

І.В. Парсаданов, І.В. Рикова, А.Г. Лал, М.С. Шелестов

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

Двигуни внутрішнього згоряння, що встановлюються на сільськогосподарські машини, як і на транспортні та стаціонарні установки, для підтвердження відповідності діючим в країні стандартам підлягають обов'язковій експертизі, що проводиться компетентними установами та організаціями. Проте в технологічному процесі виробництва можуть складатися обставини, коли виникає необхідність визначення рівня екологічних показників двигуна безпосередньо на підприємстві. При цьому дослідження повинні бути проведені у короткий час і з мінімальними витратами. Наведені дані і особливості діючих на цей час в Україні норм, які враховують комплексний підхід до запровадження європейських вимог до викидів забруднюючих речовин сільськогосподарських і лісгосподарських транспортних засобів та позначаються екологічними класами «Stage».

Для визначення рівня екологічних показників в умовах виробництва на прикладі досліджень двигуна сільськогосподарського трактора, призначеного для експлуатації в Україні, запропоновано методику, яка заснована на аналізі діючої нормативної документації, що регламентує викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами двигунів, узагальнені даних виконаних досліджень та проведені випробувань безпосередньо в умовах виробництва, аналізі впливу конструктивних та хімічних факторів, режиму роботи дизельного двигуна на показники викиду шкідливих речовин із відпрацьованими газами.

Об'єктом дослідження обрано дизельний двигун WP6T180E200, який призначений для встановлення на тракторі ХТЗ-159К.010 категорії Е і має значне розповсюдження в сільському господарстві України. Оцінку рівня екологічних показників двигуна на відповідність встановленим вимогам проведено з урахуванням та узагальненням характерної для двигунів даного призначення зміни масового викиду шкідливих речовин в залежності від навантаження для номінальної частоти обертання колінчатого валу, частоти обертання, що відповідає максимальному крутному моменту та режиму мінімального холостого ходу. При дослідженнях з визначення екологічних показників дизельного двигуна в умовах виробництва запропоновано метод аналогії, що заснований на наявності характерних ознак у досліджуваному об'єкті, відповідним ознакам об'єкту, що обрано аналогом. Наведено методику та результати виконаних розрахунково-експериментальних досліджень. Дана оцінка щодо відповідності екологічних показників двигуна діючим у країні стандартам.

Ключові слова: нормативна документація, що регламентує викиди шкідливих речовин дизельних двигунів сільськогосподарських тракторів; особистості утворення та рівень викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами; вплив режиму роботи двигуна на викиди шкідливих речовин; розрахунково-експериментальний метод оцінки викидів шкідливих речовин дизельного двигуна в умовах виробництва.

Вступ

Зниження викидів шкідливих речовин енергетичних установок з двигунами внутрішнього згоряння був і залишається пріоритетним напрямком їх розвитку [1, 2]. Незважаючи на значне вдосконалення сучасних енергетичних установок з двигунами внутрішнього згоряння в транспортних засобах та сільсько-господарських машинах, шкідливі викиди їх відпрацьованих газів і на цей час негативно впливають на якість навколишнього середовища [3].

Відповідно до діючого в Україні законодавства двигуни внутрішнього згоряння, що встановлюються на транспортні, сільськогосподарські машини та стаціонарні енергетичні установки підлягають обов'язковій експертизі (сертифікації), яка призначена для підтвердження рівня екологічних показників цих двигунів відповідно до діючих в країні стандартів. Випробування проводяться і сертифікати видаються спеціальними акредитованими організаціями, які, в свою чергу, відповідають необхідним критеріям. Ці критерії пов'язані із компетенцією

спеціалістів, що виконують дослідження та наявністю і відповідністю обладнання для проведення випробувань.

Проте при реалізації технологічних процесів виробництва машин або енергетичних установок може складатися обставини, коли виникає необхідність у проведенні випробувань з визначення або підтвердження рівня екологічних показників двигунів. При цьому дані, що підтверджують відповідність двигуна встановленим вимогам, повинні бути одержані у короткий час і з мінімальними витратами.

Для вирішення означеної задачі запропонована та апробована на практиці методика визначення рівня екологічних показників двигуна, що заснована на урахуванні вимог до екологічних показників двигунів відповідно діючої нормативної документації, оцінці рівня екологічних показників двигунів сільськогосподарських тракторів, призначених для експлуатації в Україні, аналізі особливостей зміни показників викиду шкідливих речовин дизельних двигунів в залежності від режиму роботи та проведенні випробувань двигуна безпосередньо в умовах виробництва.

Оцінка рівня екологічних показників та відповідність двигуна встановленим вимогам проводилася з урахуванням та узагальненням характерної для двигунів даного призначення зміни масового викиду шкідливих речовин в залежності від навантаження для номінальної частоти обертання колінчатого валу, частоти обертання, що відповідає максимальному крутному моменту та режиму мінімального холостого ходу, а також даних, отриманих при порівняльному аналізі особливостей конструкції двигуна, в першу чергу, тих складових, які визначають організацію робочого процесу сучасних чотиритактних дизельних двигунів-аналогів.

Нормативна документація, що регламентує викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами дизельних двигунів сільськогосподарських тракторів

Законодавчі обмеження на регламентовані шкідливі речовини відпрацьованих газів встановлюються нормативною документацією (міжнародними або національними стандартами), в яких наведені вимоги до умов проведення випробувань, сфери застосування і терміну дії стандарту, засобів вимірювань, правил обробки результатів випробувань, а також до характеристик палива, що застосовується при випробуваннях.

До нормованих шкідливих викидів відпрацьованих газів дизельних двигунів сільськогосподарських машин відносять оксид вуглецю (CO), сумарні вуглеводні (C_nH_m), оксиди азоту (NO_x) та тверді частинки (ТЧ). Норми до викидів шкідливих речовин (ШР) встановлюють максимальне значення масового викиду кожного токсичного компонента за цикл випробувань, віднесеного до наведеної потужності двигуна. Вимірювання концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах згідно з нормативною документацією проводять за допомогою швидкодіючих газоаналізаторів безперервної дії. Результати вимірювань фіксуються у мільйонних частках речовини чи у відсотках. Маса РМ визначається на кожному режимі або за цикл випробувань у повнопотокових (або неповнопотокових) тунелях з подальшим зважуванням спеціальних фільтрів.

Відповідно до нормативно-правових актів ЄС рівень норм щодо гранично допустимих викидів ШР дизельних двигунів сільськогосподарських тракторів позначаються екологічними класами «Stage». Такі ж дані позначення для рівня норм прийняті і в Україні. Під викидами ШР за етапами (Stage I, Stage II, Stage III) розуміють фактичні викиди на вихлопі самого двигуна, тобто до входу у зовнішні й додаткові пристрої для обробки випускних газів.

Особливістю норм, що діють, є встановлення вимог до викидів ШР, виконання яких потребує комплексного вирішення низки проблем, пов'язаних з підвищенням технічного рівня виготовлення двигунів та його комплектуючих, покращенням та стабілізацією робочого процесу двигунів, покращенням характеристик дизельного палива та мастила.

З урахуванням негативного впливу на довкілля, що причиняють викиди ШР відпрацьованих газів двигунів сільськогосподарських машин, з урахуванням змін у вимогах Правил ЄЕК ООН R 96 та постанови Кабінету Міністрів України від 28 грудня 2011 р. № 1367, на законодавчому рівні були внесені коректування у нормативно-правові акти на екологічні норми. Більш жорсткіші норми до викидів ШР двигунами сільськогосподарських тракторів в залежності від їхньої потужності вводилися поетапно з 1 січня 2021 року відповідно постанови Кабінету Міністрів України від 04.12.2019 № 1168.

Діючі на цей час в Україні норми, визначені з урахуванням комплексного підходу до запровадження європейських вимог до викидів забруднюючих речовин сільськогосподарських і лісгосподарських транспортних засобів, що позначаються екологічними класами «Stage» [4], наведені в таблиці 1.

З урахуванням діючого технічного регламенту також встановлено графік введення екологічних стандартів, відповідно якому з 1 січня 2021 в Україні встановлюється заборона на використання тракторів з двигунами, обсяг викидів ШР яких не відповідає встановленому екологічному стандарту рівня Stage II. Проте змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 29 липня 2022 р. № 850, додатково визначено, що на час дії воєнного та/або надзвичайного стану і протягом 180 календарних днів після його припинення або скасування вимог до окремих складових частин, технічних вузлів та характеристик транспортних засобів, ці норми у частині обсягів викидів ШР не застосовуються на території України.

Випробовування з оцінки викидів ШР дизельних двигунів сільськогосподарських машин, проводяться на стендах, що обладнані навантажувальними пристроями, засобами вимірювань для контролю режиму випробувань та збору даних, які необхідні для обробки результатів випробувань. Викиди ШР визначають при послідовній роботі дизеля на встановлених режимах. Кожному режиму відповідає свій коефіцієнт значущості, який характеризує внесок цього режиму у забруднення навколишнього середовища при експлуатації двигуна.

Таблиця 1. Норми до викидів ШР сільськогосподарських машин

Категорія двигуна	Корисна потужність, Р, кВт	Оксид вуглецю, CO, г/кВт·год	Вуглеводні, C _n H _m , г/кВт·год	Оксиди азоту, NO _x , г/кВт·год	Тверді частки, РМ г/кВт·год
Допустимі норми викидів до 1 січня 2021 р. (на рівні Stage I)					
	$P \geq 130$	5,0	1,3	9,2	0,54
	$75 \leq P < 130$	5,0	1,3	9,2	0,70
	$37 \leq P < 75$	6,5	1,3	9,2	0,85
Допустимі норми викидів з 1 січня 2021 р. (на рівні Stage II)					
E	$130 \leq P < 560$	3,5	1,0	6,0	0,2
F	$75 \leq P < 130$	5,0	1,0	6,0	0,3
G	$37 \leq P < 75$	5,0	1,3	7,0	0,4
D	$18 \leq P < 37$	5,5	1,5	8,0	0,8

Сертифікаційні випробування з метою оцінки токсичності та димності відпрацьованих газів проводяться спеціальні акредитовані організації (випробувальні центри). Режими випробувань та коефіцієнти вагомості кожного із режимів встановлюються відповідно до стандарту ISO-8174-4:

- на номінальному швидкісному режимі при навантаженнях дизеля 100 % (режим номінальної потужності), 75, 50 і 10% від режиму номінальної потужності.
- на проміжному швидкісному режимі, який відповідає режиму максимального крутного моменту, при навантаженнях дизеля 100, 75, 50% від режиму максимального крутного моменту);
- на режимі мінімального холостого ходу – n_{xxmin} .

Кожному з восьми режимів надається коефіцієнт вагомості згідно з можливим шкідливим впливом викидів ШР на навколишнє середовище при роботі двигуна на цьому режимі в експлуатації. Норми викидів ШР встановлюються відносно одиниці виконаної дизелем роботи за усередненою за цикл величиною викиду у г/(кВт·год).

При сертифікації на відповідність нормам Stage I/II двигуни повинні випробуватися на паливі з складом сірки 0,1...0,2 % по масі.

Вплив конструктивних та хімічних факторів на показники викиду ШР із відпрацьованими газами дизельних двигунів

Згоряння палива в дизельних двигунах, як правило, є неповним, що обумовлено конструктивними або хімічними факторами.

Вплив *конструктивних факторів* безпосередньо пов'язаний із організацією процесу сумішоутворення, а *хімічних факторів* – з неповнотою окислення при випаровуванні й термічному розкладенні складових рідинного палива, що містять вуглець, і,

відповідно, – швидкістю перебігу хімічних реакцій. При однаковому складі палива інтенсивність горіння буде головним чином залежати від якості організації процесу сумішоутворення та згоряння.

В сучасних дизельних двигунах, що встановлюються на трактори, реалізується внутрішнє сумішоутворення, тобто горюча суміш утворюється безпосередньо у камері згоряння. За рахунок перепаду тиску в системі паливоподачі та в камері згоряння паливо через соплові отвори розпилювача форсунки подається у рухомий повітряний заряд. При нагріванні й випаровуванні краплин палива у повітряному заряді утворюється факел, горіння в якому забезпечується змішуванням пари палива із газоподібним окиснювачем, хімічною взаємодією газоподібних реагентів під дією високої температури (більш 900 К до моменту спалахування) при перемішуванні продуктів горіння із вихідними реагентами, що не потрапили до зони горіння.

Конструктивні рішення з доведення процесів сумішоутворення і згоряння, спрямовані на інтенсивне і повне згоряння палива, що подано за цикл в циліндр двигуна, та з мінімізації утворення шкідливих речовин, мають загальну спрямованість. Ці напрямки крім вдосконалення організації процесів повітропостачання та паливоподачі пов'язані з вибором форми камери згоряння, оптимізацією розподілу паливних струменів в об'ємі камери згоряння, вибором ступеня стиску, регулюванням моменту початку подачі палива. При цьому враховують найбільш характерні режими роботи двигуна в експлуатації (особливості моделі експлуатації двигуна в залежності від призначення). Основні фактори, що визначають умови утворення шкідливих речовин у дизельних двигунах наведені у роботах [5-7].

Утворення оксидів азоту (NO_x) пов'язано з окисленням азоту, що безпосередньо присутній у

паливно-повітряній суміші. Основним фактором, що впливає на утворення NO_x є температура. Вільний та інертний у нормальних умовах азот попадає до камери згоряння двигуна разом з атмосферним повітрям (вміст азоту в повітрі складає 75,5 % за масою). Разом з тим, зв'язаний азот у вигляді похідних хіноліну та піридину, може міститися і у рідинному паливі (до 0,4...0,6 % за масою).

Розрізняють три механізми утворення оксидів азоту у циліндрі двигуна: термічний, паливний та швидкий. При цьому роль термічного механізму утворення NO_x , відносно інших двох, збільшується з підвищенням температури й тиску при згорянні, тобто при збільшенні навантаження двигуна.

Утворення оксиду вуглецю (CO) пов'язано із неповним окисленням продукту розпаду палива. В свою чергу неповне окислення (не догорання) вуглеводнів безпосередньо пов'язано із характером просторової неоднорідності (концентрацій) палива і окиснювача та температури у камері згоряння. При формуванні фронту полум'я, коли процес горіння проходить у межах від нижнього до верхнього значень коефіцієнту надлишку повітря (α), на утворення CO впливають умови розподілення повітря і паливо-повітряної суміші, що знаходиться у цій зоні. У фазі дифузійного горіння у зоні реакції ширина фронту полум'я різко звужується, що сприяє інтенсивному розкладанню палива. Тобто у сучасних високо форсованих дизельних двигелів умови утворення CO також безпосередньо залежать від організації процесів сумішоутворення і згоряння.

Утворення вуглеводнів (C_nH_m) визначається згасанням полум'я у пристінних зонах камери згоряння внаслідок підвищеної тепловіддачі. Оскільки до циліндра дизельного двигуна паливо подається при досягненні відносно високих температур, емісія вуглеводнів відносно незначна, так як кількість суміші, що охолоджується у пристінних шарах, значно зменшується. Утворення C_nH_m має подібний механізм, що й для CO , однак процес розкладання вуглеводнів палива відбувається при ще меншій температурі. У дифузійній фазі горіння недопалення вуглеводнів пов'язано з низькою швидкістю змішання палива з окиснювачем у фронті полум'я та зниженням температури на такті розширення. Найбільші концентрації C_nH_m у відпрацьованих газах відмічаються при роботі дизельного дизеля на малих навантаженнях та при холодному пуску.

Утворення твердих частинок (ТЧ). Тверді частинки, що викидаються двигунами в навколишнє середовище, розділяються на дві основні групи – частинки органічного походження та частинки неорганічного походження. До частинок органічного похо-

дження (розчинених, оскільки вони можуть бути виділені із загальної маси частинок екстрагуванням в органічних розчинниках) входять фракції незгорілих з'єднань палива і моторного масла. Частинки неорганічного походження (нерозчинені), до складу яких входять фракції вуглецю у вигляді частинок сажі, сульфідів, нітратів, метали і інші елементи. Тобто склад ТЧ відпрацьованих газів дизельних двигелів визначається організацією і особливостями сумішоутворення і згоряння, а також змістом сірі в паливі, умовами існування частинок у повітрі після виходу з двигуна.

Вплив режиму роботи дизельного двигуна на викиди шкідливих речовин

В науковій літературі можна знайти значну кількість даних за результатами досліджень, що характеризують вплив режиму роботи дизельного двигуна на викиди із відпрацьованими газами шкідливих речовин [8, 9]. Для ілюстрації впливу навантаження на викиди шкідливих речовин нами обрано дані, що наведені в роботі [10], бо вони були одержані при випробуваннях двигуна, який за призначенням, конструкцією і характеристиками, близький до об'єкту досліджень.

З наведених на рис. 1 даних можна визначити, що із збільшенням навантаження значення викидів оксидів азоту NO_x зростають, найбільші викиди відповідають режиму максимального крутного моменту.

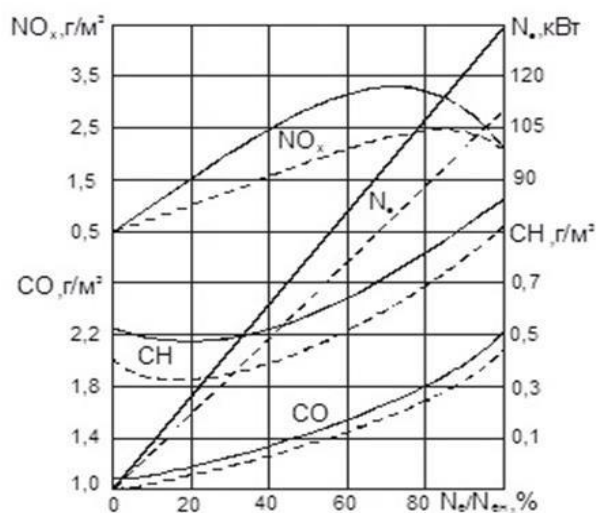


Рис. 1. Зміна викиду із відпрацьованими газами шкідливих речовин NO_x , CO , C_nH_m в залежності від навантаження дизельного двигуна з об'ємом циліндрів 11,15 л, що призначений для установки на сільськогосподарському тракторі:
- - - $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$; — $n = 1300 \text{ хв}^{-1}$ [10]

Також із збільшенням навантаження зростають викиди з відпрацьованими газами оксиду вуглецю

(CO). При цьому мінімальні значення викидів CO відповідають режимам малих навантажень і холостому ходу. Протилежні залежності визначаються із змінами викиду з відпрацьованими газами вуглеводнів (C_nH_m) – при зменшенні навантаження викиди вуглеводнів мають тенденції до зростання. Щодо викиду твердих частинок, то цих даних не наведено.

Більш значний об'єм експериментальних даних, що одержані при дослідженні двигуна з об'ємом циліндрів 9,5 л [6], дозволив узагальнити значення викидів нормованих шкідливих речовин дизельних двигунів в усьому діапазоні можливих режимів роботи дизельного двигуна.

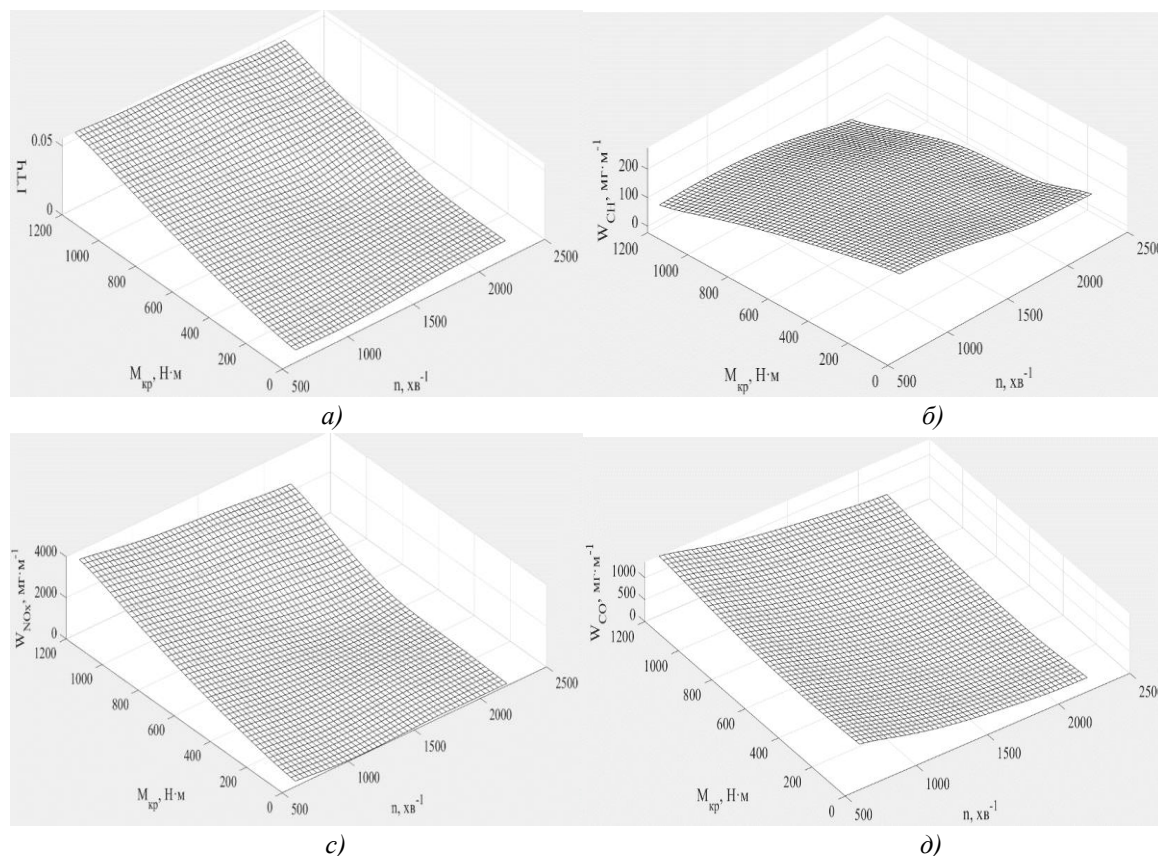


Рис. 2. Зміна викидів шкідливих речовин відпрацьованих газів двигуна 6ЧН 12х14 в діапазоні можливих режимів роботи:

а - зміна викидів твердих частинок; б - зміна викидів CH; с - зміна викидів NO_x ; д - зміна викидів CO

Двигун 6ЧН 12х14 відповідає вимогам норм Stage II, має водяне охолодження, газотурбінний наддув та систему охолодження наддувного повітря. В ньому застосовано безпосереднє впорскування палива під високим тиском в камеру згоряння, що розташована у поршні. Номінальна частота обертання колінчатого валу двигуна 6ЧН 12х14 – 2000 $хв^{-1}$, частота обертання колінчатого валу, що відповідає режиму максимального крутного моменту – 1500 $хв^{-1}$.

Дані досліджень, що наведені на рис. 2 надають можливість визначити рівень та закономірність зміни шкідливих речовин на кожному із можливих режимів його роботи. Так, викиди CO зростають (як і за даними, що наведені на рис. 2), із збільшенням навантаження, що головним чином пов'язано із неповним окисленням вуглеводнів палива і вуглецю.

Навантаження є основним фактором, що впливає і на інтенсивність утворення та викиди NO_x , проте із збільшенням частоти обертання колінчатого валу інтенсивність викидів також зростає. Що стосується викидів C_nH_m , то при збільшенні навантаження можна відмітити тенденцію до зростання, але з значно меншою інтенсивністю. При збільшенні навантаження викиди із відпрацьованими газами твердих частинок (ТЧ) зростають.

Таким чином, при підвищенні навантаження та частоті обертання збільшується викиди найбільш агресивних шкідливих речовин, таких як оксиди азоту (NO_x) та тверді частинки (ТЧ), оксиду вуглецю (CO). При зниженні навантаження та частоти обертання викиди цих речовин стають меншими, але збільшується ймовірність утворення вуглеводнів (HC).

Особливості оцінки викидів шкідливих речовин двигуна в умовах виробництва

В процесі виробництва можуть виникати обставини, що пов'язані з необхідністю визначення (підтвердження) відповідності екологічних показників двигунів вимогам, що встановлені нормативною документацією. В даному випадку в умовах відсутності необхідного вартісного обладнання (спеціалізованих стендів та стаціонарних автоматичних швидкодіючих газоаналізаторів) пропонується використання методу аналогії, що заснований на наявності ознак у досліджуваному об'єкті, які відповідають відповідним ознакам в іншому об'єкті, що обрано за основний [11, 12].

Ефективність використання запропонованого методу буде максимальною для двигунів близьких за об'ємом циліндрів і літрової потужності, діапазоном можливих режимів роботи в експлуатації, організації робочого процесу (паливоподачі, повітропостачання, сумішоутворення та згоряння). В цьому випадку з урахуванням регулювання моменту початку подачі палива при практично однакової зміні коефіцієнту надлишку повітря в залежності від частоти обертання колінчатого валу і навантаження робота двигуна, що досліджується, і двигуна-аналога, буде заснована на однотипній організації робочого процесу. Тобто будуть забезпечені однакові умови для утворення шкідливих речовин та їх зміни в залежності від режиму роботи і це в підсумку надасть можливість оцінити відповідність двигуна, що досліджується, діючій нормативній документації регламентуючої викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Метод аналогії в умовах виробництва було апробовано при дослідженні дизельного двигуна WP6T180E200 виробництва KHP, що встановлюється на тракторі ХТЗ-159К.010.

Двигуни серії WP6 розроблені на основі європейських технологій компанією «Weichai» (Китай) для застосування у сільськогосподарській галузі. При його розробці, як прототип, було обрано двигун BF6M1013 ЕС, що випускається відомою фірмою «Дойц» (Німеччина). Діапазон потужності для цих двигунів знаходиться в межах 111 - 162 кВт, (150 - 220 к. с.).

Двигун WP6T180E200 має 6 вертикально розташованих в ряд циліндрів. Діаметр циліндрів – 108 мм, хід поршня – 130 мм. Робочий об'єм циліндрів складає 7150 см³ (7,15 л), ступінь стиску – 18. Двигун має водяне охолодження, систему газотурбінного наддуву та охолодження наддувного повітря. В основу організації робочого процесу заложено безпосереднє впорскування палива під високим тиском у відкриту (циліндричну) камеру згоряння в поршні.

Номинальна частота обертання колінчатого валу – 2200 хв⁻¹, частота обертання колінчатого валу, що відповідає режиму максимального крутного моменту, знаходиться в межах 1400–1600 хв⁻¹. До системи подачі палива входять паливний насос Bosch Automotive Diesel System Co., Ltd.WPCPN2 та паливні форсунки Bosch Automotive Diesel SystemCo.,Ltd., WPCRIN2. Для забезпечення ефективності газотурбінного наддуву застосовано турбокомпресор Honeywell, тип – GT35. Рівень організації робочого процесу дозволяє забезпечити достатньо високу ефективність двигуна з експлуатаційної паливної економічності. Питома витрата палива при номінальній потужності складає 230 г/кВт·год. (169 г/к.с.·год.).

Трактор ХТЗ-159К.010 відноситься до тракторів категорії Е, які мають найбільше розповсюдження в сільському господарстві України. На цих тракторах головним чином встановлюються рядні дизельні двигуни (рідше з V-образним розташуванням циліндрів), що мають літрову потужність в межах 15...20 кВт при об'ємі циліндрів 8...11 л і ступені стиску в межах від 16 до 18. Двигуни оснащені близькою за конструкцією і характеристиками системи паливоподачі, повітропостачання та мають загальні принципи організації процесів сумішоутворення і згоряння. В них застосовується безпосереднє впорскування палива під високим тиском в камеру згоряння, що розташована у поршні. Характерним фактором, що визначає рівень екологічних показників для таких двигунів, є високий рівень організації та вдосконалення робочого процесу, що включає в себе оптимізацію моменту і тривалості впорскування палива для кожного режиму та забезпечення гетерогенності робочої суміші по об'єму камери згоряння.

В якості двигуна-аналога для визначення закономірностей зміни шкідливих речовин з відпрацьованими газами обрано вітчизняний дизельний двигун 6ЧН 12х14, що призначений для використання у сільськогосподарській техніці (гусеничні і колісні трактори) та відповідає вимогам норм Stage II. Цей двигун, як і двигун WP6T180E200 – 6-ти циліндровий, має рядне розташування циліндрів (діаметр циліндрів – 120 мм., хід поршня – 140 мм, робочий об'єм циліндрів – 9,5 л., ступінь стиску – 15,5. Двигун 6ЧН 12х14 має водяне охолодження, газотурбінний наддув та систему охолодження наддувного повітря. Як і в двигуні WP6T180E200 в ньому застосовано безпосереднє впорскування палива під високим тиском в циліндричну камеру згоряння, що розташована у поршні, близькі за конструкцією і характеристиками системи паливоподачі та повітропостачання.

чання, принципи організації робочого процесу. номінальну потужність – 162 кВт, при частоті обертання колінчатого валу двигуна 2000 хв⁻¹, частота обертання колінчатого валу, що відповідає режиму максимального крутного 1500 хв⁻¹.

Тобто при дослідженні розглядалися екологічні показники однотипних тракторних двигунів за об'ємом циліндрів, потужністю, діапазоном робочих частот обертання колінчатого валу. Характерним фактором, що визначає рівень екологічних показників для таких двигунів, є загальний підхід до організації та вдосконалення робочого процесу та високий рівень його доведення, що включає в себе оптимізацію моменту і тривалості впорскування палива для кожного режиму, забезпечення гетерогенності робочої суміші по об'єму камери згоряння.

Дані для оцінки викидів шкідливих речовин двигуна WP6T180E200 були одержані при випробуваннях трактора ХТЗ-159К.010 на стенді із біговими барабанами на режимах малих навантажень і холостого ходу на швидкісних режимах номінальної потужності, максимального крутного моменту та мінімального холостого ходу з подальшому зіставленні результатів випробувань з даними випробувань двигуна-аналога за режимами циклу згідно з Правилами ЄЕК ООН.

В якості обладнання для визначення рівня викидів шкідливих речовин при оцінці екологічних показників дизельного двигуна WP6T180E200, що встановлено на тракторі ХТЗ-159К.010 були використані наступні вимірюванні прилади:

– Газоаналізатор *Si-CA230 Kit 6NDSC*, що в режимі автоматичного регулювання забезпечує проведення вимірювання концентрацій оксиду вуглецю (CO), концентрацій вуглекислого газу (CO₂), оксидів азоту (NO_x), вуглеводнів (CH), та кисню (O₂).

– Газоаналізатор димності *Hartridge Smokemeter MK3*.

Враховуючи відсутність можливості використання при випробуваннях обладнання для визначення твердих частинок (ТЧ) при оцінці екологічних показників дизельного двигуна WP6T180E200, що встановлено на тракторі ХТЗ-159К.010, використано розрахунково-експериментальний метод визначення ТЧ у відпрацьованих газах тракторного дизеля, що був запропонований у НТУ «ХПІ» [5, 6]. Метод заснований на визначенні при випробуваннях складових, що характеризують наявність ТЧ у відпрацьованих газах дизелів.

Кореляцію та узагальнення отриманих даних щодо викиду ШР та димності відпрацьованих газів на режимах випробувань дизельного двигуна WP6T180E200 при навантаженнях відповідно з ви-

могами екологічного рівня Stage II виконано із використанням закономірностей зміни викидів шкідливих речовин відпрацьованих газів двигуна, що отримані при дослідженнях двигуна-аналога (рис.2).

Розрахунок сумарного значення викиду із відпрацьованими газами двигуна для кожної шкідливої речовини проведено відповідно до режимів циклу та вагомості режимів згідно з Правилами ЄЕК ООН №96.

Аналіз даних з оцінки екологічних показників отриманих експериментально-розрахункових надали змогу визначити відповідність дизельного двигуна WP6T180E200 № 6P22C016634, який встановлений на тракторі ХТЗ-159К.010, вимогам до викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами, пойнняти в Україні.

Висновки

Попередня оцінка рівня екологічних показників дизельних двигунів внутрішнього згоряння, які встановлюються на транспорті, сільськогосподарських машинах та стаціонарних енергетичних установках, нормативній документації, що регламентує викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами, може бути проведена безпосередньо при реалізації технологічних процесів виробництва машин. При цьому дані, що підтверджують відповідність двигуна встановленим вимогам, будуть одержані у короткий час і з мінімальними витратами.

Для вирішення означеної задачі при дослідженнях пропонується використання методу аналогії, що заснований на наявності ознак у досліджуваному об'єкті, які відповідають відповідним ознакам в іншому об'єкті.

На прикладі двигунів сільськогосподарських тракторів, призначених для експлуатації в Україні, з урахуванням вимог до екологічних показників цих двигунів відповідно діючій нормативній документації, аналізі особливостей зміни показників викиду шкідливих речовин дизельних двигунів в залежності від режиму роботи для обраного двигуна-аналога проведені випробування двигуна безпосередньо в умовах виробництва.

Оцінка рівня екологічних показників та відповідність двигуна встановленим вимогам проведено з урахуванням та узагальненням характерної для двигунів даного призначення зміни масового викиду шкідливих речовин в залежності від навантаження для номінальної частоти обертання колінчатого валу, частоти обертання, що відповідає максимальному крутному моменту та режиму мінімального холостого ходу.

Список літератури:

https://doi.org/10.19206/CE-183184

1. Emodi N. V. Are emission reduction policies effective under climate change conditions? A backcasting and exploratory scenario approach using the LEAP-OSeMOSYS Model / Emodi N. V., Chaiechi T., Beg A.B.M. R. A. // *Applied Energy*. – Vol. 236. – 2019, pp. 1183-1217, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.045>.
2. Lv W. Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015 / Lv W., Hu Y., Li E., Liu H., Pan H., Ji S., Hayat T., Alsaedi A., Ahmad B. // *Journal of Cleaner Production*. J. Clean. Prod. – 2019. – Vol.207. – pp. 814-825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.227>.
3. Review No 01/2017: EU action on energy and climate change (Landscape Review), Режим доступу: <https://www.ec.europa.eu/en/publications?did=41824>.
4. Кравчук В. Обґрунтування моделі впровадження європейських екологічних стандартів для транспортних засобів та двигунів сільськогосподарських і лісгосподарських тракторів в Україні / В. Кравчук, С. Афанасьєва, С. Рижкова // *Сільськогосподарська техніка та обладнання: прогнозування, конструювання, випробування*. – 2021. – Вип. 47 (21). – С. 14-27.
5. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах, Т. 5 Екологізація ДВЗ – 2-е видання / Марченко А.П., Парсаданов І.В., Товажнянський Л.Л., Шеховцов А.Ф. За редакцією проф. А.П. Марченко, Х: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2014. – 348 с. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/9570>.
6. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизеля на основі комплексного паливно-екологічного критерію: Монографія / І.В. Парсаданов. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с.
7. Звонов В.А. Образование загрязнений в процессах сгорания / Звонов В.А. – Луганск: Изд-во Восточно-украинского гос. ун-та, 1998. – 126 с.
8. Tucki, K. Toxicity of Exhaust Fumes (CO, NO_x) of the Compression-Ignition (Diesel) Engine with the Use of Simulation / Tucki, K., Mruk, R., Orynych, O., Botwińska, K., Gola, A., & Bączyk, A. // *Sustainability*. 2019. 11(8), 2188. <https://doi.org/10.3390/su11082188>.
9. Young-Woo Do, Seung-Min Baek, Seung-Yun Baek, Hyeon-Ho Jeon, Yeon-Soo Kim, Yong-Joo Kim, Wan-Soo Kim Determining exhaust emissions (CO, NO_x, PM) for a combine harvester based on measured engine load and emission factors using PEMS during actual field operation // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2025. – Vol. 231, 110026. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110026>.
10. Mitkov V.B., Kuvachov V.P., Ihnatiev Ye.I. (2016). Influence and ecological assessment of the level of harmful substances in exhaust gases of diesel engines depending on the operating modes of the MTA, Bulletin of the Ukrainian Branch of the International Academy of Agrarian Education [“Vplyv ta ekolohichna otsinka rivnia shkidlyvykh rechovyn vidpratsovanykh haziv dyzel-nykh dvyhunyv v zalezhnosti vid rezhymiv roboty MTA” / Mitkov V.B., Kuvachov V.P., Ignat'ev S.I. // *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. – 2016. – Вип. 4. – С. 78-87. Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/visnyk-uv-mizhnarodnoyi-akademiyi-ahhrarnoyi-osvity-vypusk-4-2016-r..pdf>.
11. Грабченко А.І. Методи наукових досліджень: Навч. посібник / Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – 142 с.
12. Kamińska M. Analysis of harmful compounds concentrations in the exhaust behind a vehicle with compression ignition engine / M. Kamińska, N. Szymlet, P. Fuć, Ł. Rymaniak, P. Lijewski, R. Grzeszczyk // *Combustion Engines*. – 2024. – 197(2):50-55.

Bibliography (transliterated):

1. Emodi N. V., Chaiechi T., Beg A.B.M. R. A. (2019), Are emission reduction policies effective under climate change conditions? A backcasting and exploratory scenario approach using the LEAP-OSeMOSYS Model, *Applied Energy*, Vol. 236, pp. 1183-1217, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.045>.
2. Lv W., Hu Y., Li E., Liu H., Pan H., Ji S., Hayat T., Alsaedi A., Ahmad B. (2019) Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015, *Journal of Cleaner Production*. J. Clean. Prod., Vol.207, 814-825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.227>.
3. Review No 01/2017: EU action on energy and climate change (Landscape Review), available at: <https://www.ec.europa.eu/en/publications?did=41824>.
4. B. Kravchuk, S. Afanasyeva, S. Ryzhkova (2021), “Substantiation of the model for the implementation of European environmental standards for vehicles and engines of agricultural and forestry tractors in Ukraine, Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing” [“Obgruntuvannia modeli vprovadzhennia yevropeis-kykh ekolohichnykh standartiv dla transportnykh zasobiv ta dvyhunyv silskohospodarskykh i liso-hospodarskykh traktoriv v Ukraini”, *Silskohospodarska tekhnika ta obladnannia: prohnzuvannia, konstruiuvannia, vyprovuvannia*], Iss. 47 (21), pp. 14-27.
5. Marchenko A.P., Parsadanov I.V., Tovazhnianskiy L.L., Shekhovtsov A.F. (2014), Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes, Vol. 5 Environmentalization of internal combustion engines, 2nd edition. Edited by Prof. A.P. Marchenko [Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia: Seria pidruchny-kiv u 6 tomakh, T. 5 Ekolohizatsiia DVZ, 2-e vydannia. Za redaksiieiu prof. A.P. Marchenko], Kh: Vydavnychiy tsentr NTU «KhPI», 348 p, available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/9570>.
6. Parsadanov I.V. (2003), Improving the quality and competitiveness of diesel based on a comprehensive fuel-environmental criterion: Monograph [Pidvyshchennia yakosti i konkurento-spromozhnosti dyzelia na osnovi kompleksnoho palyvno-ekolohichnoho kryteriiu: Monohrafiia], Kharkiv: Vydavnychiy tsentr NTU «KhPI», 244 p.
7. Zvonov V.A. (1998), Education polluted in combustion processes [Obrazovanye zahriznieniy v protsesakh shoranyia], Luhansk: Yzd-vo Vostochno-ukraynskoho hos. un-ta, 126 p.
8. Tucki, K., Mruk, R., Orynych, O., Botwińska, K., Gola, A., & Bączyk, A. (2019). Toxicity of Exhaust Fumes (CO, NO_x) of the Compression-Ignition (Diesel) Engine with the Use of Simulation. *Sustainability*, 11(8), 2188. <https://doi.org/10.3390/su11082188>.
9. Young-Woo Do, Seung-Min Baek, Seung-Yun Baek, Hyeon-Ho Jeon, Yeon-Soo Kim, Yong-Joo Kim, Wan-Soo Kim Determining exhaust emissions (CO, NO_x, PM) for a combine harvester based on measured engine load and emission factors using PEMS during actual field operation // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2025. – Vol. 231, 110026. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110026>.
10. Mitkov V.B., Kuvachov V.P., Ihnatiev Ye.I. (2016). Influence and ecological assessment of the level of harmful substances in exhaust gases of diesel engines depending on the operating modes of the MTA, Bulletin of the Ukrainian Branch of the International Academy of Agrarian Education [“Vplyv ta ekolohichna otsinka rivnia shkidlyvykh rechovyn vidpratsovanykh haziv dyzel-nykh dvyhunyv v zalezhnosti vid rezhymiv roboty MTA”, *Visnyk Ukrainskoho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity*], Iss. 4, pp. 78-87, available at: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/visnyk-uv-mizhnarodnoyi-akademiyi-ahhrarnoyi-osvity-vypusk-4-2016-r..pdf>.
11. Hrabchenko A.I., Fedorovych V.O., Harashchenko Ya.M. (2009), Methods of scientific research: Textbook [Metody naukovykh doslidzhen: Navch. posibnyk], Kh.: NTU “KhPI”, 142 p.
12. Kamińska M., Szymlet N., Fuć P., Rymaniak Ł., Lijewski P., Grzeszczyk R. (2024), “Analysis of harmful compounds concentrations in the exhaust behind a vehicle with compression ignition engine”, *Combustion Engines*, 197(2):50-55. <https://doi.org/10.19206/CE-183184>

Надійшла до редакції 15.06.2025 р.

Парсаданов Ігор Володимирович – доктор техн. наук, проф., головний наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: pasadanov@kpi.kharkov.ua, <http://orcid.org/0000-0003-0587-4033>.

Рикова Інна Віталіївна – канд. техн. наук, с.н.с., старший наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, <http://orcid.org/0000-0002-5348-8199>.

Лал Амір Гул – Ph.D., молодший наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: amir.Lal@ieee.khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4729-3739>.

Шелестов Максим Сергійович – Ph.D., молодший наук. співр. кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: maks.shelestow@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9003-1422>.

DETERMINATION OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A DIESEL ENGINE IN PRODUCTION CONDITIONS

I.V. Parsadanov, I.V. Rykova, A.G. Lal, M.S. Shelestov

Internal combustion engines installed on agricultural machinery, as well as on transport and stationary installations, are subject to mandatory examination by competent institutions and organizations to confirm compliance with the standards in force in the country. However, circumstances may arise in the technological process of production when it becomes necessary to determine the level of environmental performance of the engine directly at the enterprise. In this case, the studies must be carried out in a short time and with minimal costs. The data and features of the norms currently in force in Ukraine are presented, which take into account a comprehensive approach to the implementation of European requirements for pollutant emissions from agricultural and forestry vehicles and are designated by the environmental classes "Stage".

To determine the level of environmental indicators in production conditions using the example of research on the engine of an agricultural tractor intended for operation in Ukraine, a methodology has been proposed, which is based on the analysis of the current regulatory documentation regulating the emissions of harmful substances with exhaust gases of engines, the generalization of the data of the performed research and tests carried out directly in production conditions, the analysis of the influence of design and chemical factors, the operating mode of the diesel engine on the emission indicators of harmful substances with exhaust gases. The object of the study was the WP6T180E200 diesel engine, which is intended for installation on the KhTZ-159K.010 tractor of category E and is widely used in Ukrainian agriculture. The assessment of the level of environmental performance of the engine for compliance with the established requirements was carried out taking into account and generalizing the change in mass emission of harmful substances characteristic of engines of this purpose depending on the load for the nominal crankshaft speed, the speed corresponding to the maximum torque and the minimum idle mode. In studies on determining the environmental performance of a diesel engine in production conditions, an analogy method was proposed, which is based on the presence of characteristic features in the studied object, corresponding to the features of the object chosen as an analogue. The methodology and results of the performed calculation and experimental studies are presented. An assessment is given of the compliance of the environmental performance of the engine with the standards in force in the country.

Key words: regulatory documentation regulating emissions of harmful substances from diesel engines of agricultural tractors, characteristics of formation and level of emissions of harmful substances with exhaust gases; influence of engine operating mode on emissions of harmful substances; calculation and experimental method for assessing emissions of harmful substances from a diesel engine under production conditions.