



original article | UDC 629.11 | doi: 10.31210/visnyk2019.04.31

RESEARCHING THE TOXICITY OF DIESEL ENGINES EXHAUST GASES AT DEACTIVATING PART OF CYLINDERS

V. I. Romaniak,

ORCID ID: [0000-0001-9147-7485](https://orcid.org/0000-0001-9147-7485), E-mail: romanyakvld@gmail.com,

A. O. Kelemesh,

ORCID ID: [0000-0001-9429-8570](https://orcid.org/0000-0001-9429-8570), E-mail: antonkelemesh@gmail.com,

O. V. Gorbenko,

ORCID ID: [0000-0003-2473-0801](https://orcid.org/0000-0003-2473-0801), E-mail: gorben@ukr.net,

Poltava State Agrarian Academy, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

Actual directions of structural and technological improvement of machine-tractor means are reduction of fuel consumption and exhaust gases toxicity. One of the most effective measures to reduce fuel consumption and impact on the environment is using a complex method of complete and partial deactivation of part of cylinders when operating an internal combustion engine at idle run and low loads. This method is limited to modern vehicles. However, the complexity of developing and applying technical means for its implementation lies in the differences of operation modes of machine-tractor implements, and the specifics of operating conditions. In the given researches, the development of measures of shutting-down fuel supply and drive of gas-distributing mechanism in D-240 of MTZ-80 tractor engines is presented. For carrying out experimental researches the KI-5543 rolling-brake stand with measuring devices, the D-240 diesel engine of the MTZ-80 tractor, the “Infracar D1” smoke gauge and the “InfraLight 11P” gas analyzer were used. During the experimental tests, three characteristic operating modes of the D-240 engine without loading and under loading $N_e = 0...35$ kW were selected: 1) typical mode of all 4 cylinders’ operation; 2) artificial operation mode, which was formed by deactivating the fuel supply in 2 cylinders of the 4-cylinder engine; 3) artificial operation mode, which was formed by deactivating fuel supply in 2 cylinders and the gas distribution mechanism in 2 cylinders of the 4-cylinder engine. It has been established that shutting down a part of the diesel engine cylinders leads to a decrease in fuel consumption by 25–27 %, on the average, soot and smoke content of the exhaust gases – by 30–35 %, depending on the engine operation mode. The dependences of hour fuel consumption, air flow rate, excess air ratio, soot and smoke content of the four-cylinder diesel engine when deactivating part of its cylinders under different loading modes are given.

Key words: engine, toxicity, environmental friendliness, soot content, smoke content, exhaust gases, excess air ratio, cylinder deactivation.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОКСИЧНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПРИ ДЕАКТИВАЦІЇ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ

В. І. Романяк, А. О. Келемеш, О. В. Горбенко,

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Актуальними напрямками конструктивного й технологічного удосконалення машинотракторних засобів є зниження витрати палива і токсичності відпрацьованих газів. Одним з найбільш ефективних заходів зі зниження витрати палива і впливу на екологію є використання комплексного методу повної і часткової деактивації частини циліндрів при експлуатації двигуна внутрішнього згоряння на холостому ході й малих навантаженнях. Цей спосіб обмежено застосовується на сучасних транспортних засобах. Однак складність розробки і застосування технічних засобів для його реалізації

полягає у відмінностях режимів роботи машинотракторних засобів, специфіки умов експлуатації. У наведених дослідженнях представлена розробка заходів відключення подачі палива і приводу газорозподільчого механізму двигуна Д-240 трактора МТЗ-80. Для проведення експериментальних досліджень використовували обкатно-гальмівний стенд КИ-5543 з вимірювальними приладами, дизельний двигун Д-240 трактора МТЗ-80, димомір «Інфракар ДІ» і газоаналізатор «Інфралайт ІІР». Для експериментальних випробувань були обрані три характерних режими роботи двигуна Д-240 без навантаження й під навантаженням $N_e = 0...35$ кВт: 1) типовий режим роботи всіх 4 циліндрів; 2) штучний режим роботи, що формується за допомогою деактивації подачі палива в 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна; 3) штучний режим роботи, що формується за допомогою деактивації подачі палива в 2 циліндрах і газорозподільного механізму в 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна. Встановлено, що відключення частини циліндрів дизельного двигуна призводить до зниження витрати палива в середньому на 25–27 %, вмісту сажі і димності відпрацьованих газів на 30–35 %, залежно від режиму роботи двигуна. Наведено залежності годинної витрати палива, витрати повітря, коефіцієнта надлишку повітря, сажовмісту й димності відпрацьованих газів чотирициліндрового дизельного двигуна при деактивації частини його циліндрів на різних режимах навантаження.

Ключові слова: двигун, токсичність, екологічність, сажовміст, димність, відпрацьовані гази, коефіцієнт надлишку повітря, деактивація циліндрів.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ДЕАКТИВАЦИИ ЧАСТИ ЦИЛИНДРОВ

В. И. Романык, А. А. Келемеш, А. В. Горбенко,

Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина

Одним из наиболее эффективных способов по снижению расхода топлива и воздействия на экологию является использование комплексного метода полной и частичной деактивации части цилиндров при эксплуатации двигателя внутреннего сгорания на холостом ходу и малых нагрузках. В приведенных исследованиях представлена разработка мероприятий отключения подачи топлива и привода газораспределительного механизма двигателя Д-240 трактора МТЗ-80. При экспериментальных испытаниях были выбраны три характерных режима работы двигателя Д-240 без нагрузки и под малой нагрузкой. Установлено, что отключение части цилиндров дизельного двигателя приводит к снижению расхода топлива в среднем на 25–27 %, содержания сажи и дымности отработанных газов на 30–35 % в зависимости от режима работы двигателя. Приведены зависимости часового расхода топлива, расхода воздуха, коэффициента избытка воздуха, содержания сажи и дымности отработанных газов четырехцилиндрового дизельного двигателя при деактивации части его цилиндров на различных режимах нагрузки.

Ключевые слова: двигатель, токсичность, экологичность, содержание сажи, дымность, отработанные газы, коэффициент избытка воздуха, отключение цилиндров.

Вступ

Основною рушійною силою агропромислового комплексу є дизельний двигун внутрішнього згорання. Останнім часом принципово змінилися системи дизеля, насамперед, це системи керування та паливоподачі [1–3]. Паливна система Common rail дає змогу суттєво знизити витрату палива через оптимальне дозування порції впорскуваного пального [4–6]. Комплексне застосування системи керування двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) дозволяє забезпечити раціональність вибору режимів автотракторних засобів, істотно збільшити швидкодію виконавчих елементів, покращити паливну економічність, знизити викиди відпрацьованих газів (ВГ) [7–9]. Особливу роль відіграє удосконалення елементів випускного тракту ДВЗ, зокрема кисневих датчиків, каталітичних нейтралізаторів, проти сажових фільтруючих елементів відпрацьованих газів [10]. Метою всіх зазначених заходів є збільшення потужності ДВЗ при зниженні витрати палива та зменшення викидів відпрацьованих газів у атмосферу [11–13].

В Україні до 75 % автотракторних засобів не досягають навіть норми Євро-2. При цьому, що на сьогодні в розвинутих країнах світу діють норми Євро-6. Зважаючи на це, високий знос машинно-

тракторного парку особливо актуальним є проведення заходів зі зниження токсичності та підвищення паливної економічності двигунів з низькими нормами екологічності Євро [2, 4].

Одним з таких рішень є застосування комплексного методу повної або часткової деактивації частини циліндрів при експлуатації ДВЗ на холостому ході та малих навантаженнях [9, 14, 15]. Представлений метод широко відомий та застосовується такими фірмами як Volkswagen AG, Cummins, Deutz AG, Iveco, Volvo, Scania та ін. Проте складність застосування цього методу полягає в особливостях режимів роботи автотракторних засобів [16–18].

Тому метою дослідження є винайдення можливостей знизити токсичність відпрацьованих газів та підвищення паливної економічності дизельного двигуна Д-240 трактора МТЗ-80 (як найбільш розповсюдженого в агропромисловому комплексі) шляхом деактивації частини його циліндрів.

Розробка заходів зі зниження токсичності двигуна передбачає розв'язання таких завдань:

1. Дослідити взаємозв'язок основних експлуатаційних показників двигуна Д-240 з умістом токсичності у відпрацьованих газах при по цикловому та повному відключенні частини його циліндрів.
2. Дослідити взаємозв'язок паливно-економічних показників двигуна Д-240 з показниками токсичності при по цикловому та повному відключенні частини циліндрів.

Матеріали і методи досліджень

Процес роботи дизельного ДВЗ супроводжується виділенням великої кількості токсичних компонентів [5–19]. На практиці діагностування застосовують комплексний метод контролю токсичності відпрацьованих газів – вимірювання димності та визначення вмісту сажі [20].

Розрахунок ґрунтується на основі дослідження взаємозв'язку трьох складників: 1) коефіцієнту надлишку повітря α ; 2) коефіцієнту, що враховує конструктивні відмінності двигуна $b_{\text{двиг}}$; 3) сажовміст при суттєвій варіації режиму роботи двигуна D . Зокрема конструктивне виконання елементів та систем двигуна Д-240 має суттєвий вплив на вміст сажі. Варто вказати граничні умови: 1) розрахунок базується на технічно справному об'єкті; 2) температура відпрацьованих газів при забезпеченні заданого теплового режиму стабільна та ступінь її мінливості несуттєвий до 5 %.

Розрахунок був виконаний у програмному продукті Mathcad та розповсюджений на різні марки дизельних двигунів при уточненні емпіричного коефіцієнту a . Для розв'язання поставлених завдань вибрані два характерних режими роботи двигуна: 1) типовий режим роботи усіх 4 циліндрів; 2) штучний режим роботи, що формується шляхом відключення подачі палива в 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна. В результаті теоретичного розрахунку для двигуна Д-240 трактора МТЗ-80 отримали залежності: вмісту сажі (D), димності ВГ (K) та коефіцієнту надлишку повітря (α) від частоти обертання колінчастого валу (n), представлені на рис. 1 та 2.

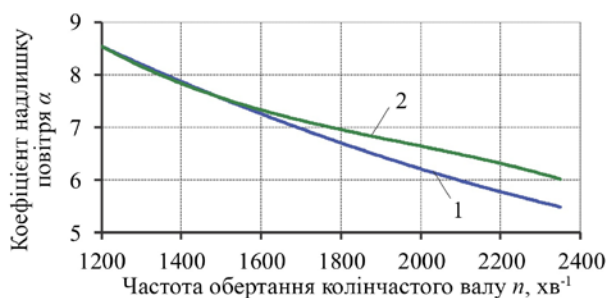


Рис. 1. Теоретична залежність коефіцієнту надлишку повітря від частоти обертання колінчастого валу двигуна Д-240 трактора МТЗ-80: 1 – вхідний двигун; 2 – відключена подача палива в 2-х циліндрах

Аналіз графіків на рис. 1 свідчить, що при типовому режимі роботи усіх 4 циліндрів залежність визначається лінією 1. При штучному режимі роботи при відключенні подачі палива в 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна Д-240 залежність, починаючи з точки 1600 хв⁻¹, піднімається вище і в межах 2000–2400 хв⁻¹ перевищує типовий режим на 10–12 %. Цей ріст коефіцієнту надлишку повітря на рис. 2 пояснюється покращенням умов процесу згорання палива в камері згорання працюючих циліндрів, а також зменшенням годинної витрати пального при практично незмінній витраті повітря.

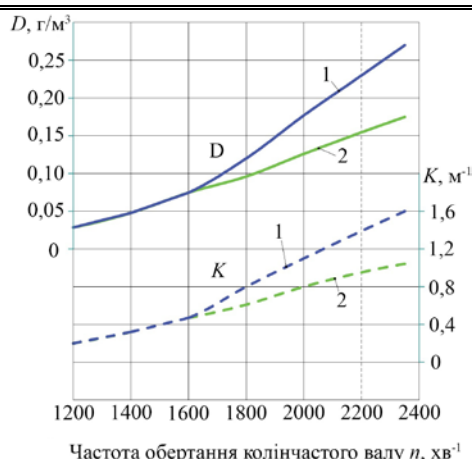


Рис. 2. Теоретична залежність вмісту сажі та димності відпрацьованих газів від частоти обертання колінчастого валу двигуна Д-240 трактора МТЗ-80: 1 – вхідний двигун; 2 – відключена подача палива в 2-х циліндрах

Аналіз графіків на рис. 2 при порівнянні типового режиму роботи ДВЗ та штучного демонструє зниження вмісту сажі. Зона зниження розпочинається з 1600 хв^{-1} та продовжується до 2400 хв^{-1} . При частоті обертання колінчастого валу 1800 хв^{-1} сажовміст зменшується на 10 %, а при 2200 хв^{-1} уже досягає 36 %. Аналогічний вигляд має залежність димності від частоти обертання колінчастого валу ДВЗ. Зниження при 2200 хв^{-1} складає близько 30 %. Отже, представлені теоретичні дослідження доводять ефективність методу відключення циліндрів у межах $1600\text{--}2400 \text{ хв}^{-1}$.

Для проведення експериментальних досліджень застосовували гальмівний стенд КИ-5543 з вимірювальними приладами. На експериментальному стенді встановлений двигун Д-240 трактора МТЗ-80. Експериментальний стенд дає змогу проводити дослідження в широкому діапазоні навантажень $0\text{--}370 \text{ Нм}$ та швидкісних режимів $1100\text{...}2800 \text{ хв}^{-1}$. Окрім того, в паливній магістралі системи живлення двигуна

Д-240 були встановлені електромагнітні клапани процесу керування відсіканням пального.

Для проведення експериментальних досліджень окрім вимірювальних стендових приладів застосовували: димомір «Інфракар Д1» та газоаналізатор «Інфралайт 11Р», що пройшли необхідну перевірку перед початком випробувань. Димоміром контролювали параметри димності при забезпеченні широкого діапазону швидкостей колінчастого валу двигуна $1100\text{--}2400 \text{ хв}^{-1}$. За відомою методикою проводили перерахунок в одиниці сажовмісту [1]. За допомогою газоаналізатора проводили вимірювання вмісту оксидів азоту (NO_x), вуглеводнів (CH), коефіцієнту надлишку повітря в робочому діапазоні швидкостей колінчастого валу двигуна $1100\text{--}2400 \text{ хв}^{-1}$.

Результати досліджень та їх обговорення

При стендових експериментальних дослідженнях на двигуні Д-240 без навантаженні отримані:

1) залежності годинної витрати палива G_z (кг/год.) та димності K (м^{-1}), відпрацьованих газів дизельного ДВЗ Д-240 від частоти обертання колінчастого валу n (хв^{-1}) (рис. 3);

2) залежності витрати повітря G_n (кг/год.) та коефіцієнту надлишку повітря α дизеля від частоти обертання колінчастого валу n (хв^{-1}) (рис. 4).

При експериментальній роботі вибрані три характерні режими роботи двигуна Д-240: 1) типовий режим роботи усіх 4 циліндрів; 2) штучний режим роботи при відключенні подачі палива в 2 циліндрах; 3) штучний режим роботи при відключенні подачі палива та газорозподільного механізму (ГРМ) в 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна.

При аналізі експериментальних даних на рис. 3 для 2 і 3 режимів випробувань димність зменшилася. Причому зменшення склало більше 30 %. Це пояснюється кращими умовами згорання паливно-повітряної суміші, зниженням нерівномірності циклової подачі палива та збільшенням коефіцієнту надлишку повітря. Причому ефект зниження димності проявляється з 1400 хв^{-1} . Зменшення годинної витрати палива для 1 і 2 режимів випробувань склало $0,2\text{--}0,3 \text{ кг/год.}$ при $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$. Відключення приводу ГРМ для режиму 3 випробувань дозволило зекономити $0,7\text{--}0,8 \text{ кг/год.}$ витраченого на роботу

палива.

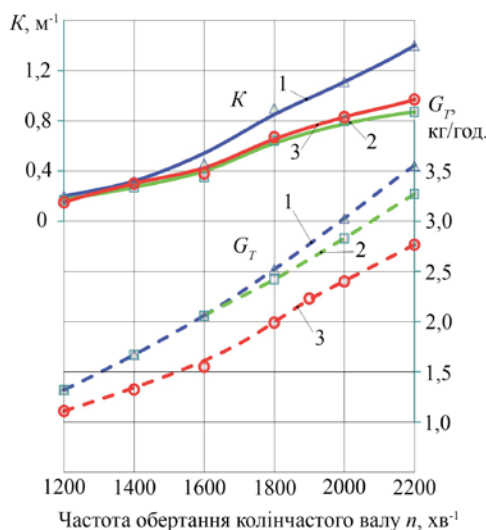


Рис. 3. Залежності годинної витрати палива $G_T, \text{кг/год.}$ та димності $K, \text{м}^{-1}$ відпрацьованих газів дизельного ДВЗ від частоти обертання колінчастого валу $n, \text{хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача палива 2 і 3 циліндрів; 3 – відключене пальне та ГРМ 2 і 3 циліндрів

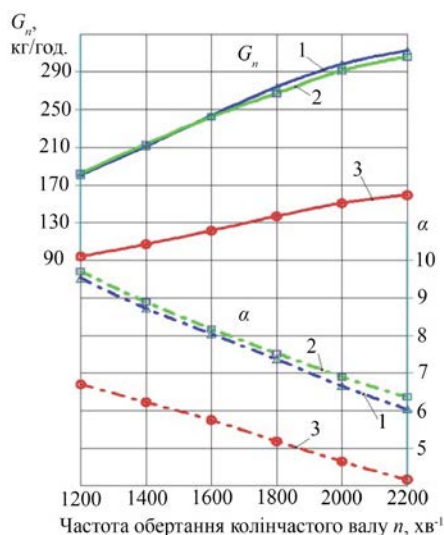


Рис. 4. Залежності витрати повітря $G_n, \text{кг/год.}$ та коефіцієнту надлишку повітря α дизельного ДВЗ від частоти обертання колінчастого валу $n, \text{хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача палива 2 і 3 циліндрів; 3 – відключене пальне та ГРМ 2 і 3 циліндрів

Аналіз даних рис. 4 свідчить про незначне зменшення витрати повітря G_n між першим і другим режимами випробувань. А для третього режиму спостерігається різке зниження витрати повітря, оскільки клапани двох циліндрів фактично закриті і впуск повітря не відбувається. При цьому усуваються зайві витрати енергії на всмоктування повітря, його стискання та тертя по стінках циліндрів. Коефіцієнт надлишку повітря, як видно у третьому варіанті випробувань рис. 4, значно знизився по всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу двигуна через суттєве зменшення надходження повітря при відключенні приводів ГРМ двох циліндрів. При цьому пального, що поступає у два робочих циліндри, потрібно більше (збільшується циклова подача) при зменшенні нерівномірності циклової подачі у два робочих циліндри. Спостерігається покращення умов процесу згоряння.

На другому етапі експериментальних досліджень була поставлена основна задача, яка полягає у виявленні взаємозв'язку параметрів токсичності дизельного ДВЗ зі ступенем відключення циліндрів під навантаженням. У результаті проведення досліджень на випробувальному стенді отримані результати (під навантаженням $N_e = 0 \dots 35 \text{ кВт}$): 1) залежності димності відпрацьованих газів та годин-

ної витрати палива від ефективної потужності двигуна при $n=2200 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 5); 2) залежності витрати повітря та коефіцієнту надлишку повітря від ефективної потужності двигуна при $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 6). Експериментальні дослідження при більших N_e не дають результатів економії палива та зниження токсичності вихлопних газів.

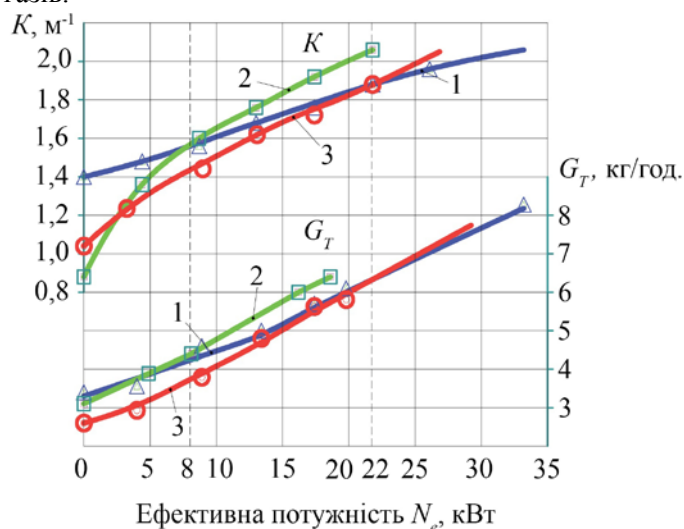


Рис. 5. Залежності димності відпрацьованих газів $K, \text{ м}^3$ та годинної витрати палива $G_T, \text{ кг/год.}$ від ефективної потужності двигуна $N_e, \text{ кВт}$ при $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача палива 2 і 3 циліндрів; 3 – відключене паливо і ГРМ 2 та 3 циліндрів

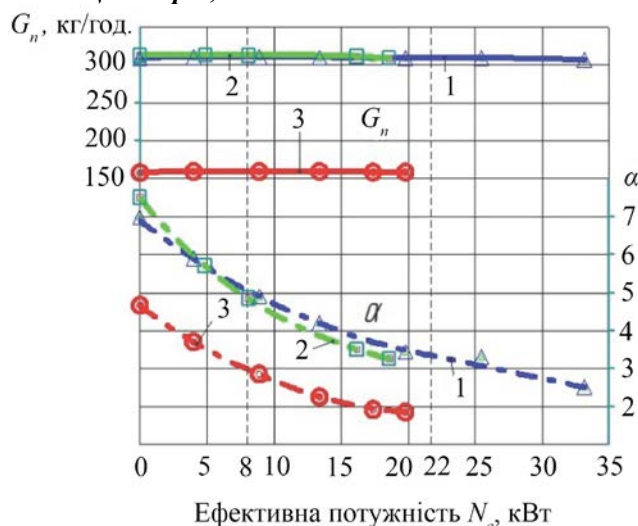


Рис. 6. Залежності витрати повітря $G_n, \text{ кг/год.}$ та коефіцієнту надлишку повітря α від ефективної потужності двигуна $N_e, \text{ кВт}$ при $n = 2200 \text{ хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача палива 2 і 3 циліндрів; 3 – відключене паливо і ГРМ 2 та 3 циліндрів

Проведемо аналіз результатів експериментальних досліджень на рис. 5, 6. При відключенні паливоподачі у двох циліндрах ефект зниження витрати палива продовжується в межах зміни навантаження $N_e = 0 \dots 8 \text{ кВт}$ (див. рис. 5). Подальше навантаження більше 8 кВт призводить до протилежного результату – витрата палива збільшується. Проте при третьому варіанті роботи ДВЗ ефект зниження витрати палива продовжується в більш широкому діапазоні зміни навантаження $N_e = 0 \dots 22 \text{ кВт}$. Хоча в межах $N_e = 15 \dots 22 \text{ кВт}$ – прямує до нуля. Суттєвого зниження димності відпрацьованих газів при відключенні паливоподачі на другому варіанті роботи ДВЗ, як показує аналіз рис. 6, можна досягти у вузькому діапазоні навантажень $N_e = 0 \dots 8 \text{ кВт}$ – $0,87 \dots 1,55 \text{ м}^3$. Збільшення навантаження призводить до суттєвого збільшення димності і ефект відключення палива нівелюється. При третьому варіанті роботи ДВЗ зниження димності продовжується в більш широкому діапазоні $N_e = 0 \dots 22 \text{ кВт}$.

Аналіз даних на рис. 6 свідчить про суттєве зниження витрати повітря G_n та коефіцієнту надлишку

повітря α від ефективної потужності двигуна N_e при третьому варіанті роботи ДВЗ. Це пояснюється відсутністю насосної дії двох циліндрів. З екологічної точки зору достатньо вигідне та ефективне зменшення кількості поданого повітря в діапазоні $N_e = 0 \dots 22$ кВт з 300 до 150 кг/год. Різниця витрати повітря 150 кг/год. не надійде в циліндр та не забрудниться відпрацьованими газами.

Проведемо зіставлення експериментальних даних з теоретичними (рис. 7 та 8).

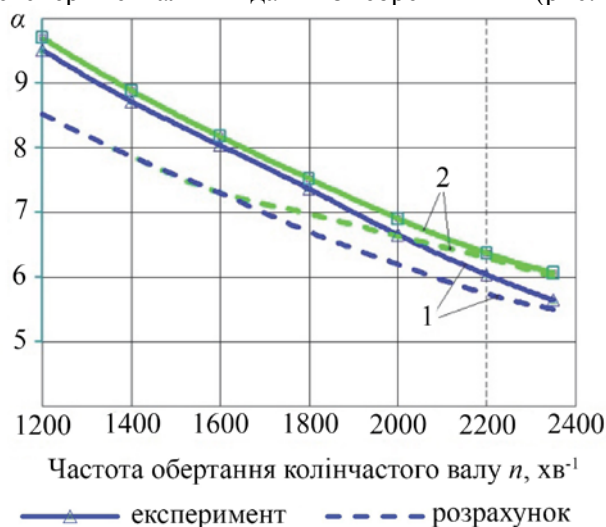


Рис. 7. Залежності коефіцієнту надлишку повітря α від частоти обертання колінчастого валу двигуна $n, \text{хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача пального в половині циліндрів

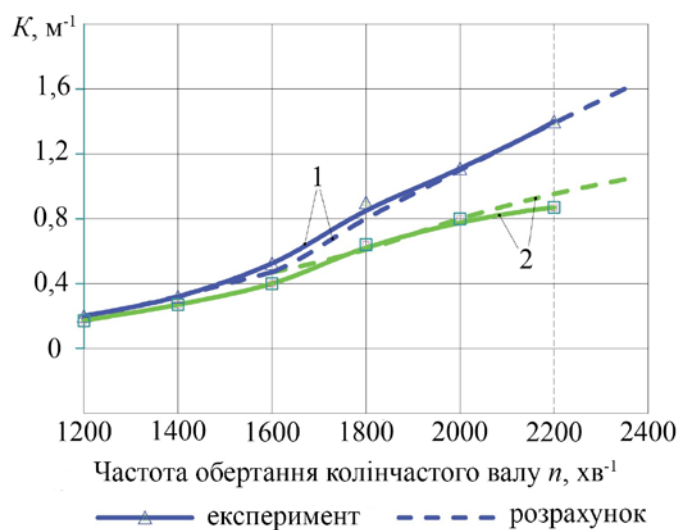


Рис. 8. Залежності димності $K, \text{м}^{-1}$ від частоти обертання колінчастого валу двигуна $n, \text{хв}^{-1}$: 1 – вихідний двигун; 2 – відключена подача пального в половині циліндрів

При порівняльній оцінці були обрані два характерні режими роботи двигуна Д-240: 1) типовий режим роботи всіх 4 циліндрів; 2) штучний режим роботи, що формується за допомогою відключення подачі палива у 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна.

Аналіз залежності (див. рис. 7) коефіцієнту надлишку повітря α від частоти обертання колінчастого валу вказує на достатню подібність результатів. У діапазоні зміни частоти обертання колінчастого валу двигуна 1200–1800 хв^{-1} спостерігається найбільша розбіжність, яка не перевищує 7%. Порівняння даних на рис. 8 показує на розбіжність теоретичних і експериментальних даних у межах 1%.

На практиці експлуатації автотракторної техніки роботи спрямовані на раціональний вибір вантажопідйомності автомобілів, тягового класу тракторів, не призводять до бажаного ефективного завантаження двигуна. В результаті при роботі на холостому ході і малих навантаженнях не забезпечується задана економічність. Крім того, показники токсичності перевищують допустимий поріг на

10–30 %. Необхідні заходи щодо зниження токсичності та підвищення паливної економічності двигунів з низькими нормами Євро. Одним з найбільш ефективних заходів є використання комплексного методу повного й часткового відключення частини циліндрів при експлуатації ДВЗ на холостому ходу й малих навантаженнях. Індивідуальна розробка заходів відключення подачі палива і приводу ГРМ конкретно під кожну машину, зважаючи на особливості режимів роботи автотракторних засобів і специфіки їх умов, є актуальним завданням.

Висновки

1. Розроблено метод підвищення паливної економічності і зменшення викидів токсичних компонентів шляхом деактивації частини циліндрів двигуна (відключення подачі палива і приводу клапанів ГРМ).

Для проведення експериментальних досліджень були обрані: 1) обкатно-гальмівний стенд КИ-5543 з вимірювальними приладами; 2) дизельний двигун Д-240 трактора МТЗ-80; 3) димомір «Інфракар Д1» і газоаналізатор «Інфралайт 11Р».

2. При експериментальних випробуваннях були обрані три характерні режими роботи двигуна Д-240 без навантаження і під навантаженням $N_e = 0...35$ кВт: 1) типовий режим роботи усіх 4 циліндрів; 2) штучний режим роботи, що формується за допомогою деактивації подачі палива у 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна; 3) штучний режим роботи, що формується за допомогою деактивації подачі палива у 2 циліндрах і ГРМ у 2 циліндрах 4-циліндрового двигуна.

У результаті експериментальних досліджень встановлено зниження димності ВГ дизельного двигуна Д-240 трактора МТЗ-80 на номінальній частоті обертання колінчастого вала:

- при відключенні подачі палива у 2-й і 3-й циліндри на 38 %;
- при одночасному відключенні палива і приводів ГРМ 2-го, 3-го циліндрів на 30 %.

3. У разі відключення подачі палива у двох циліндрах ефект зниження витрати палива триває в межах зміни навантаження $N_e = 0...8$ кВт. Подальше підвищення навантаження більше 8 кВт призводить до протилежного результату – витрата палива збільшується. При відключенні ГРМ ефект зниження витрати палива триває в більш широкому діапазоні зміни навантаження $N_e = 0...22$ кВт. Суттєвого зниження димності відпрацьованих газів при відключенні подачі палива на другому варіанті роботи ДВЗ можна досягти у вузькому діапазоні навантаження $N_e = 0...8$ кВт – 0,87–1,55 м⁻¹. Подальше навантаження призводить до істотного збільшення димності і ефект відключення палива нівелюється. При третьому варіанті роботи ДВС зниження димності триває в більш широкому діапазоні $N_e = 0...22$ кВт.

4. Зіставлення експериментальних даних з теоретичними показує, що в діапазоні зміни частоти обертання колінчастого вала двигуна 1200–1800 хв⁻¹ спостерігається найбільша розбіжність, яка не перевищує 7 %. Порівняння даних на рис. 8 показує розбіжність теоретичних і експериментальних даних у межах 1 %.

Перспективи подальших досліджень. Теоретичні та експериментальні дослідження, наведені в цій розвідці, запропоновані для дизельного двигуна трактора Д-240. Проте при уточненнях в експериментальних умовах можуть бути задіяні на будь-які дизельні і бензинові двигуни, а також перспективні нові моделі, що експлуатуються при недозавантаженнях.

References

1. Cames, M., & Helmers, E. (2013). Critical evaluation of the european diesel car boom – global comparison, environmental effects and various national strategies. *Environmental Sciences Europe*, 25 (1), 115–134. doi: 10.1186/2190-4715-25-15.
2. Beshun, O. A. (2015). Deaktyvatsiia tsylindriv u dvyhunakh: istoriia rozvytku, problemy ta perspektyvu zastosuvannia. *Pratsi Tavriiskoho Derzhavnoho Ahrotekhnolohichnoho Universytetu. Tekhnichni Nauky*, 15 (3), 310–318 [In Ukrainian].
3. Vinodh, B. (2005). Technology for Cylinder Deactivation. *SAE Technical Paper Series*. doi: 10.4271/2005-01-0077.
4. Firing only the cylinders you need: web publication. *Delphi Technologies*, Retrived from: <https://www.delphi.com>.

5. Chernetsov, D. A., & Kapustyn, V. P. (2010). Sposoby neitralyzatsyy otrabotavshykh hazov v vypusknnoi systeme dyzelnykh dvyhateleĭ. *Voprosy Sovremennoi Nauky i Praktyky*, 10–12 (31), 71–74 [In Russian].
6. Hu, M., Chang, S., Xu, Y., & Liu, L. (2018). Study on Valve Strategy of Variable Cylinder Deactivation Based on Electromagnetic Intake Valve Train. *Applied Sciences*, 8(11), 2096. doi: 10.3390/app8112096.
7. Leone, T. G., & Pozar, M. (2001). Fuel Economy Benefit of Cylinder Deactivation - Sensitivity to Vehicle Application and Operating Constraints. *SAE Technical Paper Series*. doi: 10.4271/2001-01-3591.
8. Mo, H., Huang, Y., Mao, X., & Zhuo, B. (2014). The effect of cylinder deactivation on the performance of a diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 228 (2), 199–205. doi: 10.1177/0954407013503627.
9. Leahu, C. I., Tarulescu, S., & Tarulescu, R. (2018). The exhaust gas temperature control through an adequate thermal management of the engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 444, 072016. doi: 10.1088/1757-899x/444/7/072016.
10. Korobko, A., & Molodan, A. (2018). Power Change And Fuel Consumption Of Wheel Machines Engine With Disabling Part Of Its Cylinders. Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine, (22 (36)), 266–272. doi: 10.31473/2305-5987-2018-1-22(36)-266-272.
11. Corno, M., D'Avico, L., Marelli, S., Galvani, M., & Savaresi, S. M. (2019). Predictive cylinder deactivation control for large displacement automotive engines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (10), 9554–9563. doi: 10.1109/TVT.2019.2933066.
12. Pillai, S., LoRusso, J., & Van Benschoten, M. (2015). Analytical and Experimental Evaluation of Cylinder Deactivation on a Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*. doi: 10.4271/2015-01-2809.
13. Lif, A., & Holmberg, K. (2006). Water-in-diesel emulsions and related systems. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123-126, 231–239. doi: 10.1016/j.cis.2006.05.004.
14. Kozhanov, V. N., Petelin, A. A., Gritsenko, A. V., Shepelev, V. D. (2018). Reducing the toxicity of exhaust gases of diesel engines by disabling some of its cylinders. *Bulletin of the South Ural State University Series "Mechanical Engineering Industry"*, 18(2), 34–44. doi: 10.14529/engin180204.
15. Hamid, I., Muhamad Said, M. F., Mohamed Soid, S. N., & Nasution, H. (2016). Effect of cylinder deactivation strategies on engine performances using one-dimensional simulation technique. *Jurnal Teknologi*, 78 (8-4). doi:10.11113/jt.v78.9584.
16. Molodan, A., Korobko, A. (2018). Osnovni pidkhody do nadiinosti avtotraktornoho dvyhuna z vymknenniam tsylindriv yak skladnoi systemy. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniky i Tekhnologii dlia Silskoho Hospodarstva Ukrainy*, 23, 52–60 Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tar_2018_23_7 [In Ukrainian].
17. Kozhanov, V. N., Petelin, A. A., Baganov, N. A., & Bekhtold, T. G. (2017). Study of Reducing the Toxicity of Exhaust Gases of a Diesel Engine. *Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan*, 1 (63), 97–104 [In Russian].
18. Zhuravlev, S. S., & Zubarev, K. V. (2015). Approbation of the Method for Controlling the Engine Power by Switching off the Cylinders. *Engineering and technology of construction*, 3 (3), 14–20 [In Russian].
19. Gritsenko, A., Plaksin, A., & Shepelev, V. (2017). Studying Lubrication System of Turbocompressor Rotor with Integrated Electronic Control. *Procedia Engineering*, 206, 611–616. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.525.
20. Khymchenko, A. V., Myshyn, D. H., & Buzov, A. V. (2013). Snyzhenye neravnornosti krutiashcheho momenta dvyhatelia s otkliucheniem tsylindrov na rezhymakh chastychnoho nahruzheniya. *Dvyhately Vnutrenneho Shoranyia*, 1, 46–51 [In Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 25.11.2019 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Романяк В. І., Келемеш А. О., Горбенко О. В. Дослідження токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів при деактивації частини циліндрів. *Вісник ПДАА*. 2019. № 4. С. 241–249.

© Романяк Владислав Ігорович, Келемеш Антон Олександрович,
Горбенко Олександр Вікторович, 2019