

А.П. Полив'янчук

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ РОБОТИ ДИЗЕЛЯ НА ВМІСТ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ

На базі моторного стенду автотракторного дизеля 4СН12/14, оснащеного частковопотоковою системою контролю масових викидів твердих частинок – мікротунелем МКТ-2 досліджено точність та підтверджено практичну придатність розрахункового методу оцінки вмісту твердих частинок у відпрацьованих газах двигуна. Встановлено математичну модель для непрямого визначення концентрацій твердих частинок на несталіх режимах роботи дизеля з тривалістю 10...30 с.

Ключові слова: дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, концентрація, режим випробувань, математична модель, точність.

Вступ

Серед найбільш небезпечних забруднюючих речовин, які потрапляють до атмосфери з відпрацьованими газами (ВГ) дизелів і суттєво погіршують показники якості повітря, є тверді частинки (ТЧ) [1]. Усереднений масовий викид цієї речовини з ВГ, який визначається з врахуванням умов експлуатації двигуна, являє собою один з основних нормованих екологічних показників дизеля [2]. При цьому за ТЧ приймають весь матеріал, зібраний на спеціальному фільтрі з фторвуглецевим покриттям після пропускання через нього ВГ дизеля, розбавлених чистим повітрям до температури, яка не перевищує 52 °С – точку роси рідких вуглеводнів, що входять до складу ТЧ.

Регламентована нормативними документами методика визначення масових викидів ТЧ передбачає використання гравіметричного методу вимірювань, який характеризується підвищеною вартістю, трудомісткістю та довготривалістю процедури випробувань [3]. Для реалізації цього методу потрібно спеціальне вартісне обладнання – розбавляючий тунель, в якому імітується природній процес потрапляння ТЧ у атмосферу шляхом змішування ВГ дизеля з повітрям та проводиться відбір проб ТЧ на фільтри для подальшого визначення концентрацій та викидів ТЧ з ВГ [4]. У зв'язку з цим при проведенні екологічного діагностування дизелів за показниками токсичності ВГ актуальним є завдання створення більш економічних, зручних у використанні та швидкісних непрямих методів контролю вмісту ТЧ у ВГ [5,6].

Одним з найбільш ефективних методів прямого контролю дизельних ТЧ є розрахунковий метод досліджень, який базується на використанні

математичних моделей впливу режимів роботи дизеля на концентрації та викиди ТЧ [7,8].

Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягала у створенні та дослідженні точності і практичної придатності розрахункового методу оцінки вмісту ТЧ у ВГ дизеля шляхом математичного моделювання впливу параметрів, які визначають сталі та несталі режими роботи двигуна, на концентрації, масові і питомі викиди ТЧ. Для досягнення цієї мети були вирішені такі завдання: 1) розробка експериментальної установки для досліджень вмісту ТЧ у ВГ на базі моторного стенду дизеля, оснащеного системою гравіметричного контролю ТЧ – мікротунелем; 2) математичне моделювання впливу параметрів, які визначають сталі режими роботи дизеля, на концентрації і масові викиди ТЧ; 3) математичне моделювання впливу параметрів, які визначають несталі режими роботи дизеля, на концентрації ТЧ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поступове зменшення допустимих рівнів викидів ТЧ від дизелів приводить до зростання результуючої похибки вимірювань нормованого екологічного показника - середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ. Так, при переході від норм Євро-1 до норм Євро-6 вказаний показник для автомобільних дизелів зменшився у 72 рази – від 0,36 до 0,005 г/(кВт·год), а результуюча похибка його визначення відповідно збільшилась: з 3 до 22% (у 7,3 разів) - при проведенні досліджень в одній лабораторії; з 12 до 57% (у 4,8 рази) - при проведенні досліджень в різних лабораторіях (рис. 1) [9]. Для забезпечення потрібної точності визначення масових викидів ТЧ, які знаходяться в діапазоні 0,005...0,02 г/(кВт·год),

сучасні методи вимірювань концентрацій ТЧ повинні мати чутливість 2-5 мкг/м³ [10].

До найбільш відомих високоточних методів контролю викидів ТЧ відносяться: мікроваги з конічним чутливим елементом, що коливається (Tapered element oscillating microbalance – TEOM) засновані на відповідності резонансної частоти коливань уловлювача, який використовується для збирання частинок, з масою матеріалу, що уловлюється [11]; мікроваги з п'єзоелектричним чутливим елементом – кварцовим кристалом, на гранях якого осаджуються ТЧ (Quartz Crystal Microbalance - QCM) [12]; метод кількісного аналізу ТЧ за допомогою індукваного лазером розжарювання ВГ (Laser Induced Incandescence - LII), який дозволяє одночасно проводити вимірювання масової та лічильної концентрацій ТЧ, а також розмірів первинних частинок сажі одним приладом [13] та ін.

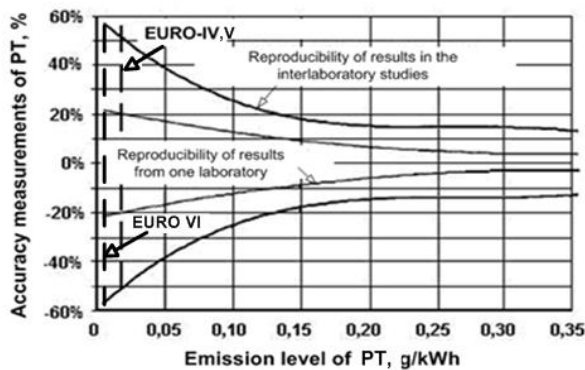


Рис. 1. Збільшення похибки визначення викиду ТЧ при зниженні норм токсичності ВГ дизелів

Роботи по створенню вітчизняних аналогів сучасних високоточних методів і обладнання для прямих та непрямих вимірювань викидів ТЧ від транспортних та промислових дизелів, мають високу актуальність.

Виклад основного матеріалу

Експериментальна установка для досліджень вмісту ТЧ у ВГ дизеля була зібрана на базі моторного стенду автотракторного двигуна 4ЧН12/14, оснащеного засобами регулювання і приладами контролю параметрів, які характеризують сталі та несталі режими роботи двигуна, а також автоматизованою системою гравіметричного контролю ТЧ – мікротунелем МКТ-2 (рис. 2).

Принцип дії МКТ-2 полягає у наступному (рис. 3). Частина ВГ з масовою витратою G_{exh}^t відбирається з вихлопної труби двигуна і через трубопровід транспортування проби подається в розбавляючий тунель – DT, де відбувається її змішування з атмосферним повітрям. З тунелю потік розбавлених ВГ з масовою витратою G_{sam} через один з шарових кранів надходить або в байпасну магістраль, або в робочий канал, в якому встановлений патрон з робочим фільтром.

Для відбору проб ТЧ використовуються фільтри на скловолоконній основі з фторвуглецевим покриттям з коефіцієнтом уловлювання ТЧ більшим, ніж 99%. Робочі фільтри мають зовнішній діаметр 70 мм, швидкість проходження проби через них варіюється в діапазоні 35...100 см/с.

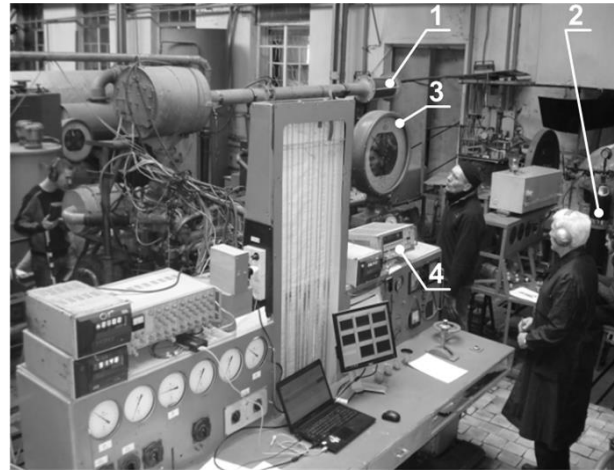


Рис. 2. Загальний вигляд моторного стенда дизеля 4ЧН12/14 з мікротунелем МКТ-2:

1 - витратомір повітря; 2 – витратомір палива; 3 – динамометр; 4 – тахометр.

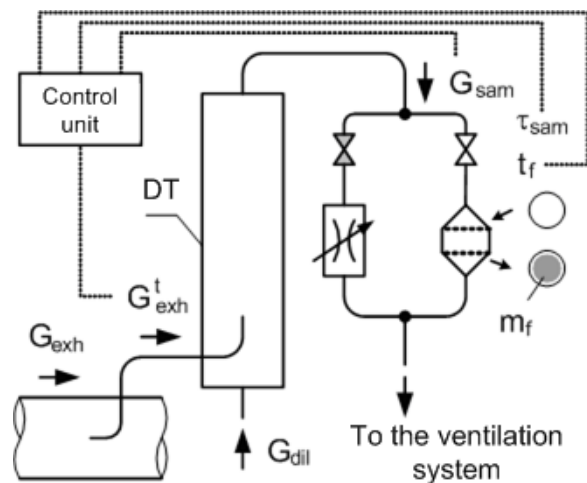


Рис. 3. Принципова схема мікротунеля МКТ-2

Падіння тиску на фільтрах в завершальній фазі відбору проб не перевищує 25 кПа. Мінімально допустима маса навішування ТЧ на фільтри складає 0,25 мг. При відборі ТЧ температура проби перед фільтром t_f не перевищує 52 °С. Шарові крани, які визначають напрямок руху потоку проби у лінії відбору проб, завжди перебувають у протилежних станах: коли один відкритий – інший закритий і навпаки. При підготовці проби до аналізу розбавлені ВГ протікають через байпасну магістраль. За допомогою встановленого в ній дроселя забезпечується регулювання тиску в магістралі таким чином, щоб у момент перемикання кранів не виникало гідравлічного удару. При виконанні процедури відбору проб

ТЧ весь потік розбавлених ВГ протікає через фільтр. При цьому фіксується тривалість даної процедури – τ_{sam} . Після завершення випробувань вимірюється маса ТЧ – m_f , як приріст маси робочих фільтрів за час випробувань. Для контролю параметрів $G^{t_{exh}}$, G_{sam} , τ_{sam} , t_f і керування шаровими кранами використовується електронний модуль.

Розрахунок масових і об'ємних концентрацій – c_{pt} і C_{pt} , масових – PT_{mass} та питомих – PT_p викидів ТЧ проводиться з використанням формул:

$$c_{pt} = \frac{m_f \cdot 10^{-3}}{m_{sam}} \cdot q, \text{ г/кг}, \quad (1)$$

де m_f – маса ТЧ зібрана на фільтрі, мг;

m_{sam} – маса проби розбавлених ВГ, яка пройшла через фільтр, кг;

q – коефіцієнт розбавлення ВГ повітрям в тунелі, який визначається як результат поділу величини G_{sam} на $G^{t_{exh}}$;

$$C_{pt} = c_{pt} \cdot \rho_{exh}, \text{ г/мн}^3, \quad (2)$$

де ρ_{exh} – густина ВГ дизеля, кг/мн³;

$$PT_{mass} = C_{pt} \cdot G_{exh}, \text{ г/год}, \quad (3)$$

де G_{exh} – масова витрата ВГ дизеля на режимі випробувань, кг/год;

$$PT_p = \frac{PT_{mass}}{P}, \text{ г/кВт-год}, \quad (4)$$

де P – ефективна потужність дизеля, кВт;

$$P = \frac{n \cdot M_k}{9550} - P_{aux}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

де n – число обертів колінчастого вала двигуна, хв⁻¹;

M_k – крутний момент на валу двигуна, Н·м;

P_{aux} – потужність допоміжного обладнання, кВт.

Методика математичного моделювання впливу режиму роботи дизеля на вміст ТЧ у ВГ. В математичних моделях, які використовуються для непрямої оцінки викидів ТЧ з ВГ на сталих і несталих режимах роботи дизеля до параметрів, які визначають режим випробувань, відносяться: число обертів колінчастого вала – n (хв⁻¹), навантаження на вал двигуна – L (%), а також і швидкості зміни цих величин у часі – $\Delta n / \Delta t$ (хв⁻¹/с) та $\Delta L / \Delta t$ (%/с). При цьому для підвищення зручності обробки і аналізу експериментальних даних ці параметри представляють у безрозмірній формі:

$$\bar{n} = \frac{n - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad (6)$$

$$\bar{L} = \frac{M_k}{M_{k(max)}}, \quad (7)$$

де n_{idle} і n_{nom} – число обертів вала двигуна на холостому ходу і номінальному режимі, відповідно;

M_k – крутний момент на валу двигуна на режимі випробувань;

$M_{k(max)}$ – максимальний крутний момент на валу двигуна при поточній швидкості його обертання n .

Результати експериментальних досліджень вмісту ТЧ у ВГ на різних режимах роботи дизеля показують, що для непрямого визначення концентрацій ТЧ на несталих режимах випробувань – c_{pt}^{un} може використовуватись формула

$$c_{pt}^{un} = c_{pt}^{st} + \Delta c_{pt}, \text{ г/кг}, \quad (8)$$

де c_{pt}^{st} – масова концентрація ТЧ у ВГ дизеля на сталому режимі випробувань, який характеризується параметрами n (\bar{n}) та L (\bar{L});

Δc_{pt} – приріст масової концентрації ТЧ, який виникає при переході від сталого до несталого режиму роботи дизеля і характеризується величинами $\Delta n / \Delta t$ ($\Delta \bar{n} / \Delta t$) та $\Delta L / \Delta t$ ($\Delta \bar{L} / \Delta t$).

В ході випробувань дизеля 4ЧН12/14 з використанням мікротунелю МКТ-2 було встановлено регресійну залежність для визначення величини Δc_{pt}^{un} при варіюванні параметрів n і L в діапазонах: $n = 1250 \dots 2000$ хв⁻¹ ($\bar{n} = 0,4 \dots 0,8$) і $L = 30 \dots 100$ % ($\bar{L} = 0,3 \dots 1,0$) при тривалості несталого режиму $\Delta t = 10 \dots 30$ с. На основі аналізу експериментальних даних обрано тип цієї залежності – поліном 1-го порядку:

$$\Delta c_{pt} = K_n \left(\frac{\Delta \bar{n}}{\Delta t} \right) + K_L \left(\frac{\Delta \bar{L}}{\Delta t} \right), \text{ г/кг}, \quad (9)$$

де K_n та K_L – коефіцієнти, які визначались в ході експерименту;

$\Delta \bar{n}$, $\Delta \bar{L}$ – відносні прирости величин \bar{n} і \bar{L} в ході несталого режиму.

Процедура визначення коефіцієнтів залежності (9) складалась з 3-х випробувальних циклів, які виконувались послідовно один за одним (рис. 4): **A** – цикл з 5-ти сталих режимів роботи дизеля; **B** – цикл з 10-ти несталого режимів роботи дизеля з тривалістю $\Delta t = 21,5 \pm 1$ с; цей цикл складався з 4-х пар основних режимів з однаковими значеннями в кожній парі однієї з величин – $\Delta \bar{n}$ або $\Delta \bar{L}$ при нульовому значенні іншої величини та 2-х контрольних режимів з різними значеннями величин $\Delta \bar{n}$ і $\Delta \bar{L}$; **C** – цикл, який складався з 3-х повторюваних несталого режимів, в яких величини $\Delta \bar{n}$ і $\Delta \bar{L}$ не змінювались і складали $\Delta \bar{n} = 0$ і $\Delta \bar{L} = 0,35$, а тривалість режиму Δt змінювалась і приймала значення 10, 20 та 30 с.

В результаті виконання циклу **A** вимірювались значення концентрацій ТЧ – c_{pt}^{st} , які відповідали початковим і кінцевим значенням параметрів \bar{n} та \bar{L} несталого режимів випробувань циклів **B** і **C** у діапазонах варіювання: $\bar{n} = 0,4 \dots 0,8$ і $\bar{L} = 0,3 \dots 1,0$.

В результаті виконання циклу **B** на основних режимах випробувань визначались коефіцієнти:

– K_L при зростанні L на 35% ($\Delta \bar{L} = 0,35$) при різних початкових значеннях величини n (режими 1→2 та 2→3);

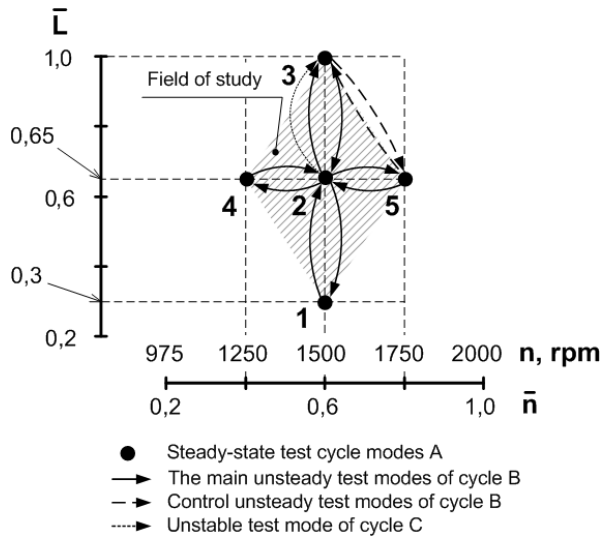


Рис. 4. План експериментальних досліджень впливу режимів роботи дизеля 4ЧН12/14 на вміст ТЧ у ВГ

– K_L при зменшенні L на 35% ($\Delta \bar{L} = -0,35$) при різних початкових значеннях величини n (режими 3→2 та 2→1);

– K_n при зростанні n на 250 хв⁻¹ ($\Delta n = 0,2$) при різних початкових значеннях величини L (режими 4→2 та 2→5);

– K_n при зменшенні n на 250 хв⁻¹ ($\Delta n = -0,2$) при різних початкових значеннях величини L (режими 5→2 та 2→4).

Для визначення коефіцієнтів K_n і K_L використовувались формули:

$$K_n = \frac{\Delta c_{pt(ex)}}{(\Delta n / \Delta t)}, (\text{г} \cdot \text{с}) / \text{кг}, \quad (10)$$

$$K_L = \frac{\Delta c_{pt(ex)}}{(\Delta L / \Delta t)}, (\text{г} \cdot \text{с}) / (\text{кг}), \quad (11)$$

де $\Delta c_{pt(ex)}$ – відхилення масових концентрацій ТЧ, визначених на несталому та відповідному йому сталому режимах роботи дизеля; при цьому перша величина визначається експериментально з використанням МКТ-2 і розраховується за допомогою формули (1), а друга приймається рівною середньому значенню з 2-х концентрацій ТЧ на сталих режимах випробувань, з яких починається та закінчується несталий режим, і визначених в ході виконання циклу А.

В ході обробки результатів виконання циклу В для кожної вказаної вище пари основних режимів випробувань розраховувалось усереднене значення коефіцієнту, який досліджувався – K_n або K_L , та оцінювалось його СКВ.

На контрольних режимах випробувань циклу В (режими 3→5 і 5→3) оцінювалась точність визначення величини c_{pt}^{un} з використанням залежності (13) при одночасних змінах параметрів Δn і ΔL .

В результаті виконання циклу С визначались усереднене значення коефіцієнту $K_L - K_{L(m)}$ та його СКВ – S_{K_L} при зростанні величини L на 35% при $n = 1500$ хв⁻¹ (режим 2→3: $\Delta n = 0$, $\Delta L = 0,35$) у діапазоні варіювання тривалості перехідного режиму $\Delta t = 10 \dots 30$ с; при цьому використовувалась формули:

$$K_{L(m)} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^n K_{L_i}, \quad (12)$$

де i – індекс режиму випробувань;

$n = 3$ – кількість режимів в циклі С;

$$S_{K_L} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{L(m)} - K_{L_i})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (13)$$

Результати досліджень та їх аналіз

В ході виконання циклів А, В і С за допомогою МКТ-2 були визначені концентрації ТЧ у ВГ на сталих – c_{pt}^{st} і несталих – c_{pt}^{un} режимах роботи дизеля 4ЧН12/14 та встановлені коефіцієнти K_n і K_L залежності (9) (табл. 1, 2, рис. 9,10).

Аналіз результатів виконання циклу В показує наступне (див. табл. 2):

– при зростанні однієї з величин Δn або ΔL при постійному значенні іншої величини середні значення коефіцієнтів K_n та K_L складають 0,96 та 1,79, відповідно; при цьому абсолютні та відносні відхилення величин K_n та K_L від середніх значень складають: $\pm 0,08$ (г·с)/кг, або 8,3% та $\pm 0,06$ (г·с)/кг, або 3,4%, відповідно; таким чином навантаження L має у 1,9 рази більш суттєвий вплив на величину Δc_{pt} ніж число обертів колінчастого валу двигуна n ;

– при зменшенні однієї з величин Δn або ΔL при постійному значенні іншої величини значення коефіцієнтів K_n та K_L є не суттєвими та можуть не враховуватись, оскільки відхилення концентрацій ТЧ, визначених на несталих та сталих режимах випробувань складають $\Delta c_{pt} = -0,005 \dots 0,006$ г/кг, що є співставним з межею чутливості МКТ-2 – $\pm 0,005$ г/кг;

– абсолютні відхилення розрахункових значень величини Δc_{pt} , визначених за допомогою залежності (13), від експериментальних даних, отриманих в ході виконання 2-х контрольних несталих режимів циклу В, складають -0,003 г/кг та 0,004 г/кг, що є співставним з межею чутливості МКТ-2; це підтверджує значимість отриманих значень коефіцієнтів K_n і K_L та практичну придатність залежності (13) для оцінювання величини Δc_{pt} .

Результати виконання циклу С показали наступне (див рис. 10):

– при збільшенні тривалості несталого режиму Δt розходження концентрацій ТЧ c_{pt}^{un} і c_{pt}^{st} зменшується; так, при збільшенні Δt з 10 до 30 с величина Δc_{pt} зменшується з 0,049 г/кг до 0,016 г/кг, тобто у 3,1 рази;

Таблиця 1

Результати досліджень концентрацій c_{pt}^{st} в ході виконання циклу А

Режим	Параметри режиму			Результати вимірювань та розрахунків					
	$n, \text{хв}^{-1}$ (\bar{n})	$M_k, \text{Н}\cdot\text{м}$ (\bar{L})	$P_e, \text{кВт}$	$G_{exh}, \text{кг/год}$	q	$\tau_{sam}, \text{с}$	$G_{sam}, \text{г/с}$ ($m_{sam}, \text{г}$)	$m_f, \text{мг}$	$c_{pt}^{st}, \text{г/кг}$
1	1500 (0,6)	175,7 (0,3)	27,6	403,6	7,13	271,1	0,73 (199,2)	0,47	0,020
2	1500 (0,6)	351,4 (0,65)	55,2	423,3	6,35	301,1	0,74 (220,5)	0,88	0,030
3	1500 (0,6)	527,2 (1,0)	82,8	473,5	6,90	180,9	0,73 (131,9)	1,16	0,073
4	1250 (0,4)	351,4 (0,65)	46,0	332,8	7,01	211,8	0,73 (155,1)	1,22	0,066
5	1750 (0,8)	351,4 (0,65)	64,4	523,8	6,38	211,3	0,73 (154,5)	0,61	0,030

Таблиця 2

Результати визначення коефіцієнтів K_n і K_L залежності (9) в ході виконання циклу В

Режим	Параметри несталих режимів				Результати вимірювань та розрахунків					
	$\bar{\Delta n}$	$\bar{\Delta L}$	$\Delta t = \tau_{sam}, \text{с}$	$P_e, \text{кВт}$	$G_{exh}, \text{кг/год}$	q	$c_{pt}^{un} (c_{pt}^{st}), \text{г/кг}$	$\Delta c_{pt}^{(ex)}, \text{г/кг}$	$K_n^{**}, (\text{г}\cdot\text{с})/\text{кг}$	$K_L^{**}, (\text{г}\cdot\text{с})/\text{кг}$
1→2	0	0,35	21,09	41,4	413,5	8,43	0,055 (0,025)	0,030	-	1,79
2→3			22,21	69,0	448,4	6,20	0,080 (0,052)	0,028		
3→2	0	-0,35	21,07	69,0	448,4	6,65	0,057 (0,052)	0,005	-	0,00
2→1			21,27	41,4	413,5	6,43	0,020 (0,025)	-0,005		
4→2	0,2	0	21,30	50,6	378,1	6,82	0,058 (0,048)	0,010	0,96	-
2→5			21,33	59,8	473,6	7,81	0,038 (0,030)	0,008		
5→2	-0,2	0	20,83	59,8	473,6	7,47	0,029 (0,030)	-0,001	0,26	-
2→4			21,11	50,6	378,1	9,83	0,054 (0,048)	0,006		
3→5	0,2	-0,35	20,69	73,6	498,7	7,10	0,064 (0,052)	0,012 0,009*	0,96	0
5→3	-0,2	0,35	20,11	73,6	498,7	7,48	0,079 (0,052)	0,027 0,031*	0	1,79

Примітки. * значення величини $\Delta c_{pt}^{(ex)}$, розраховані за допомогою залежності (8); ** представлені середньоарифметичні значення коефіцієнтів за результатами 2-х вимірювань.

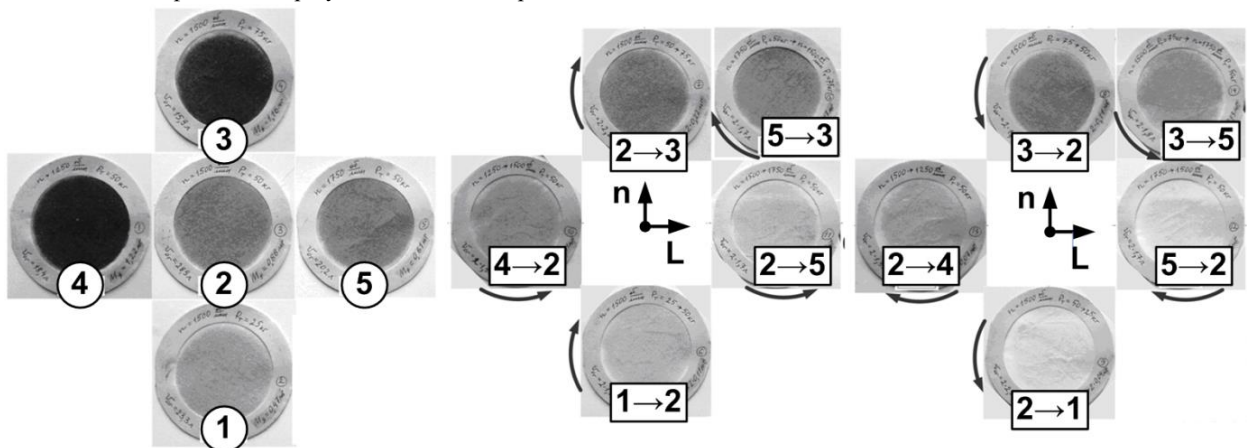


Рис. 9. Фото фільтрів з ТЧ в ході випробувань дизеля 4ЧН12/14 за циклами А і В.

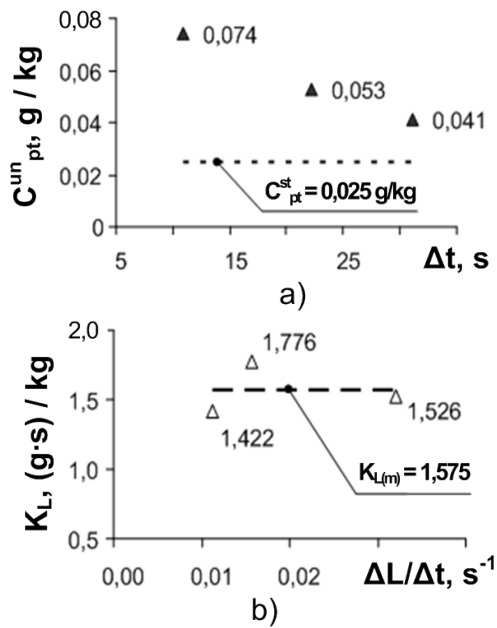


Рис. 10. Результати досліджень впливу Δt на вміст ТЧ у ВГ в ході виконання циклу С:
 а) вплив на Δc_{pt} ; б) вплив на K_L

– у досліджуваному діапазоні варіювання величини Δt коефіцієнт K_L можна вважати постійною величиною, усереднене значення якої становить 1,575; при цьому СКВ цієї величини складає $\pm 0,105$ (г·с)/кг або $\pm 6,7\%$.

Таким чином з врахуванням обраного типу регресійної залежності для оцінки величини Δc_{pt} і результатів експериментальних досліджень формула для визначення концентрацій ТЧ у ВГ дизеля на несталих режимах випробувань має вигляд:

$$c_{pt}^{un} = c_{pt}^{st} + 0,96 \cdot \left(\frac{\Delta \bar{n}_+}{\Delta t} \right) + 1,575 \cdot \left(\frac{\Delta \bar{L}_+}{\Delta t} \right), \text{ г/кг}, \quad (14)$$

де $\Delta \bar{n}_+$, $\Delta \bar{L}_+$ – позитивні значення швидкостей змінювань у часі величин \bar{n} і \bar{L} .

Практична цінність формули (14) полягає в тому, що вона дозволяє оцінювати вміст ТЧ у ВГ на несталих режимах роботи дизеля, які характеризуються тривалістю несталого періоду – 10 ... 30 с та діапазонами варіювання параметрів n , L , $\Delta n/\Delta t$ і $\Delta L/\Delta t$, приведених до безрозмірної форми – 0,4...0,8, 0,3...1,0, -0,2...0,2 і -0,35...0,35, відповідно, з похибками, які є співставними з похибками гравіметричної системи вимірювань –МКТ-2.

Висновки

1. На базі моторного стенду автотракторного дизеля 4ЧН12/14, оснащеного частковопотоковою системою розбавлення ВГ повітрям – мікротунелем МКТ-2 проведено математичне моделювання впливу режимів роботи двигуна на вміст у ВГ небезпечної забруднюючої речовини – ТЧ. Досліджено вплив параметрів сталих режимів – числа обертів

коліничастого валу – n і навантаження – L та параметрів несталих режимів – величин n , L і швидкостей їх змінювання у часі – $\Delta n/\Delta t$ і $\Delta L/\Delta t$ на масові і об'ємні концентрації – c_{pt} і C_{pt} , масові – PT_{mass} і питоми – PT_p викиди ТЧ. Контроль викидів ТЧ здійснювався гравіметричним методом у відповідності до вимог нормативних документів – стандарту ISO8178, Правил ЄЕК ООН R-49, R-96 та ін. з похибками $\pm 3 \dots 10 \%$.

2. Створено та досліджено точність і практичну придатність розрахункового методу оцінки вмісту ТЧ у ВГ дизеля. Встановлено залежність для непрямого визначення масових концентрацій ТЧ у ВГ на несталих режимах роботи дизеля, які характеризуються тривалістю 10...30 с та діапазонами варіювання параметрів n , L , $\Delta n/\Delta t$ і $\Delta L/\Delta t$, приведених до безрозмірної форми – 0,4...0,8, 0,3...1,0, -0,2...0,2 і -0,35...0,35, відповідно. Відхилення розрахункових і експериментальних даних при використанні цієї залежності складають $\pm 0,005 \dots 0,006$ г/кг, що є співставним з межею чутливості МКТ-2.

Література

1. Звонов, В.А. Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Звонов, Заиграев Л.С., Черних В.И. // Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2004. – 268 с.
2. Bielaczyc, P., Woodburn Szczołka, J. (2016). Exhaust Emissions of Gaseous and Solid Pollutants Measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Driving Cycles. *SAE Technical Paper, 2016-01-1008*, 13.
3. Foote, E., Maricq, M., Sherman, M., Carpenter, D. et al. (2013). Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement. *SAE Technical Paper, 2013-01-1567*, 10.
4. Littera, D., Cozzolini, A., Besch, M., Velardi, M. et al. (2013). Comparison of Particulate Matter Emissions from Different Aftertreatment Technologies in a Wind Tunnel. *SAE Technical Paper, 2013-24-0175*, 17.
5. Alkidas, A. C. (1984). Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements. *SAE Technical Paper. 840412*, 316–322.
6. Кухаренко, Г. М. Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей [Текст] / Г. М. Кухаренко, В. И. Березун // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 5. С. 371–379.
7. Kittelson, D., Kraft, M. (2015). Particle Formation and Models. *Encyclopedia of Automotive Engineering, 1(23)*, 107–130.
8. Muntean, G. G. (1999). A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust. *SAE Technical Paper. 1999-01-0515*, 316–322.
9. Burtscher, H. (2001). Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines. Done for the Particle Measurement Programme (PMP) for BUWAL/GRPE. Fachhochschule Aargau, University of Applied Science, Windisch, Switzerland, 45.
10. Anderson, J.D. (2003). UK Particle Measurement Programme. Phase 2. Heavy Duty Methodology

Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd, 222.

11. Seito, K., Shinozaki, O. (1990). The measurement of diesel particulate emissions with tapered element oscillating microbalance and an opacimeter. *SAE Technical Paper. 900644*, 1-5.
12. Abe, T., Sato, T., Hayashida, M. (1989). Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving. *SAE Technical Paper. 890468*, 151-163.
13. Schraml, S., Will, S., Leipertz, A. (1999). Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of DI diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII). *SAE Technical Paper, 1999-01-0146*, 8.

References

1. Zvonov, V.A. (2004). *Ekologiya avtomobil'nykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Ecology of automobile internal combustion engines]. Lugansk: VNU named after V. Dahl. – 268. (in Russian).
2. Bielaczyc, P., Woodburn Szczotka, J. (2016). Exhaust Emissions of Gaseous and Solid Pollutants Measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Driving Cycles. *SAE Technical Paper, 2016-01-1008*, 13.
3. Foote, E., Maricq, M., Sherman, M., Carpenter, D. et al. (2013). Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement. *SAE Technical Paper, 2013-01-1567*, 10.
4. Littera, D., Cozzolini, A., Besch, M., Velardi, M. et al. (2013). Comparison of Particulate Matter Emissions from Different Aftertreatment Technologies in a Wind Tunnel. *SAE Technical Paper, 2013-24-0175*, 17.
5. Alkidas, A. C. (1984). Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements. *SAE Technical Paper. 840412*, 316–322.
6. Kuharenok, G.M. (2016). Otsenka sodержaniya dispersnykh chastits v otrabotavshikh gazakh dizel'nykh dvigateley [Estimation of the content of dispersed particles in the exhaust gases of diesel engines]. *Science and technology, 15, 5*, 371–379. (in Russian).

7. Kittelson, D., Kraft, M. (2015). Particle Formation and Models. *Encyclopedia of Automotive Engineering, 1(23)*, 107–130.

8. Muntean, G. G. (1999). A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust. *SAE Technical Paper. 1999-01-0515*, 316–322.
9. Burtscher, H. (2001). Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines. Done for the Particle Measurement Programme (PMP) for BUWAL/GRPE. Fachhochschule Aargau, University of Applied Science, Windisch, Switzerland, 45.
10. Anderson, J.D. (2003). UK Particle Measurement Programme. Phase 2. Heavy Duty Methodology Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd, 222.

11. Seito, K., Shinozaki, O. (1990). The measurement of diesel particulate emissions with tapered element oscillating microbalance and an opacimeter. *SAE Technical Paper. 900644*, 1-5.
12. Abe, T., Sato, T., Hayashida, M. (1989). Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving. *SAE Technical Paper. 890468*, 151-163.
13. Schraml, S., Will, S., Leipertz, A. (1999). Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of DI diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII). *SAE Technical Paper, 1999-01-0146*, 8.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Парсаданов, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Автор: ПОЛИВ'ЯНЧУК Андрій Павлович

д.т.н., проф.

ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

E-mail – apmail@meta.ua

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9966-1938>

MATHEMATICAL MODELING OF INFLUENCE THE OPERATION MODE DIESEL ENGINE ON THE CONTENT OF PARTICULATE MATTER IN EXHAUST GASES

A. Polivyanchuk

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The work is devoted to solving an urgent scientific and practical task – establishing mathematical models that describe the effect of operating modes of diesel engines on the content in the exhaust gases of a dangerous pollutant – particulate matter (PM). The purpose of the work was to create and study the accuracy and practical suitability of the calculation method estimating concentrations and emissions with exhaust gases PM by means of mathematical modeling of the influence on them of parameters that determine steady state and unsteady diesel operation modes. The studies were carried out on the basis of the motor stand of a 4ChN12/14 autotractor diesel equipped with a partial-flow system for diluting EG with air – MKT-2 microtunnels. Measurements mass and volume concentrations – c_{pt} (g/kg) and C_{pt} (g/mn³), mass – PT_{mass} (g/h) and specific – PT_p (g/kWh) PM emissions was carried out by the gravimetric method with errors of $\pm 3 \dots 10\%$ in accordance with the requirements of regulatory documents – ISO8178 standard, UNECE Rules R-49, R-96, etc. As parameters which determine the mode of operation of the diesel engine, were considered: during the study steady-state modes – the number of revolutions of the engine crankshaft (n , min⁻¹) and the load (L , %); in the study of unsteady modes – the parameters n and L and the rate of change over time – $\Delta n/\Delta t$ and $\Delta L/\Delta t$. A dependence has been established for indirectly determining the mass concentration of PM in the exhaust gases at steady and unsteady diesel operating modes, which are characterized by a duration of 10 ... 30 s and ranges of variation of the parameters n , L , $\Delta n/\Delta t$ and $\Delta L/\Delta t$, given in dimensionless form: 0.4 ... 0.8, 0.3 ... 1.0, -0.2 ... 0.2 and -0.35 ... 0.35, respectively. The deviation of the calculated and experimental data when using this dependence is ± 0.005 - 0.006 g/kg, which is comparable with the sensitivity limit of MKT-2.

Keywords: diesel, exhaust gases, particulate matter, concentration, test mode, mathematical model, accuracy.