

А.П. Полив'янчук

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

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБУ ПРИСКОРЕНОГО ВИМІРУ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВОЗІВ

Розглянуто проблему зростання вартості екологічних випробувань тепловозів, пов'язану з початком нормування середньоексплуатаційного викиду твердих частинок з відпрацьованими газами тепловозного дизеля –РМ. Запропоновано спосіб прискореного виміру цього показника, оцінено економічну ефективність його використання. Експериментально підтверджено практичну придатність запропонованого способу в ході випробувань дизеля 4ЧН12/14 за тепловозними циклами ISO 8178-F і ДСТУ 32.001-94.

Ключові слова: тепловоз, дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, прискорений вимір, економічна ефективність.

Вступ

З 2007 р. в до складу нормованих екологічних показників тепловозів введено середньоексплуатаційний питомий викид твердих частинок (ТЧ) з відпрацьованими газами (ВГ) тепловозного дизеля, який має позначення у нормативних документах РМ (від англ. «particulate matter») [1]. Разом з іншими показниками токсичності ВГ – питомими викидами газоподібних забруднюючих речовин: оксидів азоту, монооксиду вуглецю та вуглеводнів, що мають позначення GASx, показник РМ вимірюється в ході екологічних випробувань тепловозів [2,3].

З початком нормування показника РМ виникла проблема зростання (у 1,1...2,1) рази економічних витрат на проведення екологічних випробувань тепловозів [4] з причини підвищених витрат часу на відбір проб ТЧ. Так, якщо для визначення викидів газоподібних забруднюючих речовин на кожному режимі роботи дизеля достатньо витратити 3-5 хв., то для визначення викидів ТЧ – в декілька разів більше. З часом, по мірі підвищення вимог екологічних стандартів щодо показників токсичності тепловозів, швидкість виміру показника РМ буде знижуватись, а витрати часу та палива на проведення випробувань – зростати. Розрахункові дослідження показують, що зі зменшенням рівнів викидів ТЧ з ВГ тепловозних дизелів на кожні 10 % (порівняно з рівнями викидів ТЧ, які існують сьогодні) вартість екологічних випробувань тепловозів зростає на 5...12% [5].

Для вирішення вказаної проблеми в екологічному діагностуванні тепловозів слід використовувати спосіб прискореного виміру показника РМ, який характеризується підвищеною швидкістю вимірювань цієї величини[4].

Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягала в оцінюванні економічної ефективності та підтвердженні практичної придатності способу прискореного виміру (СПВ) середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ тепловозів – нормованого екологічного показника РМ.

Для досягнення цієї мети були вирішені наступні завдання:

- 1) аналіз вимог нормативних документів щодо процедури визначення показника РМ в ході екологічних випробувань тепловозів та встановлення параметрів СПВ;
- 2) розробка методик оцінювання економічної ефективності та експериментального відпрацювання СПВ;
- 3) оцінка економічної ефективності СПВ та підтвердження його практичної придатності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз вимог нормативних документів щодо процедури визначення показника РМ та встановлення параметрів СПВ. У відповідності до вимог міжнародного стандарту ISO 8178 екологічні випробування тепловозів являють собою цикли, що складаються з нормованих режимів роботи тепловозного дизеля [2]. При реалізації циклу ISO 8178-F [3] кількість режимів дорівнює 3-м; вітчизняним аналогом цієї процедури є 5-ступінчатий цикл ДСТУ 32.001-94 (табл. 1).

На кожному режимі випробувань проводиться визначення масових викидів забруднюючих речовин, що містяться у ВГ дизеля. Методика вимірювань викидів ТЧ передбачає попереднє розбавлення ВГ повітрям в спеціальному трубопроводі – тунелі з послідовним пропусканням проби розбавлених ВГ через фільтр для збору ТЧ. При визначенні показника РМ можуть використовуватись 2 метода відбору проб ТЧ: однофі-

льтровий – ОФ (використовується один фільтр за весь випробувальний цикл) та багатофільтровий – БФ (використовується один фільтр на кожному режимі випробувань). ОФ метод застосовується при проведенні сертифікаційних випробувань тепловозів, в ході яких

визначається тільки показник РМ, БФ метод – в ході дослідницьких випробувань, в ході яких крім показника РМ визначаються масові викиди ТЧ на кожному режимі випробувань.

Таблиця 1

Нормовані процедури екологічних випробувань тепловозних дизелів

| Цикл | | ISO 8178-F | | | ДСТУ 32.001-94 | | | | |
|--------------------|---------|------------|------|---------------|----------------|-------|------|------|---------------|
| № режиму | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| % від $N_{e(nom)}$ | | 100 | 35 | $N_{e(idle)}$ | 100 | 75 | 50 | 25 | $N_{e(idle)}$ |
| WF | Магіст. | 0,25 | 0,15 | 0,60 | 0,06 | 0,13 | 0,11 | 0,10 | 0,60 |
| | Вивозн. | | | | 0,25 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,67 |
| | Маневр. | | | | 0,005 | 0,015 | 0,12 | 0,40 | 0,46 |

Примітка. В таблиці позначено: WF – ваговий фактор; $N_{e(nom)}$ – номінальна потужність дизелю; $N_{e(idle)}$ – потужність дизелю на режимі холостого ходу; Магіст., Вивозн., Маневр. – робота тепловозу: магістральна, вивізна та маневрова, відповідно.

Нормативними документами встановлено такі обмеження параметрів, що впливають на швидкість вимірювання масових викидів ТЧ: швидкість фільтрації проби розбавлених ВГ - v_f повинна знаходитись в діапазоні 35...100 см/с; маса навішування ТЧ, яка збирається на фільтрах, не має бути меншою ніж мінімально допустиме значення: при ОФ методі – $M_{fi(min)} = 0,25$ мг, при БФ методі – $M_{fi(min)} = 0,14$ мг (при використанні фільтрів з діаметрами 70 мм) [2].

Найбільш поширені сьогодні способи контролю викидів ТЧ характеризуються швидкостями фільтрації проби - $v_f = 60...80$ см/с і масами навішувань ТЧ при ОФ і БФ методах відбору проб - $M_f = M_{fi} = 1,3$ мг [6–10].

Разом з цим згідно з нормативними вимогами допускається реалізація способу прискореного виміру показника РМ (СПВ), який характеризується максимально допустимою швидкістю фільтрації проби - $v_{fi(max)} = 100$ см/с і мінімально допустимими масами навішувань ТЧ - $M_{fi(min)} = 0,25$ мг і $M_{fi(min)} = 0,14$ мг. Застосування даного способу дозволяє скоротити витрати часу на відбір проб ТЧ: при ОФ методі - в 3,1...4,1 рази; при БФ методі - в 5,3...7,1 рази і, внаслідок цього, зменшити вартість процедури екологічних випробувань дизеля [11].

Виклад основного матеріалу

Методика оцінки економічної ефективності використання СПВ передбачає порівняння 2-х способів контролю викидів ТЧ: способу, що використовується сьогодні (найбільш швидкісної його реалізації), названого способом 1, та СПВ, названого способом 2. В якості критеріїв порівняння виступають величини абсолютної – C^{test} та виносної – $\overline{C^{test}}$ вартості екологічних випробувань тепловозів. Величина $\overline{C^{test}}$ визначається, як відношення вартості випробувань, в ході яких вимірюються показники GAS_x і РМ, до вартості

випробувань, в ході яких вимірюються тільки показники GAS_x .

Абсолютна вартість випробувань визначається за допомогою формул:

$$C^{test} = M_{fuel}^{test} \times c_{fuel} + k_{oil} \times M_{fuel}^{test} \times c_{oil} + \tau^{test} \times c_{test}, \quad (1)$$

$$M_{fuel}^{test} = G_{fuel}^{heat} \tau^{heat} + \sum_{i=1}^n (G_{fueli} \times \tau_i^{mode}), \quad (2)$$

$$\tau^{test} = \tau^{heat} + \sum_{i=1}^n \tau_i^{mode}, \quad (3)$$

$$\tau_i^{mode} = \tau_i^{st} + \max\{\tau_i^{sam(GASx)}; \tau_i^{sam(PM)}\}, \quad (4)$$

де M_{fuel}^{test} - витрати палива на проведення випробувань, кг;

c_{fuel} – питома вартість палива, грн/кг;

k_{oil} – коефіцієнт, який дорівнює відношенню маси масла, що витрачається в ході випробувань, до маси витрачаемого палива;

c_{oil} – питома вартість масла, грн/кг;

τ^{test} – тривалість випробувань, год;

c_{test} – вартість 1 години роботи персоналу, грн/год;

G_{fuel}^{heat} – витрата палива на етапі попереднього прогріву дизеля, кг/год;

τ^{heat} – тривалість етапу попереднього прогріву дизелю, год;

n - кількість режимів випробувань;

G_{fueli} – витрата палива на режимі випробувань, кг/год;

τ_i^{mode} – тривалість роботи дизеля на режимі випробувань, год;

τ_i^{st} – витрати часу на температурну стабілізацію дизеля, год;

$\tau_i^{sam(GASx)}$ – тривалість відбору проб газоподібних забруднюючих речовин, год;

$\tau_i^{sam(PM)}$ – тривалість відбору проб ТЧ, год.

Величини, що входять до формул (1)-(4), визначаються на основі результатів реальних випробувань тепловозів.

Методика експериментального відпрацювання СПВ передбачає виконання наступних операцій:

- проведення серії вимірювань питомого викиду ТЧ від тепловозу або силової установки, що імітує роботу тепловозного дизелю, з використанням СПВ;
- обчислення похибки відтворюваності результатів вимірювань показника $PM - \delta PT^v$ [6]:

$$\delta PM^v = \frac{\Delta PM}{PM_{(m)}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де $\Delta PM = t_{(0,95;n-1)} \cdot S_{PT} -$ ширина довірчого інтервалу вимірюваного значення показника PM ($t_{(0,95;n-1)}$ – критерій Стьюдента при довірчій вірогідності 0,95 та числі вимірів – n ; S_{PT} – середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань), $PM_{(m)}$ – середнє виміряне значення питомого викиду ТЧ в серії вимірів;

- порівняння похибки δPM^v з максимально допустимою величиною - $\pm 8,5\%$; на основі цього робиться висновок про відповідність точності СПВ вимогам стандарту ISO 8178.

Результати досліджень та їх аналіз

Оцінка доцільності використання СПВ РТ проходила на базі результатів екологічних випробувань магістрального – 2ТЕ116 та маневрового ТЕМ-2 тепловозів [4]. В якості процедури випробувань розглядався цикл ISO 8178-F. В ході досліджень враховувався вплив на вартість випробувань такого фактору, як зменшення рівнів викидів ТЧ, пов'язане з підвищенням вимог екологічних стандартів до показників токсичності ВГ. Врахування цього фактору проводилось за допомогою відносної величини \overline{PM} , яка визначалась, як відношення двох питомих викидів ТЧ: існуючого сьогодні та фактичного.

Результати досліджень свідчать про економічну ефективність СПВ [11]. Його використання дозволяє при існуючих рівнях викидів ТЧ знизити витрати на проведення одного сертифікаційного випробування на 0,8...1,5 тис. грн або 9...28%, дослідницького – на 1,7...3,0 тис. грн або 43...53%; при збільшенні параметра \overline{PM} на кожну одиницю вартість одного випробування додатково зменшується: сертифікаційного – на 1,5...3,8 тис. грн, дослідницького - на 3,8...7,8 тис. грн.

Експериментальне відпрацювання СПВ проводилось на базі дизельної установки 4ЧН12/14 з використанням системи контролю викидів ТЧ – мікротунелю МКТ-2 (рис. 1) [12-14].

В ході випробувань дизеля 4ЧН12/14 реалізовані тепловозні випробувальні цикли ISO 8178-F і ДСТУ 32.001-94 та визначено похибку δPT^v (за результатами 5 повторних вимірів показника PM в ході виконання циклу ISO 8178-F) (рис.2).

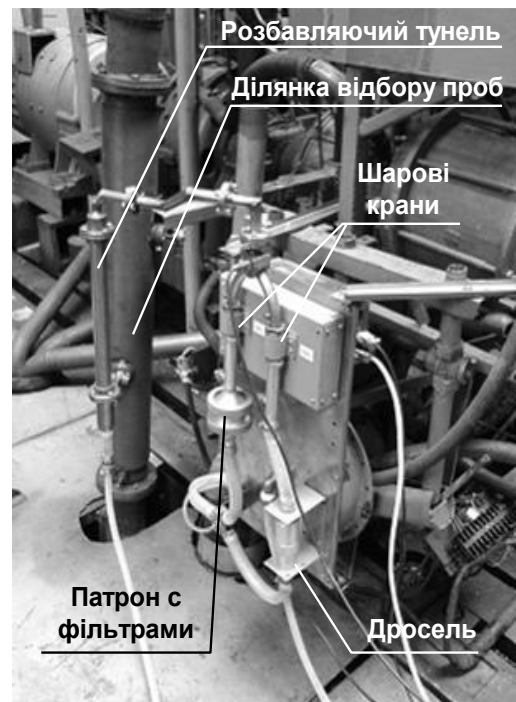


Рис. 1. Загальний вигляд моторного стенда дизеля 4ЧН12/14 з мікротунелем МКТ-2

При цьому мікротунель МКТ-2 являв собою вимірювальний комплекс у складі (див. рис. 1):

а) системи відбору частки (0,02...1,2 %) потоку ВГ, до якої входять: пробовідбірник – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 6 мм і довжиною 80 мм; трубопровід транспортування проби з внутрішнім діаметром 6 мм та малою довжиною 80 мм; регулятор витрати ВГ;

б) системи розбавлення ВГ повітрям, яка має такі складові: розбавляючий тунель – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 300 мм; діафрагму, яка встановлюється на вході в тунель з метою покращення процесу змішування ВГ з повітрям; газодувку продуктивністю 20...120 л/хв, яка є одночасно й пробовідбірним насосом; витратоміри газових потоків розбавлених ВГ у тунелі та повітря;

в) системи відбору проб ТЧ, елементами якої є: лінія відбору проб – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 16 мм і довжиною 950 мм; регулятори режимів відбір-байпас – два шарових крани, які знаходяться у протилежних станах; байпасна магістраль, в якій встановлено дросель, що вирівнює тиск у байпасній та робочій магістралях; робоча магістраль, в якій встановлено патрон з фільтром для відбору ТЧ діаметром 70 мм; захисний фільтр з механічним фільтруючим елементом, який захищає пробовідбірний насос від забруднення ТЧ.

Результати випробувань показали, що величина δPT^v (обчислена за допомогою вираження (5)) складає 7,2 %, що відповідає вимогам стандарту ISO 8178 та свідчить про практичну придатність СПВ.

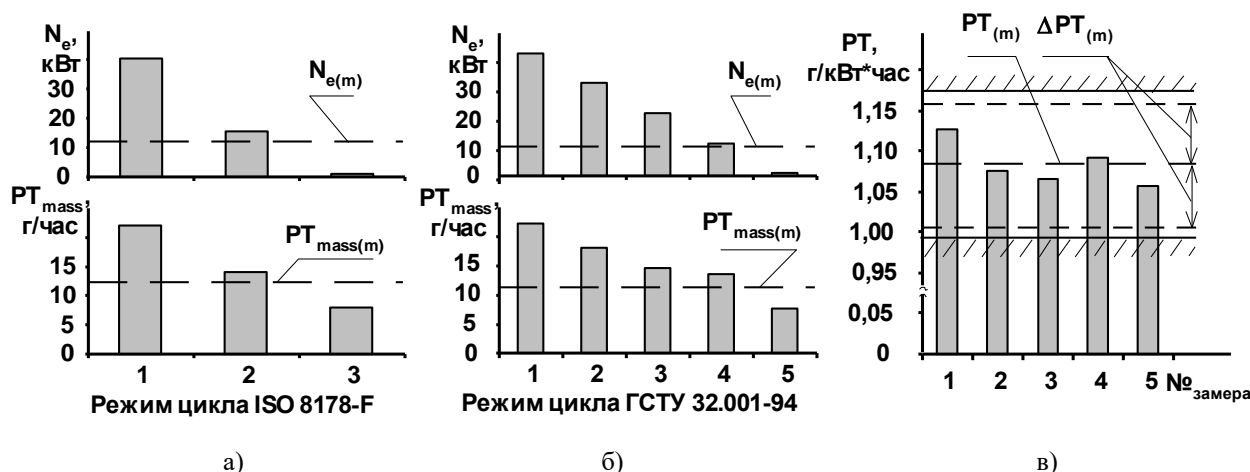


Рис. 2. Результати експериментального відпрацювання СПВ:
 а) виконання циклу ISO 8178-F; б) виконання циклу ДСТУ 32.001-94; в) визначення δPT^v .

Висновки

1. З початком нормування середньоексплуатаційного питомого викиду ТЧ з ВГ тепловозного дизеля – показника РМ пов’язана проблема зростання економічних витрат на проведення екологічних випробувань тепловозів у 1,1...2,1 рази, яка виникає з причини підвищених витрат часу на відбір проб ТЧ. По мірі підвищення вимог екологічних стандартів щодо показників токсичності тепловозів, швидкість виміру показника РМ буде знижуватись, а витрати часу на проведення випробувань зростати.

2. З метою підвищення економічної ефективності екологічних випробувань тепловозів запропоновано використання способу прискореного виміру (СПВ) нормованого показника РМ, який дозволяє зменшити витрати часу на відбір проб ТЧ: при проведенні сертифікаційних випробувань – у 3,1...4,1 рази, дослідницьких випробувань – у 5,3...7,1 рази.

3. Доведено економічну ефективність СПВ: використання цього способу дозволяє знизити витрати на проведення сертифікаційного випробування на 9...28%, дослідницького – на 43...53%. Зі зменшенням рівнів викидів ТЧ від тепловозів ефективність використання СПВ зростає.

4. На базі дизеля 4ЧН12/14 проведено експериментальне відпрацювання СПВ, яке підтвердило практичну придатність цього способу для реалізації випробувальних циклів ISO 8178-F і ДСТУ 32.001-94. Встановлено, що похибка відтворюваності результатів вимірювань, яка забезпечується СПВ не перевищує допустимого рівня $\pm 8,5$.

Література

1. Emission Standards EU: Nonroad Engines [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>.

2. ISO 8178-1: 2017. (2017). Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 150.

3. ISO 8178-4: 2017. (2017). Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part4: Test cycles for different engine applications, 237.

4. Полив'ячук, А.П. Підвищення ефективності систем контролю викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів [Текст]: монографія / А.П. Полив'ячук. – Х.: ХНАДУ, 2015. – 224 с.

5. Полив'ячук, А.П. Исследование результирующей погрешности измерений сред-неэксплуатационного выброса взвешенных частиц с отработавши газами [Текст] / А.П. Полив'ячук, О.Р. Игнатов // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2012. - №1 (4). - С.73-82.

6. Hirakouchi, N., Fukano, I., Shoji, T. (1989). Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. SAE, 890181, 11.

7. Nagano, H. (1990). Measurement of Unregulated Exhaust Emissions from Heavy Duty Diesel Engines with Mini-Dilution Tunnel. SAE, 900643, 10.

8. Smart Sampler PC SPC 472. (1993). PC program for SPC 472 control. AVL, List GmbH Graz, 76.

9. Russel, R. (1993). Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates. SAE Technical Papers, 931190, 12.

10. Lianga, Z., Tiana, J., Rezaeia, S., Zhanga, Y. (2015). Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS. School of Mechanical Engineering. University of Birmingham, 31.

11. Полив'ячук, А.П. Обґрунтування доцільності підвищення швидкодії систем екологічного діагностування дизельних енергетичних установок [Текст] / А.П. Полив'ячук, О.І. Каслін, О.О. Скурідіна // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура, 2018. - № 142. - С.2-7.

12. Polivyanchuk, A., Parsadanov, I. (2015). Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine. Industrial technology and engineering. Republic of Kazakhstan, 2(15), 11-16.

13. Поливянчук, А. Дослідження ефективності використання вимірювального комплексу з мікротунелем MKT-2 при проведенні екологічного діагностування тепловозів [Текст] / А. Поливянчук, Т. Харитонова, О. Чумак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2007. № 8(114). С. 119-124.
14. Поливянчук, А.П. Повышение эффективности систем экологического диагностирования дизельных силовых установок – туннелей [Текст] / А.П. Поливянчук // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2016. № 3-4 (26). С. 132-140.

References

1. Emission Standards EU: Nonroad Engines (2019): <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>.
2. ISO 8178-1: 2017. (2017). Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 150.
3. ISO 8178-4: 2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part4: Test cycles for different engine applications, 2017. 237 p.
4. Polivyanchuk, A. (2015). Improving the efficiency of diesel particulate emissions control systems: monograph. Publishing HNADU, 224.
5. Polivyanchuk, A., Ignatov, O. (2012). Investigation of the resulting error in measuring the average operating emission of suspended particles with spent gases. *Applied ecology. Collection of scientific works of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university, №1 (4)*, 73-82.
6. Hirakouchi, N., Fukano, I., Shoji, T. (1989). Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. SAE, 890181, 11. [in English].
7. Nagano, H. (1990). Measurement of Unregulated Exhaust Emissions from Heavy Duty Diesel Engines with Mini-Dilution Tunnel. SAE, 900643, 10.
8. Smart Sampler PC SPC 472. (1993). PC program for SPC 472 control. AVL, List GmbH Graz, 76.

9. Russel, R. (1993). Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates. SAE Technical Papers, 931190, 12.
10. Lianga, Z., Tiana, J., Rezaeia, S., Zhanga, Y. (2015). Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS. School of Mechanical Engineering. University of Birmingham, 31.
11. Polivyanchuk, A. (2018). Substantiation of expediency of increase of speed of systems of ecological diagnostics of diesel power plants. *Municipal services of cities. Series: Engineering and Architecture*, 142, 2-7.
12. Polivyanchuk, A., Parsadanov, I. (2015). Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine. *Industrial technology and engineering. Republic of Kazakhstan*, 2(15), 11-16.
13. Polivyanchuk, A., Kharitonova, T., Chumak, O. (2007). Investigation of the efficiency of using the measuring complex with the microtubule MKT-2 during the ecological diagnostics of diesel locomotives. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 8(114), 119-124.
14. Polivyanchuk, A., Skurydyna, A., Kaslyn, I. (2016). Increasing the effectiveness of environmental diagnostic systems for diesel power plants - tunnels. *Man and the environment. Problems of neoeology*, 3-4(26), 132-140.

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.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail - arpmail@meta.ua

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

ASSESSMENT ECONOMIC EFFICIENCY OF METHOD ACCELERATED MEASUREMENT EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER WITH DIESEL LOCOMOTIVE EXHAUST

A. Polivyanchuk

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

The problem of increasing the cost of environmental testing of diesel locomotives is considered, associated with the beginning of the normalization of the average operational emission of particulate matter from the exhaust gases of a diesel engine - an indicator of PM. The requirements of regulatory documents on the procedure for determining the PM indicator in the course of environmental tests of diesel locomotives are analyzed. In order to increase the economic efficiency of environmental tests of diesel locomotives, it is proposed to use the method of accelerated measurement (MAM) of the PM indicator, which is characterized by a maximum allowable sample filtration rate of 100 cm/s and a minimum allowable mass of particulate matter on filters of 0,25 during certification tests and 0,14 mg - during research trials of a diesel engine. Developed: a methodology for evaluating the economic efficiency of using MAM and a methodology for experimental testing of MAM during diesel engine tests. The economic efficiency of MAM is proved. Computational studies have shown that the use of this method allows to reduce the cost of certification testing of a locomotive by 9 ... 28%, research tests - by 43 ... 53%. With decreasing levels of particulate emissions from diesel locomotives, the efficiency of the use of MAM is growing. On the basis of the 4CHN12/14 diesel engine, the experimental development of the proposed method was carried out, which confirmed the practical suitability of the MAM for the implementation of ISO 8178-F and DSTU 32.001-94 test cycles. It has been established that a decrease in the mass of the sample to the minimum allowable value leads to some decrease in the accuracy of the measurements of the PM index. However, it has been experimentally proved that the error in the reproducibility of the measurement results of the PM indicator during the implementation of MIE does not exceed the permissible value of $\pm 8.5\%$, and, therefore, this method can be applied in practice.

Keywords: diesel locomotive, diesel, exhaust gases, particulate matter, accelerated metering, economic efficiency.