

А.П. Полив'янчук

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ЧАСТКОВОПОТОКОВИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛІВ

Роботу присвячено вирішенню проблеми забезпечення потрібної точності міні- та мікротунелів – компактних частковопотоків систем контролю масових викидів твердих частинок від дизелів. Проаналізовано вимоги нормативних документів щодо технічних характеристик та умов експлуатації тунелів різних типів, світовий та вітчизняний досвід їх використання. Розроблено математичну модель для визначення результуючої похибки тунелю. Досліджено точність частковопотоків тунелів та доведено необхідність регулювання температури проби в найбільш компактній системі – мікротунелі з діаметром 3 см.

Ключові слова: дизель, екологічність, відпрацьовані гази, тверді частинки, розбавляючий тунель, температура проби, результуюча похибка.

Вступ

Одним з найбільш значимих нормованих екологічних показників дизеля є середньоексплуатаційний масовий викид твердих частинок (ТЧ) з відпрацьованими газами (ВГ), який має позначення РМ (від англ. «particulate matter») та розмірність г/(кВт·год). Цей показник визначається в ході встановлення з врахуванням типу дизеля випробувального циклу з використанням спеціальної системи екологічного діагностування – розбавляючого тунелю – трубопроводу, в якому ВГ дизеля розбавляються чистим повітрям з метою імітації природного процесу потрапляння ТЧ в атмосферу [1,2]. При цьому за ТЧ приймають весь матеріал, що збирається на спеціальних фільтрах на скловолоконній основі з фторопластовим покриттям в результаті пропускання через них ВГ дизеля, розбавлених чистим повітрям до температури, що не перевищує 52 °С.

Еталонним обладнанням для визначення показника РМ є повнопотоківі тунелі, в яких розбавленню підлягають всі ВГ дизеля. Ці вимірювальні системи є громіздкими та вартісними тому в якості альтернативи їм сьогодні широко застосовуються більш компактні, мобільні та дешеві частковопотоківі тунелі – міні- та мікротунелі, в яких відбувається розбавлення повітрям малої частки від загального потоку ВГ [3,4]. При використанні міні- та мікротунелів слід виконувати вимогу щодо їх точності – відносні відхилення результатів вимірювань показника РМ частковопотоківі та еталонною системами не повинні перевищувати $\pm 5\%$.

При використанні компактних тунелів при вимірюванні показника РМ виникає методична похибка вимірювань цієї величини – δR_{M_t} , обумовлена зміною температури розбавлених ВГ у тунелі, від

якої залежить маса розчинної органічної фракції (РОФ) у складі ТЧ. Величина вказаної похибки залежить від розмірів частковопотоківі системи і є тим більшою чим більш компактною є система [5].

Похибка δR_{M_t} може бути усунена за рахунок використання регуляторів температури проби в тунелі, що забезпечують відповідні еталонні системи умови розбавлення ВГ. Оскільки такі регулятори є вартісними, високотехнологічними пристроями, встановлення яких ускладнює вимірювачі ТЧ, доцільність їх використання повинна бути досліджена.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягала у аналізі доцільності регулювання температури проби в міні- та мікротунелях на основі результатів досліджень точності цих систем з врахуванням методичної похибки вимірювань показника РМ. Для досягнення цієї мети були вирішені наступні завдання:

1) аналіз літературних джерел за тематикою дослідження та встановлення: технічних характеристик та умов використання розбавляючих тунелів, методики визначення нормованого показника РМ, ступені впливу температури проби в тунелі на контрольований масовий викид ТЧ;

2) розробка математичної моделі для визначення результуючої похибки вимірювань показника РМ тунелями різних типів.

3) дослідження умов забезпечення потрібної точності міні- та мікротунелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технічні характеристики та умови використання розбавляючих тунелів. У відповідності до вимог нормативних документів – Правил ЄЕК ООН R-49, R-96, стандарту ISO 8178 та ін. вимірювання

масових викидів ТЧ від дизелів здійснюються з використанням вимірювальних систем (рис. 1):

1) еталонних повнопотокових тунелів з 1 та 2-кратним розбавленням ВГ; 1-кратне розбавлення використовують при випробуваннях дизелів, масова витрата ВГ яких не перевищує 750...900 кг/год (при цьому діаметр тунелю – D складає не менш ніж 46 см, довжина – L – не менш ніж $10 \cdot D$); в іншому випадку виконують 2-кратне розбавлення ВГ (при цьому первинний і вторинний тунелі характеризуються такими діаметрами і довжинами: $D_1 = 20...46$ см, $L_1 = 10 \cdot D_1$; $D_2 = 2,5...10$ см, $L_2 = 2,5...10 \cdot D_2$);

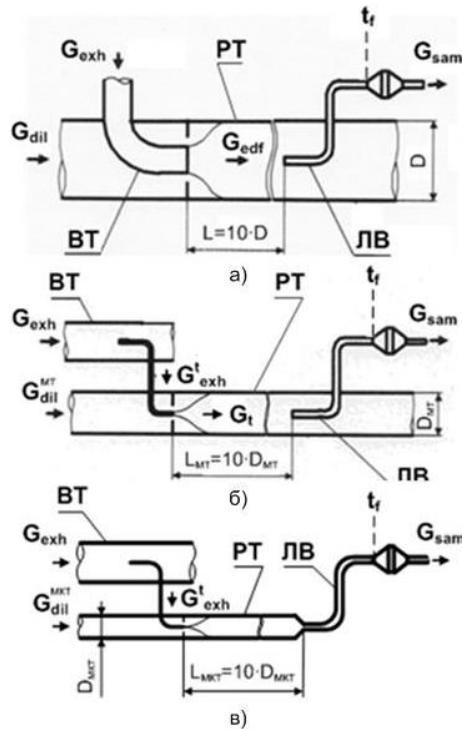


Рис. 1. Принципові схеми розбавляючих тунелів: а) повнопотокового; б) мінітунелю; в) мікротунелю.

2) частковопотокових тунелів, які поділяються на мінітунелі (мають діаметр і довжину: $D_{MT} = 7,5...12$ см, $L_{MT} = 10 \cdot D_{MT}$) та мікротунелі (мають діаметр і довжину: $D_{MKT} = 2,5...4$ см, $L_{MKT} = 10 \cdot D_{MKT}$); до найбільш відомих частковопотокових тунелів відносяться: мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником МТ 474 (AVL), мінітунель багатотрубного типу (Mitsubishi), мікротунелі з диференційним способом визначення масової витрати ВГ – SPC 472 (AVL), РТР 2000 (Pirburg) та ін. [6-8].

В тунелях можуть застосовуватись наступні режими розбавлення ВГ повітрям («dilution mode»): D_1 – режим з постійною масовою витратою розбавлених ВГ або CVS-режим (від «Constant Volume Sampling»); D_2 – CVS-режим з зовнішнім (повітряним) охолодженням тунелю (охолодження дозволяє зменшити мінімальний коефіцієнт розбавлення ВГ в тунелі і, за рахунок цього, збільшити контролюва-

ний масовий викид ТЧ та підвищити точність тунелю); D_3 – режим з постійним коефіцієнтом розбавлення ВГ; D_4 – режим з постійним коефіцієнтом розбавлення ВГ та охолодженням тунелю.

Для визначення середньоексплуатаційного масового викиду ТЧ – РМ проводяться випробування дизеля за циклом, який складаються з режимів роботи двигуна з заданими значеннями числа обертів колінчастого валу – n та навантаження – L .

За результатами циклових випробувань дизеля показник РМ визначають наступним чином:

$$PM = \frac{PT_{mass}}{P}, \text{ г/(кВт·год)}, \quad (1)$$

де PT_{mass} – середній за цикл викид ТЧ, г/год;
 P – середня за цикл потужність дизеля, кВт;

$$PT_{mass} = \frac{m_f}{m_{sam}} \cdot \frac{G_{edf}}{1000}, \text{ г/год}, \quad (2)$$

де m_f – маса ТЧ, зібрана на фільтрі за цикл, мг;
 m_{sam} – маса проби розбавлених ВГ, яка пройшла через фільтр за цикл, г;

G_{edf} – середня за цикл еквівалентна масова витрата розбавлених ВГ у еталонному тунелі, кг/год;

$$m_{sam} = \sum_{i=1}^N m_{sami}, \text{ г} \quad (3)$$

де N – кількість нормованих режимів у циклі;

$$G_{edf} = \sum_{i=1}^N WF_i \cdot G_{edfi}, \text{ кг/год}, \quad (4)$$

де G_{edfi} – еквівалентна масова витрата розбавлених ВГ у еталонному тунелі на i -му режимі, кг/год (визначається як добуток коефіцієнту розбавлення ВГ – q_i на масову витрату ВГ дизеля – G_{exhi} , кг/год);

$$P = \sum_{i=1}^N (P_i \cdot WF_i), \text{ кВт}, \quad (5)$$

де P_i – потужність дизеля на i -му режимі, кВт:

$$P_i = \frac{n_i \cdot M_{ki}}{9550} - P_{auxi}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

де n_i – число обертів колінчастого валу на, хв^{-1} ;

M_{ki} – крутний момент на i -му режимі, Н·м ;

P_{auxi} – потужність допоміжних елементів, кВт.

Таким чином показник РМ визначається непрямым шляхом за результатами прямих вимірювань величин m_f , m_{sam} , q_i , G_{exhi} , n_i та M_{ki} .

Виклад основного матеріалу

Ступінь впливу температури проби в тунелі на контрольований масовий викид ТЧ може бути оцінено за результатами експериментальних досліджень зарубіжних та вітчизняних авторів [6, 9,10] (рис. 2), які свідчать про наступне:

1) збільшення температури розбавлених ВГ перед фільтрами – t_f призводить до зменшення контрольованого (за масою навішування ТЧ) масового викиду ТЧ – m_f і навпаки;

2) вплив температури t_f на величину m_f може бути врахований за допомогою лінійної залежності

$$\delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{tf0}}{m_f^{tf0}} \cdot 100\% = k_{tf} \cdot (t_f - t_{f0}),$$

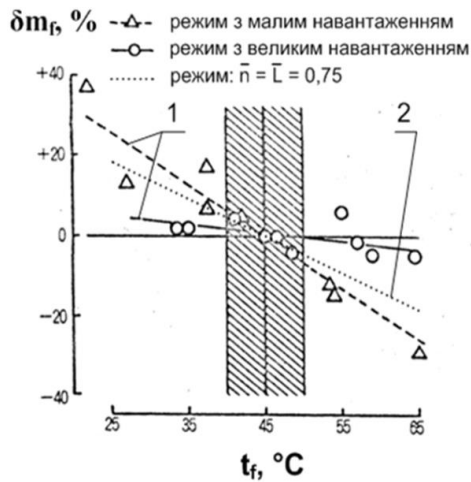


Рис. 2. Експериментальні дані щодо впливу температури проби t_f на контрольований викид ТЧ m_f : 1 – зарубіжні дані [6]; 2 – вітчизняні дані [10].

де δm_f^{tf} – відносне відхилення контрольованого масового викиду ТЧ при температурі проби $t_f - m_f^{tf}$ від базового значення m_f^{tf0} , яке відповідає температурі проби t_{f0} , прийнятій за базову (у даних, представлених на рис. 2 – $t_{f0} = 45$ °C);

k_{tf} – коефіцієнт пропорційності;

3) значення коефіцієнту k_{tf} залежить від режиму роботи двигуна: при збільшенні потужності дизеля його величина зменшується (за рахунок зменшення частки РОФ у складі ТЧ).

Математична модель для визначення результуючої похибки вимірювань $PM - \delta PM$ передбачає визначення цієї величини, як суми її інструментальної – δPM_{in} та методичної – δPM_t складових:

$$\delta PM = \delta PM_{in} + \delta PM_t$$

Величина δPM_{in} визначається як похибка результату непрямих вимірювань за формулою:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2},$$

де y – величина, яка вимірюється непрямым шляхом за відомою залежністю – $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ (див. формули (1) – (6));

x_i – величини, за допомогою яких визначається y , m – їх кількість.

Похибка δPM_t чисельно дорівнює величині δm_f^{tf} – відносному відхиленню контрольованого масового викиду ТЧ – m_f^{tf} , визначеного при фактичних значеннях температур t_{fi} , від масового викиду ТЧ – m_f^{tf0} , визначеного при значеннях температур t_{f0i} , прийнятих за базові і відповідних розбавленню ВГ у еталонній системі при $t_{dil} = 20$ °C, $t_{f(max)} = 52$ °C:

$$\delta PM_t = \delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{tf0}}{m_f^{tf0}} \cdot 100\% = \sum_{i=1}^{13} \frac{m_{fi}^{tf} - m_{fi}^{tf0}}{m_{fi}^{tf0}} \cdot r_{m_{fi}} = \sum_{i=1}^{13} \delta m_{fi}^{tf} \cdot r_{m_{fi}}$$

де δm_{fi}^{tf} – відносні відхилення контрольованого масового викиду ТЧ на i -му режимі – m_{fi}^{tf} від базових значень – m_{fi}^{tf0} ;

$r_{m_{fi}} = (m_{fi}^{tf0}/m_{fi}^{tf0}) \cdot 100\%$ – відносні долі m_{fi}^{tf} у загальному масовому викиді m_f^{tf0} .

Для визначення величин δm_{fi}^{tf} використовується емпірична залежність, тип якої обрано з врахуванням експериментальних даних (див. рис. 2):

$$\delta m_{fi}^{tf} = k_{t_{fi}}(\bar{n}_i, \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}),$$

де $k_{t_{fi}}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$ – коефіцієнт пропорційності, який є функцією відносних величин – \bar{n}_i та \bar{L}_i [10]:

$$k_{t_{fi}} = -1,20 - 0,148 \cdot \bar{n}_i + 0,552 \cdot \bar{L}_i.$$

Величини \bar{n}_i та \bar{L}_i характеризують режим роботи двигуна і визначаються наступним чином:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}},$$

де n_{idle} і n_{nom} – число обертів колінчастого вала на режимах холостого ходу і номінальної потужності;

$$\bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}},$$

де $M_{k(max)i}$ – максимальний крутний момент на валу двигуна при n_i .

Результати досліджень та їх аналіз

Дослідження доцільності регулювання температури проби в міні- та мікротунелях проведені за критерієм відносного відхилення результатів вимірювань показника РМ часковопотоковою та еталонною системами – δPM_* :

$$\delta PM_* \approx \sqrt{\delta PM_0^2 + \delta PM_1^2}, \quad (7)$$

де δPM_0 – результуюча (інструментальна) похибка повнопотокового тунелю, %;

δPM_1 – результуюча похибка частковопотокового тунелю (визначається за допомогою вищенаведеної математичної моделі), %.

На основі результатів екологічних випробувань дизелів 1Ч12/14 та 4ЧН12/14 за циклом ESC за допомогою вищенаведеної математичної моделі та формули (7) проведено розрахункові дослідження: а) абсолютних відхилень температур проб в повнопотоковій системі (з діаметром $D_{пт} = 46$ см) від аналогічних температур в міні- ($D_{mt} = 10$ см) та мікротунелі ($D_{mkt} = 3$ см): $\Delta t_{fi}^{MT} = t_{fi}^{MT} - t_{fi}^{PT}$, $\Delta t_{fi}^{MKT} = t_{fi}^{MKT} - t_{fi}^{PT}$ (верхній індекс вказує на тип тунелю); б) методичних похибок вимірювань масових викидів ТЧ – $\delta m_{t_{fi}}^{MT}$ та $\delta m_{t_{fi}}^{MKT}$ (які виникають внаслідок наявності

відхилень Δt_{fi}^{MT} та Δt_{fi}^{MKT}) та показника РМ – δPM_{fi}^{MT} та δPM_{fi}^{MKT} . В) результуючих похибок тунелів – δPM ,

відносних відхилень δPM^* . Результати проведених досліджень свідчать про наступне (рис. 3, табл. 1).

Таблиця 1

Результати досліджень точності розбавляючих тунелів

Величина	Вимірювальні системи та режими розбавлення ВГ											
	Еталонний тунель				Мінітунель				Мікротунель			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
$\delta PM_{in}, \%$	2,0	1,6	1,9	1,5	4,3	3,3	3,9	3,0	4,3	3,3	3,9	3,1
$\delta PM_t, \%$	0	0	0	0	0,3	0,3	0,4	0,4	1,6	1,6	1,7	1,7
$\delta PM, \%$	2,0	1,6	1,9	1,5	4,6	3,6	4,3	3,4	5,9	4,9	5,6	4,8
$\delta PM^*, \%$	0	0	0	0	5,0	3,9	4,7	3,7	6,3	5,2	6,0	5,1

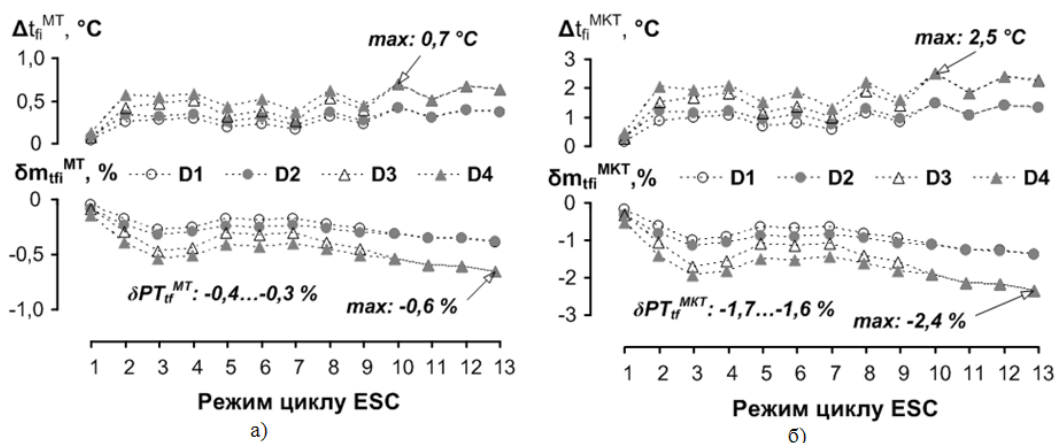


Рис. 3. Результати оцінювання значень величин Δt_{fi} , $\delta m_{t_{fi}}$, δPM_{fi} : а) для мінітунелю (D =10см); б) для мікротунелю (D =3см).

Теплові умови розбавлення ВГ в мінітунелі і еталонній системі є приблизно рівними: відхилення температур проби в цих системах є меншими 0,7 °С, виникаючі при цьому методичні похибки вимірювань показника РМ не перевищують 0,4 % і не впливають суттєво на результуючу похибку тунелю, при цьому величина δPM^* не перевищує свого допустимого значення і дорівнює $\pm 3,7 - 5,0 \%$.

Теплові умови розбавлення ВГ в мікротунелі і еталонній системі мають суттєві відмінності: відхилення температур проби в цих системах досягають 2,5 °С, виникаючі при цьому методичні похибки вимірювань показника РМ складають 1,6 – 1,7 %, що призводить до збільшення результуючої похибки тунелю до $\pm 5,9\%$, при цьому величина δPM^* перевищує своє допустиме значення і досягає $\pm 6,3 \%$.

Таким чином регулювання температури проби є доцільним лише в мікротунелі.

Висновки

1. За результатами аналізу нормативних документів – Правил ЄЕК ООН R-49, R-96, стандарту ISO 8178 та ін., світового та вітчизняного досвіду використання розбавляючих тунелів встановлено: технічні характеристики та умови експлуатації еталонних повнопотокових та частковопотокових ту-

нелів, емпіричні залежності, що характеризують ступінь впливу температури проби в тунелі на точність вимірювань масових викидів ТЧ.

2. На основі результатів випробувань дизелів 1Ч12/14 та 4ЧН12/14 за циклом ESC проведено розрахункові дослідження з оцінювання впливу на точність мінітунелю та мікротунелю з діаметрами 10 см і 3 см, відповідно, температурних режимів пробопідготовки, які порівнювались з еталонною системою з діаметром 46 см. Результати досліджень довели доцільність регулювання температури проби в мікротунелі для усунення суттєвих методичних похибок вимірювань показника РМ: -1,6 ... -1,7 %. В мінітунелі відповідні похибки є не суттєвими і потреби в регулюванні температури проби немає.

Література

1. 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.
2. Редзюк, А.М. Щодо визначення масових викидів забруднюючих речовин двигунами колісних транспортних засобів [Текст] / А.М. Редзюк, О.А. Клименко, О.В. Кудренко // *Автошляховик України*, 2012. – № 4 (228) – С. 2–7.
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 Papers*, 2013-01-1567, 10.

4. Клименко, О.А. Дослідження та створення перспективної системи для визначення масових викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах двигунів [Текст] / О.А. Клименко, А.М. Редзюк, О.В. Кудренко, С.О. Ричок // *Автомобілівник України*, 2012. – № 5 (229) – С. 2–8.

5. Alozie, N., Peirce, D., Lindner, A., Winklmayr, W. et al. (2014). Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Measurement Using a Mixing Tube Diluter. *SAE Technical Papers*, 2014-01-1568, 14.

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

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 Papers*, 2013-01-1567, 10.

4. Klimenko, O., Redzuk, A., Kudrenko, O., Rychok, S. (2012). Research and development of a promising system for determining the mass emissions of pollutants in the exhaust gases of engines. *Road car of Ukraine*, 5 (229), 2-8.

5. Alozie, N., Peirce, D., Lindner, A., Winklmayr, W. et al. (2014). Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Measurement Using a Mixing Tube Diluter. *SAE Technical Papers*, 2014-01-1568, 14.

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. Polivyanchuk, A. (2015). Improving the efficiency of diesel particulate emissions control systems: monograph. Publishing HNADU, 224.

References

1. 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.

2. Redzuk, A., Klimenko, O., Kudrenko, O. (2012). With respect to the determination of the mass emissions of pollutants by wheeled vehicle engines. *Road car of Ukraine*, 4(228), 2-7.

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 - armail@meta.ua

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

INVESTIGATION OF THE ACCURACY PARTIAL-FLOW CONTROL SYSTEMS FOR PARTICULATE EMISSIONS FROM DIESEL EXHAUST GASES

A. Polivyanchuk

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

The work is devoted to solving the problem of ensuring the required accuracy of frequent-flow mini- and microtunnels - compact systems for controlling mass emissions of particulate matter from diesel engines, which arises due to the difference in temperature conditions of sample preparation in these tunnels and the reference measurement system - full-flow tunnel. According to the results of the analysis of regulatory documents - UNECE Rules R-49, R-96, international standard ISO 8178 and others, international and domestic experience in the use of dilution tunnels, it was established: technical characteristics and operating conditions of reference full-flow and part-flow tunnels, empirical dependencies characterizing the degree the influence of the sample temperature of diluted exhaust gases in the tunnel on the accuracy of measurements of mass emissions of particulate matter at various diesel operating modes. Mathematical models have been developed to determine: sample temperatures in tunnels of various types, the resulting measurement error of the average operational emission of particulate matter - PM index, taking into account the influence of sample temperature in the tunnel on the accuracy of PM measurements. Based on the results of tests of 1Ч12/14 and 4ЧН12/14 diesel engines according to the ESC cycle and developed mathematical models, computational studies were carried out to assess the impact on the accuracy of the minitunnel and microtunnel with diameters of 10 cm and 3 cm, respectively, of the temperature conditions of sample preparation, which were compared with a reference system with diameter, 46 cm. The research results proved the feasibility of controlling the temperature of the sample in the microtunnel to eliminate significant methodological errors in the measurement of PM, which are -1.6 ... -1.7%. In a minitunnel, the corresponding errors are not significant and equal to -0.3 ... -0.4%. Since the thermal conditions for diluting the exhaust gases in the minitunnel and the reference system are approximately equal, there is no need to control the sample temperature in this system.

Keywords: diesel, ecological compatibility, exhaust gases, particulate matter, dilution tunnel, resulting error.