

Шифр роботи: «Foundation»

**ДОСЛІДЖЕННЯ
ДОЦІЛЬНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОБИ
В СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛІВ –
МІНІ- ТА МІКРОТУНЕЛЯХ**

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми.

Роботу присвячено вирішенню актуальної проблеми забезпечення потрібної точності частковопотокових міні- та мікротунелів – компактних і економічних систем контролю масових викидів твердих частинок (ТЧ) від дизелів, яка виникає внаслідок різних температурних режимів прободготовки в цих тунелях та в еталонній системі вимірювань – вартісному та громіздкому повнопотоковому тунелі.

В роботі проаналізовано вимоги нормативних документів щодо технічних характеристик та умов експлуатації тунелів, світовий та вітчизняний досвід їх використання. Розроблено математичні моделі для визначення температури проби в тунелі та результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного масового викиду твердих частинок – показника РМ. За результатами випробувань дизелів 1Ч12/14 і 4ЧН12/14 за циклом ESC досліджено точність частковопотокових тунелів та доведено доцільність регулювання температури проби в найбільш компактній вимірювальній системі – мікротунелі з діаметром 3 см.

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.

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 математичних моделей для визначення температури проби розбавлених ВГ повітрям в тунелі та результуючої похибки вимірювань показника РМ.

3) дослідження доцільності регулювання температури проби в міні- та мікротунелях.

Методи дослідження:

Аналіз та синтез інформації, математичне моделювання, планування експерименту, експериментальні дослідження, розрахунковий експеримент.

Наукова новизна.

Вперше розроблено математичну модель для визначення температури проби перед фільтром в повнопотокових та частковопотокових розбавляючих тунелях з врахуванням умов розбавлення ВГ повітрям, які відповідають вимогам нормативних документів.

Вперше обґрунтовано доцільність використання регуляторів температури проби у найбільш компактних та економічних вимірювальних системах – мікротунелях з метою зменшення суттєвих методичних похибок вимірювань нормованого показника РМ.

Практична цінність.

Розроблено та експериментально відпрацьовано математичні моделі, які дозволяють визначати:

- температури проби розбавлених ВГ в різних тунелях на різних режимах роботи дизеля;
- методичні та результуючі похибки вимірювань показника РМ з використанням еталонних – повнопотокових та альтернативних – частковопотокових систем розбавлення ВГ повітрям.

Наукова робота включає: 21 с., 8 рис., 2 табл., 12 літературних джерел.

Ключові слова: ДИЗЕЛЬ, ВІДПРАЦЬОВАНІ ГАЗИ, ТВЕРДІ ЧАСТИНКИ, МІНІТУНЕЛЬ, МІКРОТУНЕЛЬ, МЕТОДИЧНА ПОХИБКА, ТЕМПЕРАТУРНЕ РУГУЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	6
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОБИ РОЗБАВЛЕНИХ ВГ В ТУНЕЛІ – t_f	11
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТУЮЧОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ ПОКАЗНИКА РМ – δ_{RM}	14
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОБИ В МІНІ- ТА МІКРОТУНЕЛЯХ	16
ВИСНОВКИ	19
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	20

ВСТУП

Середньоексплуатаційний масовий викид ТЧ з відпрацьованими газами (ВГ) є одним з найбільш значимих нормованих екологічних показників дизеля. Він має позначення РМ (від англ. «particulate matter») та розмірність г/(кВт·год). Цей показник визначається в ході встановленого 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 та є більшою, ніж 42 °С.

Еталонним обладнанням для визначення показника РМ є повнопотокові 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 частковопотокові 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 частковопотоковою та еталонною системами не повинні перевищувати $\pm 5\%$.

При використанні компактних тунелів при вимірюванні показника РМ виникає методична похибка вимірювань цієї величини – δPM_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 частковопотокової системи і є тим більшою чим більш компактною є система [5].

Похибка δPM_t може бути усунена за рахунок використання регуляторів температури проби в тунелі, що забезпечують відповідні еталонній системі

умови розбавлення ВГ. Оскільки такі регулятори є вартісними, високотехнологічними пристроями, встановлення яких ускладнює та здорожує вимірювальні системи, доцільність їх використання повинна бути досліджена.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

Технічні характеристики та умови використання розбавляючих тунелів, методика визначення нормованого показника РМ.

У відповідності до вимог нормативних документів – Правил ЄЕК ООН R-49, R-96, міжнародного стандарту ISO 8178 та ін. вимірювання масових викидів ТЧ від дизелів здійснюються з використанням вимірювальних систем:

1) еталонних повнопотокових тунелів з 1 та 2-кратним розбавленням ВГ (рис. 1); 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: $D_1 = 20 \dots 46$ см, $L_1 = 10 \cdot D_1$; $D_2 = 2,5 \dots 10$ см, $L_2 = 2,5 \dots 10 \cdot D_2$);

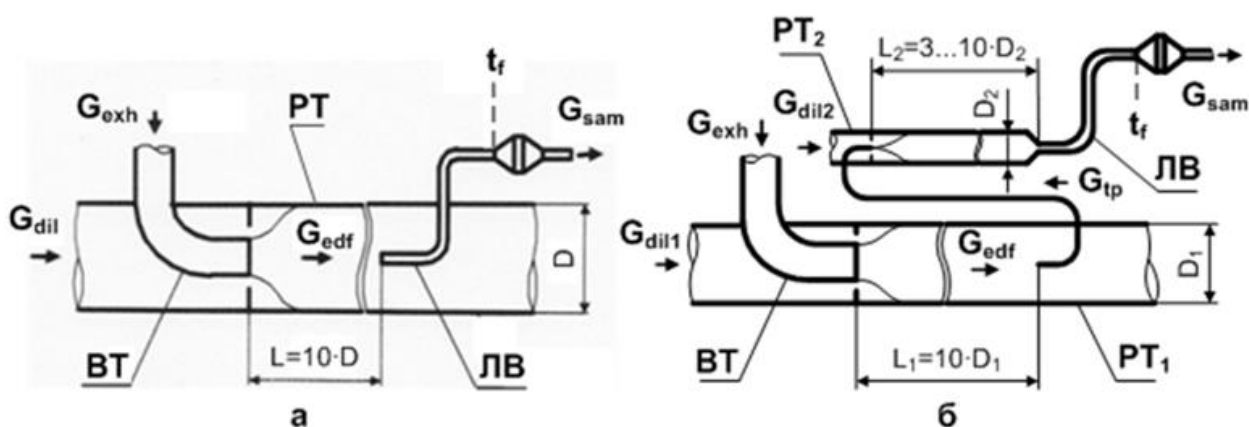


Рисунок 1 – Принципові схеми повнопотокових тунелів:

а) з 1-кратним розбавленням ВГ; б) з 2-кратним розбавленням ВГ.

2) частковопотокових тунелів, які поділяються на мінітунелі (мають діаметр і довжину: $D_{MT} = 7,5 \dots 12$ см, $L_{MT} = 10 \cdot D_{MT}$) та мікротунелі (мають

діаметр і довжину: $D_{\text{МКТ}} = 2,5 \dots 4$ см, $L_{\text{МКТ}} = 10 \cdot D_{\text{МКТ}}$) (рис. 2); 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].

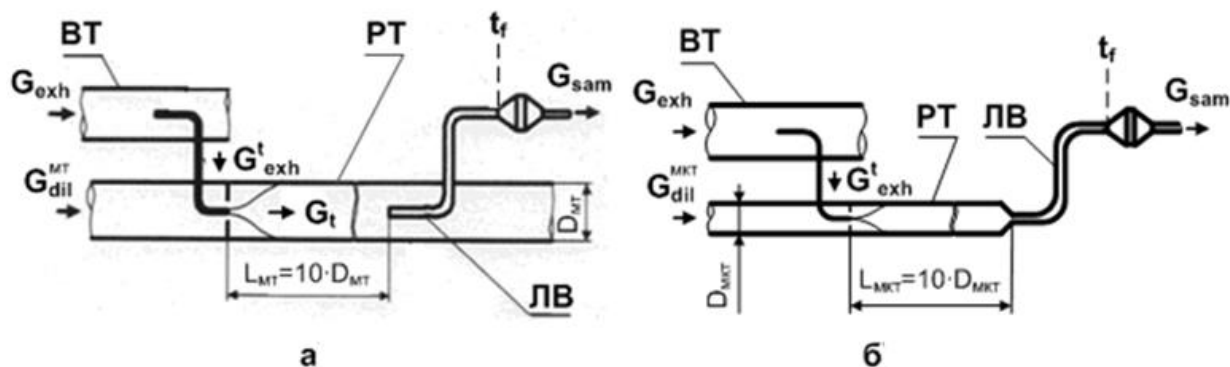


Рисунок 2 – Принципові схеми частковопотокових тунелів:

а – мінітунелю; б – мікротунелю.

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

Для визначення середньоексплуатаційного масового викиду ТЧ – РМ проводяться випробування дизеля за спеціальними випробувальними циклами, які складаються з нормованих режимів роботи двигуна з заданими

значеннями числа обертів колінчастого валу – n , навантаження – L , вагового фактору – WF (враховує відносний час роботи дизеля на режимі в процесі експлуатації) та тривалості випробувань – τ (табл. 1).

Таблиця 1 – Режими циклу ESC (R-49) для випробувань дизелів вантажних автомобілів і автобусів

№ _{реж}	n	$L, \%$	WF	$\tau, \text{хв}$
1	хол. хід	-	0,15	4
2	A	100	0,08	2
3	B	50	0,10	2
4	B	75	0,10	2
5	A	50	0,05	2
6	A	75	0,05	2
7	A	25	0,05	2
8	B	100	0,09	2
9	B	25	0,10	2
10	C	100	0,08	2
11	C	25	0,05	2
12	C	75	0,05	2
13	C	50	0,05	2

Примітка. Значення A , B та C визначаються за формулами:
 $A = n_{lo} + 0,25 \cdot (n_{hi} - n_{lo})$; $B = n_{lo} + 0,50 \cdot (n_{hi} - n_{lo})$; $C = n_{lo} + 0,75 \cdot (n_{hi} - n_{lo})$;
де n_{lo} – найменше число обертів, при якому досягається 50% заявленої ефективної потужності дизеля – P ; n_{hi} – найбільше число обертів, при якому досягається 75% від P .

За результатами випробувань дизеля за циклом визначають показник РМ шляхом проведення наступних обчислень:

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

де PM_{mass} – середній за цикл масовий викид ТЧ, г/год;

P – середня за цикл ефективна потужність дизеля, кВт;

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

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 випробувань 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 (для частковопотоккових тунелів визначається як добуток коефіцієнту розбавлення ВГ – q_i на масову витрату ВГ – G_{exhi} , кг/год);

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

де P_i – ефективна 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 вала двигуна на i -му режимі, хв^{-1} ;

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

P_{auxi} – потужність допоміжного обладнання на i -му режимі, 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} .

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. 3), 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;

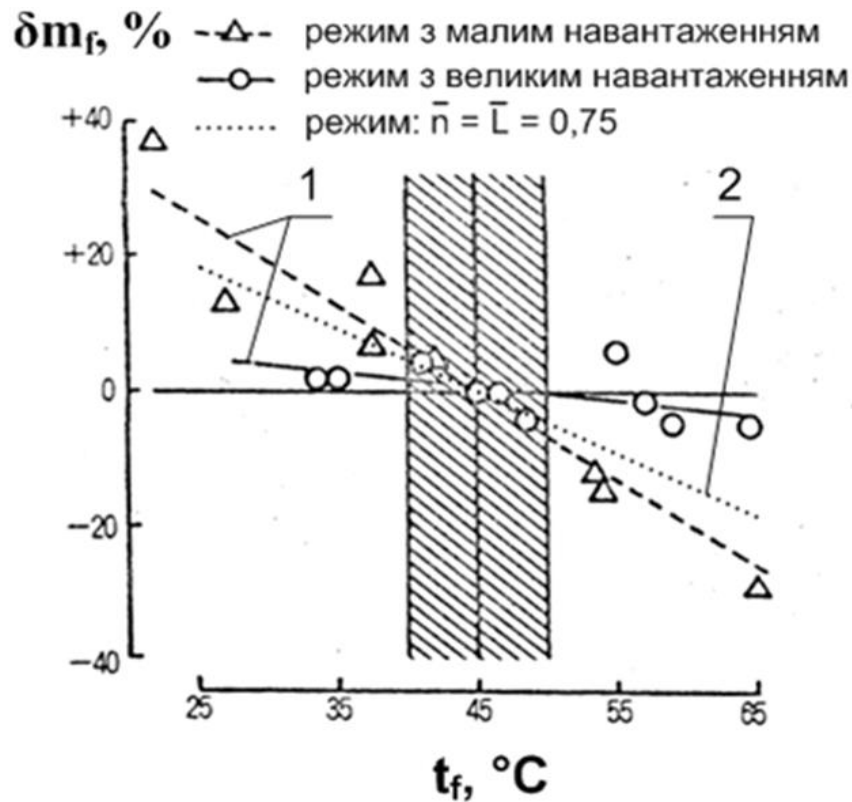


Рисунок 3 – Експериментальні дані щодо впливу температури проби t_f на контрольований масовий викид ТЧ m_f :

1 – результати зарубіжних авторів [6]; 2 – результати вітчизняних авторів [10].

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

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

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. 3 – $t_{f0} = 45^\circ\text{C}$);

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).

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОБИ РОЗБАВЛЕНИХ ВГ В ТУНЕЛІ – t_f

В моделі використовуються наступні вихідні данні.

Геометричні характеристики системи розбавлення ВГ:

d_t – діаметр тунелю (або d_{t1} і d_{t2} – діаметри первинного та вторинного тунелів при 2-кратному розбавленні ВГ), м;

l_t – довжина тунелю (або l_{t1} і l_{t2} – довжини первинного та вторинного тунелів), м;

d_{tp} – діаметр трубопроводу транспортування проби від первинного до вторинного тунелю при 2-кратному розбавленні ВГ (ТП), м;

d_{sam} – діаметр трубопроводу лінії відбору проб ТЧ (ЛВ), м;

l_{sam} – довжина трубопроводу ЛВ від пробовідбірника до фільтру, м.

Газодинамічні характеристики системи розбавлення ВГ:

G_t – масова витрата потоку в тунелі (або G_{t1} і G_{t2} – масові витрати потоків у первинному та вторинному тунелях), кг/с;

G_{exh} – масова витрата повного потоку ВГ, що потрапляють у еталонний тунель (або G_{exh}^t – масова витрата частки ВГ, що потрапляють у частковопоточний тунель), кг/с;

G_{sam} – масова витрата потоку у ЛВ, кг/с;

t_{exh} – температура ВГ на вході в тунель, °С;

t_{dil} – температура розбавляючого повітря, °С.

Залежності від температури фізичних властивостей робочого тіла, в якості якого розглядається повітря [11]:

а) щільності, кг/м³:

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T} = \frac{353,2}{T},$$

де $\rho_0 = 1,293$ кг/м³, $T_0 = 273,15$ К – щільність та абсолютна температура робочого тіла при н.у.; T – фактична температура робочого тіла, К;

б) теплопровідності, Вт/(м·К):

$$\lambda = 24,1 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,82},$$

в) кінематичної в'язкості, м²/с:

$$\nu = 1,33 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,683},$$

г) температурного коефіцієнту об'ємного розширення:

$$\beta = \frac{1}{T}.$$

В основі математичної моделі лежить рівняння теплового балансу процесу теплообміну нагрітого газу в циліндричному трубопроводі з навколишнім повітрям (рис. 4) [11]:

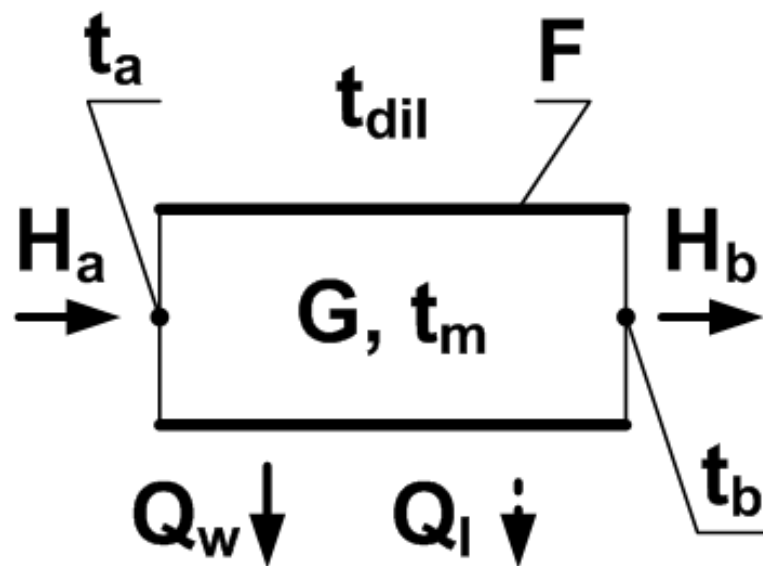


Рисунок 4 – Розрахункова схема процесу теплообміну між нагрітими газами в трубопроводі та навколишнім середовищем

$$H_a = H_b + Q_w + Q_l, \quad (7)$$

де H_a, H_b – ентальпії газового потоку на вході та виході трубопроводу;

Q_w – тепловий потік, що передається через стінку трубопроводу внаслідок теплопередачі;

$Q_l = r \cdot H_a$ – теплові втрати на елементах конструкції лінії відбору проб в місцях установки фланцевих з'єднань та шарових кранів (коефіцієнт пропорційності r визначається експериментально за формулою $r = 1 - (H_b - Q_w)/H_a$);

$$H_a = c_p \cdot G \cdot (T_a - T_{dil}); H_b = c_p \cdot G \cdot (T_b - T_{dil}),$$

де $c_p = 1005$ Дж/(кг·К) – середня ізобарна теплоємність у робочому діапазоні варіювання температур робочого тіла у тунелі;

G – масова витрата потоку в трубопроводі протікання робочого тіла, кг/с;

T_a , T_b та T_{dil} – відповідно: абсолютні початкова і кінцева середньомасові температури потоку та температура повітря навколо трубопроводу, К;

$$Q_w = (T_m - T_{dil}) \cdot F \cdot k,$$

де T_m – середня абсолютна температура газового потоку в тунелі (визначається, як середньоарифметичне з T_a і T_b), К;

F – площа поверхні трубопроводу, через яку передається теплота, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{(\alpha_t)^{-1} + (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})^{-1}} = \frac{\alpha_t \cdot (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})}{\alpha_t + \alpha_{wc} + \alpha_{wr}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки трубопроводу, Вт/(м²·К);

α_{wc} , α_{wr} – коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої стінки трубопроводу при конвективному та променистому теплообміні, Вт/(м²·К).

Для розбавляючих тунелів коефіцієнт α_t визначається за емпіричною залежністю [10]:

$$\alpha_t = 0,037 \cdot \frac{\lambda}{d_t^{0,22}} \cdot \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0,78} \cdot \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-0,28} \cdot \left(\frac{k_t}{k_{t0}} \right)^{0,48} \cdot \frac{f(k_t)}{f(k_{t0})},$$

де q – коефіцієнт розбавлення ВГ;

$k_t = T_h/T_c$ – температурний коефіцієнт (T_h , T_c – абсолютні температури нагрітого та холодного потоків, К);

$k_1 = l_t / (10 \cdot d_t)$ – відносна довжина тунелю;

$q_0 = 5$, $k_{t0} = 1,27$, $k_{l0} = 1,0$, $f(k_1)$ – функція:

$$f(k_1) = -33,0 + 341 \cdot k_1 - 421 \cdot k_1^2 + 163 \cdot k_1^3.$$

В результаті перетворення рівняння теплового балансу (7) отримано основну розрахункову формулу, для визначення температури газового потоку в кінці трубопроводу протікання розбавлених ВГ – t_b :

$$t_b = (1 - r) \cdot (t_a - t_{dil}) - \frac{(t_m - t_{dil}) \cdot F \cdot k}{c_p \cdot G} + t_{dil}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

де t_a – початкова середньомасова температура потоку, $^\circ\text{C}$.

Оскільки величина t_m на початку обчислень невідома, то визначення температури t_b здійснюється методом послідовних наближень. При цьому визначається приблизне значення величини t_b за умови $t_m = t_a$, яке уточнюється в результаті використання формули (8) до тих пір, поки різниця між уточненим та попереднім значеннями t_b не буде меншою за $\pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ (для цього достатньо 3-4 уточнюючих обчислень).

Послідовне обчислення кінцевих температур газових потоків у всіх трубопроводах системи розбавлення ВГ за встановленим алгоритмом (рис. 5) дозволяє визначити температуру проби перед фільтром – t_f (на рис. 5 нижні індекси у величин G , t_a , t_b і F , взяті у дужки, позначають трубопровід, через який протікають розбавлені ВГ: t_1 – первинний тунель, t_p – ТП, t_2 – вторинний тунель, sam – ЛВ).

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТУЮЧОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ ПОКАЗНИКА РМ – δPM

Математична модель передбачає визначення величини δPM , як суми її інструментальної – δPM_{in} та методичної – δPM_t складових:

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

Величина δPM_{in} визначається за допомогою залежності для обчислення похибки результату непрямих вимірювань:

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

де y – величина, яка вимірюється непрямим 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.

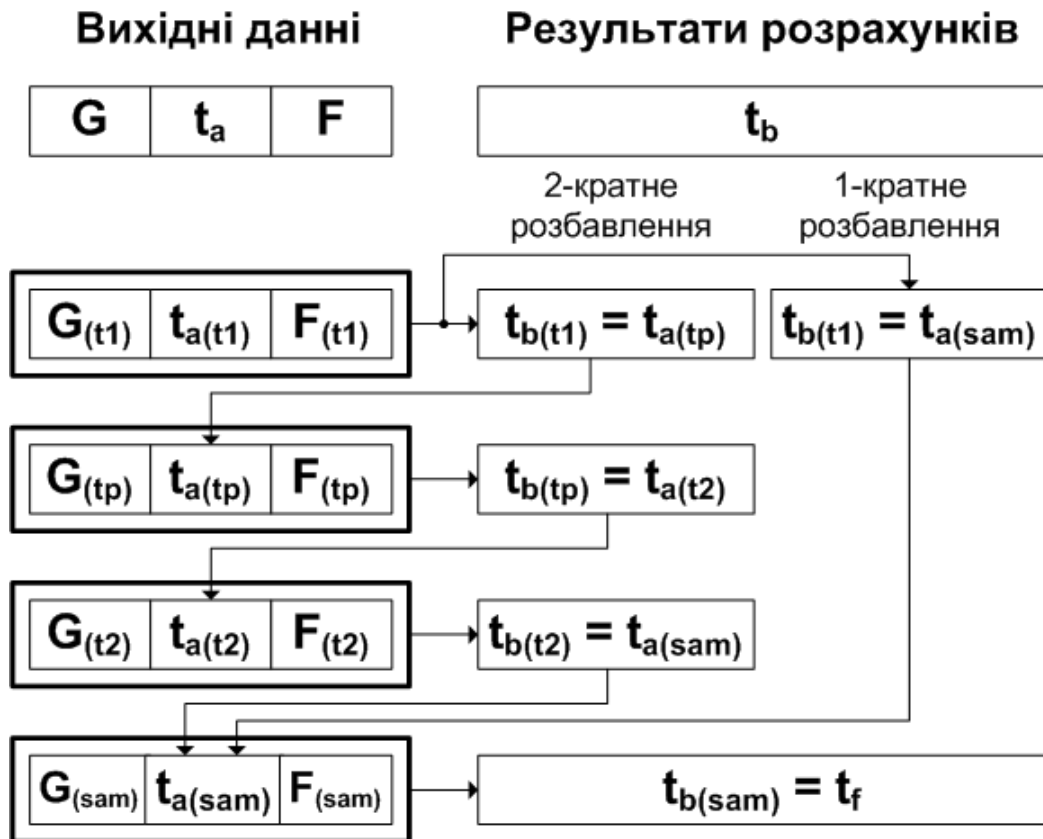


Рисунок 5 – Алгоритм визначення температури t_f

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 $t_{dil} = 20^\circ \text{C}$, $t_{f(max)} = 52^\circ \text{C}$:

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

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

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

Для визначення величин δm_{fi}^{tf} використовується емпірична залежність, тип якої обрано з врахуванням результатів попередніх досліджень (див. рис. 3):

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

де $k_{tfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$ – коефіцієнт пропорційності, який є функцією відносних числа обертів – \bar{n}_i та навантаження – \bar{L}_i :

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

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 двигуна на холостому ходу і режимі номінальної потужності, відповідно;

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

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

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОБИ В МІНІ- ТА МІКРОТУНЕЛЯХ

Дослідження проведені за критерієм відносного відхилення результатів вимірювань показника РМ часковопоточною та еталонною системами – δPM_* . Визначення цієї величини здійснювалось за формулою

$$\delta PM_* \approx \sqrt{\delta PM_0^2 + \delta PM_t^2} \quad (9)$$

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

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

На основі результатів екологічних випробувань дизелів 1Ч12/14 (оснащеного мінітунелем МТ-1) та 4ЧН12/14 (оснащеного мікротунелем МКТ-2 [12]) (рис. 6) за циклом ESC за допомогою вищенаведених математичних моделей та формули (9) проведено розрахункові дослідження:

- абсолютних відхилень температур проб в повнопотоковій системі (з діаметром $D_{пт} = 46$ см) від аналогічних температур в міні- ($D_{мт} = 10$ см) та мікротунелі ($D_{мкт} = 3$ см): $\Delta t_{fi}^{MT} = t_{fi}^{пт} - t_{fi}^{MT}$, $\Delta t_{fi}^{MKT} = t_{fi}^{пт} - t_{fi}^{MKT}$ (верхній індекс вказує на тип тунелю);

- методичних похибок вимірювань масових викидів ТЧ – δm_{tfi}^{MT} та δm_{tfi}^{MKT} (які виникають внаслідок наявності відхилень Δt_{fi}^{MT} та Δt_{fi}^{MKT}) та показника РМ – δPM_{tf}^{MT} та δPM_{tf}^{MKT} .

- результуючих похибок тунелів – δPM та відносних відхилень δPM_* .

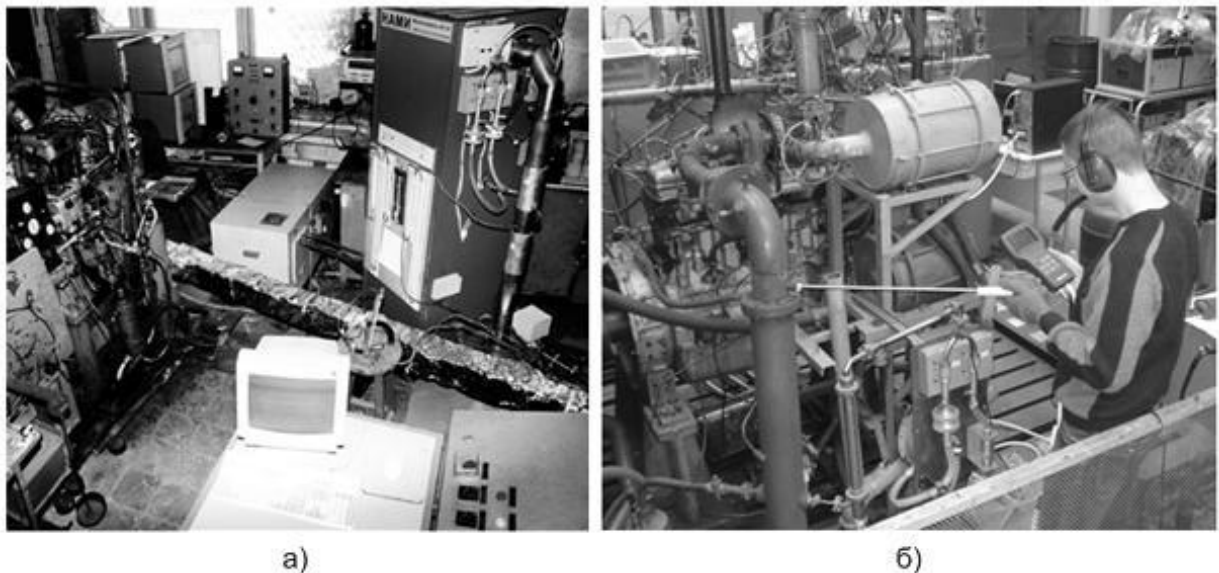


Рисунок 6 – Моторні випробувальні стенди дизелів:

а) 1Ч12/14 з мінітунелем МТ-1; б) 4ЧН12/14 з мікротунелем МКТ-2.

Результати проведених досліджень свідчать про наступне (рис. 7, 8, табл. 2).

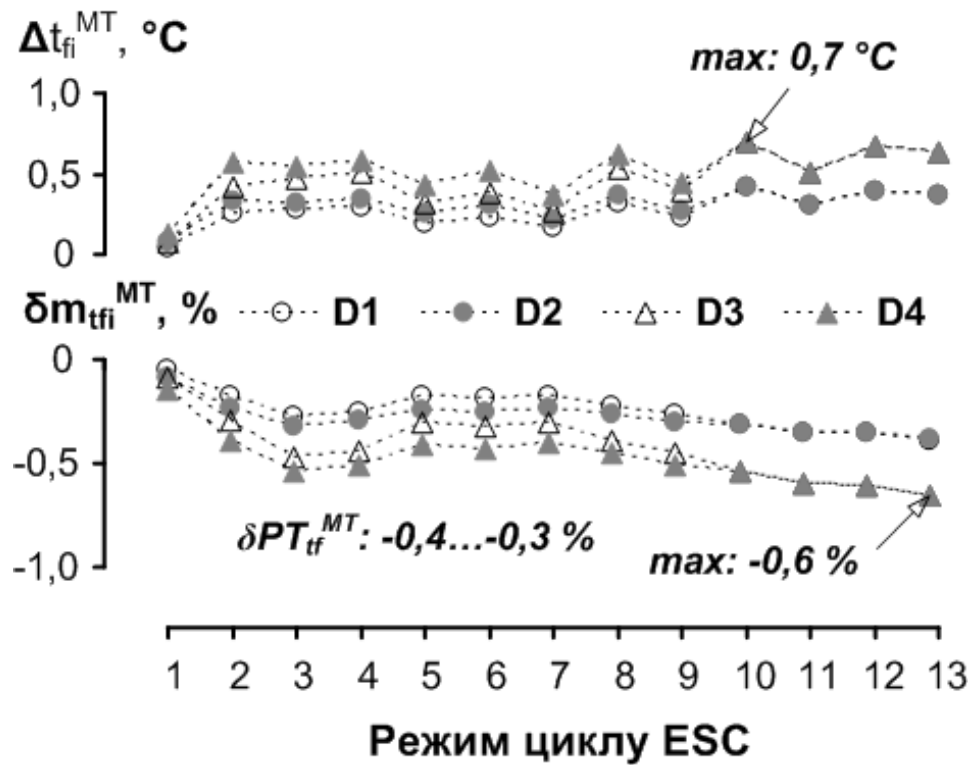


Рисунок 7 – Результати оцінювання величин Δt_{fi}^{MT} , δm_{tfi}^{MT} та δPM_t^{MT}

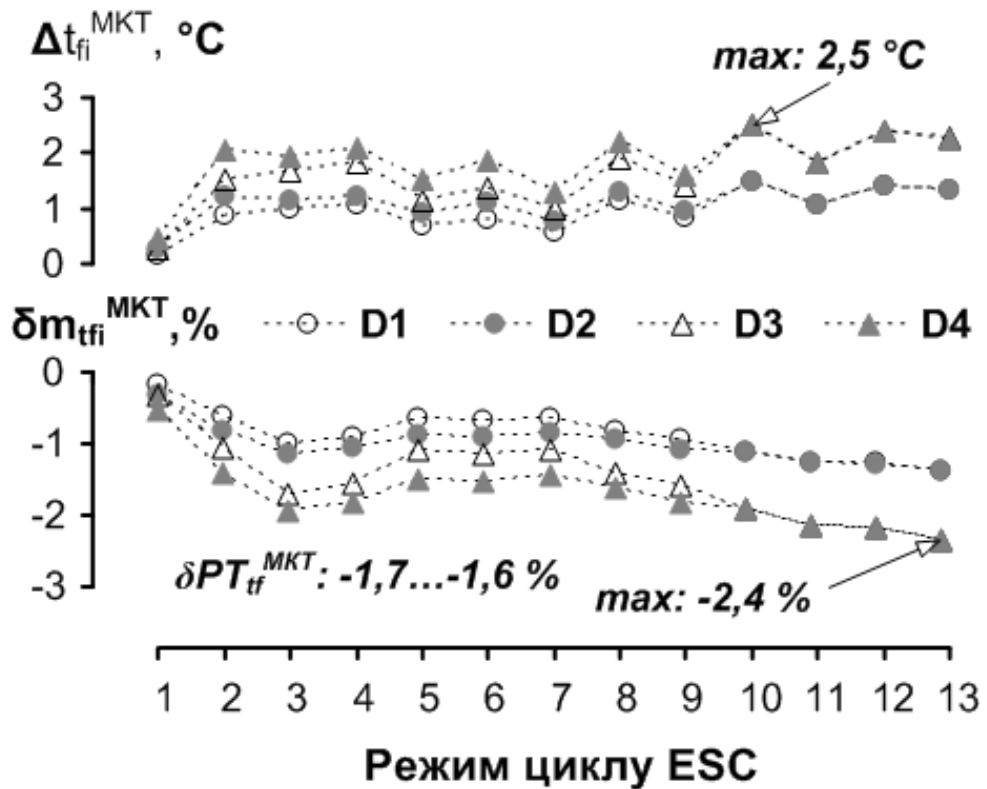


Рисунок 8 – Результати оцінювання величин Δt_{fi}^{MKT} , δm_{tfi}^{MKT} та δPM_t^{MKT}

Таблиця 2 – 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
$\delta PM_*, \%$	2,0	2,6	2,9	2,5	5,0	3,9	4,7	3,7	6,3	5,2	6,0	5,1

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 в мінітунелі – не потрібно, а в мікротунелі – є доцільним для забезпечення потрібної точності вимірювань РМ.

ВИСНОВКИ

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

частковопотокових тунелів, емпіричні залежності, що характеризують ступінь впливу температури проби в тунелі на точність вимірювань масових викидів ТЧ на різних режимах роботи дизеля.

2. Розроблено математичні моделі для визначення: температур проби розбавлених повітрям ВГ в тунелях різних типів, результуючої похибки визначення середньоексплуатаційного викиду ТЧ - показника РМ з врахуванням впливу температури проби в тунелі на точність вимірювань РМ.

3. На основі результатів випробувань дизелів 1Ч12/14 та 4ЧН12/14 за циклом ESC та розроблених математичних моделей 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, які складають -1,6 ... -1,7 %. В мінітунелі відповідні похибки є не суттєвими і дорівнюють -0,3 ... -0,4 %, тому потреби в регулюванні температури проби в цій системі немає.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lianga Z. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS / Z. Lianga, J. Tian, S. Zeraati Rezaeia, Y. Zhanga et al. // School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, UK, 2015. – 31 p.

2. Редзюк А.М. Щодо визначення масових викидів забруднюючих речовин двигунами колісних транспортних засобів / А.М. Редзюк, О.А. Клименко, О.В. Кудренко // Автошляховик України, 2012. – № 4 (228) – С. 2–7.

3. Foote E. Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement / E. Foote, M. Maricq, M. Sherman, D. Carpenter et al. // SAE Technical Paper № 2013-01-1567, 2013. – 10 p.

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

5. Alozie, N. Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Measurement Using a Mixing Tube Diluter / N. Alozie, D. Peirce, A. Lindner, W. Winklmayr et al. // SAE Technical Paper № 2014-01-1568, 2014. – 14 p.

6. N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. SAE Techn. Pap. Ser. №890181, 1989. – 11p.

7. H. Nagano. Measurement of Unregulated Exhaust Emissions from Heavy Duty Diesel Engines with Mini-Dilution Tunnel. SAE Techn. Pap. Ser. №900643, 1990. – 10p.

8. Smart Sampler PC SPC 472. PC program for SPC 472 control. – AVL, List GmbH Graz, Austria, 1993. – 76 p.

9. Russel R. Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates / R. Russel // SAE Techn. Pap. Ser. №931190, 1993. – 12 p.

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

11. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача / А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев. – М.: Высшая школа, 1964. – 458 с.

12. Polivyanchuk A. Effectiveness evaluation of the measuring system with a microtunnel MKT-2 for ecological diagnosis of diesel locomotives / A. Polivyanchuk, O. Kaslin, E. Skuridina // Двигуни внутрішнього згорання, 2018. – № 2. – С. 72–76.