

УДК 621.43.068

А. П. ПОЛИВ'ЯНЧУК, д-р техн. наук, проф.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна

e-mail: apmail@meta.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ГАЗОВОЇ ПРОБИ В СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ДВИГУНІВ

Мета. Підвищення точності систем екологічного діагностування транспортних двигунів – тунелів при визначенні одного з основних показників токсичності відпрацьованих газів двигуна – масового викиду твердих частинок. **Методи.** Математичне моделювання, експериментальні дослідження, розрахунковий експеримент, аналіз і синтез інформації. **Результати.** Проаналізовано технологію вимірювання масового викиду твердих частинок, класифікацію тунелів, вплив температури газової проби перед фільтром для відбору твердих частинок на точність тунелів. Розроблено математичну модель теплового стану проби в тунелі. Досліджено температурні режими відбору проб в еталонному – повнопоточковому та альтернативних – міні- та мікро- тунелях. **Висновки.** Експериментально підтверджено придатність розробленої математичної моделі для визначення температур газових проб в різних тунелях при різних режимах випробувань двигунів. Встановлено, що температурний режим відбору проб в мінітунелі не потребує корекції, а в мікротунелі його потрібно регулювати та встановлювати відповідним еталонному тунелю.

Ключові слова: екологічне діагностування, двигун, відпрацьовані гази, тверді частинки, проба, тепловий стан

Polivyanchuk A. P.

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

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL STATE GAS SAMPLES IN THE ENVIRONMENTAL DIAGNOSIS SYSTEMS OF VEHICLE ENGINE

Purpose. Improving the accuracy of ecological diagnostic systems of transport engines – tunnels in the determination of one of the main indicators of toxicity engine exhaust gases - the mass emissions of particulate matter. **Methods.** Mathematical modeling, experimental studies, computational experiment, analysis and synthesis of information. **Results.** Analyzed: measuring technology for the mass emission of particulate matter, the tunnel classification, the effect of temperature of the sample gas before the filter for particulate sampling on the accuracy of the tunnels. Developed a mathematical model of the thermal state of the sample in the tunnel. Investigated the temperature sampling modes in the standard - full flow and alternative - mini- and micro-tunnels. **Conclusions.** Experiments confirmed the suitability of the developed mathematical model to determine the temperature of gas samples in different tunnels for different engine test modes. It is found that the temperature in the sampling mode minitunnel requires no correction, and it is necessary to adjust mikrotunnel and tunnel set corresponding to the reference.

Keywords: environmental diagnostics, engine, exhaust gases, particulate matter, sample, thermal state

Поливянчук А. П.

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОЙ ПРОБЫ В СИСТЕМАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель. Повышение точности систем экологического диагностирования транспортных двигателей – туннелей при определении одного из основных показателей токсичности отработанных газов двигателя – массового выброса твердых частиц. **Методы.** Математическое моделирование, экспериментальные исследования, расчетный эксперимент, анализ и синтез информации. **Результаты.** Проанализированы: технология измерения массового выброса твердых частиц, классификация туннелей, влияние температуры газовой пробы перед фильтром для отбора твердых частиц на точность туннелей. Разработана математическая модель теплового состояния пробы в туннеле. Исследованы температурные режимы отбора проб в эталонном – полнопоточном и альтернативных – мини- и микро- туннелях. **Выводы.** Экспериментально подтверждена пригодность разработанной математической модели для определения температур газовых проб в различных туннелях при различных режимах испытаний двигателей. Установлено, что температурный режим отбора проб в минитуннеле не требует коррекции, а в микротуннеле его нужно регулировать и устанавливать соответствующим эталонному туннелю.

Ключевые слова: экологическое диагностирование, двигатель, отработавшие газы, твердые частицы, проба, тепловое состояние

Вступ

Для визначення кількості забруднюючих речовин (ЗР), які містяться у відпрацьованих газах (ВГ) транспортних двигунів використовуються спеціальні вимірювальні системи – тунелі. З метою імітації природного процесу потрапляння ВГ у атмосферу в тунелях здійснюється їх розбавлення чистим повітрям до температури, яка не перевищує точки роси для важких вуглеводнів, що містяться у ВГ – 52 °С [1].

При експлуатації тунелів слід враховувати вплив теплового стану проби розбавлених ВГ на точність вимірювань одного з основних екологічних показників двигуна – масового викиду твердих частинок (ТЧ). З метою підвищення ефективності визначення цього показника розроблено математичну модель теплового стану газової проби в тунелі та досліджено необхідність регулювання температури розбавлених ВГ у тунелях різних типів.

Об'єкт та методи досліджень

Процедура визначення масових викидів ТЧ з ВГ двигунів. Класифікація тунелів. За тверді частинки приймають весь матеріал, зібраний на спеціальному фільтруючому засобі з фторопластовою основою після пропускання крізь нього ВГ двигуна, розбавлених чистим атмосферним

повітрям у тунелі – трубопроводі з нержавіючої сталі, довжина якого у 10 разів перевищує діаметр. Згідно вимог нормативних документів [1–3] процедура визначення масових викидів ТЧ складається з 6 етапів, представлених на рис. 1.

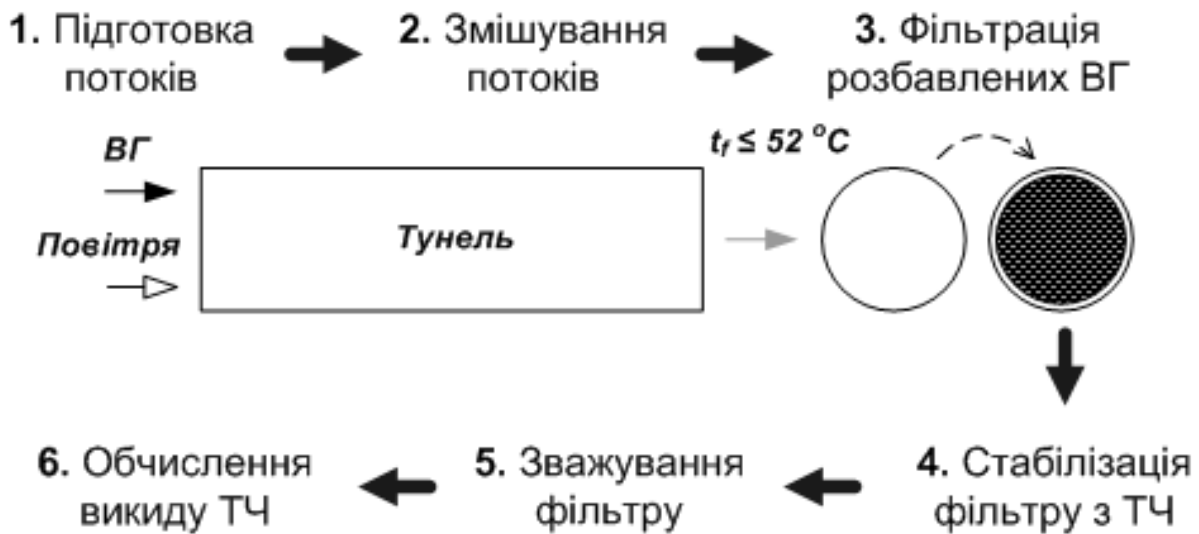


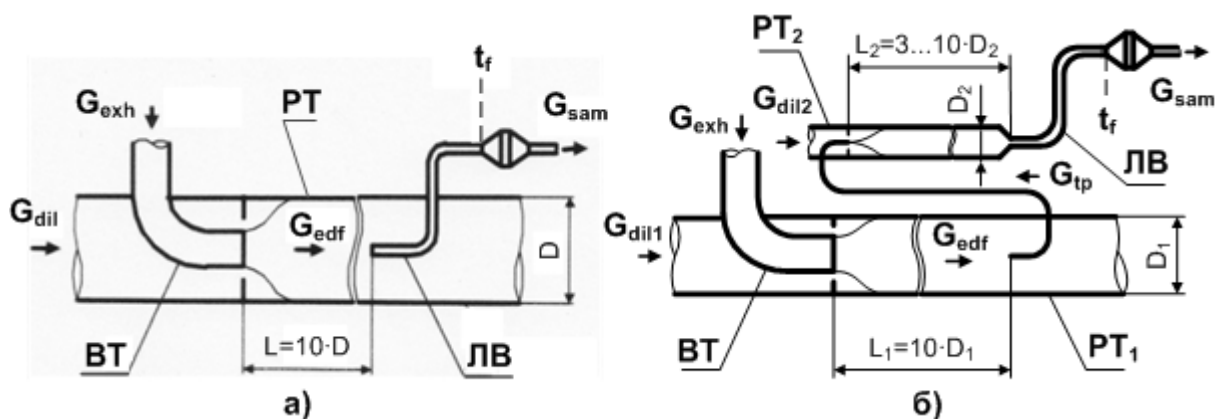
Рис. 1 – Етапи визначення нормованого показника масового викиду ТЧ з ВГ двигуна

Для виконання цієї процедури використовуються тунелі, які в залежності від кількості ВГ, що відбираються з вихлопної системи двигуна, поділяються на 2 типи – повнопотокові і частковопотокові (рис. 2, 3).

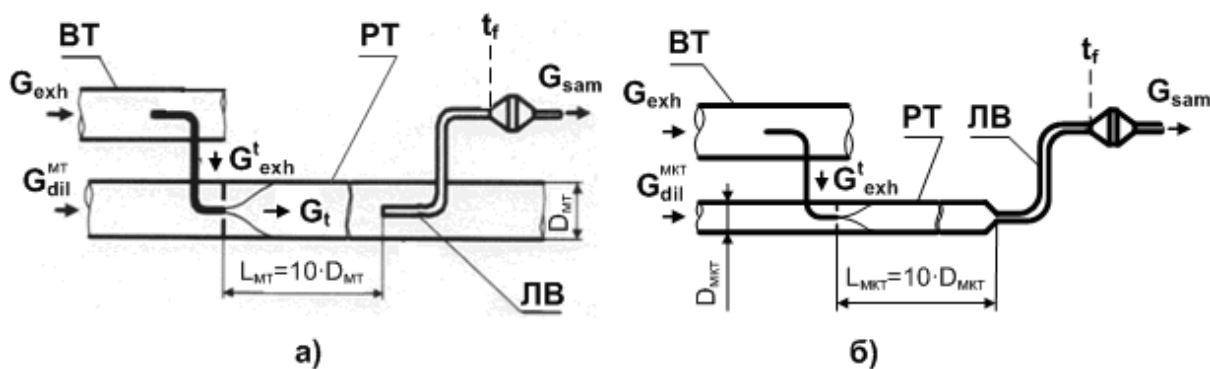
Еталонною системою для контролю масових викидів ТЧ є повнопотоковий тунель, в якому розбавляються повітрям всі ВГ двигуна. При випробуванні двигунів з масовою витратою ВГ меншою ніж 800 кг/год – автомобільних, тракторних та ін. використовуються тунелі з 1-кратним роз-

бавленням ВГ з діаметром $D \geq 46$ см; якщо витрата ВГ двигунів перевищує вказане значення – використовуються тунелі з 2-кратним розбавленням ВГ з діаметрами трубопроводів первинного та вторинного розбавлення – $D_1 = 20...46$ см, та $D_2 = 2,5...12$ см. Результати визначення масових викидів ТЧ будь-якою іншою вимірювальною системою повинні мати кореляцію з результатами еталонної системи на рівні не меншим, ніж 0,95.

Альтернативою для громіздких та



ВТ – вихлопна труба, РТ, РТ₁, РТ₂ – розбавляючі тунелі, ЛВ – лінія відбору проб
Рис. 2 – Повнопотокові тунелі з 1-кратним (а) та 2-кратним (б) розбавленням ВГ



а) мінітунель; б) мікротунель
Рис. 3 – Частковопотокові системи розбавлення ВГ

вартісних еталонних тунелів є компактні, мобільні та більш доступні за ціною частковопоточні мінітунелі з діаметрами $D_{MT} = 7,5 \dots 12$ см та мікротунелі з діаметрами $D_{MKT} = 2,5 \dots 4$ см (див. рис. 3).

Вплив теплового стану проби розбавлених ВГ на точність тунелів. При виконанні стандартної процедури вимірювань масових викидів ТЧ слід враховувати таку її особливість, як вплив температурного режиму відбору проб на масу ТЧ, що збирається на фільтрі – m_f . Зміна цього режиму зміщує рівновагу процесів конденсації-випарювання розчинної органічної фракції ТЧ в той чи інший бік. Це призводить до виникнення методичних похибок вимірювання масового викиду ТЧ – δm_f , які були оцінені в ході експериментальних досліджень закордонних та вітчизняних авторів (рис. 4):

$$\delta m_f = \frac{m_f - m_f^0}{m_f^0} \cdot 100\% = k_t \cdot (t_f - t_{f0}), \quad (1)$$

де: m_f, m_f^0 – масові викиди ТЧ, визначені з використанням альтернативного (частковопотокового) та еталонного (повнопотокового) тунелів, відповідно;

k_t – коефіцієнт пропорційності, який залежить від режиму роботи двигуна: при збільшенні потужності його величина зменшується (за рахунок зменшення частки розчинної органічної фракції у складі ТЧ);

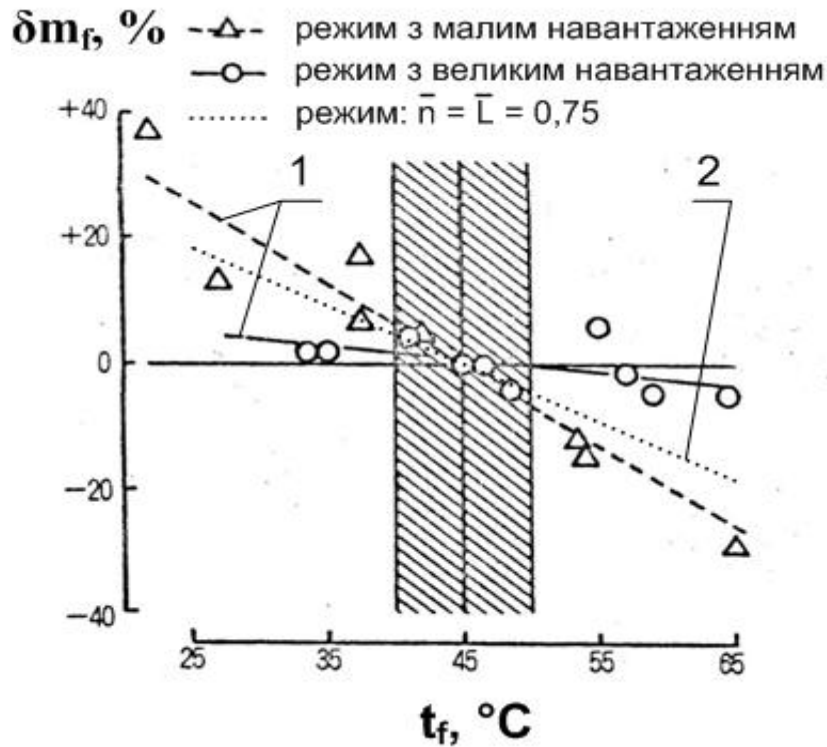
t_f, t_{f0} – температури проби перед фільтрами для відбору ТЧ в альтернативному та еталонному тунелях, відповідно.

Значення коефіцієнту k_t , визначається за формулою [5]:

$$k_t = -(1,20 + 0,148 \cdot \bar{n} - 0,552 \cdot \bar{L}), \quad (2)$$

де: \bar{n}, \bar{L} – відносні число обертів і навантаження на вал двигуна:

$$\bar{n} = \frac{n - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad \bar{L} = \frac{M_k}{M_{k(max)}}, \quad (3)$$



1 – результати досліджень фірми Mitsubishi [4]; 2 – результати досліджень автора [5]

Рис. 4 – Вплив температурного режиму відбору проб ТЧ на масовий викид ТЧ

де: n_{idle} та n_{nom} – число обертів вала двигуна на холостому ході і режимі номінальної потужності, відповідно;

$M_{k(max)}$ – максимальний крутний момент на валу двигуна при заданому n .

Математична модель теплового стану газової проби в тунелі призначена

для визначення основної характеристики температурного режиму відбору проб ТЧ в будь-якому тунелі – температури проби перед фільтром t_f . В основі моделі лежить рівняння теплового балансу процесу теплообміну нагрітого газу в циліндричному трубопроводі з навколишнім повітрям (рис. 5):

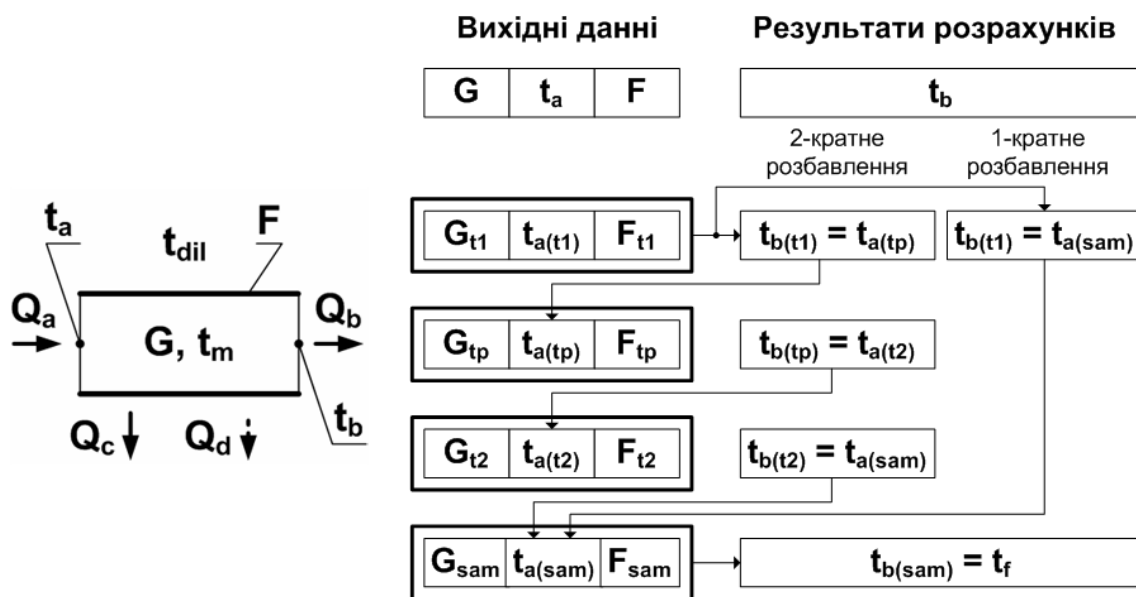


Рис. 5 – Розрахункова схема процесу теплопередачі та алгоритм визначення t_f

$$Q_a = Q_b + Q_c + Q_d, \quad (4)$$

де: Q_a , Q_b – надлишкова теплота на вході та виході трубопроводу;

Q_c – теплота, яка передається через стінку трубопроводу;

$Q_d = r \cdot Q_a$ – теплові втрати, які виникають тільки в лінії відбору проб в місцях установки фланцевих з'єднань та шарових кранів (коефіцієнт пропорційності r визначається експериментально за формулою $r = 1 - (Q_b - Q_c)/Q_a$); при цьому:

$$\begin{aligned} Q_a &= c_p \cdot G \cdot (t_a - t_{\text{дтл}}); \\ Q_b &= c_p \cdot G \cdot (t_b - t_{\text{дтл}}). \end{aligned} \quad (5)$$

де: c_p , G , t_a та t_b – питома ізобарна теплоємність (Вт/(кг·°C)), масова витрата потоку проби в трубопроводі (кг/с), початкова та кінцева середньомасові температури потоку проби, відповідно (°C);

$t_{\text{дтл}}$ – температура повітря навколо трубопроводу, °C.

Кількість тепла Q_c визначається за рівнянням:

$$Q_c = (t_m - t_{\text{дтл}}) \cdot F \cdot k, \quad (6)$$

де: t_m – середня температура потоку в тунелі

(визначається, як середньоарифметичне з t_a і t_b), °C;

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

k – коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{(\alpha_t)^{-1} + (\alpha_{\text{wc}} + \alpha_{\text{wr}})^{-1}} = \frac{\alpha_t \cdot (\alpha_{\text{wc}} + \alpha_{\text{wr}})}{\alpha_t + \alpha_{\text{wc}} + \alpha_{\text{wr}}} \quad (7)$$

Вт/м²·°C,

де: α_t – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки трубопроводу (для тунелю ця величина визначається за критеріальним рівнянням тепловіддачі, яке отримане експериментально [6]);

α_{wc} , α_{wr} – коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої стінки трубопроводу при конвективному та променистому теплообміні, які визначаються за відомими формулами [7].

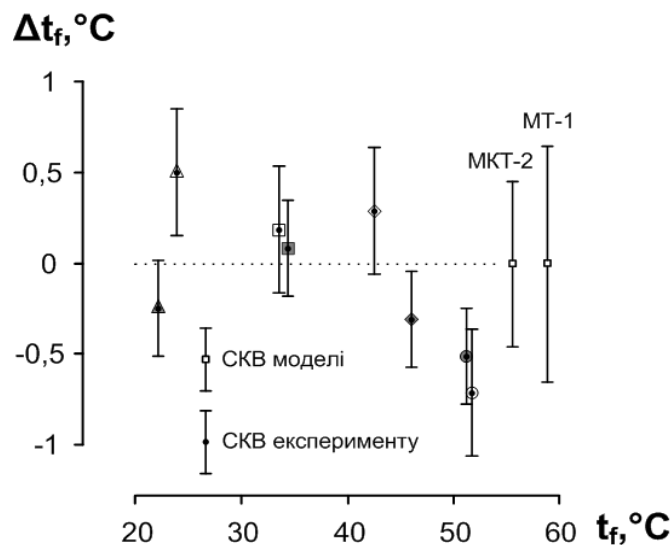
Наслідком рівняння (6) є формула розрахунку температури t_b , послідовне застосування якої з врахуванням трубопроводу протікання розбавлених ВГ дозволяє встановити температуру t_f (див. рис. 5):

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

Результати досліджень та їх обговорення

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась в ході випробувань 2-х дизельних двигунів – судового 1Ч12/14, з'єданого з мінітунелем МТ-1 [8] та автотракторного 4ЧН12/14, з'єданого з мікротунелем МКТ-2 [9–10]. Випробування дизелів проводились за Європейським ста-

ціонарним циклом ESC, який складається з 13-ти нормованих режимів роботи двигуна. На кожному режимі випробувального циклу визначались та порівнювались між собою фактичні та розрахункові значення температури проби перед фільтром для відбору ТЧ (рис. 6).



Характеристика контрольних точок

Режим циклу ESC	\bar{n}^*	\bar{L}	Тунель	
			МТ-1	МКТ-2
1	хол. хід	---	△	▲
3	$\frac{0,3}{0,47}$	0,5	◇	◆
7	$\frac{0,55}{0,66}$	0,25	□	■
10	$\frac{0,8}{0,85}$	1,0	○	●

* чисельник - 1Ч12/14; знаменник - 4ЧН12/14

Рис. 6 – Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

Результати випробувань показали, що розбіжності розрахункових та експериментальних даних є незначними та не перевищують $\pm 0,7$ °C, а середньоквадратичні відхилення моделі та відтворюваності експерименту є зіставними величинами і дорівнюють $\pm 0,25$ °C та $\pm 0,30$ °C, відповідно. Адекватність розробленої моделі підтверджено також розрахунком критерію Фішера.

Дослідження температурних режимів відбору проб в міні- та мікро- тунелях. На основі результатів випробувань

дизеля 4ЧН12/14 за циклом ESC виконано розрахунки (рис. 7, 8):

а) абсолютних відхилень температур проби перед фільтром в повнопоточній системі з діаметром $D_{пт} = 46$ см від аналогічних температур в міні- та мікротунелі з діаметрами $D_{мт} = 10$ см і $D_{мкт} = 3$ см, відповідно:

$\Delta t_f^{MT} = t_f^{пт} - t_f^{MT}$, $\Delta t_f^{MKT} = t_f^{пт} - t_f^{MKT}$ (верхній індекс вказує на тип тунелю);

б) методичних похибок вимірювань масового викиду ТЧ міні- та мікро- тунелями – δm_{tf}^{MT} і δm_{tf}^{MKT} , які виникають внаслідок наявності відхилень Δt_f^{MT} і Δt_f^{MKT} .

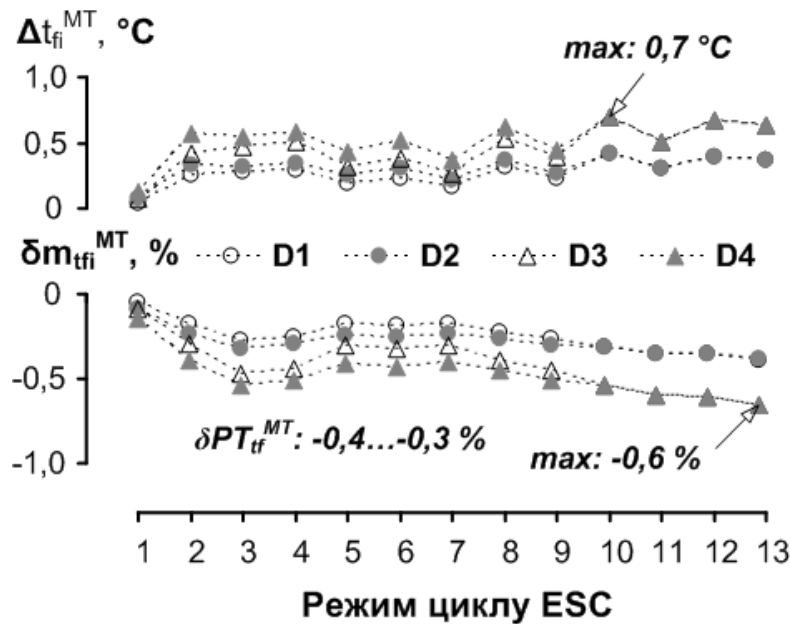


Рис. 7 – Результати оцінювання величин Δt_f^{MT} та δm_{tf}^{MT}

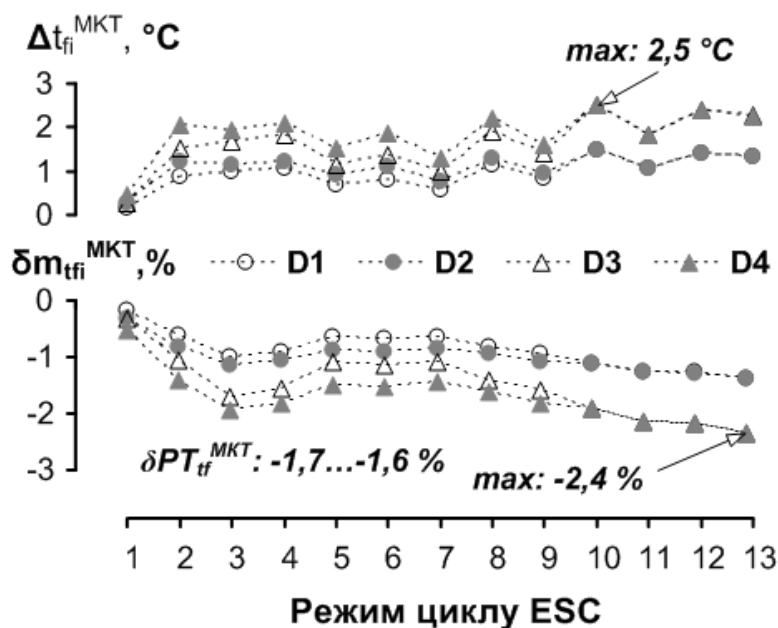


Рис. 8 – Результати оцінювання величин Δt_f^{MKT} та δm_{tf}^{MKT}

Результати досліджень свідчать про те, що в мінітунелі і еталонному тунелі значення температур t_f приблизно рівні (відхилення $\Delta t_f^{MT} \leq 0,7$ °C та похибки $\delta m_f^{MT} \leq 0,6\%$ є несуттєвими), а в мікротунелі величини

Δt_f^{MKT} та δm_f^{MKT} більш значимі і досягають, відповідно: 2,5 °C та 2,4%, тому вони повинні усуватися за рахунок регулювання температурного режиму відбору проб.

Висновки

1. Розроблено математичну модель теплового стану газової проби в системах екологічного діагностування транспортних двигунів – тунелях, яка дозволяє визначати та порівнювати між собою значення температур проби перед фільтром для відбору ТЧ – t_f на різних режимах роботи двигуна, в різних тунелях, при різних умовах розбавлення ВГ.

2. Проведено розрахункові дослідження розбіжностей температур t_f в еталонному повнопоточному та альтернатив-

них – міні- та мікро- тунелях – Δt_f^{MT} та Δt_f^{MKT} , а також виникаючих при цьому додаткових похибок вимірювань масових викидів ТЧ – δm_f^{MT} та δm_f^{MKT} . Дослідження показали, що в міні- та еталонному тунелі теплові стани проб приблизно рівні (значення $\Delta t_f^{MT} \leq 0,7$ °C, $\delta m_f^{MT} \leq 0,6\%$ є несуттєвими), а в мікротунелі відхилення температур проби Δt_f^{MKT} та похибки δm_f^{MKT} , які досягають 2,5 °C та 2,4%, відповідно, є більш значимими та повинні усуватися шляхом регулювання температури розбавлених ВГ.

Література

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. – E/ECE/TRANS/505. – 4 May 2011. – 602 p.

2. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. 109 p.

3. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996. 94 p.

4. Hirakouchi N., Fukano I., Shoji T. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / N. Hirakouchi, // SAE Technical Paper Series. 1989. № 890181. 11p.

5. Поливянчук А.П., Львов С.А. Повышение точности гравиметрического метода измерений выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизеля // Двигатели внутреннего сгорания, 2013. № 1. С. 93-97.

6. Парсаданов И.В., Поливянчук А.П. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса теплоотдачи в разбавляющем туннеле // Двигатели внутреннего сгорания, 2012. № 2. С. 96-101.

7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, М.: «Энергия», 1977. 344с.

8. Поливянчук А.П., Звонов В.А. Измерительный комплекс для определения массовых

выбросов твердых частиц дизелей. // Авиационно-космическая техника и технология. Тепловые двигатели и энергоустановки. Сб. науч. тр. ХАИ.– X., 2000. Вып. 19. С. 478–481.

9. Polivyanchuk A. P., Parsadanov I. V. Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine // Industrial technology and engineering. – Republic of Kazakhstan, 2015. №2 (15). P. 11-16.

10. Polivyanchuk A., Parsadanov I., Holkina E. Creation and experimental studies of the dynamic measuring concentrations of particulates in the exhaust gases of diesel engines // ТЕКА. – Commission of motorization and energetics in agriculture. Poland, 2015. Vol. 15, №2. P. 15–24.

Надійшла до редколегії 12.10.2016