

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

Полив'янчук Андрій Павлович



УДК 621.43.068

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК
З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків-2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Звонов Василь Олексійович Державний науковий центр Російської Федерації
Центральний науково-дослідний автомобільний і автотранспортний інститут «НАМИ», м.
Москва, Росія

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Строков Олександр Петрович,

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, м. Харків, завідувач відділу
поршневих енергоустановок

доктор технічних наук, професор

Тимошевський Борис Георгійович,

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння

доктор технічних наук, професор

Кульчицький Олексій Ремович,

ТОВ «Завод інноваційних продуктів «Концерн Тракторні Заводи», м. Володимир, Росія,
головний спеціаліст

Захист відбудеться «06» червня 2013 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.13 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «29» квітня 2013 г.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осетров О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З початком дії норм ЄВРО (1993 р.) в число нормованих екологічних показників дизеля введено середньоексплуатаційний масовий викид твердих частинок (ТЧ) з відпрацьованими газами (ВГ). Цей показник, згідно нормативних документів, має позначення *PT* від «particles» (або РМ від «particulate matter») і визначається гравіметричним методом з використанням спеціального обладнання - тунеля в ході виконання встановлених випробувальних циклів.

Серед забруднюючих речовин, що містяться у ВГ дизелів, ТЧ займають друге місце після оксидів азоту за рівнем негативного впливу на навколишнє середовище та характеризуються найбільшим показником відносної агресивності (у порівнянні з оксидом вуглецю), який дорівнює 200. З причини високої токсичності ТЧ протягом останніх 20-ти років відбувається розширення області нормування викидів цієї речовини на дизелі різних призначень. Сьогодні норми на викиди ТЧ встановлені для дизелів автомобілів, позашляхової техніки, тепловозів, морських та річкових суден. В цих умовах підвищується значимість доступності за вартістю обладнання для вимірювань показника *PT*.

З 2005 р. допустимий рівень викидів ТЧ з ВГ автомобільних дизелів за випробувальним циклом ESC становить 0,02 г/(кВт·год), що у 18 разів менше, ніж при введенні норм ЄВРО. При такому рівні викидів результуюча похибка вимірювань показника *PT* при випробуваннях - δPT є значною і досягає 25...35%. В перспективі (з введенням норм ЄВРО-6) планується подальше зниження норм на викиди ТЧ автомобільних дизелів до 0,005 г/(кВт·год). Передбачається підвищення вимог щодо масової кількості ТЧ у ВГ дизелів позашляхової техніки, тепловозів, морських та річкових суден. Оскільки δPT є основним показником, який визначає придатність гравіметричного методу для контролю малих рівнів викидів ТЧ з ВГ дизелів, важливо розробити наукові основи і реалізувати практичні заходи щодо його зменшення.

Таким чином в умовах збільшення області нормування викидів ТЧ від дизелів різних призначень і зменшення допустимих рівнів цих викидів потребує розв'язання актуальна проблема створення науково-практичних основ гравіметричних вимірювань нормованого показника *PT*, які забезпечують потрібну точність та дозволяють оснастити доступними за вартістю тунелями організації, які проводять сертифікацію, дослідницькі випробування та експлуатацію дизелів в Україні і в інших країнах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Здобувач, як відповідальний виконавець, проводив дослідження по фундаментальних та прикладних НДР МОН України: „Розробка теоретичних основ створення універсальних, високоточних систем екологічного діагностування двигунів внутрішнього згоряння” (ДР № 0105U000258); „Розробка експериментального зразку вимірювального комплексу з мікротунелем для екологічного діагностування дизельних двигунів” (ДР №0108U000163); „Розробка динамічного високоточного методу вимірювань масових викидів дизельних твердих частинок та його метрологічного забезпечення” (ДР № 0111U000038), а також був виконавцем НДР «Розроблення гальваноплазменої технології обробки поршнів для поліпшення екологічних показників автотракторних дизелів» (ДР № 0107U0009706, НТУ «ХП»).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення науково-практичних основ гравіметричних вимірювань викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів, які забезпечують підвищення точності та зменшення вартості тунелів.

Для досягнення цієї мети сформульовані та вирішені наступні задачі:

- аналіз сучасної технології гравіметричних вимірювань викидів ТЧ з ВГ дизелів та можливостей її удосконалення;
- створення теоретичних основ забезпечення потрібної точності вимірювань малих рівнів викидів ТЧ з ВГ дизелів;
- розробка заходів щодо зменшення вартості розбавляючих тунелів;
- створення методик та експериментальних установок для досліджень точності тунелів та експериментального відпрацювання заходів щодо зменшення їх вартості;

- проектування, виготовлення та експериментальне відпрацювання макетних зразків частковопоточних систем контролю викидів ТЧ з ВГ дизелів;
- проведення експериментальних досліджень заходів, що дозволяють підвищити точність та зменшити вартість тунелів;
- виконання розрахункових досліджень з визначення необхідності використання регулювання температури проби в міні- та мікротунелях, результуючої похибки вимірювань показника PT (δPT) та значимості її складових;
- апробація і впровадження у практику розроблених рекомендацій та обладнання.

Об'єкт дослідження – процес визначення масових викидів твердих частинок, які містяться у відпрацьованих газах дизелів, відповідно до вимог нормативних документів.

Предмет дослідження – точність та вартість обладнання для вимірювань викидів твердих частинок - тунелів.

Методи дослідження. При вирішенні задач дисертаційної роботи використовувались методи: аналіз та синтез інформації – при аналізі технології гравіметричних вимірювань викидів ТЧ та можливостей її удосконалення; математичне моделювання – при дослідженні температурних полів у системах розбавлення ВГ та результуючої похибки δPT ; методи теорії подібності – при розробці та дослідженні процесу тепловіддачі в тунелі; планування експерименту – при дослідженні процесу тепловіддачі в тунелі та методичних складових похибки δPT ; експериментальні дослідження – при встановленні критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі, визначенні умов ізокінетичного відбору ВГ з вихлопної труби, встановленні залежностей для оцінювання методичних складових похибки δPT ; розрахункові дослідження – при обґрунтуванні доцільності використання компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ, дослідженні необхідності регулювання температури проби в міні- та мікротунелях, оцінюванні результуючої похибки δPT та значимості її складових.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблена математична модель утворення результуючих похибок вимірювань масових та середньоексплуатаційного викидів ТЧ, яка враховує спільний вплив на ці величини похибок вимірювального обладнання, температурного режиму відбору проб ТЧ та умов стабілізації робочого фільтру.
2. Вперше оцінено величину та значимість складових результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ, які виникають на етапах підготовки проби до аналізу та визначення маси ТЧ.
3. Створено математичну модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ, в якій вперше враховані всі можливі варіанти розбавлення відпрацьованих газів дизеля повітрям у тунелі.
4. Доведено необхідність регулювання температури розбавлених ВГ в мікротунелях для усунення невідповідностей температур проб у цих системах та в еталонних тунелях, які знижують точність вимірювань викидів ТЧ.
5. Вперше обґрунтовано доцільність використання в частковопоточних тунелях компенсаційного способу визначення масової витрати відпрацьованих газів дизеля, як більш ефективного, ніж відомі аналоги.
6. Доведено, що в мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником перепад статичних тисків між трубопроводом відбору проб та вихлопною трубою є пропорційним швидкісному напору потоку відпрацьованих газів та залежить від режиму роботи дизеля.
7. Обґрунтовано критеріальне рівняння процесу тепловіддачі в трубопроводах первинного та вторинного розбавлення ВГ повнопоточних, міні- та мікро- тунелів, яке відрізняється від відомих критеріальних рівнянь.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновані заходи з удосконалення гравіметричного методу вимірювань показника PT дозволили знизити результуючу похибку його визначення у 4,6 разів (з 37,7 % до 8,2 %).

2. Сформований в результаті аналізу нормативних документів систематизований комплекс вимог щодо обладнання, процедур випробувань та методик розрахунків викидів ТЧ від дизелів різних типів може використовуватись при створенні розбавляючих тунелів з широким спектром застосування.

3. Створені макетні зразки мобільних автоматизованих систем (мінітунеля з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунеля МКТ-2), у яких реалізовані запропоновані заходи з удосконалення гравіметричного методу вимірювання, дозволяють визначати викиди ТЧ з ВГ дизелів різних типів у відповідності до вимог міжнародних стандартів.

4. Електронне та програмне забезпечення, створені для керування системами МТ-1 та МКТ-2, доцільно використовувати при розробці промислових зразків міні- та мікротунелів вітчизняного виробництва.

5. Розроблені експериментальні установки дозволяють проводити дослідження робочих процесів у тунелях в широкому діапазоні варіювання конструктивних та режимних параметрів, що впливають на точність вимірювання показника PT .

6. Отримані експериментальні залежності для встановлення методичних похибок вимірювань показника PT , які виникають на етапах підготовки проб та стабілізації робочого фільтру, дозволяють оцінити точність визначення величини PT .

7. Рекомендоване використання поліному 2-го порядку в якості регресійної залежності викидів ТЧ від відносних числа обертів вала двигуна та навантаження забезпечує адекватне оцінювання впливу режиму роботи дизеля на ці викиди.

8. Впроваджена в НПЦ «Трансмаш» (м. Луганськ) методика визначення викидів ТЧ від тепловозних дизелів забезпечує потрібну точність і дозволяє скоротити тривалість та вартість екологічних випробувань дизелів.

9. Розроблені математичні моделі, обладнання і результати досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри екології СНУ ім. В. Даля і кафедри ДВЗ НТУ «ХПІ» та використовуються при проведенні занять зі студентами.

Особистий внесок здобувача:

- проаналізовано вимоги нормативних документів щодо процедур і обладнання для вимірювань показника PT , світовий досвід проведення таких вимірювань, можливість удосконалення технології визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів; розроблено відповідні рекомендації;

- створено математичні моделі: утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ; утворення результуючої похибки δPT ;

- розроблено компенсаційний спосіб вимірювань масової витрати ВГ в тунелі та обґрунтовано доцільність його використання;

- створено експериментальні установки і методики та проведені дослідження процесу тепловіддачі в тунелі, ізокінетичного режиму відбору ВГ, методичних складових результуючої похибки δPT ;

- спроектовані, виготовлені та випробувані на дизелях макетні зразки мінітунеля з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунеля МКТ-2;

- розроблено алгоритми роботи тунелів МТ-1 та МКТ-2, на базі яких створені електронне та програмне забезпечення цих систем;

- проаналізовано необхідність регулювання температури розбавлених ВГ в частковопоточних тунелях;

- досліджено результуючу похибку вимірювань показника PT , значимість її складових та оцінено ефективність зроблених рекомендацій;

- розроблено «Методику визначення викидів ТЧ з ВГ тепловозних дизелів» з мінімальними витратами часу на відбір проб ТЧ.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації докладались та обговорювались на: XII-XVII Міжнародних конгресах двигунобудівників (с. Рибаче, Крим, 2007-2012 рр.), Міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: XVII - «Проблеми розвитку рейкового транспорту» (м. Ялта, Крим, 2007 р.), XIV-XX - «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2006-2012 рр.), XII - «Університет и регіон»

(м. Луганськ, 2006 р.), «Університетська наука 2011» (м. Маріуполь, 2011 р.), «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобільних двигунів» (м. Київ, 2012 р.), а також на конференціях професорсько - викладацького складу кафедри екології СНУ ім. В. Даля у період 2005-2012 рр.

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 33-х друкованих роботах, з них: 23 – статті у фахових виданнях України, 2 – тези доповідей на науково-практичних конференціях і 4 патенти України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації - 311 сторінок, в тому числі: 64 рисунків за текстом, 18 таблиць за текстом, 3 таблиці на 3 окремих сторінках, список використаних джерел з 173 найменувань на 18 сторінках, 4 додатки на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі показано сутність та сучасний стан проблеми, що розглядається, обґрунтовано її актуальність; сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи; визначено об'єкт, предмет і методологію досліджень; наведені наукова новизна, практична цінність отриманих результатів та інформація про особистий внесок здобувача в результати досліджень.

Перший розділ присвячено аналізу сучасної технології гравіметричних вимірювань викидів ТЧ з ВГ дизелів і можливостей її удосконалення та розробці відповідних рекомендацій. На території країн СНД вагомий внесок у вирішення проблеми створення ефективних методів та обладнання для оцінювання і контролю викидів ТЧ від дизелів зробили вчені: Звонов В.О., Гутаревич Ю.Ф., Парсаданов І.В., Кульчицький О.Р., спеціалісти ДП «ДержавтотрансНДІпроект»: Редзюк А.М., Устименко В.С., Клименко О.А. та ін.

ТЧ (або забруднюючі зважені частинки), враховуючи процедуру вимірювання, представляють собою полікомпонентне утворення, зібране на спеціальних фільтруючих засобах після пропускання крізь них ВГ дизеля, розбавлених чистим повітрям до температури, яка не перевищує 52 °С. До складу ТЧ входять: сажа (продукт піролізу палива), розчинна органічна фракція – РОФ (вуглеводи палива та мастила, які не згоріли та сконденсувалися і адсорбувалися на поверхні сажових частинок), сульфати (солі сірчаної кислоти) та інші включення (продукти зносу, зола від присадок, тощо).

Для визначення нормованого показника PT використовується тунель – трубопровід, в якому ВГ дизеля розбавляються чистим повітрям з метою імітації природного процесу розсіювання забруднюючих речовин, що містяться у ВГ, в атмосфері. Еталонною системою контролю викидів ТЧ є повнопоточний тунель, в якому розбавляються повітрям всі ВГ дизеля: якщо їх масова витрата не перевищує 750...900 кг/год, то виконується 1-кратне розбавлення ВГ (у трубопроводі з діаметром $D \geq 46$ см і довжиною $L = 10 \cdot D$), в іншому випадку - виконується 2-кратне розбавлення ВГ (у трубопроводах: первинному – $D_1 = 20...46$ см, $L_1 = 10 \cdot D_1$; вторинному – $D_2 = 2,5...10$ см, $L_2 = 2,5...10 \cdot D_2$). Результати визначення величини PT будь-якою іншою вимірювальною системою повинні співпадати з результатами еталонного тунелю з коефіцієнтом кореляції не меншим, ніж 0,95.

Альтернативою для громіздких та вартісних (з ціною, більшою 1 млн. дол. США) еталонних тунелів є компактні, мобільні та більш доступні за ціною частковопоточні системи розбавлення ВГ (рис. 1): мінітунелі ($D_{MT} = 7,5...12$ см, $L_{MT} = 10 \cdot D_{MT}$) та мікротунелі ($D_{MKT} = 2,5...4$ см, $L_{MKT} = 10 \cdot D_{MKT}$). Серед частковопоточних систем найбільш затребуваними є: мінітунель з ізокінетичним пробовідбірником – зменшена геометрична та газодинамічна копія еталонної системи (відомі аналоги – мінітунель багатотрубного типу фірми Mitsubishi, MT 474 фірми AVL); мікротунель з диференційним способом визначення масової витрати ВГ (AVL SPC 472, Pirburg PTP 2000).

Перехід до частковопоточних систем дозволив суттєво (у 8-12 разів) знизити вартість обладнання для визначення показника PT , але вона залишається достатньо високою. Одним з шляхів подальшого зниження вартості тунелів є розробка нових способів для визначення масової витрати ВГ в тунелі, які потребують менш вартісного обладнання.

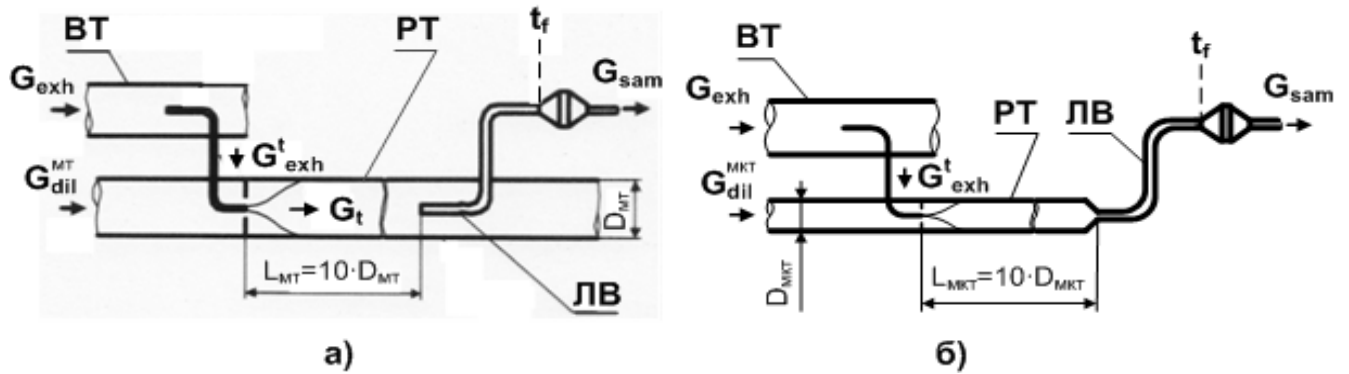


Рис. 1. Частковопоточні системи розбавлення ВГ: а) мінітунель; б) мікротунель.

Показник PT визначається в ході виконання випробувального циклу. Для автомобільних дизелів застосовується 13-ти режимний цикл ESC (від European Stationary Cycle). На кожному режимі циклу проводиться відбір проб ТЧ з ВГ, розбавлених у тунелі чистим повітрям, яке має температуру $t_{dil} = 25 \pm 5$ °C. Максимальна температура розбавлених ВГ перед фільтром для відбору ТЧ (використовується один фільтр протягом усього циклу) не повинна перевищувати 52 °C та бути меншою ніж 42 °C. За результатами випробувань проводиться розрахунок показника PT :

$$PT = \frac{PT_{mass}}{\bar{P}} = \frac{PT_{mass}}{\sum_{i=1}^{13} (P_i \cdot WF_i)} = \frac{PT_{mass}}{\sum_{i=1}^{13} \left(\left(\frac{n_i \cdot M_{ki}}{9550} - P_{auxi} \right) \cdot WF_i \right)}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}, \quad (1)$$

де PT_{mass} , \bar{P} - середні за цикл: масовий викид ТЧ і ефективна потужність дизеля; P_i , WF_i , n_i , M_{ki} та P_{auxi} - відповідно: ефективна потужність (кВт), ваговий фактор (враховує відносний час роботи дизеля на режимі в процесі експлуатації), число обертів (хв^{-1}), крутінний момент (Н·м) та потужність допоміжного обладнання (кВт) на i -му режимі;

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

де m_f - маса ТЧ, зібрана на фільтрі за цикл, мг; m_{sam} - маса проби розбавлених ВГ, яка пройшла крізь фільтр за цикл (за умови пропорційності кількості відібраної проби на кожному режимі відповідному ваговому коефіцієнту), кг; $\overline{G_{edf}}$ - середня еквівалентна масова витрата розбавлених ВГ:

$$\overline{G_{edf}} = \sum_{i=1}^{13} WF_i \cdot G_{edfi} = \sum_{i=1}^{13} WF_i \cdot (q_i \cdot G_{exhi}), \text{ кг/год}, \quad (3)$$

де q_i - коефіцієнт розбавлення ВГ на i -му режимі - відношення масових витрат розбавлених і нерозбавлених ВГ у тунелі; G_{exhi} - масова витрата ВГ дизеля на i -му режимі, кг/год.

Перед визначенням величини m_f фільтр з ТЧ попередньо витримують для стабілізації його маси в спеціальній камері або кімнаті при постійних температурі - t_{st} і відносній вологості - φ_{st} повітря (можуть знаходитися в діапазонах: $t_{st} = 22 \pm 3$ °C, $\varphi_{st} = 45 \pm 10\%$) протягом проміжку часу $\tau_{st} = 1 \dots 80$ год.

При виконанні описаної процедури в тунелі можуть підтримуватись різні режими розбавлення (dilution mode) ВГ: DM1) CVS-режим (від «Constant Volume Sampling») з постійною масовою витратою розбавлених ВГ в тунелі; до 2000 р. цей режим був основним і використовувався в еталонних тунелях; DM2) CVS-режим з повітряним охолодженням тунелю, за рахунок

якого температура перед фільтром - t_f може бути знижена на величину $\Delta t_{f(52)} = 0 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$; DM3) режим з постійним коефіцієнтом q ; DM4) режим з постійним коефіцієнтом q і повітряним охолодженням тунелю, при якому на фільтрі відбирається найбільша маса ТЧ.

При виконанні стандартної процедури вимірювань величини PT слід враховувати таку її особливість, як вплив температурного режиму відбору проб ТЧ (характеризується температурами t_{fi} , які залежать від величин t_{dil} , $t_{f(max)}$ та $\Delta t_{f(52)}$) та умов стабілізації фільтру (характеризуються величинами τ_{st} і t_{st}) на масу РОФ, а через це і масу ТЧ в цілому - m_f . Зміни t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$ та τ_{st} , t_{st} зміщують рівновагу процесів конденсації-випаровування РОФ в той чи інший бік. Варіювання цих величин в допустимих межах призводить до виникнення методичних похибок вимірювання показника PT , які утворюються на етапах пробопідготовки - δPT_{tf} та стабілізації фільтру - δPT_{st} внаслідок розходження результатів визначення m_f . Результати досліджень фахівців (рис. 2) свідчать про те, що: а) вплив температури t_f на m_f може приблизно оцінюватись лінійною залежністю, коефіцієнт пропорційності якої зменшується з ростом навантаження (оскільки при цьому зменшується доля РОФ у ТЧ); б) величина m_f зменшується пропорційно зростанню температури t_{st} та десяткового логарифму від τ_{st} за рахунок втрати маси РОФ в наслідок її випаровування.

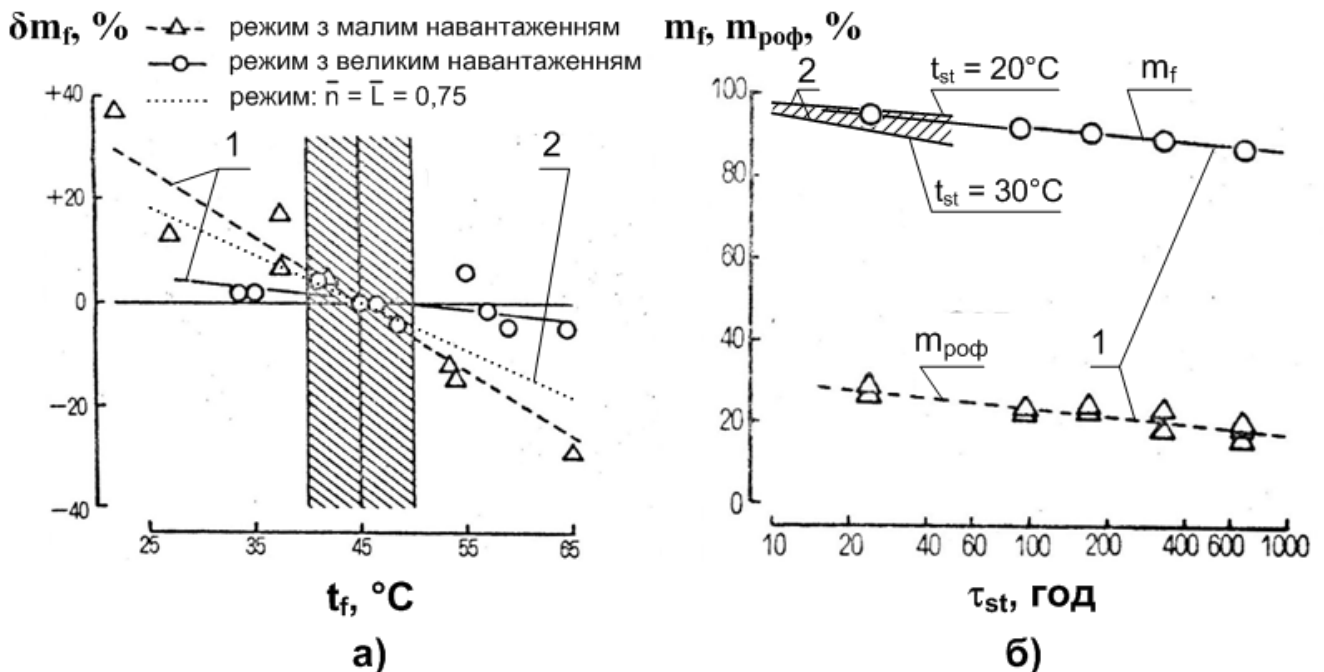


Рис. 2. Експериментальні дані про вплив величин t_f (а) і t_{st} , τ_{st} (б) на масу m_f :
1 - результати досліджень фірми Mitsubishi; 2 - результати досліджень здобувача

За час дії Правил R-49 до них внесено 5 серій поправок з удосконаленнями методу вимірювань показника PT (табл. 1).

Аналіз можливостей подальшого підвищення ефективності цього методу дозволяє зробити наступні рекомендації:

1) використання в частковопоточних тунелях компенсаційного способу вимірювань масової витрати ВГ - G_{exh}^t , для виконання якого потрібні невагісні витратоміри з низьким класом точності (рис. 3); це дозволяє зменшити вартість вимірювача коефіцієнту розбавлення ВГ;

2) використання в тунелі режиму розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом q , повітряним охолодженням тунелю і регулюванням температури проби, при якому температури t_{fi} підтримуються такими ж, як при режимі CVS в еталонному тунелі; разом з цим допустимі діапазони варіювання температур t_{dil} та $t_{f(max)}$ скорочуються в 5 разів - до інтервалів: $t_{dil} = 20 \dots 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{f(max)} = 50 \dots 52 \text{ }^\circ\text{C}$; це дозволяє зібрати на фільтрі найбільш можливу масу ТЧ та зменшити область можливих значень температур t_{fi} і, за рахунок цього, похибку δPT_{tf} ;

Заходи з удосконалення гравіметричного методу визначення величини PT

КЕ	Назва заходу	Результат заходу	Вплив на КЕ
1	Перехід від повнопоточних тунелів до мінітунелів	Зменшення ГТ у 4,5...6 разів, ПГ – у 20...35 разів	Зниження вартості тунеля у 4...5 разів
	Перехід від міні- до мікротунелів	Зменшення ГТ у 3...4 разів, ПГ – у 10...15 разів	Зниження вартості тунеля у 2...2,5 рази
2	Зменшення максимальної теплоємності потоку ВГ при переході від 13-Mode Cycle до циклу ESC; впровадження режимів розбавлення ВГ DM2-4; Підвищення допустимої швидкості фільтрації ТЧ (при переході з 2-х на 1-фільтрову схему) з 0,8 до 1,0 м/с	Збільшення m_f	Зменшення інструментальної похибки δPT_{in}
	Введення нижньої межі допустимого діапазону варіювання $t_{f(max)} - 42^\circ\text{C}$	Зменшення НР m_f на етапі ПП	Зменшення δPT_{tf}
	Зменшення допустимого діапазону варіювання t_{st} з 20-30 $^\circ\text{C}$ до 19-25 $^\circ\text{C}$	Зменшення НР m_f на етапі СФ	Зменшення δPT_{st}

Примітка. В таблиці позначені: КЕ – критерії ефективності тунелю: 1 – вартість, 2 – точність; ГТ – габарити тунелю; ПГ – продуктивність газодувки; НР – невизначеність результату вимірювань; ПП – пробопідготовка; СФ – стабілізація фільтру.

3) скорочення діапазонів варіювання параметрів процесу стабілізації робочого фільтра до інтервалів: $t_{st} = 20 \dots 22^\circ\text{C}$ (скорочений в 3 рази), $\tau_{st} = 6 \dots 8$ год (скорочений на 77 год); це дозволяє зменшити похибку δPT_{st} (при таких t_{st} і τ_{st} вона не перевищує $\pm 0,5\%$).

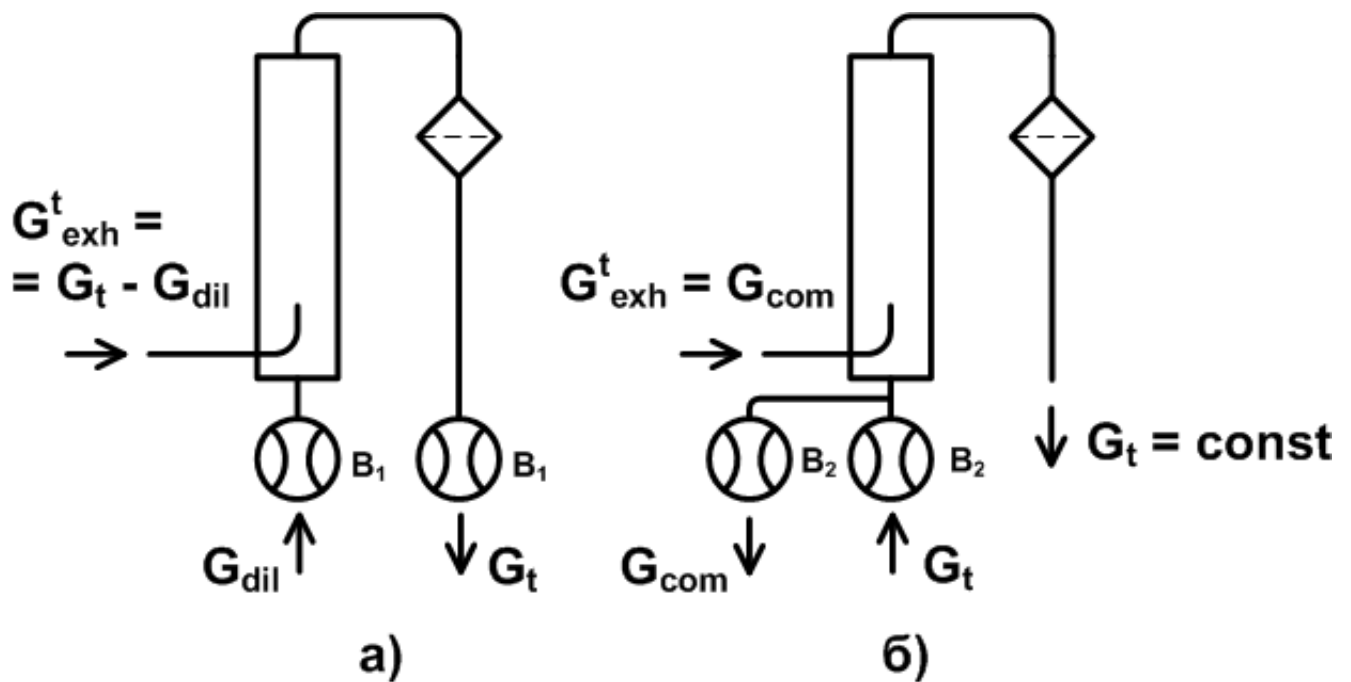


Рис. 3. Принципові схеми способів визначення G^t_{exh} : а) диференційного (AVL SPC 472); б) компенсаційного

У **другому розділі** представлені теоретичні розробки, спрямовані на підвищення точності та зменшення вартості тунелів.

Математична модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ призначена для визначення основної характеристики температурного режиму відбору ТЧ в тунелі – температури проби перед фільтром - t_f . В основі моделі лежить рівняння теплового балансу процесу теплообміну нагрітого газу в циліндричному трубопроводі з навколишнім повітрям:

$$H_a = H_b + Q_w + Q_l, \quad (4)$$

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 $r = 1 - (H_b - Q_w)/H_a$);

$$H_a = c_p \cdot G \cdot (T_a - T_{dil}); \quad H_b = c_p \cdot G \cdot (T_b - T_{dil}), \quad (5)$$

де c_p , G , T_a , T_b та T_{dil} – відповідно: середня ізобарна теплоємність (Дж/(кг·К)), масова витрата потоку в трубопроводі (кг/с), абсолютні початкова і кінцева середньомасові температури потоку та температура повітря навколо трубопроводу, (К);

$$Q_w = (T_m - T_{dil}) \cdot F \cdot k, \quad (6)$$

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:

$$k = \frac{1}{(\alpha_t)^{-1} + (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})^{-1}} = \frac{\alpha_t \cdot (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})}{\alpha_t + \alpha_{wc} + \alpha_{wr}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (7)$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки трубопроводу, α_{wc} , α_{wr} - коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої стінки трубопроводу при конвективному та променистому теплообміні, які визначаються за відомими формулами.

Для розбавляючих тунелів коефіцієнт α_t визначається за критеріальним рівнянням тепловіддачі у безрозмірному вигляді, яке являє собою функцію 4-х змінних (отримане експериментально і наведено в 4-му розділі):

$$Nu = f(Re, q, k_t, k_l), \quad (8)$$

де $Nu = \alpha_t d_t / \lambda$ - критерій Нуссельта (d_t – діаметр тунелю, м; λ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/(м·К))), $Re = \bar{v}_0 d_t / \nu$ - число Рейнольда (\bar{v}_0 - початкова середньомасова швидкість потоку, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості потоку (м²/с)); q – коефіцієнт розбавлення ВГ; $k_t = T_h/T_c$ - температурний коефіцієнт (T_h , T_c – абсолютні температури нагрітого та холодного потоків, К); $k_l = l_t/(10 \cdot d_t)$ - відносна довжина тунелю (l_t – фактична довжина тунелю).

Для лінії транспортування проби розбавлених ВГ від первинного до вторинного тунелю (при двократному розбавленні ВГ) та лінії відбору проб ТЧ коефіцієнт α_t визначається за відомими залежностями з урахуванням геометричної форми та просторового розташування цих трубопроводів.

В результаті перетворення рівняння (4) отримано формулу, послідовне застосування якої за встановленим алгоритмом (рис. 4) з врахуванням трубопроводу протікання розбавлених ВГ дозволяє встановити температуру перед фільтром - t_f .

$$t_b = (1-r) \cdot (t_a - t_{dil}) - \frac{(t_m - t_{dil}) \cdot F \cdot k}{c_p \cdot G} + t_{dil}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (9)$$

де t_b , t_a , t_m та t_{dil} – відповідно: кінцева, початкова, середня середньомасові температури потоку та температура повітря навколо трубопроводу, виражені у $^\circ\text{C}$.

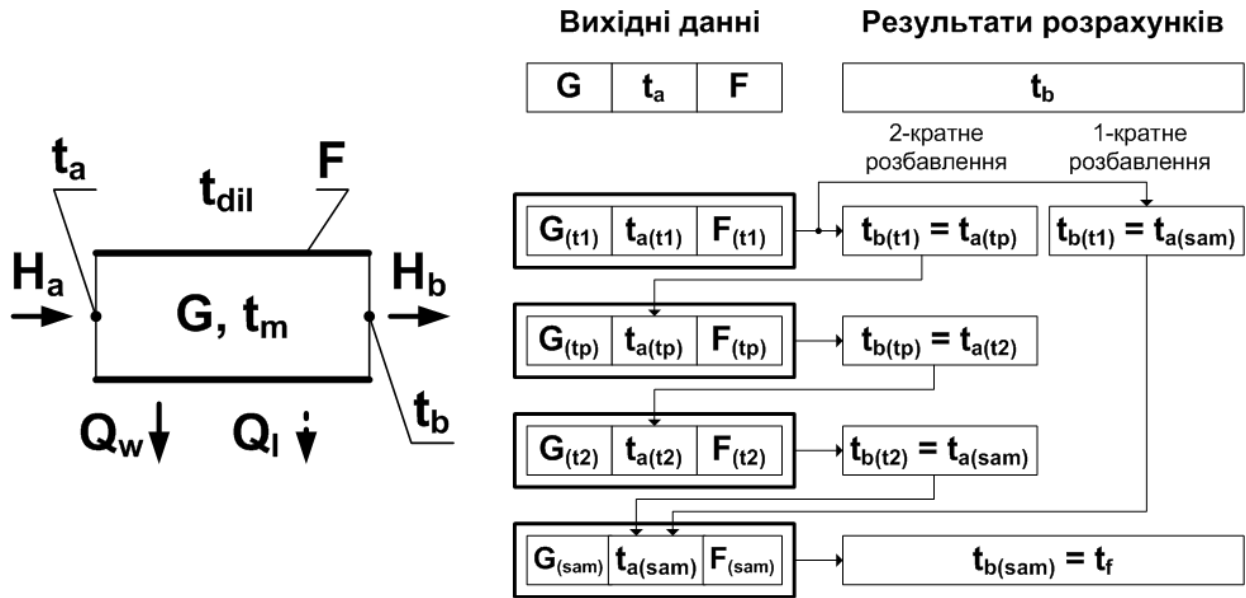


Рис. 4. Розрахункова схема процесу тепловіддачі та алгоритм визначення t_f

На рис. 4 нижні індекси у величин G , t_a , t_b і F , заключні у дужки, позначають трубопровід, через який протікає потік розбавлених ВГ: t1 – первинний тунель, tp - лінія транспортування проби, t2 – вторинний тунель, sam – лінія відбору проб ТЧ.

Математичну модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ перевірено на адекватність за критерієм Фішера F (рис. 5) в ході випробувань дизелів 1Ч12/14 та 4ЧН12/14 за циклом ESC з використанням тунелів МТ-1 та МКТ-2, описаних у 3-му розділі. На рис. 5 позначені: Δt_f – абсолютні відхилення розрахункових даних від експериментальних; СКВ – середньоквадратичні відхилення; \bar{n}_i , \bar{L}_i - відносні значення числа обертів вала двигуна та навантаження, які визначаються за формулами (16).

Математична модель утворення результуючої похибки δPT дозволяє визначити цю величину з врахуванням її інструментальної – δPT_{in} та методичних – δPT_{tf} , δPT_{st} складових

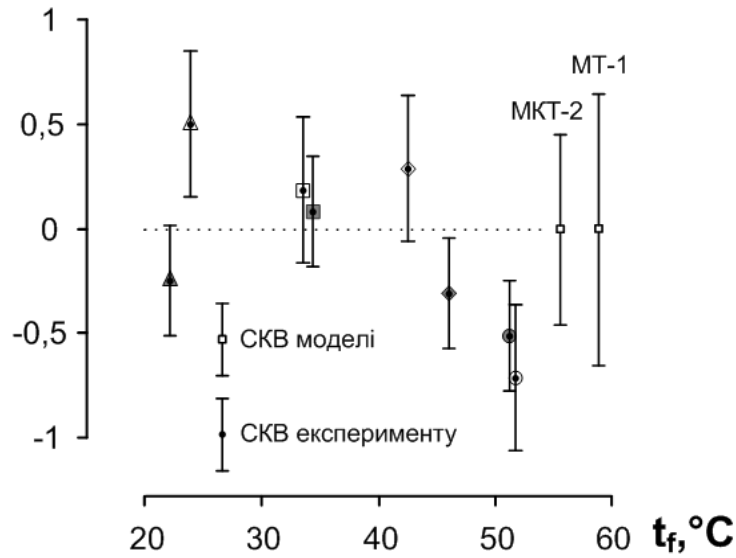
$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_{tf} + \delta PT_{st}. \quad (10)$$

Величина δPT_{in} визначається при допущенні про нормальність законів розподілу похибок вимірювань величин, за якими розраховується показник PT ; при цьому використовується формула обчислення похибки результату непрямих вимірювань:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (11)$$

де y - величина, яка вимірюється непрямым шляхом по відомій залежності - $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$; x_i - величини, за допомогою яких визначається y , m - їх кількість.

$\Delta t_f, ^\circ\text{C}$



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

Значення критерію F:

$$F_{\text{МТ-1}} = 2,85; F_{\text{МКТ-2}} = 3,72; F_{0,95} = 5,91$$

Рис. 5. Результати перевірки адекватності математичної моделі для визначення температури проби розбавлених ВГ перед фільтром - t_f

Похибка δPT_{tf} чисельно дорівнює величині δm_{tf}^{tf} - відносному відхиленню маси навішування ТЧ - m_{tf}^{tf} , визначеної при фактичних значеннях температур t_{fi} , від маси ТЧ - m_{fi}^{t0} , визначеної при значеннях температур t_{f0i} , прийнятих за базові і відповідаючих CVS-режиму розбавлення ВГ при $t_{dil} = 20^\circ\text{C}$, $t_{f(max)} = 52^\circ\text{C}$:

$$\delta PT_{tf} = \delta m_{tf}^{tf} = \frac{m_{tf}^{tf} - m_{fi}^{t0}}{m_{fi}^{t0}} \cdot 100\% = \sum_{i=1}^{13} \frac{m_{fi}^{tf} - m_{fi}^{t0}}{m_{fi}^{t0}} \cdot r_{mfi} = \sum_{i=1}^{13} \delta m_{fi}^{tf} \cdot r_{mfi}, \quad (12)$$

де δm_{fi}^{tf} - відносні відхилення маси ТЧ на i -му режимі - m_{fi}^{tf} від базових значень - m_{fi}^{t0} ; $r_{mfi} = (m_{fi}^{t0}/m_{fi}^{t0}) \cdot 100\%$ - відносні долі m_{fi}^{t0} у загальній масі m_{fi}^{t0} .

Похибка δPT_{st} чисельно дорівнює величині δm_{st}^{st} - відносному відхиленню маси ТЧ - m_{st}^{st} , визначеної при фактичних значеннях величин t_{st} і τ_{st} , від маси ТЧ - m_{st}^{st0} , визначеної при значеннях $t_{st0} = 20^\circ\text{C}$ і $\tau_{st0} = 6$ год, прийнятих за базові:

$$\delta PT_{st} = \delta m_{st}^{st} = \frac{m_{st}^{st} - m_{st}^{st0}}{m_{st}^{st0}} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Для визначення величин δm_{fi}^{tf} та δm_{st}^{st} використовуються експериментальні залежності (наведені у 4-му розділі), вигляд яких обрано з урахуванням результатів попередніх досліджень (див. рис. 2):

$$\delta m_{fi}^{tf} = k_{tfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}), \quad (14)$$

де $k_{fi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$ - коефіцієнт пропорційності, який є функцією відносних числа обертів вала дизеля \bar{n}_i та навантаження \bar{L}_i ;

$$\delta m_f^{st} = k_{\tau st}(t_{st}) \cdot \lg\left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}}\right), \quad (15)$$

де $k_{\tau st}(t_{st})$ - коефіцієнт пропорційності, який залежить від температури t_{st} .

Величини \bar{n}_i та \bar{L}_i характеризують режим роботи двигуна:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad \bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}}, \quad (16)$$

де n_{idle} і n_{nom} - число обертів вала двигуна на холостому ходу і режимі номінальної потужності; $M_{k(max)i}$ - максимальний крутний момент на валу двигуна при n_i .

Теоретичне обґрунтування ефективності використання компенсаційного способу вимірювань G_{exh}^t . Проведено порівняння точності витратомірів B_2 , які використовуються при цьому способі, та B_1 , які застосовуються у розповсюджені диференційному способі. При цьому зроблено припущення про те, що в кожному способі витратоміри мають один клас точності: $\delta G_{dil} = \delta G_t = \delta B_1$, $\delta G_t = \delta G_{com} = \delta B_2$ (див. рис. 3). Кожен з способів визначення G_{exh}^t характеризується індивідуальною формулою визначення коефіцієнта розбавлення ВГ:

$$\text{диференційний} - q = \frac{G_t}{G_t - G_{dil}}, \quad \text{компенсаційний} - q = \frac{G_t}{G_{com}}, \quad (17)$$

де G_t , G_{dil} та $G_{com} = G_{exh}^t$ - масові витрати потоків: розбавлених ВГ, повітря та компенсаційного.

Застосування формули (11) до виражень (17) з урахуванням зробленого припущення дозволяє встановити допустимі похибки витратомірів B_1 та B_2 :

$$\delta B_{1\delta on} = \frac{0,707}{q-1} \cdot \delta q_{\delta on}, \quad \delta B_{2\delta on} = \frac{0,707 \cdot q}{q-1} \cdot \delta q_{\delta on}, \quad \text{тобто: } \delta B_{2\delta on} = q \cdot \delta B_{1\delta on}, \quad (18)$$

де $\delta q_{\delta on} = 4\%$ - допустима похибка вимірювань коефіцієнта q .

Аналіз залежностей (18) показує: а) для забезпечення потрібної точності вимірювань коефіцієнта q , який може дорівнювати 15...30 (при CVS - розбавлені ВГ), потрібні витратоміри з допустимими похибками $\delta B_{1\delta on} = 0,1...0,2\%$ та $\delta B_{2\delta on} = 3\%$; б) при використанні недорогих витратомірів з класом точності 1,5 для компенсаційного способу коефіцієнт q визначається з похибкою у 2...2,5 разів меншою $q_{\delta on}$. Таким чином перехід від диференційного до компенсаційного способу визначення G_{exh}^t дозволяє більш ніж у 15 разів зменшити вимоги до точності витратомірів і, за рахунок цього, у 5-8 разів знизити вартість вимірювача коефіцієнта розбавлення ВГ, яка складає до 20% від вартості мікротунелю.

В третьому розділі описані методики та експериментальні установки для досліджень точності тунелів та відпрацювання заходів щодо зменшення їх вартості.

Методика та експериментальна установка для визначення критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі - $Nu = f(Re, q, k_t, k_l)$.

У відповідності до методики це рівняння визначається за результатами експерименту з планом «Греко-Латинський квадрат» 5×5 з 5-ма рівнями варіювання змінних (табл. 2, 3) у вигляді:

$$Nu = K \cdot \prod_{i=1}^4 Nu_m(P_i), \quad (19)$$

де K - коефіцієнт; i – індекс параметру, що впливає на тепловіддачу: 1 - Re , 2 - q , 3 - k_t , 4 - k_l ; $Nu_m(P_i)$ – регресійні залежності усереднених значень критерія Нуссельта - Nu_m від параметрів P_i , кожна з яких визначається по п'яти розрахунковим точкам з координатами - $Nu_m(P_{ij})$; P_{ij} , (j – 1...5 - рівні варіювання параметра P_i).

Таблиця 2

План збалансованого експерименту «Греко-Латинський квадрат» 5×5

№ _д	Значення параметрів		№ _д	Значення параметрів		№ _д	Значення параметрів		№ _д	Значення параметрів				
1*	Re_1	k_{t3}	6	Re_2	k_{t4}	11	Re_3	k_{t5}	16	Re_4	k_{l1}	21	Re_5	k_{l2}
	q_1	k_{l4}		q_1	k_{l3}		q_1	k_{l2}		q_1	k_{l1}		q_1	k_{l5}
2	Re_1	k_{t4}	7	Re_2	k_{t5}	12*	Re_3	k_{t1}	17	Re_4	k_{l2}	22	Re_5	k_{l3}
	q_2	k_{l5}		q_2	k_{l4}		q_2	k_{l3}		q_2	k_{l2}		q_2	k_{l1}
3	Re_1	k_{t5}	8	Re_2	k_{t1}	13	Re_3	k_{t2}	18*	Re_4	k_{l3}	23	Re_5	k_{l4}
	q_3	k_{l1}		q_3	k_{l5}		q_3	k_{l4}		q_3	k_{l3}		q_3	k_{l2}
4	Re_1	k_{t1}	9	Re_2	k_{t2}	14	Re_3	k_{t3}	19	Re_4	k_{l4}	24	Re_5	k_{l5}
	q_4	k_{l2}		q_4	k_{l1}		q_4	k_{l5}		q_4	k_{l4}		q_4	k_{l3}
5	Re_1	k_{t2}	10	Re_2	k_{t3}	15	Re_3	k_{t4}	20	Re_4	k_{l5}	25*	Re_5	k_{l1}
	q_5	k_{l3}		q_5	k_{l2}		q_5	k_{l1}		q_5	k_{l5}		q_5	k_{l4}

Примітка. * досліди, в яких проводились повторні вимірювання.

Величини $Nu_m(P_{ij})$ - середньгеометричні значення з результатів вимірювання критерія Nu в тих дослідах, в яких параметр P_i знаходився на j -му рівні (ці досліди утворюють окрему вибірку у кількості 5 елементів з поточним індексом r):

$$Nu_m(P_{ij}) = \left(\prod_{r=1}^5 Nu(P_{ijr}) \right)^{0,2} \quad (20)$$

Коефіцієнт K визначається, як середньоарифметичне з величин K_{exp} , розрахованих за результатами кожного дослідження:

$$K_{exp} = \frac{Nu_{exp}}{Nu_m(Re_{exp}) \cdot Nu_m(q_{exp}) \cdot Nu_m(k_{t_{exp}}) \cdot Nu_m(k_{l_{exp}})}, \quad (21)$$

Таблиця 3

Рівні варіювання параметрів, які впливають на Nu

Пара-метр	Рівні варіювання				
	1	2	3	4	5
$Re \cdot 10^{-3}$	4	6	10	18	35
q	5	7,5	10	12,5	15
k_t (t_h в °C)	1,27 (100)	1,44 (150)	1,61 (200)	1,78 (250)	1,96 (300)
k_l	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

де Nu_{exp} – критерій Nu , який був вимірюваний при значеннях параметрів Re_{exp} , q_{exp} , $k_{t_{exp}}$ та $k_{l_{exp}}$; $Nu_m(Re_{exp})$, $Nu_m(q_{exp})$, $Nu_m(k_{t_{exp}})$, $Nu_m(k_{l_{exp}})$ – значення функцій $Nu_m(P_i)$, які відповідають цим параметрам.

Адекватність рівняння (19) оцінюється за критерієм F .

Значення Nu_{exp} в кожному дослідженні визначається за формулою $Nu_{exp} = (\alpha_i \cdot d) / \lambda$; при

цьому коефіцієнт α_t вимірюється за допомогою експериментальної установки – зменшеної у 15,5 разів копії еталонного тунелю з діаметром 3 см та довжиною 30 см (рис. 6).

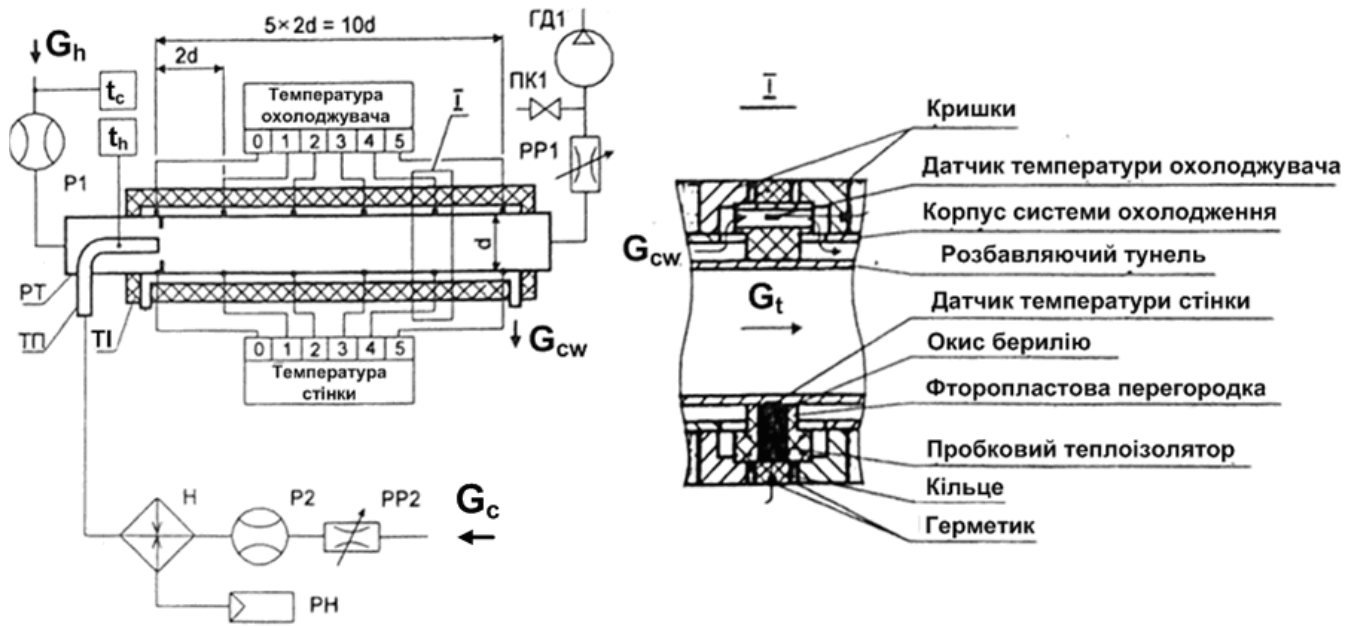


Рис. 6. Схема експериментальної установки для вимірювань коефіцієнту α_t

Величина α_t визначається методом ентальпії, як відношення середніх за довжиною трубопроводу розбавлення робочого тіла (повітря) щільності теплового потоку крізь стінку – q_m та температурного напору – $\bar{\vartheta}_m$:

$$\alpha_t = \frac{q_m}{v_m} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^5 q_i \cdot \Delta L}{\frac{1}{5} \left(\frac{\bar{\vartheta}_0 + \bar{\vartheta}_5}{2} + \sum_{i=1}^4 \bar{\vartheta}_i \right)} = \frac{\sum_{i=1}^5 \frac{Q_i}{2\pi d^2}}{\frac{\bar{\vartheta}_0 + \bar{\vartheta}_5}{2} + \sum_{i=1}^4 \bar{\vartheta}_i}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (22)$$

де q_i – щільність теплового потоку на i -й ділянці довжиною $\Delta L = 2 \cdot d$ ($i = 1 \dots 5$), $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\bar{\vartheta}_0$, $\bar{\vartheta}_5$, $\bar{\vartheta}_i$ – температурні напори: початковий, кінцевий, в кінці i -ої ділянці, $^{\circ}\text{C}$; Q_i – тепловий потік, що передається через стінку трубопроводу на i -й ділянці (розраховується по зміні температури охолоджувача – води на ділянці), $\text{Дж}/\text{с}$.

Макетні зразки автоматизованих частковопоточних систем контролю викидів ТЧ з ВГ дизелів розроблені у відповідності до вимог Правил R-49 з врахуванням рекомендацій щодо підвищення ефективності визначення показника РТ.

Мінітунель з ізокінетичним пробовідбірником (ІКП) МТ-1 (рис. 7) призначений для вимірювань викидів ТЧ від дизелів, масова витрата ВГ яких становить 70...650 кг/год; точність вимірювань: показника РТ – $\pm 4,5\%$; викидів ТЧ на окремих режимах – $\pm 5 \dots 12\%$ (зі збільшенням навантаження точність зростає).

До складу МТ-1 входять 3 основних елементи:

1) система розбавлення повітрям частки потоку ВГ – 1,8% або 5,5% (в залежності від діаметру трубопроводу з ІКП); характеристики системи: а) геометричні – діаметр (D) \times довжина (L): трубопроводу підводу ВГ (ТП) – $1,2 \times 95$ см, розбавляючого тунелю (РТ) – 9×90 см, лінії відбору проб ТЧ (ЛВ) – $1,6 \times 100$ см; б) газодинамічні – масові витрати потоків: у ТП – 4...12 кг/год, у РТ – 60...120 кг/год, у ЛВ – 1,4...4,5 кг/год; діапазон варіювання коефіцієнту q –

4...30; ізокінетичний режим відбору частки ВГ з масовою витратою G'_{exh} забезпечується регулятором потоку в ТП з вимірювачем перепаду статичних тисків між ІКП та вихлопною трубою – ΔP_{ik} (ця величина підтримується на заданому рівні); для калібрування цього регулятора використовується компенсаційний спосіб вимірювань G'_{exh} ;

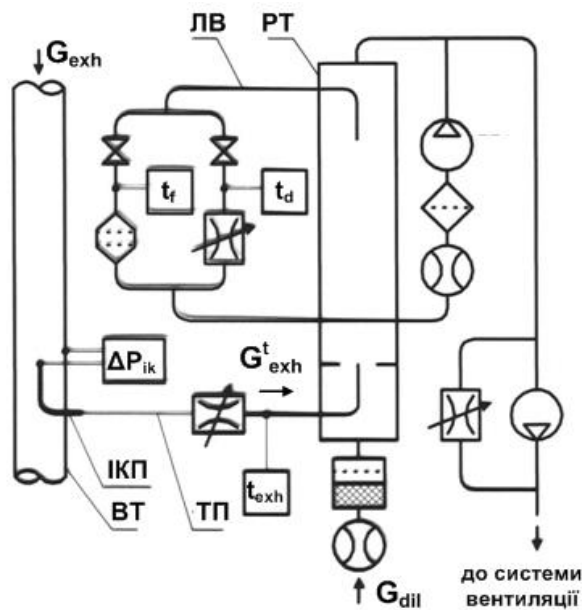


Рис. 7. Принципова схема та загальний вигляд мінітунелю МТ-1

2) електронний модуль керування (ЕМК), який виконує функції регулювання та контролю процесів відбору частки ВГ, розбавлення її повітрям та відбору проб ТЧ; інформація та функції керування з цього модулю надаються до персонального комп'ютера (ПК), для якого розроблено відповідне програмне забезпечення;

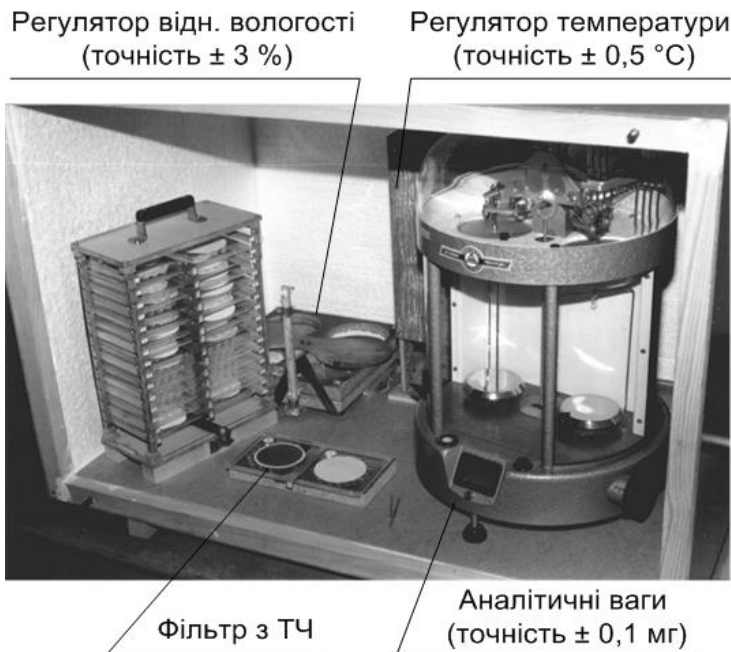


Рис. 8. Камера для визначення маси ТЧ

3) камера для стабілізації та зважування фільтрів (рис. 8) забезпечує потрібні умови для визначення маси ТЧ; камера містить: касету для зберігання фільтрів у кількості 30 шт, аналітичні ваги з похибкою $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ г, системи регулювання температури t_{st} та відносної вологості φ_{st} повітря у діапазонах - $t_{st} = 18 \dots 40$ °C та $\varphi_{st} = 40 \dots 90\%$; камера може використовуватись у герметичному режимі; для контролю та регулювання величин t_{st} та φ_{st} використовується мікропроцесорний блок. МТ-1 був змонтований та випробувався на двох стендах: безмоторному (з імітацією роботи дизеля) та моторному стенді дизеля 1Ч12/14 (характеристики: $n_{idle} = 800$ хв⁻¹; $n_{nom} = 1500$ хв⁻¹; $M_{k(max)} = 50$ Н·м).

Мікротунель МКТ-2 (рис. 9) дозволяє вимірювати викиди ТЧ з ВГ будь-яких дизелів з точністю: на окремих режимах - $\pm 3 \dots 10\%$, показника PT - $\pm 3,5\%$.

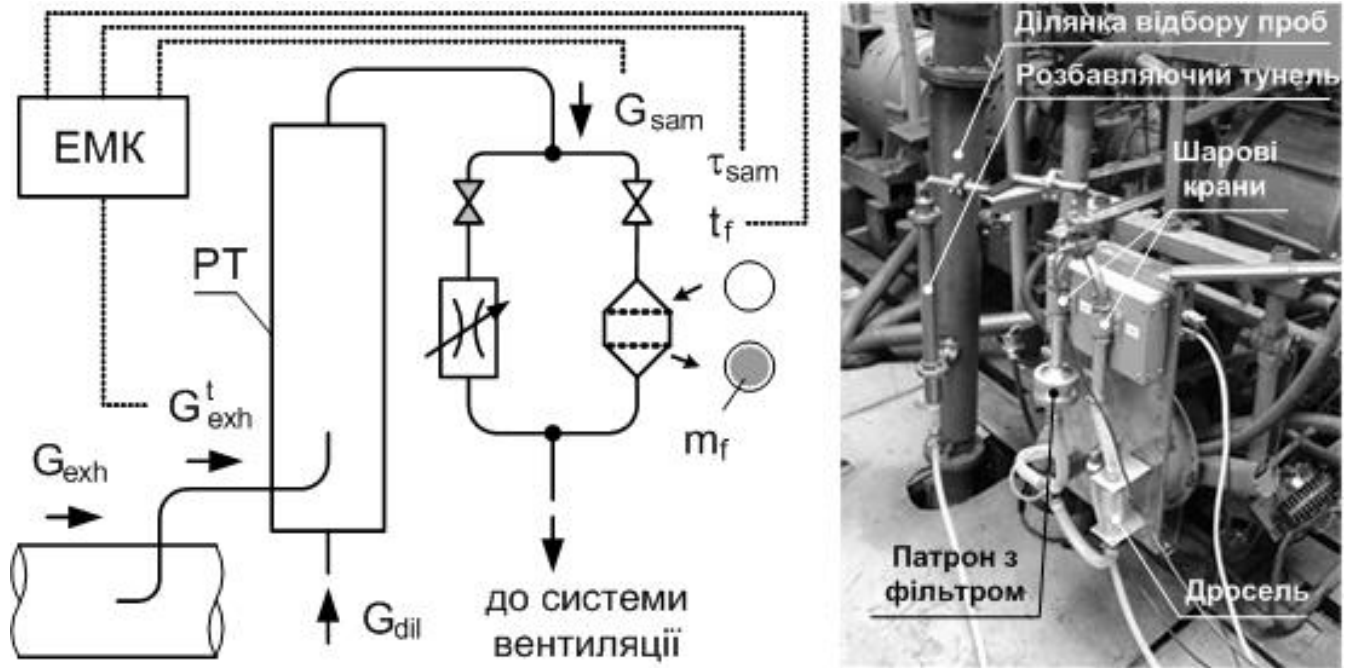


Рис. 9. Принципова схема та загальний вигляд мікротунелю MKT-2

До складу MKT-2 входять такі елементи:

1) система розбавлення частки ВГ (0,02...1,2%) повітрям, яка має характеристики: а) геометричні – $D \times L$: ТП – $0,6 \times 80$ см, РТ – 3×30 см, ЛВ – $1,6 \times 95$ см; б) газодинамічні – масові витрати потоків: у ТП – $0,15 \dots 2,0$ кг/год, у РТ і ЛВ (один потік) – $4,3 \dots 9,0$ кг/год; діапазон варіювання коефіцієнту q – $4 \dots 50$; масова витрата G'_{exh} визначається компенсаторним способом; 2) ЕМК, який виконує функції контролю, регулювання та передачі інформації на ПК; програмне забезпечення, що розроблене для MKT-2, дозволяє здійснювати: повний контроль та керування процесами підготовки та відбору проб ТЧ; обчислення та протоколювання результатів випробувань. Для визначення маси ТЧ при використанні MKT-2 застосовується те саме обладнання, що і для МТ-1. MKT-2 був змонтований та випробуваний на гальмівному стенді дизеля 4ЧН12/14 ($n_{idle} = 750$ хв⁻¹; $n_{nom} = 2000$ хв⁻¹; $M_{k(max)} = 480$ Н·м).

Випробувальний стенд для досліджень ізокінетичного режиму відбору ВГ (рис. 10) дозволяє визначати перепад статичних тисків ΔP_{ik} при рівних швидкостях потоків робочого тіла (повітря) у ІКП та ВТ в умовах імітації роботи дизеля. Для цього стенд оснащений: газодувкою з масовою витратою $60 \dots 170$ кг/год; нагрівачем робочого тіла до температури 180 °С; генератором пульсацій тиску у ВТ з амплітудою до ± 500 Па та частотою до 25 Гц; спеціально розробленим датчиком різниці тисків з діапазоном вимірювань ± 500 Па та похибкою ± 2 Па; регулятором надлишкового тиску у ВТ в діапазоні $0 \dots 2,5$ кПа.

Як показали попередні дослідження, величина ΔP_{ik} відрізняється від нульового значення та залежить від швидкісного напору потоку у ВТ:

$$P_1 + \alpha_1 \cdot \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \alpha_2 \cdot \frac{\rho v_2^2}{2}; \text{ при } v_1 = v_2 = v: \Delta P_{ik} = P_1 - P_2 = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \frac{\rho v^2}{2},$$

де P_1 , $(\rho v_1^2)/2$ та P_2 , $(\rho v_2^2)/2$ – статичні тиски та швидкісні напори потоків у ІКП та ВТ, відповідно, Па; α_1 , α_2 – коефіцієнти, які враховують нерівномірність розподілу швидкостей в перетинах цих трубопроводів.

З урахуванням даної обставини на стенді визначалась експериментальна залежність $\Delta P_{ik} = f((\rho v^2)/2)$ для стаціонарного газового потоку та досліджувався вплив на неї таких факторів, як варіювання температурного режиму, надлишкового тиску та пульсацій потоку у ВТ.

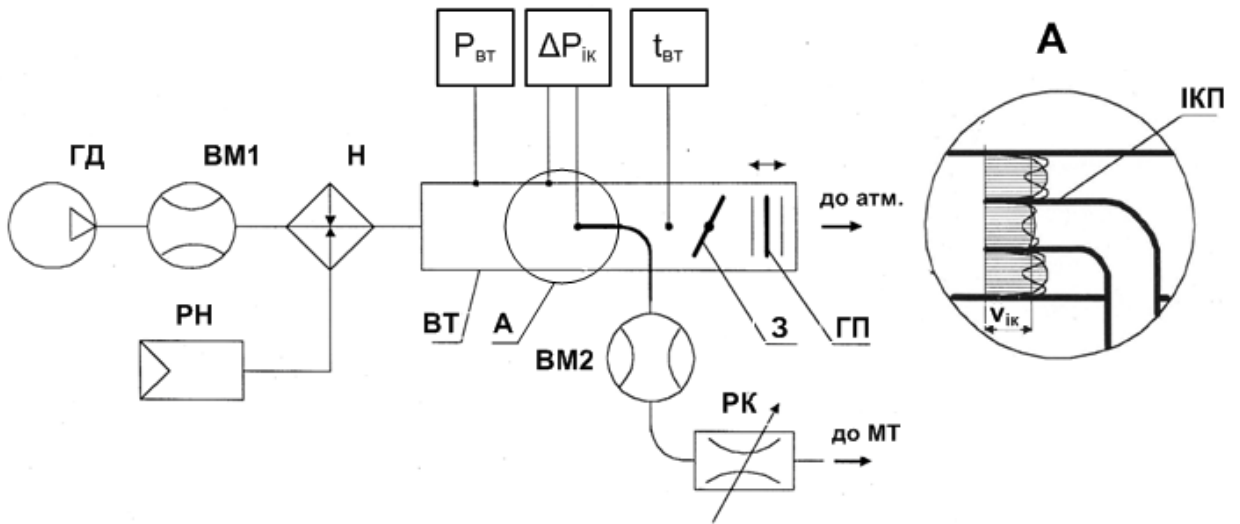


Рис. 10. Схема стенду для досліджень ізокінетичного режиму відбору ВГ

Експериментальна установка та методики визначення коефіцієнтів $k_{f\bar{i}}$ та k_{tst} для розрахунків методичних похибок δPT_{tf} та δPT_{st} (рис. 11, а). Установку зібрано на базі моторного стенду дизеля 1Ч12/14 з МТ-1. Для визначення коефіцієнтів $k_{f\bar{i}}$ (з точністю $\pm 7...12\%$) в мінітурбіні МТ-1 використовувалась 2-канальна лінія відбору проб, до якої входили контрольний канал (визначає масу ТЧ - m_1) та канал, що нагрівається (визначає масу ТЧ - m_2 , при температурі t_f , більшою, ніж в контрольному каналі, на величину $\Delta t_f = 20 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Масові витрати проб в обох каналах підтримувались на одному рівні з точністю $\pm 2\%$. Величина k_f на окремому режимі випробувань визначається за формулою: $k_f = ((m_2 - m_1)/(m_1 \cdot \Delta t_f)) \cdot 100\%$, $\% / ^\circ\text{C}$. Вплив режиму роботи дизеля на $k_{f\bar{i}}$ враховується регресійною залежністю 1-го порядку, яка визначається за результатами 2-факторного експерименту (рис. 11, б):

$$k_{f\bar{i}} = A_0 + A_1 \cdot \bar{n}_i + A_2 \cdot \bar{L}_i, \tag{23}$$

де A_0, A_1, A_2 – коефіцієнти (передбачається, що коефіцієнт A_{12} , який характеризує сумісний вплив \bar{n}_i та \bar{L}_i на величину $k_{f\bar{i}}$ є незначним і може не враховуватись).

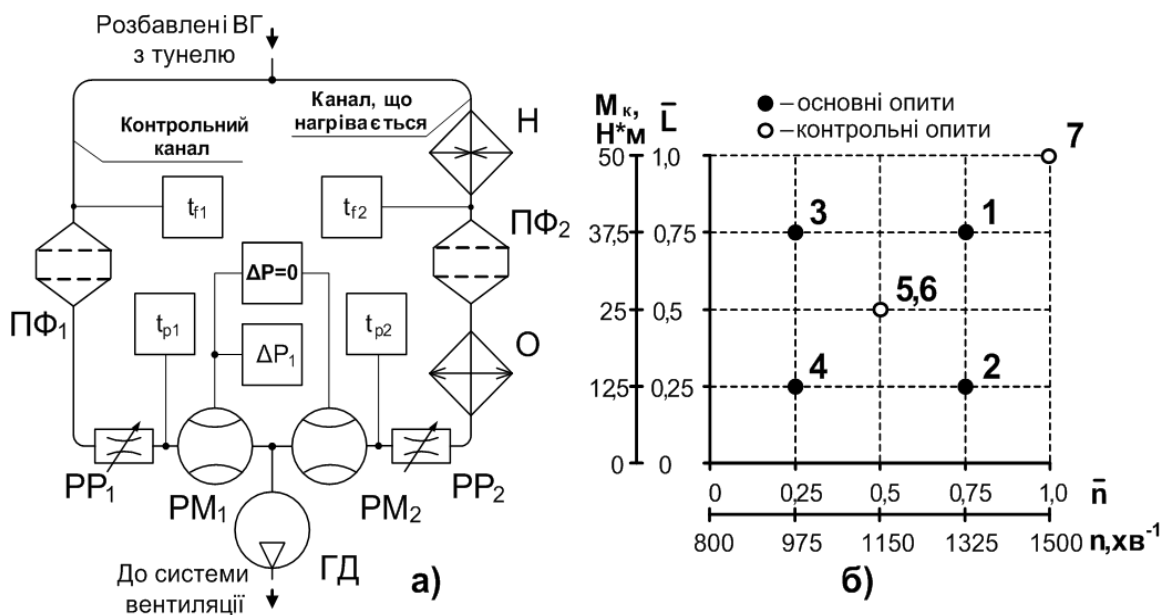


Рис. 11. Експериментальна установка для вимірювань коефіцієнтів $k_{f\bar{i}}$ (а) та план 2-факторного експерименту для визначення залежності (23) (б)

Для врахування впливу температури t_{st} на величину коефіцієнту $k_{\tau st}$ фільтр з ТЧ після проведення випробувань дизеля за циклом ESC стабілізується при 3-х різних температурах t_{st} : 18, 25 та 32 °C з контролем маси ТЧ m_f після періодів стабілізації τ_{st} : 2, 4, 8, 20 і 50 год. За результатами випробувань для кожної температури t_{st} визначається відповідний коефіцієнт $k_{\tau st}$ (методом найменших квадратів, по 4-м парам точок: $(\delta m_{fi}; \lg(\tau_{sti}))$, $i = 1 \dots 4$) та встановлюється залежність

$$k_{\tau st}(t_{st}) = k_{\tau st}^{25} \cdot (1 + b \cdot (t_{st} - 25)), \quad (24)$$

де $k_{\tau st}^{25}$ - розрахункова величина коефіцієнту $k_{\tau st}$ при температурі $t_{st} = 25^\circ\text{C}$; b - коефіцієнт, що враховує відхилення t_{st} від 25°C .

У **четвертому розділі** приведені результати експериментальних та розрахункових досліджень з оцінювання точності вимірювань показника PT .

Визначення критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі. Виконання плану експеримента та методики обробки даних дозволили встановити усереднені залежності критерія Nu від Re , q , k_t і k_l (рис. 12) та величину коефіцієнта K залежності (19) - дорівнює $13,38 \cdot 10^{-6}$. Адекватність рівняння тепловіддачі, підтверджено критерієм F (дорівнює 2,55 при критичному значенні $F_{0,95} = 5,87$).

Залежність (19) можна представити у вигляді:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,78} \left(\frac{q}{q_0}\right)^{-0,28} \left(\frac{k_t}{k_{t0}}\right)^{0,48} \frac{f(k_l)}{f(k_{l0})}, \quad (25)$$

де - $q_0 = 5$, $k_{t0} = 1,27$ (відповідає $t_h = 100^\circ\text{C}$), $k_{l0} = 1,0$ (відповідає $l_t = 10 \cdot d_t$) - значення коефіцієнтів q , k_t і k_l , що прийняті в якості базових.

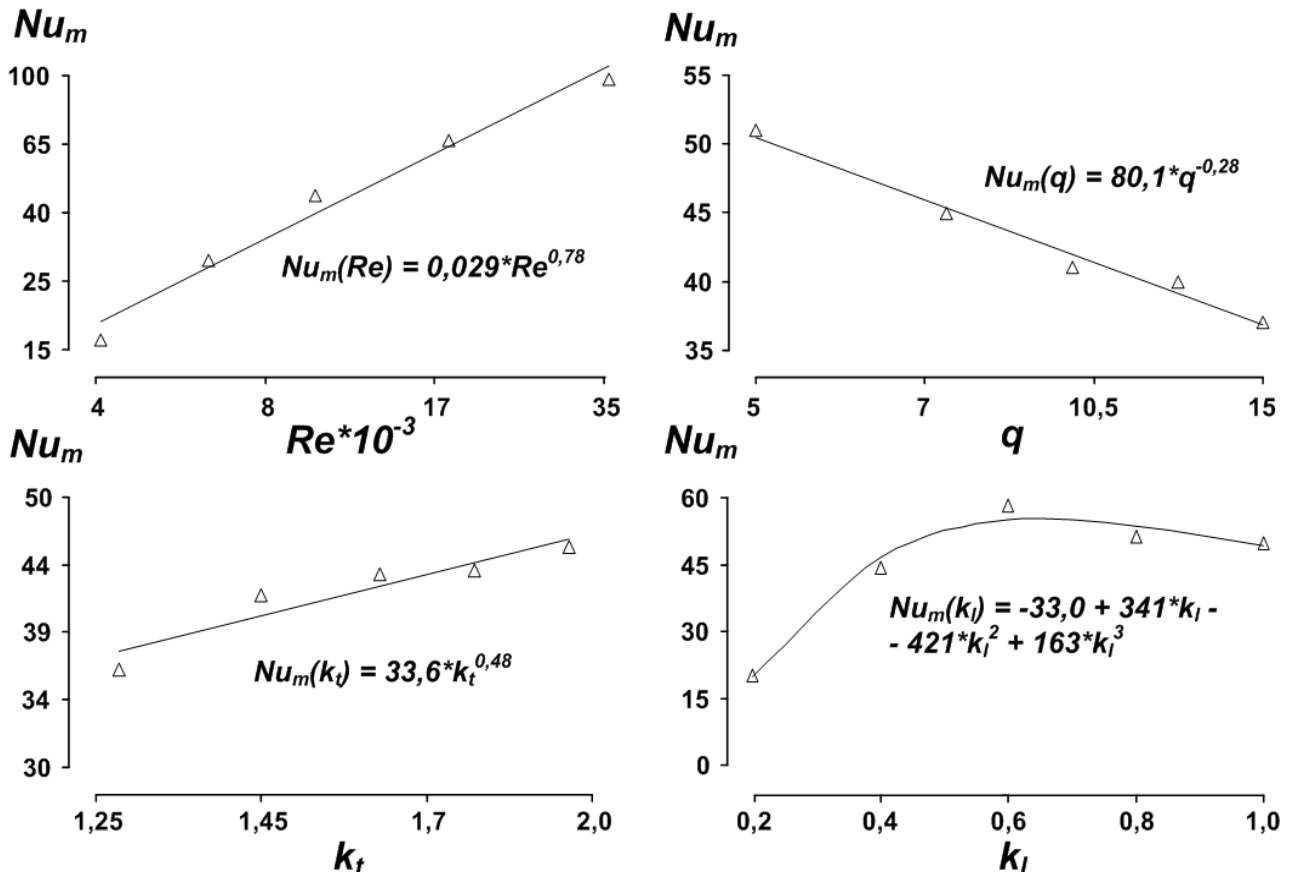


Рис. 12. Результати досліджень тепловіддачі в тунелі

Аналіз цієї залежності показує (рис. 13): а) в тунелі при базових значеннях величин q , k_t і k_l критерій Nu в 1,4 ... 2,0 рази вище, ніж в гладких циліндричних трубах; б) при збільшенні коефіцієнта q від 5 до 15 критерій Nu знижується на 26%; в) при зростанні температури ВГ на вході в тунель з 100 °С ($k_t = 1,27$) до 300 °С ($k_t = 1,96$) число Nu пропорційно збільшується на 23%; г) при зменшенні довжини тунелю з $10 \cdot d_t$ ($k_l = k_{l0}$) до $6 \cdot d_t$ ($k_l = 0,6$) число Nu зростає на 12%, при подальшому зменшенні довжини до $2 \cdot d_t$ ($k_l = 0,2$) - Nu знижується до 40% від базового рівня.

Забезпечення ізокінетичного режиму відбору ВГ в мінітунелі з ІКП. В результаті проведення 3-х серій дослідів (на стенді, зображеному на рис. 10) з варіюванням швидкості, температури та надлишкового тиску у ВГ в діапазонах 8,2...23,0 м/с, 20...155 °С та 0,4...2,2 кПа встановлено експериментальну залежність величини ΔP_{ik} від швидкісного напору (досліджувався в діапазоні 40...300 Па) для стаціонарного потоку робочого тіла (рис. 14, а):

$$\Delta P_{ik} = 0,161 \cdot \frac{\rho v^2}{2} - 4,7. \quad (26)$$

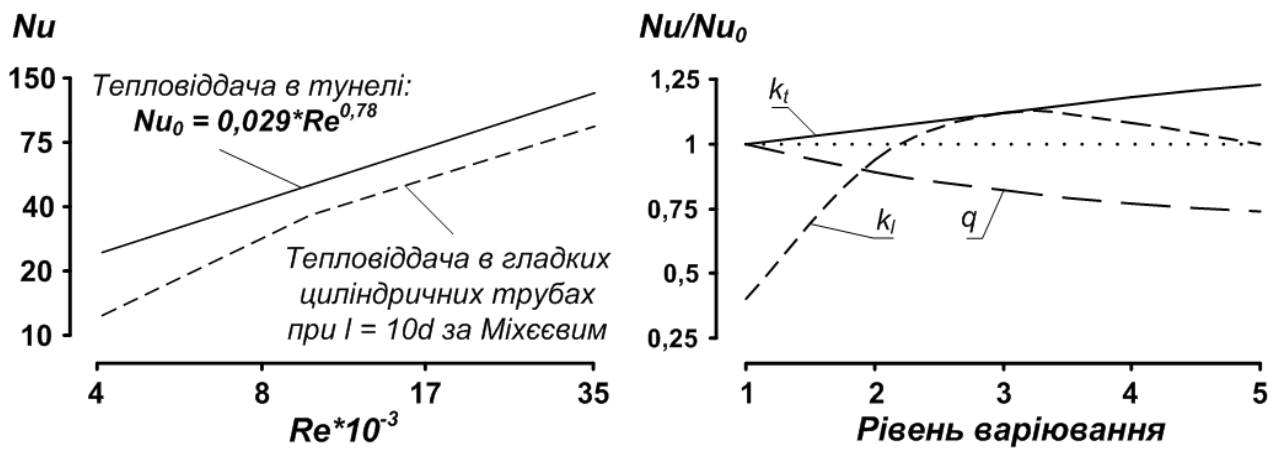


Рис. 13. Вплив параметрів Re , q , k_t і k_l на критерій Nu

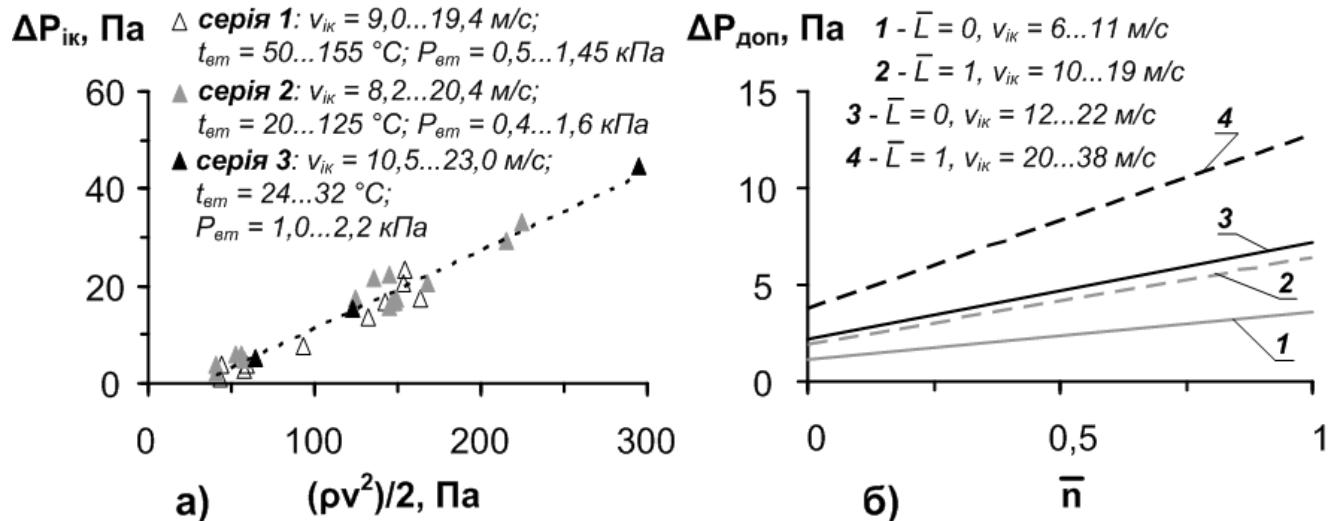


Рис. 14. Результати досліджень ізокінетичного режиму відбору ВГ:

а) залежність $\Delta P_{ik} = f((\rho v^2)/2)$ для стаціонарного газового потоку;

б) залежність допустимих відхилень $\Delta P_{доп}$ від параметрів режиму роботи дизеля

Використання цієї формули в умовах пульсацій тиску у ВТ неможливе із-за суттєвих відхилень режиму відбору від ізокінетичного. Так, при коливаннях тиску у ВТ з амплітудою $\pm 0,25 \dots 0,5$ кПа і частотою 16...24 Гц відхилення швидкостей потоків в ІКП і ВТ складають 7...13%. На стенді дизеля 1Ч12/14 з МТ-1 отримано експериментальну залежність, яка враховує реальні умови роботи дизеля:

$$\Delta P_{ik}^{real} = \Delta P_{ik} + \Delta_{ik}(\bar{n}, \bar{L}), \quad (27)$$

де $\Delta_{ik}(\bar{n}, \bar{L}) = 3,0 + 0,5 \cdot \bar{n} - 2,3 \cdot \bar{n} \cdot \bar{L}$ - поправка, яка враховує режим роботи двигуна.

Для практичного використання формули (27) додатково визначені допустимі відхилення $-\Delta P_{oon}$ фактичного перепаду статичних тисків між ІКП та ВТ від ΔP_{ik}^{real} (рис. 14, б).

Встановлення залежностей для визначення інструментальної та методичних складових результуючої похибки δPT . В результаті застосування залежності (17) до величин, що вимірюються непрямим шляхом, визначені формули для обчислення похибки δPT_{in} та її максимальні значення для режимів розбавлення DM1-4 (табл. 4).

Таблиця 4

Результати визначення інструментальної похибки δPT_{in}

Похибка	Вираження для розрахунку похибки	Значення похибки, %				
		DM1 2 цикли	DM1	DM2	DM3	DM4
δM_f	$(\Delta M_f / M_f) \cdot 100\%$	2,1	4,1	2,8	3,4	2,4
δM_{sam}	$\delta M_{sami} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} W F_i^2}$	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
δq_i	$\sqrt{2} \cdot \delta G^{a)} \cdot (q_i - 1)$	3,8 ^{б)}	3,8 ^{б)}	2,3 ^{б)}	2,2	1,2
δG_{edfi}	$\sqrt{\delta q_i^2 + \delta G_{exhi}^2}$	4,6 ^{б)}	4,6 ^{б)}	3,6 ^{б)}	3,3	2,8
$\overline{\delta G_{edf}}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^{13} (W F_i \cdot k_{Gedfi}^{e)} \cdot \delta G_{edfi})^2}$	1,0	1,4	1,1	1,3	1,1
δPT_{mass}	$\sqrt{\delta M_f^2 + \delta M_{sam}^2 + (\overline{\delta G_{edf}})^2}$	2,4	4,4	3,1	3,7	2,7
δP_i	$\sqrt{\delta n^2 + \delta M_k^2}$	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
$\overline{\delta P}$	$\delta P_i \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (W F_i \cdot k_{Pi}^{e)})^2}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
δPT	$\sqrt{\delta PT_{mass}^2 + (\overline{\delta P})^2}$	2,6	4,5	3,3	3,9	3,0

Примітки: а) δG – похибки витратомірів при диференційному способі визначення G_{exh}^t (приймаються рівними 0,2%); б) наведено максимальні значення похибок; в) $k_{Gedfi} = G_{edfi} / G_{edf}$ - коефіцієнти; г) $k_{Pi} = P_i / \bar{P}_i$ - коефіцієнти.

За результатами 2-х факторного експерименту встановлено залежність коефіцієнту k_{tf} від режиму роботи двигуна та підтверджено її адекватність (рис. 15).

Таким чином методична похибка δPT_{tf} може оцінюватись за наступною формулою (див. вираження (12), (14)):

$$\delta PT_{tf} = \sum_{i=1}^{13} (-1,20 - 0,148 \cdot \bar{n}_i + 0,552 \cdot \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}) \cdot r_{mfi} \cdot \quad (28)$$

Оцінювання величини δPT_{tf} , проведене за результатами випробувань дизеля 1Ч12/14 за циклом ESC, показує, що діапазон варіювання цієї похибки становить -8,3...6,3% (розходження результатів - 14,6%) (рис. 16).

В результаті експериментального встановлення залежності (24) та підстановки її до формул (15), (13) з врахуванням величин t_0 та τ_{st0} отримано залежність для визначення похибки δPT_{st}

$$\delta PT_{st} = \frac{-5,72 \cdot (1 + 0,071 \cdot (t_{st} - t_{st0}))}{1,508 - 0,003 \cdot (t_{st} - t_{st0})} \cdot \lg \left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}} \right) \cdot \quad (29)$$

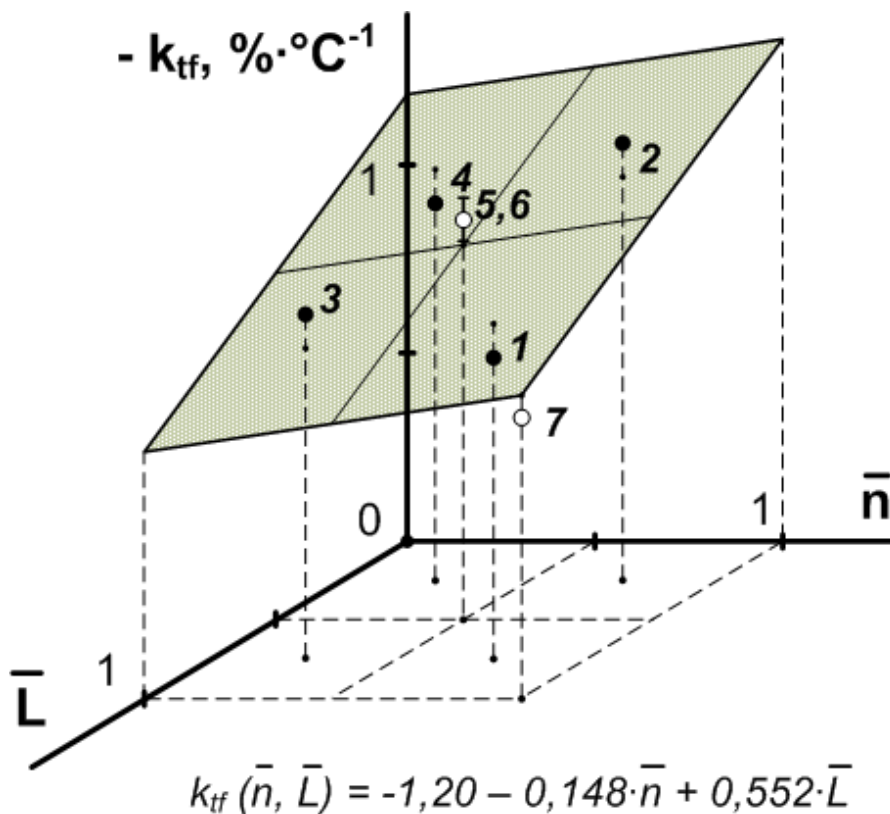


Рис. 15. Результати досліджень залежності $k_{tf}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$

похибок середньоексплуатаційного викиду ТЧ - δPT_{tf}^{mm} та δPT_{tf}^{mkm} . Результати досліджень (рис. 18) свідчать про те, що в мінітунелі і еталонному тунелі значення температур t_{fi} приблизно рівні (відхилення $\Delta t_{fi}^{mm} \leq 0,7$ °C та похибки $\delta m_{tfi}^{mm} \leq 0,6\%$, $\delta PT_{tf}^{mm} \leq 0,4\%$ є несуттєвими), а в мікротунелі величини Δt_{fi}^{mkm} , δm_{tfi}^{mkm} та δPT_{tf}^{mkm} більш значущі і досягають, відповідно: 2,5 °C, -2,4% та -1,7%, тому вони повинні усуватися за рахунок регулювання температури t_f .

Ця залежність дозволяє оцінити діапазон варіювання похибки δPT_{st} : -6,7...4,5% (розходження результатів - 11,2%) (рис. 17).

Аналіз необхідності використання регулювання температури проби в міні- та мікротунелях. На основі результатів випробувань дизеля 4ЧН12/14 за циклом ESC виконано розрахунки: а) абсолютних відхилень температур проби перед фільтром в повнопоточній системі (з діаметром $D_{nm} = 46$ см) від аналогічних температур в міні- ($D_{mm} = 10$ см) та мікротунелі ($D_{mkm} = 3$ см): $\Delta t_{fi}^{mm} = t_{fi}^{nm} - t_{fi}^{mm}$, $\Delta t_{fi}^{mkm} = t_{fi}^{nm} - t_{fi}^{mkm}$ (верхній індекс вказує на тип тунелю); б) методичних похибок δm_{tfi}^{mm} та δm_{tfi}^{mkm} , які виникають внаслідок наявності відхилень Δt_{fi}^{mm} та Δt_{fi}^{mkm} ; в) методичних по-

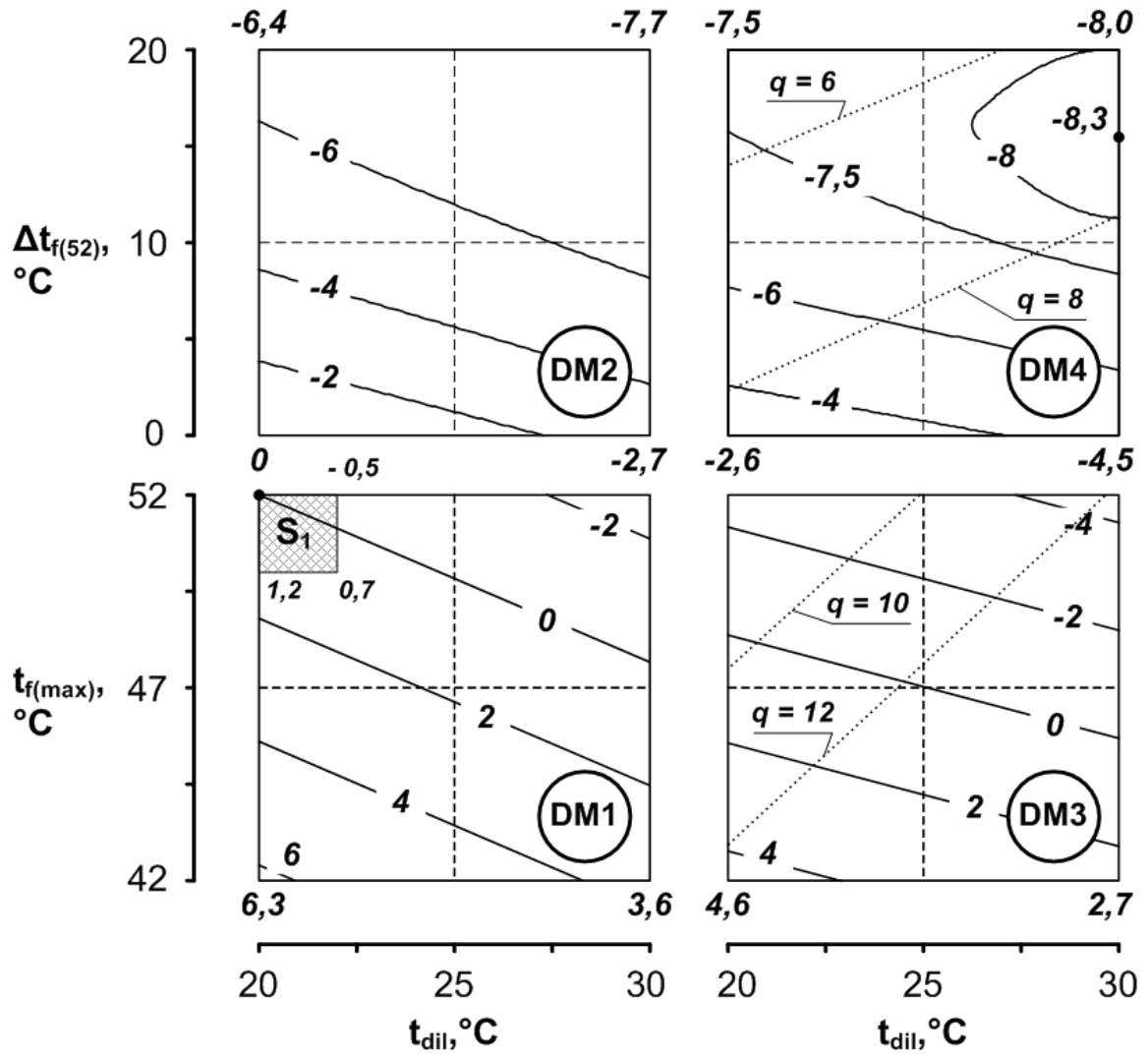


Рис. 16. Діапазони варіювання методичної похибки δPT_{if} :
 S_1 - область рекомендованих значень параметрів t_{dil} і $t_{f(max)}$

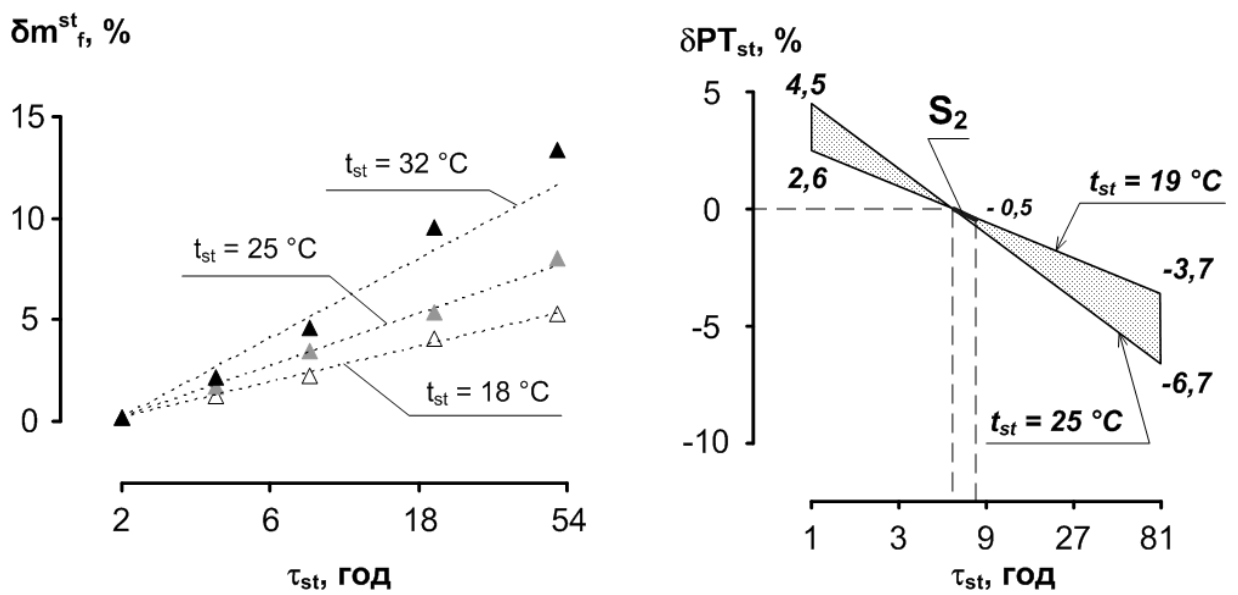


Рис. 17. Діапазони варіювання методичної похибки δPT_{st} :
 S_2 - область рекомендованих значень параметрів τ_{st} та t_{st}

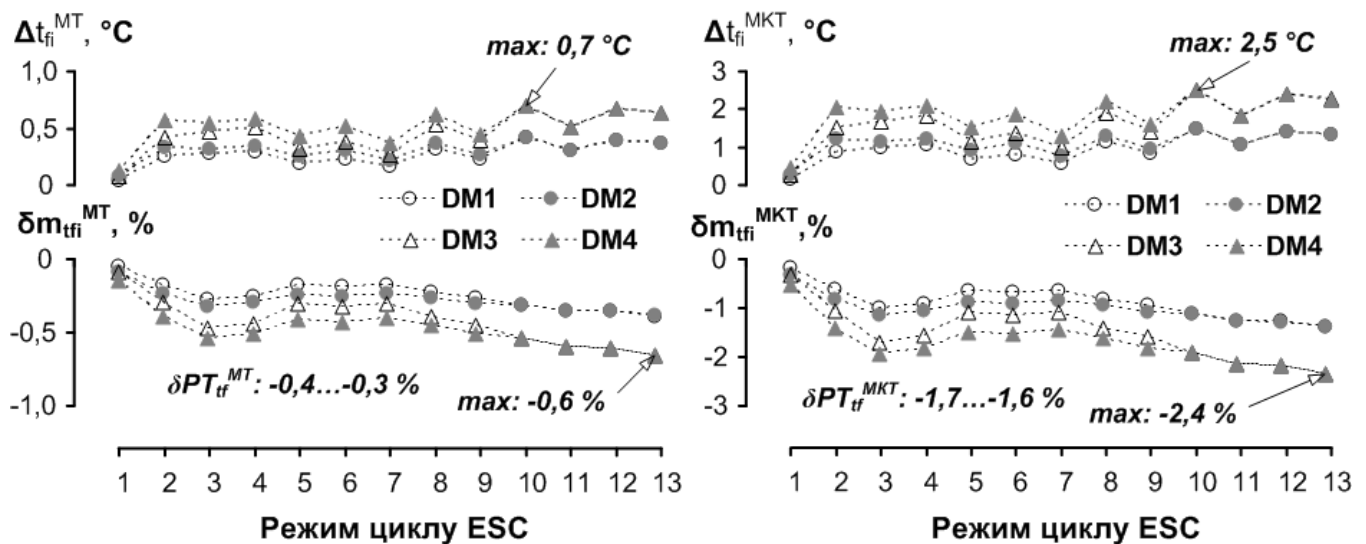


Рис. 18. Результати досліджень відхилень Δt_{fi}^{mm} , Δt_{fi}^{mkt} та похибок δm_{tffi}^{mm} , δm_{tffi}^{mkt}

Оцінка похибки δPT , значимості її складових та ефективності зроблених рекомендацій. За допомогою вираження (10) визначено величину результуючої похибки δPT . Для оцінювання значимості її складових – R_j використано формулу

$$R_j = \frac{\delta PT_j^+ - \delta PT_j^-}{\delta PT^+ - \delta PT^-} \cdot 100\%,$$

де j - індекс складової результуючої похибки (in , tf або st); індекси «+» і «-» відповідають граничним значенням діапазонів варіювання відповідних похибок в області позитивних і негативних значень.

Результати досліджень свідчать про наступне (рис. 19):

- при використанні режимів розбавлення ВГ, які допускаються Правилами ЄЕК ООН R-49, результуюча похибка δPT варіюється в діапазоні -18,0...19,7% (розходження результатів 37,7%); при цьому найбільший внесок у δPT вносять методичні складові - сумарно 76%; внесок інструментальної складової - 24 %;

- повторне виконання додаткового циклу ESC при CVS-розбавленні ВГ у тунелі не дозволяє підвищити точність вимірювань показника PT , не дивлячись на те, що інструментальна похибка при цьому знижується з 4,5% до 2,6%, результуюча похибка зростає з -13,9 ... 15,3% (розходження 29,2%) до -14,7 ... 19,7% (розходження 34,7%) за рахунок збільшення методичної похибки δPT_{tf} ;

- в результаті виконання запропонованих рекомендацій результуюча похибка δPT знижується до -4,0...4,2%, розходження результатів (8,2%) зменшується в 4,6 разів; при цьому внесок інструментальної складової в δPT зростає до 73%, а сумарний внесок методичних складових знижується до 27%.

В п'ятому розділі наведено результати впровадження у практику виконання НДР, виробництва і навчальний процес розроблених рекомендацій, математичних моделей та обладнання. У 2006-2012 рр. в ході виконання ряду держбюджетних НДР на базі мікротунелю MKT-2 проведено такі дослідження:

- оцінювання рівнів викидів ТЧ з ВГ автотракторного дизеля 4ЧН12/14 (рис. 20); в ході досліджень обрано тип та визначено регресійні залежності (поліноми 2-го порядку) масового - PT_{massi} (г/год), питомого - PT_i (г/кВт·год) викидів та концентрації - C_{pi} (г/м³) ТЧ від параметрів режиму роботи двигуна - \bar{n} та \bar{L} в області досліджень: $\bar{n} = 0,25...1,0$, $\bar{L} = 0,25...1,0$;

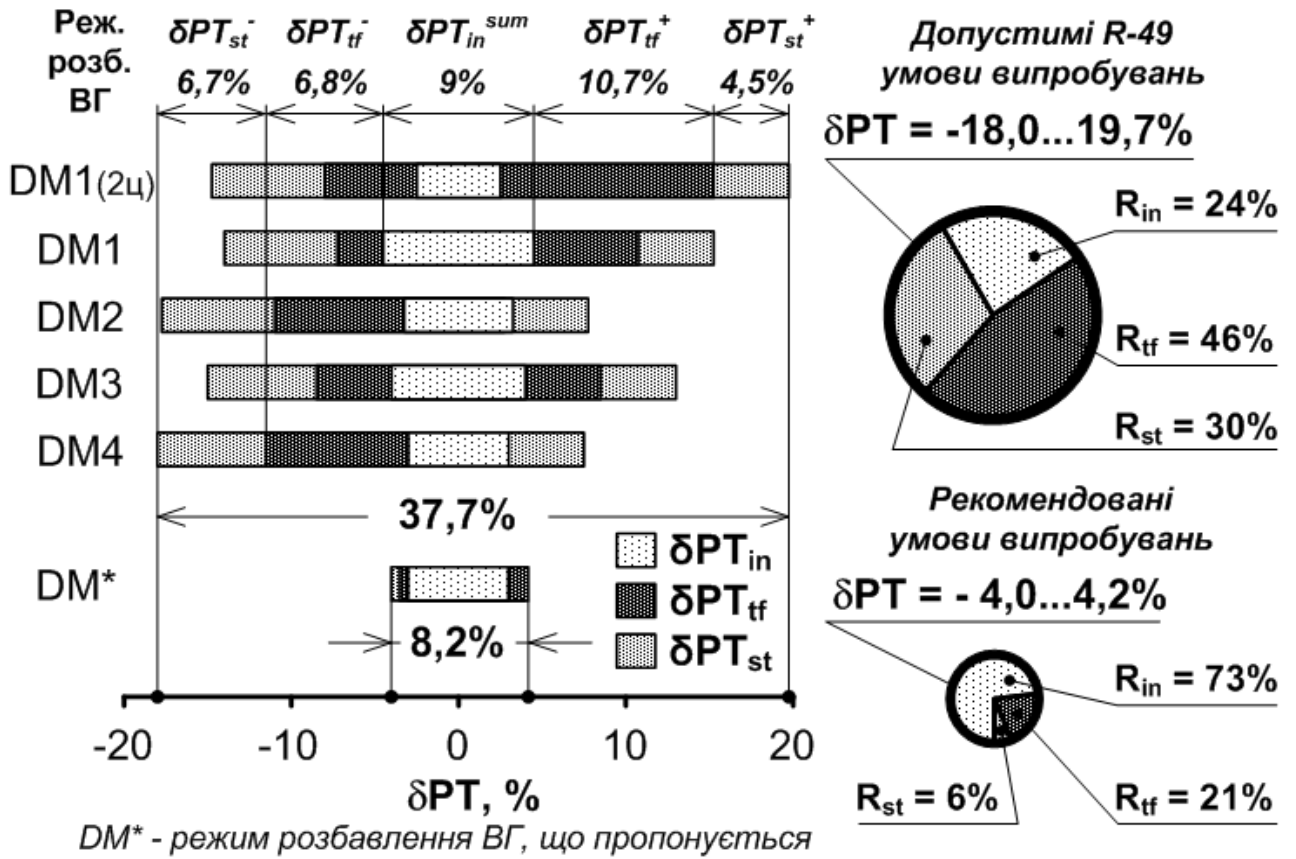


Рис. 19. Результати досліджень похибки δPT та значимості її складових

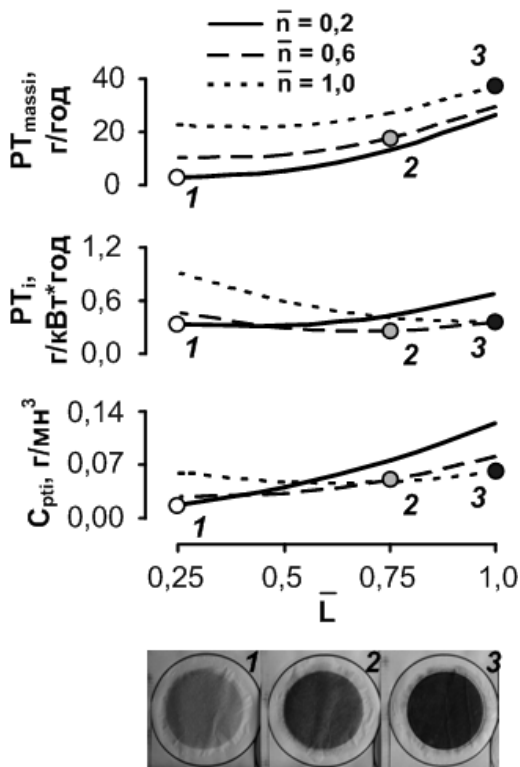


Рис. 20. Результати оцінювання рівнів викидів ТЧ дизеля 4ЧН12/14

- експериментальна перевірка ефективності рекомендацій щодо підвищення точності визначення показника PT ; в ході експерименту проведено дві серії дослідів (по 4 дослідів в серії), при цьому в кожному досліді визначався показник PT для дизеля 4ЧН12/14 при заданих планом експерименту умовах пробопідготовки та стабілізації робочого фільтру; в першій серії дослідів в рандомізованому порядку варіювались: режим розбавлення ВГ, температури t_{dil} , $t_{f(max)}$ і t_{st} та тривалість τ_{st} , в другій серії всі дослідів проводились при режимі розбавлення DM1 та рекомендованих значеннях вказаних параметрів (табл. 5); за результатами випробувань для кожної серії дослідів визначено похибку відтворюваності експерименту δPT_{exp} (рис. 21); дослідження підтвердили ефективність зроблених рекомендацій – в результаті їх виконання похибка δPT_{exp} зменшилась у 2,1 рази;

- оцінка ефективності заходів щодо екологізації ДВЗ: А) використання альтернативного палива на основі метилового ефіру ріпакової олії - МЕРО; Б) нанесення гальваноплазмових покриттів на поршні дизеля; дослідження (на дизелі 4ЧН12/14), довели ефективність цих заходів в зменшенні викидів ТЧ (рис. 22): використання заходу А дозволяє знизити питомий викид ТЧ - PT_i (г/(кВт·год)) на 11...40% в залежності від режиму роботи двигуна; використання заходу Б забез-

печує зменшення середньоексплуатаційного викиду ТЧ: при виконанні дизелем автомобільної роботи – на 7,8...16,8%, тракторної роботи – на 5,6...12,1%.

Таблиця 5

Умови проведення вимірювань показника PT

Серія досл.	№ _д	Режим розб.	$t_{f(max)}$, °C	t_{dil} , t_{sb} , °C	τ_{sb} , ГОД
1	1	DM1	46	19,5	6
	2	DM3	50	19,5	18
	3	DM1	52	24,0	2
	4	DM3	48	24,0	54
2	1-4	DM1	52	21,0	6

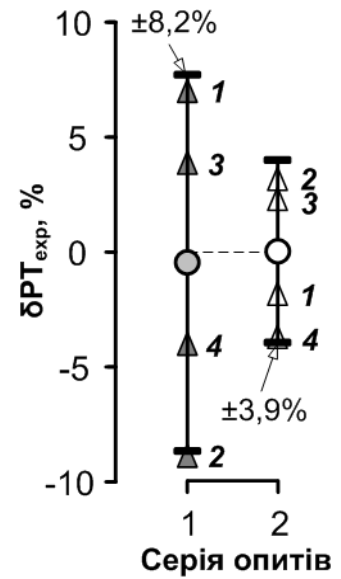
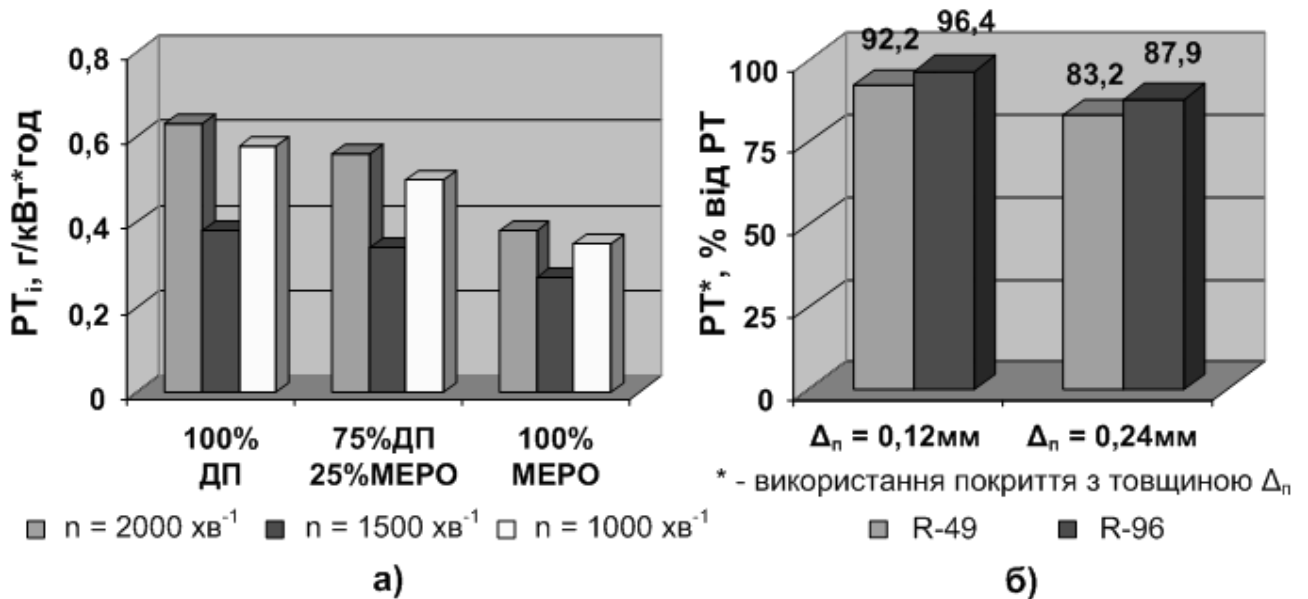
Рис. 21. Результати визначення похибок δPT_{exp} 

Рис. 22. Результати досліджень ефективності використання в дизелях палива на основі МЕРО (а) та гальваноплазових покриттів поршнів (б)

В НПС «Трансмаш» впроваджено «Методику визначення викидів ТЧ з ВГ тепловозних дизелів», якою передбачається вимірювання викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля та середньоексплуатаційного викиду ТЧ з потрібною точністю та мінімальними витратами часу на відбір проб ТЧ - τ_{sami}^{min} :

$$\tau_{sami}^{min} = 3,6 \cdot 10^6 \cdot m_{fi}^{min} \cdot \frac{q_i}{C_{pti}} \cdot \frac{\rho_{sam0}}{G_{sami}} \cdot (1 + \delta\tau_{sami}^{min}), \text{ с.} \quad (30)$$

де i - індекс режиму випробувань; m_{fi}^{min} - мінімальна маса навішування ТЧ на фільтрі, мг; q_i , C_{pti} , ρ_{sam0} , G_{sami} - відповідно: коефіцієнт розбавлення ВГ, концентрація ТЧ у ВГ (г/мн^3), щільність при н.у. (кг/мн^3) та масова витрата проби (кг/год) розбавлених ВГ; $\delta\tau_{sami}^{min} = (\delta q_i^2 + \delta C_{pti}^2 + \delta G_{sami}^2)^{0.5}$ - відносна похибка визначення τ_{sami}^{min} (δq_i , δC_{pti} , δG_{sami} - відносні похибки вимірювань q_i , C_{pti} і G_{sami}).

Величина m_{fi}^{min} визначається за формулами:

$$m_{fi}^{min} = \frac{\Delta m_f}{\delta m_f^{don}} \cdot 100\% \text{ - для режиму; } m_{fi}^{min} = WF_i \cdot \frac{K_{PTmassi}}{K_{Gedfi}} \cdot \frac{\Delta m_f}{\delta m_f^{don}} \cdot 100\% \text{ - для циклу,}$$

де Δm_f - абсолютна похибка вимірювань величини m_f , мг; $\delta m_f^{don} = 5\%$ - допустима похибка визначення m_f ; $K_{PTmassi} = PT_{massi} / PT_{mass}$, $K_{Gedfi} = G_{edfi} / \bar{G}_{edf}$ - коефіцієнти, які визначаються за експериментальними даними.

До вказаної методики включені рекомендації щодо підвищення точності вимірювань викидів ТЧ та запропоновано використання в якості вимірювального обладнання мікротунелю МКТ-2 з компенсаційним способом визначення масової витрати ВГ. Використання цієї методики дозволяє зменшити до мінімально можливих значень тривалість та вартість екологічних випробувань тепловозних дизелів.

Результати роботи – обладнання, математичні моделі, данні досліджень, тощо впроваджено в навчальний процес кафедри екології СНУ ім. В. Даля і кафедри ДВЗ НТУ «ХПІ» та використовуються при проведенні лекційних, практичних і лабораторних занять з учбових дисциплін: «Екологія ДВЗ», «Екологічна сертифікація», «Техніка, автоматизація та стандартизація екологічних досліджень».

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему створення науково-практичних основ гравіметричних вимірювань викидів ТЧ з ВГ дизелів, що забезпечують потрібну точність та дозволяють знизити вартість обладнання – розбавляючих тунелів. Результати проведених досліджень та виконаних робіт дозволяють зробити наступні висновки.

1. На основі аналізу причин високої вартості систем контролю показника PT та значної результуючої похибки вимірювань даної величини – δPT дані рекомендації, виконання яких дозволяє зменшити похибку δPT (за рахунок зниження методичних похибок δPT_{tf} й δPT_{st} шляхом скорочення допустимих діапазонів варіювання параметрів t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} та τ_{st} та використання в тунелі режиму розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом q , повітряним охолодженням тунелю і регулюванням температури проби) та знизити вартість тунелів (за рахунок використання компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ).

2. Розроблено математичну модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ, яка дозволяє визначати та порівнювати між собою значення температур проби перед фільтром t_f на різних режимах роботи двигуна, в різних тунелях, при різних умовах розбавлення ВГ (характеризуються параметрами t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$).

3. Створено математичну модель утворення результуючої похибки δPT , яка дозволяє оцінювати точність визначення показника PT з урахуванням похибок вимірювального обладнання і факторів, що впливають на масу навішування ТЧ на фільтрі на етапах пробопідготовки (t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$) та стабілізації фільтру (t_{st} , τ_{st}).

4. Запропоновано для використання компенсаційний спосіб визначення масової витрати ВГ, що поступають в тунель, замість найбільш розповсюдженого диференційного способу (використовується у мікротунелі AVL SPC 472). Це дозволяє більш ніж у 15 разів знизити вимоги щодо точності витратомірів вартісного вузла міні- та мікротунелів – вимірювача коефіцієнту розбавлення ВГ та у 5...8 разів зменшити його вартість.

5. Спроектовані (з врахуванням зроблених рекомендацій), виготовлені і апробовані макетні зразки автоматизованих вимірювальних систем: мінітунеля з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунеля МКТ-2. Вони дозволяють визначати: показник PT (у відповідності до вимог Правил R-49), викиди ТЧ з ВГ на різних режимах роботи дизеля.

6. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати функції контролю і керування частковопоточними системами МТ-1 та МКТ-2, обробки і протоколювання результатів випробувань, та запропоновано його використання при розробці промислових зразків міні- та мікротунелів вітчизняного виробництва.

7. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що при ізокінетичному режимі відбору проби ВГ перепад статичних тисків між пробовідбірником та вихлопною трубою є функцією швидкісного напору потоку ВГ і залежить від режиму роботи двигуна.

8. Підготовлені (шляхом створення випробувального стенду та відповідних методик) та проведені (на базі дизеля 1Ч12/14) експериментальні дослідження, в ході яких встановлені залежності для визначення методичних похибок вимірювань показника PT , які виникають на етапах пробопідготовки - δPT_{if} та стабілізації фільтру - δPT_{st} .

9. Проведено розрахункові дослідження розбіжностей температур t_{fi} в повнопоточному (еталонному) та частковопоточних тунелях - Δt_{fi}^{mm} та Δt_{fi}^{mkm} , а також виникаючих при цьому відхилень результатів вимірювань показника PT - δPT^{mm} та δPT^{mkm} . Дослідження показали, що в міні- та еталонному тунелі значення температур t_{fi} приблизно рівні ($\Delta t_{fi}^{mm} \leq 0,7$ °С, $\delta PT^{mm} \leq -0,4\%$ - несуттєві), а в мікротунелі відхилення Δt_{fi}^{mkm} (досягають 2,5 °С) та $\delta PT^{mkm} = -1,7...-1,6\%$ більш значущі й повинні усуватися за рахунок регулювання температури проби.

10. Оцінено результуючу похибку вимірювань показника PT : а) при знаходженні величин t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} та τ_{st} в межах допустимих Правилами R-49 діапазонів варіювання - $\delta PT = -18,0...-19,7\%$ (розходження результатів - 37,7%), сумарний внесок методичних складових в дану величину - 76%; б) при виконанні зроблених рекомендацій δPT зменшується в 4,6 рази і складає -4,0...-4,2% (розбіг 8,2%), внесок методичних складових знижується в 2,8 рази - до 27%.

11. МКТ-2 використано в ході виконання НДР і отримано такі результати: оцінено рівні викидів ТЧ від дизеля 4ЧН12/14, експериментально підтверджено ефективність рекомендацій щодо зменшення похибки δPT (знизилась у 2,1 рази), доведено ефективність таких заходів з екологізації ДВЗ, як використання альтернативного палива на основі МЕРО, нанесення гальваноплазмових покриттів на поршні.

12. Встановлено залежність для визначення мінімального часу відбору проб, при якому забезпечується потрібна точність вимірювань викиду ТЧ на окремому режимі роботи дизеля; її використання дозволяє скоротити тривалість і вартість екологічних випробувань, що актуально при випробуваннях габаритних дизелів.

13. Результати роботи впроваджені у виробництво - НПЦ «Трансмаш» та у навчальний процес кафедри екології СНУ ім. В. Даля і кафедри ДВЗ НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поливянчук А.П. Моделирование процесса охлаждения отработавших газов дизельного двигателя в разбавляющем туннеле / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания.- 2005. - № 1. - С. 121-125.

2. Поливянчук А.П. Совершенствование методики экологических испытаний дизелей с целью повышения ее экономической эффективности / А.П. Поливянчук, В.А. Звонов // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Техногенна безпека. – 2005. - Т.43, Вип. 30. - С. 112-115.

Здобувачем запропоновані заходи щодо скорочення тривалості і вартості екологічних випробувань дизелів за рахунок підвищення швидкості вимірювань частинок.

3. Поливянчук А.П. Исследование факторов, влияющих на точность измерения массовых выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей / А.П. Поливянчук // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2005. - №9/25. - С.202-205.

4. Поливянчук А.П. Обоснование целесообразности применения методики ускоренного замера показателей токсичности отработавших газов тепловозов / А.П. Поливянчук, Н.С. Го-

ловко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. - 2005. - № 8 (90), Ч.1. - С. 204-209.

Здобувачем на прикладі дизелів тепловозів ТЕМ-2 та 2ТЕ-116 доведено економічну ефективність підвищення швидкості вимірювань викидів твердих частинок.

5. Поливянчук А.П. Повышение точности измерений массовых выбросов твердых частиц в ходе экологической диагностики автомобильных дизелей / А.П. Поливянчук // Вісник двигунобудування. Запоріжжя. – 2005. - № 2. - С.129–132.

6. Поливянчук А.П. Підвищення економічної ефективності екологічних випробувань тепловозів / А.П. Поливянчук, В.А. Звонов // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. -2005.-Вип. 68.-С.168-176.

Здобувачем розроблено методику оцінки ефективності екологічних випробувань тепловозів за критеріями витрат палива, тривалості та вартості випробувань.

7. Поливянчук А.П. Оценка выбросов твердых частиц с отработавшими газами автотракторного дизеля / В.А. Звонов, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. - 2006. - № 2 - С. 64–67.

Здобувачем на базі автотракторного дизеля 4ЧН12/14 проведено експериментальне відпрацювання мікротунеля МКТ-2, в ході якого були визначені масові викиди твердих частинок на окремих режимах роботи двигуна.

8. Поливянчук А.П. Совершенствование измерительного комплекса для оценки выброса твердых частиц / А.П. Поливянчук, С.В. Зубов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. - №1. – С. 133-137.

Здобувачем підвищено рівень автоматизації та удосконалено програмне забезпечення мікротунеля МКТ-2, що дозволило підвищити його ефективність.

9. Поливянчук А.П. Повышение универсальности и точности системы контроля выбросов дизельных твердых частиц - микротуннеля МКТ-2 / А.П. Поливянчук, Т.С. Харитоновна, Т.В. Несмашная // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2007. - №9/45. - С. 67-70.

Здобувачем оцінено ефективність заходів щодо удосконалення мікротунеля МКТ-2, в результаті яких суттєво зросла його точність.

10. Поливянчук А.П. Повышение точности измерений нормируемых выбросов загрязняющих веществ с отработавшими газами дизелей / А.П. Поливянчук // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2007.- № 10/46.- С. 170-174.

11. Полив'янчук А. П. Дослідження ефективності використання вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2 при проведенні екологічного діагностування тепловозів / А.П. Полив'янчук, Т.С. Харитоновна, О.О. Чумак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. - 2007. - № 8(114) - С. 119-124.

Здобувачем розроблено методику оцінки ефективності використання мікротунеля МКТ-2 в ході екологічних випробувань тепловозних.

12. Поливянчук А.П. Исследование степени токсичности вредных веществ, выбросы которых нормируются европейскими экологическими стандартами / А.П. Поливянчук, Е.Ю. Щепак, Е.Ю. Титова // Вестник Национального технического университета „ХПИ”. – 2007. - №2. – С. 112-115.

Здобувачем досліджені індивідуальні внески основних забруднюючих речовин – СО, СН, NO_x та ТЧ у сумарну токсичність відпрацьованих газів дизелів.

13. Поливянчук А.П. Определение условий разбавления отработавших газов дизелей в системах контроля массовых выбросов твердых частиц (туннелях) / А.П. Поливянчук, О.Р. Игнатов, Н.В. Ермоленко // Екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. Даля.-2007.-№1(4)-С.110-113.

Здобувачем розроблено методику визначення коефіцієнтів розбавлення відпрацьованих газів дизеля та температур проби перед фільтрами в тунелях.

14. Поливянчук А.П. Определение и анализ уровней выбросов твердых частиц с отработавшими газами автомобильного дизеля на установившихся режимах работы / А.П. Поливянчук, И.В. Парсаданов, И.В. Рыкова // Двигатели внутреннего сгорания. - №1. – С. 92-96.

Здобувачем експериментально встановлено залежність масових викидів твердих частинок дизеля 4ЧН12/14 від параметрів режиму випробувань.

15. Полив'янчук А.П. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня на выбросы твердых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов, А.П. Полив'янчук // Двигатели внутреннего сгорания. -2009.- №2.-С.97-100.

Здобувачем доведено ефективність використання гальваноплазмового покриття поршня, як засобу, що знижує масові викиди твердих частинок.

16. Полив'янчук А.П. Оценка эффективности компенсационного способа измерения массового расхода отработавших газов дизеля в микротуннеле / А.П. Полив'янчук, О.Р. Игнатов // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.-2009.-№ 1(5). С 149-154.

Здобувачем обґрунтовано доцільність використання компенсаційного способу визначення масової витрати відпрацьованих газів у микротунелі.

17. Полив'янчук А.П. Оцінка індивідуального внеску основних забруднюючих речовин у сумарну токсичність відпрацьованих газів тепловозів / А.П. Полив'янчук, С.О. Львов, С.В.Зубов // Международный информационный научно-технический журнал Локомотивинформ. - 2010. – №5. - С. 61-62.

Здобувачем досліджено відносні частки основних забруднюючих речовин в сумарній токсичності відпрацьованих газів тепловозних дизелів.

18. Полив'янчук А.П. Анализ влияния условий стабилизации рабочих фильтров на массу навески дизельных твердых частиц / А.П. Полив'янчук // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. - №1. – С. 88-91.

19. Полив'янчук А.П. Повышение точности гравиметрического метода измерений удельного выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля / А.П. Полив'янчук // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. - №2. – С. 110-113.

20. Полив'янчук А.П. Оценка эффективности применения сажевого фильтра с учетом дисперсного состава улавливаемых частиц / А.П. Полив'янчук, Е.А. Холкина, Е.А. Гречишкина // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.-2010.-№ 1(6).-С.112-116.

Здобувачем запропоновано комплексну методику оцінки роботи сажевого фільтру за критеріями гравіметричної, поверхневої і кількісної ефективності.

21. Полив'янчук А.П. Сравнительный анализ дифференциального и компенсационного способов измерения массового расхода отработавших газов дизеля в микротуннеле / А.П. Полив'янчук // Двигатели внутреннего сгорания. 2011. - №2. - С. 123-126.

22. Полив'янчук А.П. Влияние режимов работы автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Полив'янчук // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – № 25. – С. 151-155.

Здобувачем проведено та опрацьовано результати випробувань дизеля 4ЧН12/14, які продемонстрували ефективність микротунелю МКТ-2.

23. Полив'янчук А.П. Оценка неопределенности результатов измерений выбросов твердых частиц в ходе экологических испытаний дизелей / А.П. Полив'янчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012, - №5 (176), Ч. 2. – С. 121-128.

24. Polivyanchuk A.P. The analysis of the influence of stabilization conditions of working filters on the sample mass of diesel particulates / A.P. Polivyanchuk, O.R. Ignatov // Combustion engines. Poznan. - № 1/2012 (148). – P.48-52.

Здобувачем проаналізовано експериментальні данні про вплив температури повітря та тривалості стабілізації робочих фільтрів на масу твердих частинок.

25. Полив'янчук А.П. Разработка методики и экспериментальной установки для исследования теплоотдачи в разбавляющем туннеле отработавших газов дизеля / А.П. Полив'янчук // Двигатели внутреннего сгорания. - 2012. - № 1. - С. 93-95.

26. Полив'яничук А.П. Теоретическе и експериментальне исследование процесу теплоотдачи в разбавляющем туннеле / И.В. Парсаданов, А.П. Полив'яничук // Двигатели внутреннего сгорания. - 2012. - № 2. - С. 96-101.

Здобувачем розроблено математичний опис процесу тепловіддачі в тунелі та експериментально встановлено критеріальне рівняння цього процесу.

27. Полив'яничук А.П. Исследование результирующей погрешности измерений средне-эксплуатационного выброса взвешенных частиц с отработавши газами / А.П. Полив'яничук, О.Р. Игнатов // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - 2012, - №1 (4). - С.73-82.

Здобувачем створено математичну модель утворення результируючої похибки вимірювань показника РТ та зроблені рекомендації щодо її зменшення.

28. Полив'яничук А.П. Комплексное исследование параметров автотракторного дизеля при работе на метиловом эфире рапсового масла / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.А. Прохоренко, Д.В. Мешков, В. Смайлис, В. Сенчила, А.П. Полив'яничук // Сборник научных трудов МГТУ им. Н.Э. Баумана по материалам Международной конференции «Двигатель-2007». Москва. - 2007. - С. 389-393.

Здобувачем експериментально досліджено вплив використання біопалива – МЕРО на масовий викид твердих частинок автотракторного дизеля.

29. Полив'яничук А.П. Нові методи контролю екологічного показника масового викиду твердих частинок з відпрацьованими газами дизеля / А.П. Полив'яничук, І.М. Свистун, К.О. Гречишкіна, О.О. Холкіна // Тезиси докладов межд. научно-технической конференции «Университетская наука 2011». – 2011, Т.2. – С. 92-93.

Здобувачем проаналізовано принципи дії перспективних методів контролю масових викидів твердих частинок.

30. Пат. 68930 Україна, МПК (2012.01) G01G 9/00. Датчик / Смирний М.Ф., Полив'яничук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В.Даля. - №201114146; заявл. 30.11.11; опубл. 10.04.12, бюл. №7.

Здобувачем проаналізовано прототип та визначено його недоліки.

31. Пат. 68932 Україна, МПК (2012.01) G01G 9/00. Датчик / Смирний М.Ф., Полив'яничук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В.Даля. - №201114160; заявл. 30.11.11; опубл. 10.04.12, бюл. №7.

Здобувачем запропоновано заходи з удосконалення принципової схеми датчика.

32. Пат. 68933 Україна, МПК (2012.01) G01G 9/00. Датчик / Смирний М.Ф., Полив'яничук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В.Даля. - №201114162; заявл. 30.11.11; опубл. 10.04.12, бюл. №7.

Здобувачем запропоновані заходи з удосконалення прототипу датчика.

33. Пат. 74279 Україна, МПК (2012.01) G01L 13/00. Датчик різниці тисків / Смирний М.Ф., Полив'яничук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. - №201203569; заявл. 26.03.12; опубл. 25.10.12, бюл. №20.

Здобувачем досліджено та доведено ефективність запропонованої принципової схеми датчика різниці тисків в ході випробувань мінітунеля МТ-1.

АНОТАЦІЇ

Полив'яничук А.П. Науково-практичні основи підвищення ефективності визначення викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизеля. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - Харків, 2013.

Роботу присвячено створенню науково-практичних основ гравіметричних вимірювань викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів, що забезпечують потрібну точність та дозволяють знизити вартість обладнання – розбавляючих тунелів.

Проаналізовані вимоги Правил ЄЕК ООН R-49 до процедури і обладнання для вимірювання показника PT , міжнародний досвід проведення таких вимірювань. Зроблені рекомендації щодо зменшення результуючої похибки вимірювань величини PT (δPT) та зниження вартості тунелів. Створені математичні моделі процесів утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення відпрацьованих газів і лінії відбору проб та результуючої похибки δPT . Обґрунтовано доцільність використання в тунелі менш вартісного, ніж аналоги, компенсаційного способу вимірювань масової витрати відпрацьованих газів. Розроблені з використанням зроблених рекомендацій та випробувані на дизелях 1Ч12/14 і 4ЧН12/14 макетні зразки автоматизованих систем контролю викидів твердих частинок: мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунелю МКТ-2.

Досліджено результуючу похибку δPT , значимість її інструментальної та методичних складових та доведено ефективність зроблених рекомендацій (δPT зменшується у 4,6 разів). Приведені результати впровадження у практику виконання НДР, виробництво та навчальний процес зроблених рекомендацій, математичних моделей та обладнання.

Ключові слова: дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, випробувальний цикл, гальмівний стенд, розбавляючий тунель, похибка вимірювань.

Поливянчук А.П. Научно-практические основы повышения эффективности определения выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизеля. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». - Харьков, 2013.

Работа посвящена созданию научно-практических основ гравиметрических измерений выбросов твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) - дизелей, которые обеспечивают требуемую точность и позволяют снизить стоимость оборудования – разбавляющих туннелей.

Проанализированы требования нормативных документов к процедуре и оборудованию для измерения показателя PT , международный опыт проведения таких измерений. Сделаны рекомендации по повышению эффективности гравиметрического метода определения величины PT : 1) уменьшение результирующей погрешности измерений показателя PT (δPT) за счет сокращения допустимых диапазонов варьирования величин t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} , τ_{st} и использование в туннеле режима разбавления ОГ с постоянным коэффициентом разбавления ОГ, воздушным охлаждением и температурной компенсацией; 2) снижение стоимости мини- и микротуннелей за счет использования в них компенсационного способа измерений массового расхода ОГ.

Созданы математические модели процессов образования: а) температурных полей в конечных сечениях трубопроводов разбавления ОГ и линии отбора проб ТЧ (позволяет вычислять температуру пробы перед фильтром в любом туннеле), при этом разработано математическое описание процесса теплоотдачи в туннеле в безразмерной форме; б) результирующей погрешности δPT , которая рассматривается, как сумма инструментальной и методических (возникающих на этапах пробоподготовки – δPT_{tf} и стабилизации фильтра - δPT_{st}) составляющих. Обоснована целесообразность использования в мини- и микротуннелях компенсационного способа измерений массового расхода ОГ (более дешевого, чем распространенный дифференциальный способ, применяемый в микротуннеле AVL SPS 472), позволяющего снизить стоимость дорогостоящего измерителя коэффициента разбавления ОГ в 5...8 раз.

Разработана экспериментальная база для исследований эффективности гравиметрического метода определения показателя PT : а) методика и экспериментальная установка для исследований процесса теплоотдачи в туннеле; б) макетные образцы автоматизированных систем контроля выбросов ТЧ (соответствуют требованиям Правил R-49): минутунель с исокинетическим пробовідборником МТ-1 и микротунель МКТ-2; в) испытательный стенд для исследований исокинетического режима отбора ОГ из выхлопной трубы дизеля в минутунель; г) экспериментальная установка и методики для определения методических составляющих погрешности δPT .

Проведены экспериментальные и расчетные исследования по оценке точности измерений величины PT , в результате которых: а) получено критериальное уравнение теплоотдачи в туннеле

в виде функции 4-х переменных - $Nu = f(Re, q, k_r, k_l)$; б) определены условия, при которых обеспечивается изокINETический режим отбора ОГ дизеля (перепад статических давлений между пробоотборником и выхлопной трубой является функцией скоростного напора пока ОГ и зависит от режима работы двигателя); в) установлены зависимости для определения инструментальной и методических составляющих погрешности δPT ; г) обоснована необходимость применения регулирования температуры пробы в микротуннелях; д) оценена результирующая погрешность δPT и значимость ее составляющих. Подтверждена эффективность сделанных рекомендаций по повышению точности измерений величины PT : их выполнение позволяет уменьшить результирующую погрешность δPT в 4,6 раза с $-18,0 \dots 19,7\%$ (разброс показаний – $37,7\%$) до $-4,0 \dots 4,2\%$ (разброс - $8,2\%$); при этом суммарный вклад в δPT ее методических составляющих снижается в 2,8 раза - с 76% до 27% .

Приведены результаты внедрения разработанных рекомендаций, математических моделей и оборудования: в практику выполнения НИР (исследованы уровни выбросов ТЧ с ОГ дизеля 4ЧН12/14, экспериментально подтверждена эффективность рекомендаций по уменьшению погрешности δPT , оценен экологический эффект от применения альтернативного топлива на основе МЭРМ и гальваноплазменного покрытия поршней); в НПЦ «Трансмаш» (создана «Методика определения выбросов ТЧ с ОГ тепловозных дизелей» с минимальными затратами времени и стоимостью испытаний); учебный процесс.

Ключевые слова: дизель, отработавшие газы, твердые частицы, испытательный цикл, тормозной стенд, разбавляющий туннель, погрешность измерений.

Polivianchuk A.P. Scientific and practical basis for improving the efficiency of determining emissions of of particulate pollutants in the exhaust gases of diesel. – On the rights of manuscript.

Thesis for a doctor of technical science degree by speciality 05.05.03 – Engines and power settings. National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”. - Kharkov, 2013.

The work is dedicated to increasing the effectiveness of determining of one of the fundamental environmental performance of diesel engines - indicator of the average emission of particulate pollutants in the exhaust gases - PT indicator, performance criteria - the cost of test equipment - the tunnel and the accuracy of the measuring PT .

Analyzed the requirements of Regulation R-49 for the procedure and equipment for measuring the PT , the international experience of such measurements. Made recommendations to reduce the cost of the tunnels and the resulting decrease in the value of measurement error PT (δPT). Mathematical models of heat transfer process in the dilute exhaust emission control system of suspended particles to the environment and the resultant error δPT . Based on the economic feasibility of using the compensation method of measuring mass flow rate of the exhaust gas entering the mikrotunel. Prototypes were developed automated systems: minitunel isokinetic sampler with MT-1 and mikrotunel MKT-2.

The resultant error investigational δPT , meaningfulness is appraised its instrumental and methodical constituents and efficiency of the done recommendations is well-proven (δPT diminishes in 4,6 times). The results of the effective use of MT-1 and MKT-2 are resulted during the tests of diesels 1Ч12/14, 4ЧН12/14.

Key words: diesel engine, exhaust gases, particles, test cycle, brake stand, dilution tunnel, error of measuring.