

УДК 621.43.068

А. П. ПОЛИВ'ЯНЧУК<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., О. І. КАСЛІН<sup>2</sup>,  
М. Ф. СМІРНІЙ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., О. П. СТРОКОВ<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
О. О. СКУРІДІНА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна  
e-mail: armail@meta.ua

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна  
e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

<sup>3</sup>Класичний приватний університет  
вул. Жуковського 70-б, м. Запоріжжя, 69002, Україна  
e-mail: kpuinform@gmail.com

<sup>4</sup>Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,  
проспект Центральний, 59-а, м. Северодонецьк, 93400, Україна  
e-mail: icd@snu.edu.ua

## СТВОРЕННЯ НА БАЗІ МІКРОТУНЕЛЮ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ ДИЗЕЛЬНИХ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

**Мета.** Створення вітчизняної універсальної системи динамічного контролю викидів твердих частинок від дизелів різних типів на базі вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2. **Методи:** Аналіз та синтез інформації, математичне моделювання, розрахунковий експеримент. **Результати.** Розглянуті сучасні методи динамічного контролю викидів дизельних твердих частинок, визначено їх технічні характеристики. Розроблено принципову схему методу динамічного контролю викидів твердих частинок з оптичним чутливим елементом. **Висновки.** Визначено технічні можливості мікротунеля МКТ-2 при проведенні екологічного діагностування різних двигунів. Обґрунтовано рекомендації щодо створення на базі МКТ-2 універсальної системи контролю викидів твердих частинок від транспортних дизелів.

**Ключові слова:** дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, динамічний контроль, мікротунель, концентрація, димність

Polivyanchuk A. P.<sup>1</sup>, Kaslin O. I.<sup>2</sup>, Smirny M. F.<sup>1</sup>, Strokov O. P.<sup>3</sup>, Skuridina O. O.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

<sup>2</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

<sup>3</sup> Classic Private University

<sup>4</sup> Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

## CREATION OF THE UNIVERSAL SYSTEM OF DYNAMIC CONTROL OF EMISSIONS OF DIESEL SOLID PARTICLES ON THE BASIS OF MICROTUNNEL

**Purpose.** Creation of a national universal system of dynamic control of particulate emissions from diesel engines of different types – automobile, diesel, tractor, court and others on the basis of the measuring complex with the microtunnel MKT-2. **Methods.** Analysis and synthesis of information, mathematical modeling, calculated experiment. **Results.** The modern dynamic methods of control of emissions of diesel particulate matter are analyzed: Method for Real-Time Mass Microbalance, Tapered Element Elemental Microscopic Microbalance – TEOM, Quartz Crystal Microbalance – QCM and Laser Induced Incandescence – LII, their technical characteristics are determined. A schematic diagram of a dynamic method for controlling emissions of solid particles with an optical sensitive element has been developed. A procedure has been developed for determining the permissible degree of dilution of diesel exhaust gases by air in the tunnel. **Conclusions.** The technical capabilities of the microtunnel MKT-2 for environmental diagnostics of various engines have been determined. The recommendations on the creation of a universal system for the ecological diagnosis of transport diesels based on MKT-2 have been substantiated. It has been established ranges of variation of the dilution coefficients of exhaust gases in the tunnel are established for testing diesel engines corresponding to various norms of the Euro. The necessity of using a gas sample cooler in a tunnel is verified when controlling the concentration of solid diesel particles meeting the requirements of Euro-6 standards.

**Keywords:** diesel, exhaust gases, particulate matter, dynamic control, microtunnel, concentration, smoke

© Полив'янчук А. П., Каслін О. І., Смирний М. Ф., Строков О. П., Скурідіна О. О., 2017

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2017-28-15>

Поливянчук А. П.<sup>1</sup>, Каслин А. И.<sup>2</sup>, Смирный М. Ф.<sup>1</sup>, Строков А. П.<sup>3</sup>, Скуридина Е. А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Харьковський національний університет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

<sup>2</sup> Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

<sup>3</sup> Классический частный университет

<sup>4</sup> Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

## СОЗДАНИЕ НА БАЗЕ МИКРОТУННЕЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

**Цель.** Создание отечественной универсальной системы динамического контроля выбросов твердых частиц от дизелей различных типов на базе измерительного комплекса с микротуннелем МКТ-2. **Методы.** Анализ и синтез информации, математическое моделирование, расчетный эксперимент. **Результаты.** Проанализированы современные методы динамического контроля выбросов дизельных твердых частиц, определены их технические характеристики. Разработана принципиальная схема метода динамического контроля выбросов твердых частиц с оптическим чувствительным элементом. **Выводы.** Определены технические возможности микротуннеля МКТ-2 при проведении экологического диагностирования различных двигателей. Обоснованы рекомендации по созданию на базе МКТ-2 универсальной системы контроля выбросов твердых частиц от транспортных дизелей.

**Ключевые слова:** дизель, отработавшие газы, твердые частицы, динамический контроль, микротуннель, концентрация, дымность

### Вступ

Відомо, що робота транспортних дизелів різного призначення супроводжується викидами у атмосферу шкідливих речовин – продуктів згоряння палива, що сприяє розвитку екологічних проблем міст, зокрема: погіршенню якості повітря, утворенню смогів, випадінню кислотних опадів та ін.

До складу найбільш небезпечних за дією на організм людини та навколишнє середовище речовин у складі відпрацьованих газів (ВГ) дизелів відносять тверді частинки (ТЧ), які визначають як весь матеріал, зібраний на спеціальних фільтруючих засобах після пропускання крізь них ВГ, розбавлених чистим повітрям до температури, що не перевищує 52 °С [1].

Для проведення контролю нормованих викидів дизельних ТЧ використовують складні високовартісні вимірювальні комплекси – розбавляючі тунелі, які в сучасних умовах екологічної модернізації двигунів повинні володіти такими властивостями, як: *висока універсальність* – можливість використання в екологічному діагностуванні дизелів різних типів: автомобіль-

них, тепловозних, тракторних, суднових та ін.; *динамічність* – можливість контролю миттєвих значень викидів ТЧ в ході виконання транзйентних випробувальних циклів: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC), ін. [2–6]; *висока точність* – можливість вимірювань наднизьких концентрацій ТЧ з чутливістю до  $\pm 2$  мкг/м<sup>3</sup> в діапазонах: 1,25 ... 0,25 ... 0,063 мг/м<sup>3</sup>, які відповідають вимогам норм Євро-3, Євро-4,5 та Євро-6, відповідно [7–9]; *компактність, мобільність та низька вартість обладнання.*

З метою створення вітчизняної системи вимірювань викидів дизельних ТЧ, яка має вказані властивості, авторами проаналізовано сучасні методи динамічного контролю ТЧ, розроблено метод динамічного визначення викидів ТЧ з оптичним чутливим елементом та запропоновано його використання на базі компактного автоматизованого вимірювального комплексу з микротунелем МКТ-2 [10,11].

### Методи досліджень

**Аналіз сучасних методів динамічного контролю викидів дизельних ТЧ.** Ще в 70...80-х роках минулого століття значною популярністю користувалися так звані мікроваги, в основі дії яких лежить зміна частоти власних коливань чутливого елемента (кварцового кристала) залежно від маси матеріалу, що осідає на його поверхні [4–6]. Потім увага до цього методу зменшилась в наслідок проблем, пов'язаних з перевантаженням кристала при високих рівнях викидів ТЧ, відскоком частинок внаслідок неідеального з'єднання з уловлюючою поверхнею та проблем з калібру-

ванням. Але зменшення норм на викиди дизельних частинок і використання сучасних технологій дозволяють дати даному методу друге життя та забезпечити ефективність його застосування при проведенні безперервного аналізу викидів ТЧ в ході випробувань дизелів за циклами змінних режимів. Метод вимірювання масової концентрації ТЧ в реальному масштабі часу, що здійснюється за допомогою вимірювання змін частоти коливань чутливого елемента, на якому осідають частинки, отримав назву *Method for Real-Time Mass Microbalances*. Перевагою даного методу в порі-

в'янні з іншими динамічними методами є те, що він дозволяє визначати саме масу частинок, які осідають на фільтрі.

Метод мікроваг з конічним чутливим елементом, що коливається – *Tapered element oscillating microbalance* – ТЕОМ за-

снований на відповідності резонансної частоти коливань уловлювача, який використовується для збирання частинок, з масою матеріалу, що уловлюється (рис. 1) [2].

Принцип дії методу ТЕОМ полягає у наступному. ВГ протягом випробувань без-

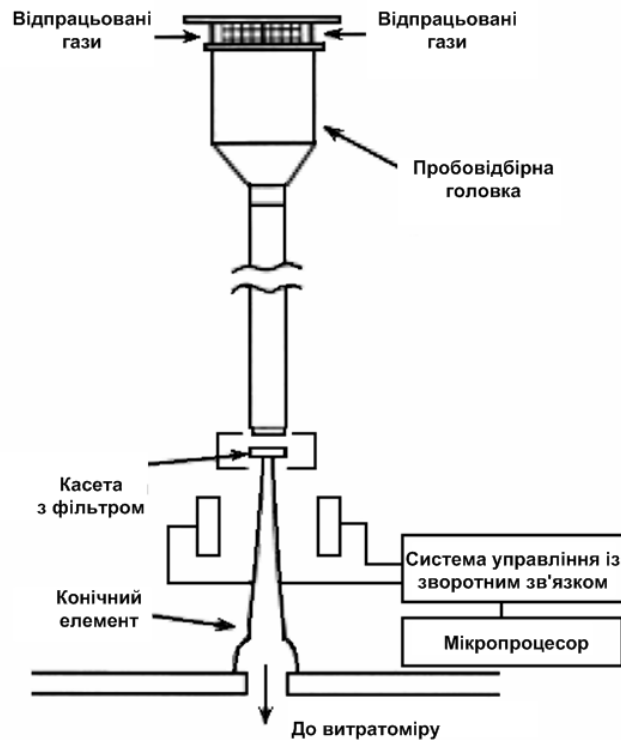


Рис. 1 – Принципова схема методу ТЕОМ

перервно проходять через вакуумний конічний елемент з нержавіючої сталі, на вході в який розташована касета з фільтром для уловлювання ТЧ. Діаметр верхньої горловини елемента становить 2 мм. Конічний елемент безупинно приводиться в коливальний рух у вертикальній площині з частотою порядку 100 Гц. Збільшення загальної маси пристрою при осадженні ТЧ на фільтрі призводить до зміни частоти коливань уловлювача в цілому, що реєструється оптико-електронною системою спостереження із зворотним зв'язком. Це дозволяє безперервно реєструвати масу накопичених частинок та розраховувати їх миттєву концентрацію у ВГ з роздільною здатністю в декілька секунд, а також розраховувати середню концентрацію частинок за цикл випробувань. Межа детектування концентрації ТЧ дорівнює приблизно  $2 \text{ мкг/м}^3$ . Метод забезпечує високу узгодженість результатів зі стандартною гравіметричною процедурою визначення вмісту ТЧ у ВГ за рахунок однакового механізму вловлювання части-

нок [8]. Однак при високому вмісті летючого матеріалу (вуглеводнів) метод дає занижені результати.

Мікроваги з п'єзоелектричним чутливим елементом – *Quartz Crystal Microbalance* – QCM мають той же принцип роботи, що й ТЕОМ [3]. При цьому в якості чутливого елемента використаний п'єзоелектричний датчик, який являє собою кварцовий кристал. Такі кристали є найпростішими гармонійними осциляторами з природною частотою  $\sim 5 \text{ МГц}$ . Принцип дії датчика заснований на п'єзоелектричному ефекті - виникненні електричного заряду на протилежних гранях кристалу, який має форму прямокутного паралелепіпеду, при його деформації під дією стискаючого або розтяжного зусилля. Для вимірювання електричних зарядів, що виникають на протилежних гранях кварцової пластини, останні покривають металевим шаром, в результаті чого утворюється конденсатор. Кварц має низьку температурну чутливість і має значний модуль пружності –  $8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , що до-

зволяє здійснювати вимірювання при незначних переміщеннях [9]. П'єзоелектричні чутливі елементи дають можливість контролювати процеси, що швидко протікають, оскільки заряди утворюються практично безінерційно.

Через виборчий вхід частинки діаметром менше 2,5 мкм надходять у вимірювальний пристрій і проходять через зону коронного розряду, де отримують позитивний заряд (рис. 2). За рахунок дії електростатичних сил заряджені частинки осідають на поверхні кварцового кристалу, частота коливань якого змінюється відповідно до ма-

си осаджувального матеріалу. При цьому зміна частоти коливань кристалу носить лінійний характер, що забезпечує можливість проводити вимірювання навіть при незначних відкладеннях частинок та, відповідно, при невеликих змінах їхньої маси. Невеликі маси відкладень дозволяють кристалу з частинками вібрувати як єдине ціле. Оскільки частота власних коливань кварцу надзвичайно висока, то механічні коливання не можуть вплинути на результати вимірювань, чим забезпечується надійність датчика при високій роздільній здатності – 2 мкг/м<sup>3</sup>.

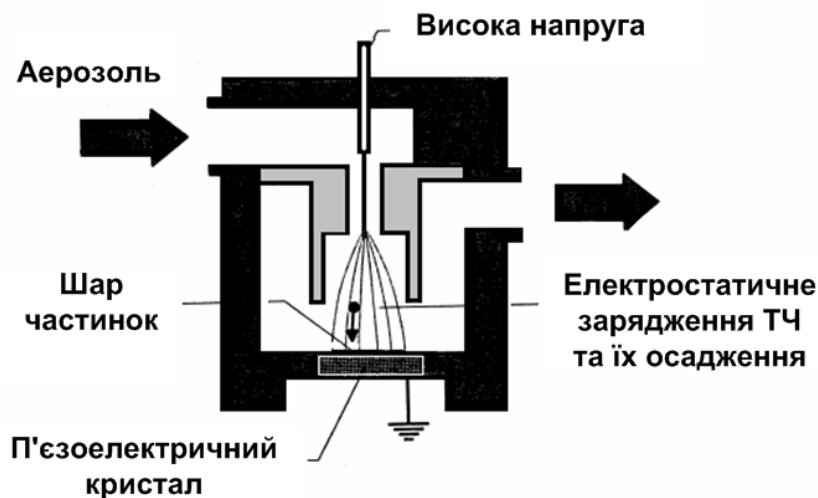


Рис. 2 – Схема мікроваг з п'єзоелектричним чутливим елементом

Кореляція результатів QCM та стандартного гравіметричного методу в діапазоні 0,2...2,5 мкг/м<sup>3</sup> становить майже 0,95. Цей метод є одним з найбільш ефективних при вимірюванні низьких рівнів викидів ТЧ, наприклад, якщо дизель оснащений сажовим фільтром. Він показує більш високу відтворюваність, ніж стандартний гравіметричний метод вимірювань. Коефіцієнт варіації результатів методу QCM протягом одного дня не перевищує 10 % для транзійтних циклів, при цьому варіація результатів між випробуваннями, зробленими в різні дні складає 15 ... 30 % [8].

Метод лазерного розжарювання ВГ – Laser Induced Incandescence - LII дозволяє одночасно проводити вимірювання масової концентрації дисперсних частинок, розмірів первинних частинок сажі та лічильної концентрації ТЧ одним приладом [2,3,12]. Основний принцип вимірювань полягає у швидкому нагріванні частинок сажі високоенергетичним лазерним імпульсом до температури ~ 4000 К та аналізі термічного ви-

промінювання, яке при цьому утворюється. У момент, коли температура нагріву частинок максимальна, сигнал детектору майже пропорційний об'ємній та масовій концентраціям ТЧ у обсязі проби, аналізується. При високій інтенсивності лазерного випромінювання (кілька десятків мВт/см<sup>2</sup>) ТЧ досягають температури близько 4000 К за кілька наносекунд. При довжині хвилі детектування ~530 нм інтенсивність термічного випромінювання збільшується на кілька порядків і стає можливим чітко відділення сигналу детектору від фонового свічення.

Аналізатор ЛІ складається з джерела випромінювання, в якості якого використаний Nd:YAG лазер, чуттєвого елемента, кільця адаптера для встановлення у вихлопній трубі дизеля та діалогового пристрою оцінки даних (рис. 3) [12]. Аналізатор забезпечує можливість проведення як автономних, так і системних вимірів з високою роздільною здатністю за часом – до 20 Гц. Це дозволяє використовувати пристрій при дослідженнях високо динамічних процесів,

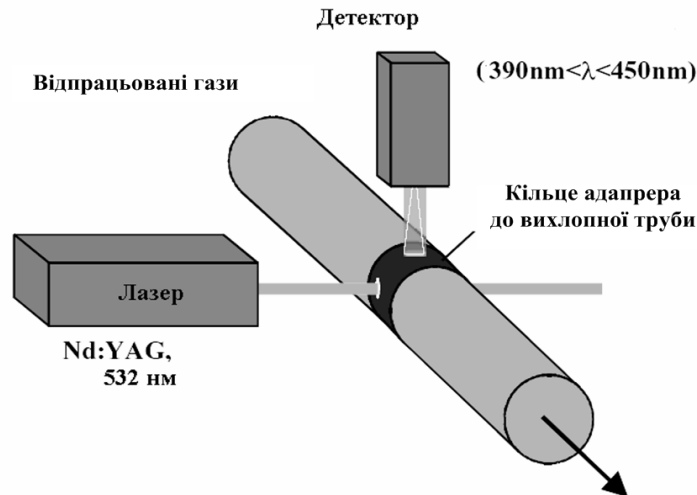


Рис. 3 – Схема аналізатору Laser Induced Incandescence

зокрема при випробуваннях двигунів за циклами змінних режимів.

Основні переваги даного методу, крім його високої чутливості –  $2 \text{ мкг/м}^3$ , це гнучка придатність як для нерозбавлених, так і для розбавлених ВГ, як для вимірювань в системах CVS, так і в частково поточних тунелях. Завдяки своїй високій чутливості і високій роздільній здатності за часом вимірювач ЛІ може бути використаний при випробуваннях двигунів з наднизькими рівнями викидів ТЧ, випробуваннях за всіма стандартними процедурами на динамометричних або моторних стендах. Аналізатор ЛІ забезпечує високу відтворюваність даних, навіть якщо рівні концентрацій частинок після сажового фільтру близькі до рівня шуму приладу. Типовий коефіцієнт варіації при випробуваннях дизеля протягом одного дня не перевищує 12,5 % для циклів перехідних режимів та 20 % для стаціонарних циклів. У дослідженнях фірми Рікардо концентрації ТЧ становили  $0,008 \text{ мг/м}^3$  при випробуваннях за циклами ЕТС та WHDC, що приблизно відповідає рівням викидів ТЧ –  $0,0008$  та  $0,0012 \text{ г/кВт-год}$  [3].

Альтернативою представленим високотехнологічним та вартісним методам вимірювань миттєвих концентрацій ТЧ є недорогий, мало інерційний *метод динамічного контролю ТЧ з оптичним чутливим*

*елементом*. Цей метод реалізується на базі мікротунелю МКТ-2 і дозволяє визначати миттєві концентрації ТЧ –  $C_{pt}$  за показником оптичної непрозорості – димності ВГ, розбавлених в  $q$  разів повітрям в мікротунелі –  $N_{dil}$ , з використанням калібрувальної характеристики  $C_{pt} = f(N_{dil})$ , яка визначається експериментально. Описання даного методу та технічних засобів для його використання представлено нижче.

**Методика визначення допустимого ступеня розбавлення ВГ повітрям при динамічному контролі викидів ТЧ в МКТ-2.** Ця методика дозволяє встановити максимально допустимі значення коефіцієнту розбавлення ВГ –  $q_{max}$ , при якому величина  $N_{dil}$ , що вимірюється оптичним чутливим елементом досягає межі чутливості димоміру Hartridge –  $\Delta N = 0,1\%$  [13]. При цьому використовується формула:

$$q_{max} = \frac{N(C_{pt})}{\Delta N},$$

де  $N(C_{pt})$  – емпірична залежність, яка відображає кореляційний зв'язок між димністю та концентрацією ТЧ у ВГ [14]:

$$N = 100 \cdot (1 - e^{-2,865 \cdot C}).$$

Визначення величин  $q_{max}$  для різних нормованих рівнів викидів ТЧ здійснюється шляхом підстановки у формули (1) і (2) відповідних цим рівням концентрацій ТЧ у ВГ.

### Результати та обговорення

**Принцип дії та технічні характеристики мікротунелю МКТ-2 [2].** Мікротунель МКТ-2 – компактна автоматизована частково поточна система контролю викидів ТЧ, спроектована у відповідності до вимог міжнародних нормативних документів

[1,15,16]. Принцип дії МКТ-2 полягає у наступному (рис. 4).

Частина ВГ з масовою витратою  $G_{exh}^t$  відбирається з вихлопної труби двигуна – ВГ і через трубопровід транспортування проби – ТП подається в розбавляючий ту-

нель – РТ, де відбувається її змішування з атмосферним повітрям. З тунелю потік розбавлених ВГ з масовою витратою  $G_t$  через один з шарових кранів надходить або в байпасну магістраль, або в робочий канал, в якому встановлений патрон із двома фільтрами для відбору ТЧ. Масова витрата  $G_t$  створюється штатною газодувкою ГД1 та підтримується постійною на заданому рівні у відповідності до обраного режиму розба-

влення ВГ. При цьому температура проби перед фільтром  $t_f$  не перевищує 52 °С.

Величина  $G_t$  вимірюється витратоміром  $B_1$  – колектором з внутрішнім діаметром 8 мм; для визначення масової витрати потоку компенсованого повітря  $G_{com}$ , яка дорівнює величині  $G_{exh}^t$ , використовується витратомір  $B_2$  – нормальне сопло з внутрішнім діаметром 3 мм.

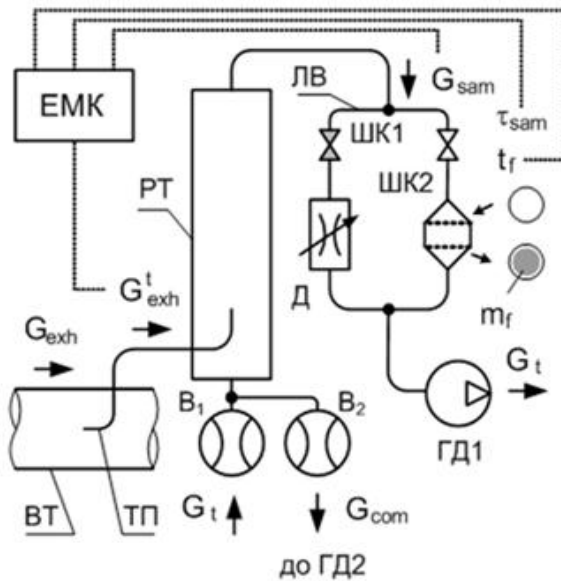


Рис. 4 – Принципова схема та загальний вигляд мікротунелю МКТ-2

Шарові крани К1 і К2, які визначають напрямок руху потоку проби у лінії відбору проб – ЛВ, завжди перебувають у протилежних станах: коли один відкритий – інший закритий і навпаки. При підготовці проби до аналізу відкритий кран К1 і розбавлені ВГ протікають через байпасну магістраль. За допомогою дроселя Д забезпечується регулювання тиску в даній магістралі таким чином, щоб у момент перемикання кранів не виникало гідравлічного удару. При виконанні процедури відбору проб ТЧ відкритий кран К2 і весь потік розбавлених ВГ протікає через фільтр. При цьому фіксується тривалість даної процедури –  $\tau_{sam}$ . Коефіцієнт розбавлення ВГ у тунелі –  $q$  визначається за формулою

$$q = \frac{G_t}{G_{com}}$$

Після завершення випробувань вимірюється маса ТЧ –  $m_f$ , як приріст маси робочого фільтру за час випробувань. Для контролю параметрів  $G_t$ ,  $G_{com}$ ,  $\tau_{sam}$ ,  $t_f$  і керу-

вання шаровими кранами К1 і К2 використовується мікропроцесорний блок. У ході виконання випробувань усі зазначені величини протоколюються та використовуються при визначенні масових (г/год), питомих (г/кВт-год) викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля та середньоексплуатаційного викиду ТЧ за цикл (г/кВт-год).

До складу вимірювального комплексу з МКТ-2 входять наступні елементи (рис. 5).

1) Система розбавлення частки ВГ (0,02...1,2 %) повітрям, яка поєднує у собі три підсистеми:

а) систему відбору частки потоку ВГ, до якої входять:

– пробовідбірник – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 6 мм і довжиною 80 мм, виготовлений у двох виконаннях, які передбачають установку пробовідбірника паралельно (виконання 1) та перпендикулярно (виконання 2) потоку ВГ;

– трубопровід транспортування проби – ТП з внутрішнім діаметром 6 мм та малою довжиною (для зменшення теплових втрат і

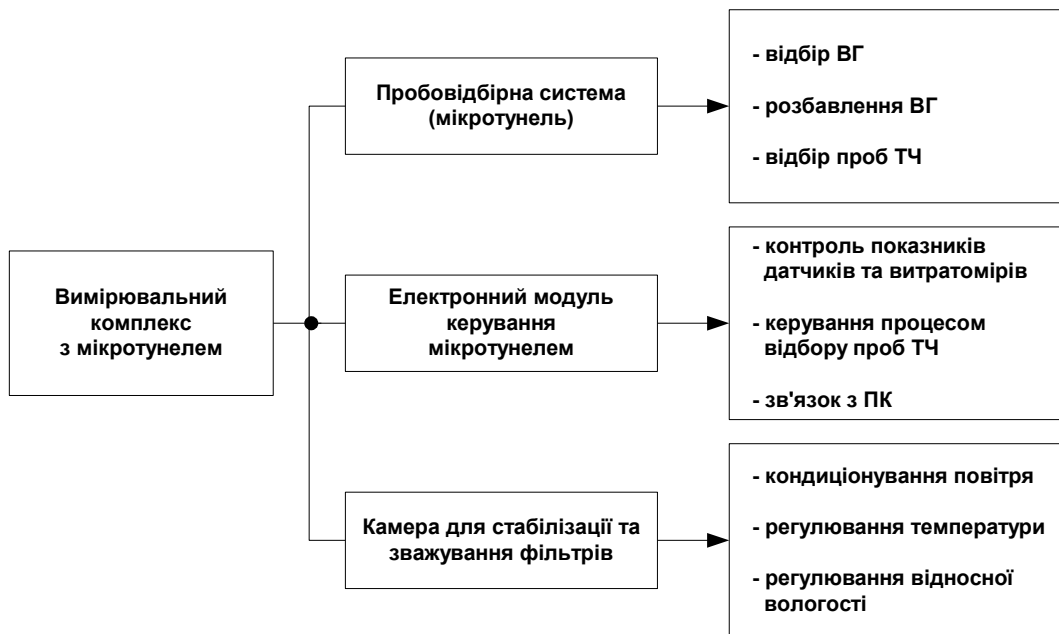


Рис. 5 – Елементи вимірювального комплексу з МКТ-2 та функції, які вони виконують

осадження ТЧ) – 80 мм;

– регулятор витрати ВГ, який плавно перекриває перетин ТП від повністю закритого до повністю відкритого стану;

б) систему розбавлення ВГ, має такі складові:

– розбавляючий тунель – РТ – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 300 мм;

– діафрагму, яка встановлюється на вході в тунель з метою покращення процесу змішування ВГ з повітрям;

– газодувку з продуктивністю 20...120 л/хв, яка є одночасно й пробовідбірним насосом;

– витратоміри газового потоку розбавлених ВГ у тунелі –  $G_t$  (колектор, профільований по дузі окружності з внутрішнім діаметром 8 мм) та потоку компенсованого повітря –  $G_{com}$  (нормальне сопло діаметром 3 мм);

– гнучкий полівініловий шланг довжиною 2 м, який пов'язує тунель з колектором.

в) систему відбору проб ТЧ, елементами якої є:

– лінія відбору проб – ЛВ – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 16 мм і довжиною 950 мм;

– регулятори режимів відбір-байпас – два шарових крани, які знаходяться у протилежних станах;

– байпасна магістраль, в якій встановлено дросель, що вирівнює тиск у байпасній та робочій магістралях;

– робоча магістраль, в якій встановлено патрон з фільтром (або двома фільтрами) для відбору ТЧ (діаметром 70 мм);

– захисний фільтр з паперовим фільтруючим елементом, який застерігає пробовідбірний насос від забруднення ТЧ;

– гнучкий полівініловий шланг довжиною 2 м, який пов'язує захисний фільтр з пробовідбірним насосом.

Система розбавлення частки ВГ повітрям має такі газодинамічні параметри:

– масові витрати потоків: у ТП – 0,15...2,0 кг/год, у РТ і ЛВ (один потік) – 4,3...9,0 кг/год;

– діапазон варіювання коефіцієнту  $q$  – 4...50;

– спосіб визначення масової витрати  $G_{ext}^t$  – компенсаційний.

2) Електронний модуль керування (ЕМК)

– являє собою пов'язаний з персональним комп'ютером (ПК) мікропроцесорний блок, до якого приєднані усі датчики та органи керування мікротунеля. За допомогою ЕМК виконуються наступні операції:

– контроль поточних показів датчиків та витратомірів пробовідбірної системи;

– керування процесом відбору проб ТЧ (перемикання режимів байпас-відбір проб ТЧ за допомогою шарових кранів);

– передача функцій контролю та керування мікротунелем на ПК (за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення), що дозволяє реєструвати, обробляти та протоколювати результати вимірювань масових викидів дизельних ТЧ.

3) *Камера для стабілізації та зважування фільтрів*, яка забезпечує потрібні умови для визначення маси ТЧ (рис. 6).

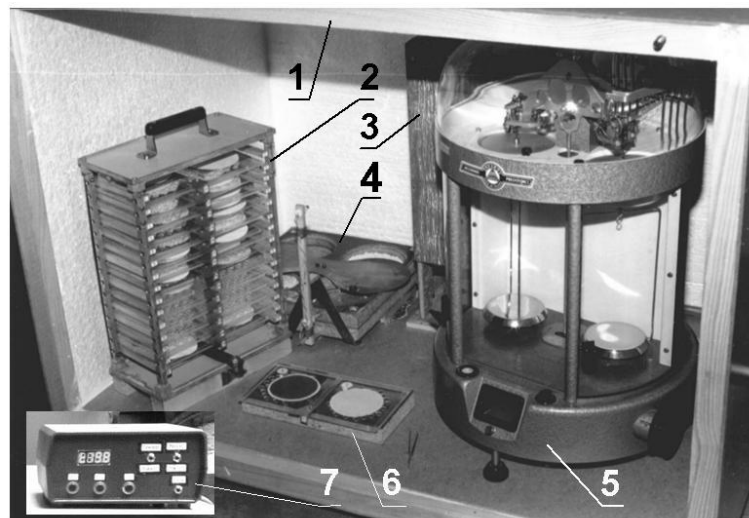
**Технічні характеристики мікротунелю МКТ-2** при використанні гравіметричного методу контролю ТЧ:

– *показники точності вимірювань*: інструментальні похибки вимірювань масових (г/год.) та середньоексплуатаційних

викидів ТЧ (г/кВт·год) складають 3...10% та 3,5%, відповідно (при допустимих значеннях вказаних похибок: 3...8,5%, та 3,6...5,1%, відповідно);

– *показники швидкодії*: тривалість підготовки мікротунеля до проведення вимірювання не перевищує 1 хв; тривалості процедур відбору проб ТЧ становлять: на режимах холостого ходу та малої потужності – 5...7 хв, на режимах середньої потужності – 2...3 хв, на режимі номінальної потужності – до 1 хв;

– *масогабаритні показники*: розміри тунелю ( $L, B, H$ ) – 500×300×1200 – мм, маса (з газодувкою) – 40 кг.



1 – корпус; 2 – касета з фільтрами; 3 – газохід з вентилятором та нагрівачем; 4 – регулятор поглинання-виділення вологи; 5 – аналітичні ваги; 6 – підставка для фільтрів; 7 – електронний модуль керування.

**Рис. 6** – Основні елементи камери для стабілізації та зважування фільтрів

Основними якостями МКТ-2, які надають цій системі переваги над аналогами, є: *універсальність* – можливість використання системи на різних об'єктах: автомобільних, тепловозних, позашляхових, судових, тракторних та ін. дизелях; *компактність та мобільність*, які забезпечують зручність транспортування системи та монтажу її на об'єкті; *підвищена ефективність* за рахунок використання заходів з підвищення точності вимірювань та зменшення тривалості і вартості процедури випробувань [17].

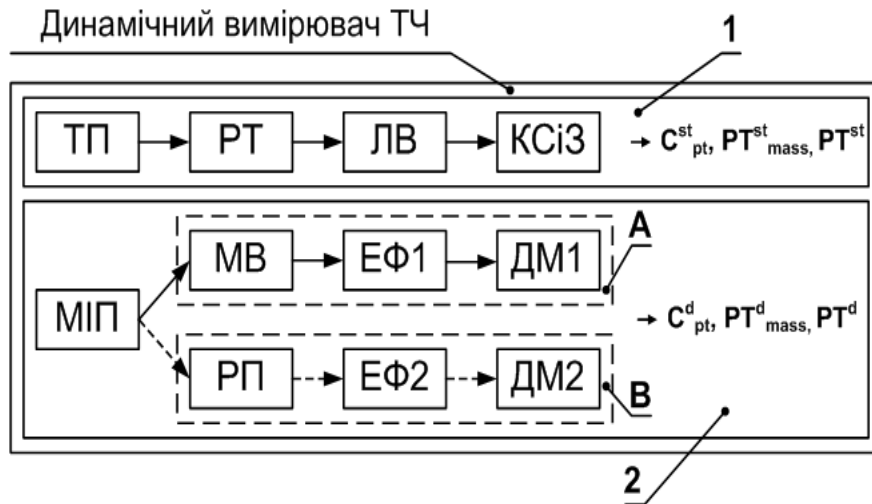
**Метод динамічного контролю викидів ТЧ з оптичним чутливим елементом для використання в мікротунелі МКТ-2** призначений для визначення миттєвих значень кількісних характеристик вмісту ТЧ у ВГ дизелів: концентрацій (г/мн<sup>3</sup>), масових (г/год) та питомих (г/кВт·год) ви-

кидів ТЧ. Метод передбачає використання динамічного вимірювача ТЧ, до складу якого входять дві установки (рис. 7):

1) частково потокова система розбавлення ВГ – *мікротунель МКТ-2*, яка виконує функції підготовки проби розбавлених ВГ до вимірювань та калібрування динамічного детектору ТЧ; в ході калібрування визначаються еталонні значення концентрацій, масових та питомих викидів ТЧ на сталих та несталих (перехідних) режимах випробувань;

2) система контролю миттєвих значень концентрацій, масових та питомих викидів ТЧ на різних режимах роботи дизеля – *динамічний детектор ТЧ*, яка може використовуватись з одним робочим вимірювальним каналом або з двома – робочим і контрольним вимірювальними каналами.





1 – мікротунель МКТ-2; 2 – динамічний детектор ТЧ;  
А – робочий канал; В – контрольний канал.

Рис. 7 – Основні елементи динамічного вимірювача ТЧ

**Опис елементів динамічного детектору ТЧ:**

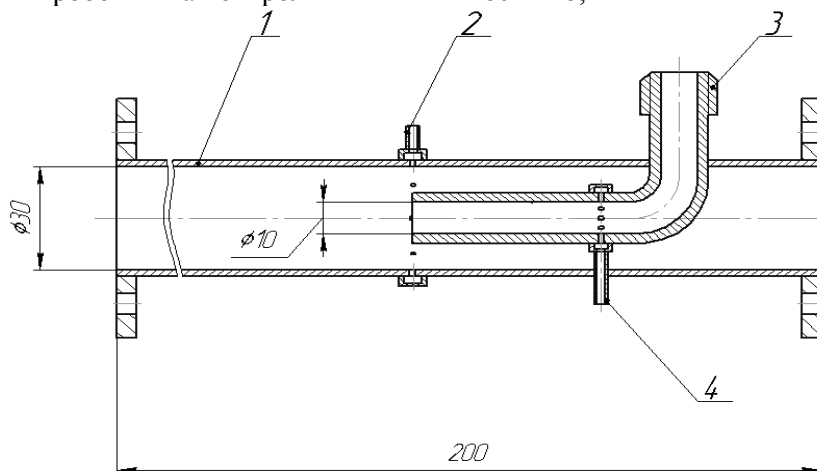
МІП – модуль з ізокінетичним пробовідбірником (ІКП), призначений для відбору з тунелю пропорційної частки проби розбавлених ВГ, яка дорівнює відношенню площ поперечного перетину пробовідбірника та тунелю (рис. 8); контроль ізокінетичного режиму відбору проби здійснюється за перепадом статичних тисків газових потоків у пробовідбірнику та тунелі –  $\Delta P_{ик}$ , який підтримується на заданому рівні;

МВ – масовий витратомір – сопло Вентурі, призначений для контролю кількості проби, що відбирається з тунелю до робочого вимірювального каналу (рис. 9);

РП – розподілювач потоків проби розбавлених ВГ між робочим та контрольним

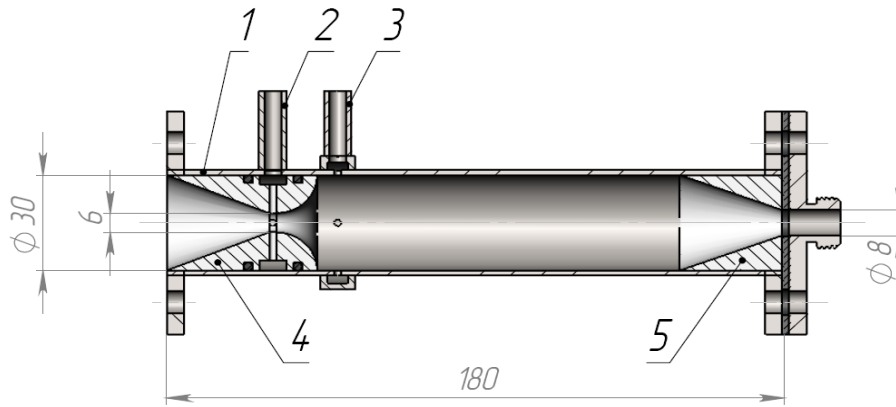
каналами, який забезпечує рівність масових витрат обох потоків за рахунок підтримки «нульового» перепаду статичних тисків між двома однаковими соплами Вентурі, встановленими в кожному каналі (рис. 10); регулювання потоків проби здійснюється за допомогою заслінки;

ЕФ1, ЕФ2 – електричні фільтри для уловлювання ТЧ, які призначені для очищення потоків проби розбавлених ВГ від ТЧ з високою ефективністю – до 97 % (рис. 11); фільтр ЕФ1, який встановлений в робочому каналі, включається тільки на етапі установки «нуля» шкали концентрацій ТЧ; фільтр ЕФ2, який встановлений в контрольному каналі, при проведенні вимірювань концентрацій ТЧ знаходиться у включеному стані постійно;

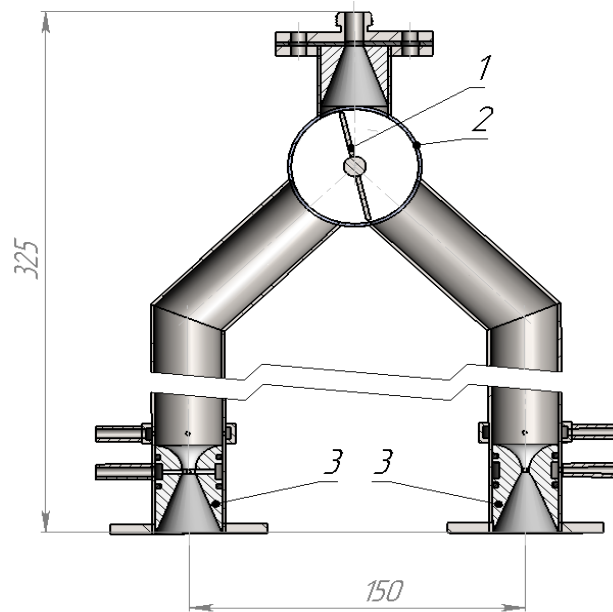


1 – трубопровід; 2, 4 – штуцери, 3 – ізокінетичний пробовідбірник

Рис. 8 – Модуль з ізокінетичним пробовідбірником

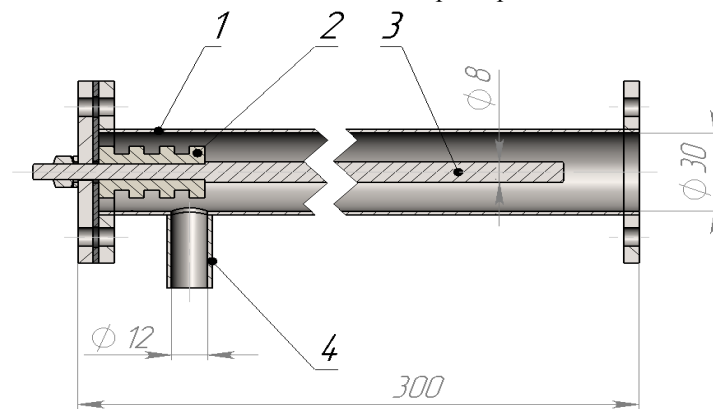


1 – трубопровід; 2, 3 – штуцери; 4 – сопло Вентури; 5 – конфузур  
**Рис. 9** – Масовий витратомір



1 – заслінка; 2 – корпус; 3 – сопла Вентури.

**Рис. 10** – Розподільвач потоків проби розбавлених ВГ

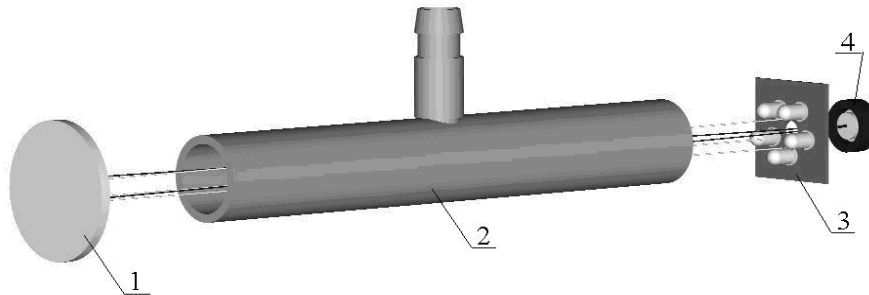


1 – трубопровід - осаджувальний електрод; 2 – ізолятор;  
 3 – металевий стрижень – коронуючий електрод; 4 – штуцер.

**Рис. 11** – Електрофільтр для уловлювання ГЧ

ДМ1, ДМ2 – вимірювачі оптичної щільності потоків проби розбавлених ВГ в робочому та контрольному каналах – димоміри (рис. 12); при цьому різниця значень оптичної щільності потоків в цих ка-

налах –  $\Delta N$  пропорційна вмісту ТЧ у ВГ дизеля; залежність величини  $\Delta N$  від концентрації ТЧ визначається в результаті калібрування динамічного детектора ТЧ.



1 - відбивач світла, 2 - кювета, 3 - джерело світла, 4 – фотоприймач  
Рис. 12 – Вимірювач оптичної щільності потоку проби – димомір

При роботі динамічного детектору ТЧ миттєві значення концентрацій дизельних ТЧ на робочих режимах випробувань визначаються за методикою, яка враховує інструментальні та методичні похибки обладнання [18].

**Визначення допустимого ступеня розбавлення ВГ повітрям в МКТ-2 при**

**проведенні динамічного контролю викидів ТЧ.** У відповідності до наведеної вище методики встановлено максимально допустимі значення коефіцієнту розбавлення ВГ –  $q_{max}$  при випробуванні дизелів, які відповідають вимогам різних стандартів Євро (табл. 1).

Таблиця 1

Значення  $q_{max}$  при різних рівнях викидів дизельних ТЧ

Норматив	Нормований питомий викид ТЧ, г/(кВт·год)	Рівень концентрацій ТЧ у ВГ, мг/м <sup>3</sup>	$q_{max}$
Євро-3	0,1	1,25	36
Євро-4, 5	0,02	0,25	7
Євро-6	0,005	0,063	2

Результати обчислень свідчать про суттєве зменшення діапазону варіювання коефіцієнту розбавлення ВГ в тунелі при зниженні викидів ТЧ до рівня норм Євро-6. При використанні динамічного детектору

ТЧ з низькими значеннями коефіцієнта  $q$  мікротунель необхідно додатково оснастити системою охолодження проби для зменшення її температури до граничного значення – 52 °С.

**Висновки**

1. Проаналізовано сучасні методи динамічного контролю однієї з наднебезпечних для організму людини та навколишнього середовища шкідливої речовини – дизельних твердих частинок. Розглянуто принципи дії та технічні характеристики методів: Method for Real-Time Mass Microbalances, Tapered element oscillating microbalance – TEOM, Quartz Crystal Microbalance – QCM та Laser Induced Incandescence – LII. Встановлено, що точність цих методів забезпечує можливість вимірювань наднизьких концен-

трацій ТЧ з чутливістю до  $\pm 2$  мкг/м<sup>3</sup> в діапазонах: 1,25 ... 0,25 ... 0,063 мг/м<sup>3</sup> відповідно до вимог норм Євро-3, Євро-4,5 та Євро-6, а швидкодія вказаних методів забезпечує можливість контролю миттєвих значень викидів ТЧ в ході виконання транзйентних випробувальних циклів дизелів: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVС), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) та ін.

2. Розроблено метод динамічного контролю викидів дизельних ТЧ з оптичним

чутливим елементом, описано технічні засоби для реалізації даного методу та обґрунтовано доцільність його використання на базі компактного автоматизованого вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2,

який є універсальним та може використовуватись при проведенні екологічного діагностування дизелів різних типів: автомобільних, тепловозних, тракторних та ін.

### Література

1. Regulation No 49. Revision 6. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positiveignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. / United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. // E/ECE/TRANS/505, 2013. 434 p.
2. Burtscher H. Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines. *GRPE . Fachhochschule Aargau, University of Applied Science*. 2001. 45 p.
3. Anderson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 2 / Heavy Duty Methodology Development . *Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd*. 2003. 222p.
4. Tsugio A., Tatsuji S., Morimasa H. Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving. *SAE Technical Papers*. 1989. №890468. P. 151-163.
5. Steven H. Development of Worldwide Harmonized Heavyduty Engine Emissions Test Cycle / Final Report ECE-GRPE WHDC Working Group. *Informal document No2 GRPE 42nd session*. 2001. TRANS/WP 29/GRPE/2001/2. 58 p.
6. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure . *Draft Global Technical Regulation (GTR). UN/ECE-WP 29 – GRPE WHDC Working Group. Informal Document № GRPE-48-7*. 2004. 86 p.
7. Oswald M. Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Entwicklung von Dieselmotoren . *VDI-BER*. 1988. № 681. P. 365-377.
8. Andersson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 1. Heavy Duty Methodology Development. *Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd*, 2002. 136 p.
9. Lianga Z., Tiana J., Rezaeia S., Zhanga Y. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS. *School of Mechanical Engineering, University of Birmingham*. 2015. 31 p.
10. Полив'ячук А., Харитоновна Т., Чумак О. Дослідження ефективності використання вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2 при проведенні екологічного діагностування тепловозів. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля*. 2007. № 8(114). С. 119-124.
11. Polivyanchuk A., Parsadanov I. Experimental verification of microtunnel MКТ-2 on the brake stand autotractor diesel engine . *Industrial technology and engineering. Republic of Kazakhstan*. 2015. №2 (15). P. 11-16.
12. Schraml S., Will S., Leipertz A. Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of DI diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII) . *SAE Technical Papers*, 2001. № 010146. 8 p.
13. ДСТУ 4276:2004. Атмосфера. Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями. Київ: Держкомітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2004. 8 с.
14. Hardenberg H., Albreht H. Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen. *MTZ: Motortechn. Z*. 1987. № 2. P. 51–54.
15. Regulation № 96. Revision 3. 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. E/ECE/TRANS/505. 2014. 416 p.
16. ISO 8178-1: 2017. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 2017. 150 p. /
17. Полив'ячук А.П. Повышение эффективности систем экологического диагностирования дизельных силовых установок – туннелей. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2016. № 3-4 (26). С. 132-140.
18. Polivyanchuk A. Improving the efficiency of emission control dispersed particles from diesel exhaust gases. *Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2014. №1140, вип. 11. С. 83-88.

### References

1. Regulation No 49. Revision 6 (2013). Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positiveignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. E/ECE/TRANS/505, 434. [in English].

2. Burtscher, H. (2001). Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines. Done for the Particle Measurement Programme (PMP) for BUWAL/GRPE. Fachhochschule Aargau, University of Applied Science, Windisch, 45. [in English].
3. Anderson, J.D. (2003). UK Particle Measurement Programme. Phase 2. Heavy Duty Methodology Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd. 222. [in English].
4. Tsugio, A., Tatsuji, S., Morimasa, H. (1989). Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving. SAE Technical Papers, 890468, 151-163. [in English].
5. Steven, H. (2001). Development of Worldwide Harmonized Heavyduty Engine Emissions Test Cycle. Final Report ECE-GRPE WHDC Working Group. Informal document No2 GRPE 42nd session. TRANS/WP 29/GRPE/2001/2, 58. [in English].
6. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure (2004). Draft Global Technical Regulation (GTR). UN/ECE-WP 29. GRPE WHDC Working Group. Informal Document, GRPE-48-7, 86. [in English].
7. Oswald, M. (1988). Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Entwicklung von Dieselmotoren. VDI-BER, 681, 365-377. [in English].
8. Andersson, J.D. (2002). UK Particle Measurement Programme. Phase 1. Heavy Duty Methodology Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd, 136. [in English].
9. Lianga, Z., Tiana, J., Rezaeia, S., Zhanga, Y. (2015). Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS. School of Mechanical Engineering. University of Birmingham, 31. [in English].
10. Polivyanchuk, A., Kharitonova, T., Chumak, O. (2007). Doslidzhennya efektyvnosti vykorystannya vymiryval'noho kompleksu z mikrotunelem MKT-2 pry provedenni ekolohichnoho diahnostuvannya teplovoziv. [Investigation of the efficiency of using the measuring complex with the microtubule MKT-2 during the ecological diagnostics of diesel locomotives ]. Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university, 8(114), 119-124. [in Ukrainian].
11. Polivyanchuk, A., Parsadanov, I. (2015). Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine . Industrial technology and engineering. Republic of Kazakhstan, 2(15), 11-16. [in English].
12. Schraml, S., Will, S., Leipertz, A. (2001). Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of DI diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII). SAE Technical Papers, 010146, 8. [in English].
13. DSTU 4276:2004. (2004). Atmosfera. Normy i metody vymiryuvan' dymnosti vidprats'ovanykh haziv avtomobiliv z dyzelyamy abo hazodyzelyamy [Atmosphere. Norms and methods of measuring the smoke of exhaust gases of cars with diesel engines or gas dischips]. Kyiv: The State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy, 8. [in Ukrainian].
14. Hardenberg, H., Albrecht, H. (1987). Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen. MTZ: Motortechn. Z., 2, 51-54. [in English].
15. Regulation № 96. Revision 3. (2014). 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. E/ECE/TRANS/505, 416. [in English].
16. ISO 8178-1: 2017. (2017). Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 150. [in English].
17. Polivyanchuk, A., Skurydyna, A., Kaslyn, I. (2016). Povyshenie ehffektivnosti sistem ehkologicheskogo diagnostirovaniya dizel'nih silovih ustanovok – tunnelej. [Increasing the effectiveness of environmental diagnostic systems for diesel power plants - tunnels]. Man and the environment. Problems of neocology, 3-4(26), 132-140. [in Russian].
18. Polivyanchuk, A. (2014). Improving the efficiency of emission control dispersed particles from diesel exhaust gases. Bulletin of Kharkiv National University of Karazin. Series «Ecology», 11(1140), 83-88. [in English].

Надійшла до редколегії 21.08.2017