

стандартизованого стаціонарного испытательного цикла ESC. Усовершенствованы математический аппарат и методика применения комплексного топливно-экологического критерия проф. Игоря Парсаданова. Получены распределения значений этого показателя уровня экологической безопасности процесса эксплуатации энергоустановок с поршневым ДВС по полю рабочих режимов автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 и по режимам стандартизованного стаціонарного испытательного цикла ESC, а также его среднеэксплуатационное значение. Установлено, что среднеэксплуатационные значения критерия  $K_{fe}$  и эффекта  $\delta K_{fe}$  для всех исследованных вариантов учета массовых часовых выбросов Б(а)П и ПАУ с потоком отработавших газов дизеля почти идентичны друг другу и снижают значение критерия  $K_{fe}$  на 29 – 32 % – с 63 % до 42 – 45 %. Научная новизна полученных результатов заключается в том, что получил дальнейшее развитие подход проф. Игоря Парсаданова к критериальному оцениванию топливно-экологической эффективности процесса эксплуатации автотракторных дизельных двигателей как части энергоустановки с учетом массовых часовых выбросов бенз(а)пирена и полициклических ароматических углеводородов с потоком отработавших газов поршневого ДВС как токсичных поллютантов, а также в разработке методики определения таких выбросов и их весомости в направлении применения этого математического аппарата для стандартизованных стаціонарных испытательных циклов.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность; технологии защиты окружающей среды; энергетические установки; поршневые двигатели внутреннего сгорания; выброс поллютантов, критериальное оценивание; бенз(а)пирен; полициклические ароматические углеводороды.

УДК 621.43.068

DOI: 10.20998/0419-8719.2020.1.08

*А.П. Полив'яничук*

## РЕАЛІЗАЦІЯ НА БАЗІ МІКРОТУНЕЛЮ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЙ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛІВ

*Проаналізовано сучасні методи динамічного контролю викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів. 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 концентрацій твердих частинок з чутливістю до  $\pm 2 \text{ мкг/м}^3$  в діапазонах: 1,25 ... 0,25 ... 0,063  $\text{мг/м}^3$ , відповідно до вимог норм Євро-3, Євро-4,5 та Євро-6, а швидкодія вказаних методів забезпечує можливість контролю миттєвих значень викидів твердих частинок в ході виконання транзйентних випробувальних циклів дизелів: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVTC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) та ін. На основі аналізу вказаних методів, світового та вітчизняного досвіду створення і експлуатації систем екологічної діагностики дизелів запропоновано для практичного застосування метод динамічного контролю концентрацій твердих частинок з оптичним чутливим елементом. Сутність даного методу полягає у непрямому визначенні миттєвих концентрацій твердих частинок за показником оптичної непрозорості – димності відпрацьованих газів дизеля з використанням емпіричної залежності між цими величинами, яка встановлюється в ході калібрування оптичного детектора твердих частинок гравіметричною системою – мікротунелем МКТ-2. Розглянуті принципова схема даного методу, технічні засоби для його реалізації, до яких відносяться: частковоопотокова система розбавлення відпрацьованих газів повітрям з МКТ-2 та динамічний детектор твердих частинок. Встановлено максимально допустимі значення коефіцієнтів розбавлення відпрацьованих газів повітрям в МКТ-2, при яких забезпечується потрібна точність вимірювань концентрацій твердих частинок оптичним детектором з чутливістю  $\pm 0,1 \%$  за шкалою Hartridge при відповідності рівнів викидів твердих частинок дизеля вимогам норм Євро 3-6.*

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

### Вступ

Відомо, що робота транспортних дизелів різного призначення супроводжується викидами у атмосферу шкідливих речовин – продуктів згоряння палива, що сприяє розвитку локальних та глобальних екологічних проблем навколишнього середовища, таких як: парниковий ефект, руйнування озонового шару атмосфери, погіршення якості повітря, утворення смогів, випадіння кислотних опадів та ін.

До складу найбільш небезпечних за дією на організм людини та довкілля забруднюючих речовин у складі відпрацьованих газів (ВГ) дизелів відносять тверді частинки (ТЧ), які визначають як

весь матеріал, зібраний на спеціальних фільтруючих засобах після пропускання через них ВГ, розбавлених чистим повітрям до температури, що не перевищує 52 °С [1].

Для забезпечення ефективного контролю нормованих викидів дизельних ТЧ передбачено використання складних високовартісних вимірювальних комплексів – розбавляючих тунелів, які в умовах інтенсивної екологічної модернізації сучасних двигунів повинні мати такі властивості, як: висока універсальність – можливість використання при проведенні екологічної діагностики дизелів різних типів автомобільних, тепловозних, тракторних, судових та ін.; висока точність – можливість ви-

мірювань наднизьких концентрацій ТЧ з чутливістю до  $\pm 2$  мкг/м<sup>3</sup> в діапазонах: 1,25 ... 0,25 ... 0,063 мкг/м<sup>3</sup>, які відповідають вимогам норм Євро-3, Євро-4,5 та Євро-6, відповідно [2-4]; компактність, мобільність та низька вартість обладнання. З введенням до складу нормованих процедур екологічної діагностики дизелів транзйентних випробувальних циклів, таких як: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) та ін. [5-9] до основних властивостей розбавляючих тунелів додано динамічність – можливість контролю миттєвих значень концентрацій та викидів ТЧ з ВГ дизеля в ході виконання регламентованої процедури випробувань.

На основі аналізу сучасних методів динамічного контролю викидів ТЧ, світового та вітчизняного досвіду створення і експлуатації систем екологічної діагностики дизелів автором запропоновано використання на базі компактного автоматизованого вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2 [10] методу динамічного контролю концентрацій ТЧ з оптичним чутливим елементом.

#### Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягала у створенні та оцінюванні точності методу динамічного контролю концентрацій ТЧ у ВГ дизелів, який реалізується на базі автоматизованої системи гравіметричного контролю ТЧ – мікротунеля МКТ-2. Для досягнення цієї мети вирішено наступні завдання: 1) аналіз сучасних методів динамічного контролю викидів ТЧ; 2) створення на базі міротунелю МКТ-2 методу динамічного контролю концентрацій ТЧ з оптичним чутливим елементом; 3) оцінка точності запропонованого методу.

#### Аналіз сучасних методів динамічного контролю викидів 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 [2-4]. 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 калібруванням. 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 порівнянні 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 – TEOM* [5] заснований на відповідності резонансної частоти коливань уловлювача, який використовується для збирання ТЧ з масою матеріалу, що уловлюється (рис. 1).

Принцип дії методу ТЕОМ полягає у наступному. ВГ протягом випробувань безперервно проходить 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 оптикоелектронною 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.

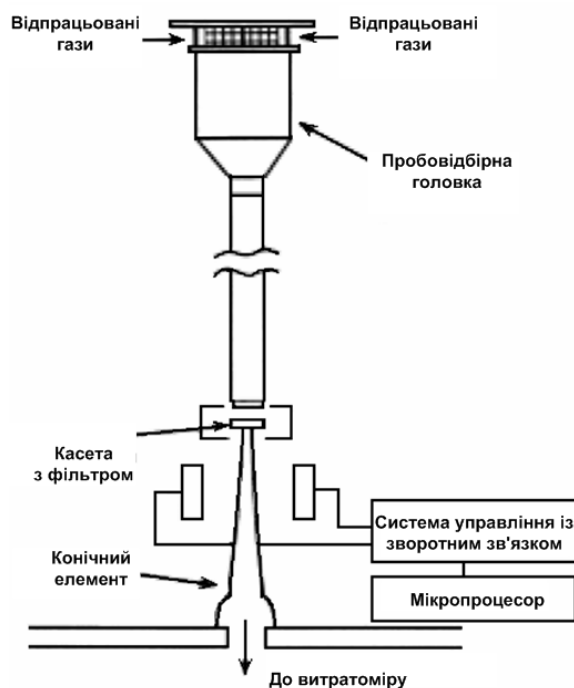


Рис. 1. Принципова схема методу ТЕОМ

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 частинок [3]. 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 [6]. 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 дозволяє здійснювати вимірювання при незначних переміщеннях [6]. П'єзоелектричні чутливі елементи дають можливість контролювати процеси, що швидко протікають, оскільки заряди утворюються практично безінерційно.

Через виборчий вхід частинки діаметром менше  $2,5 \text{ мкм}$  надходять у вимірювальний пристрій і проходять через зону коронного розряду, де отримують позитивний заряд (рис. 2).

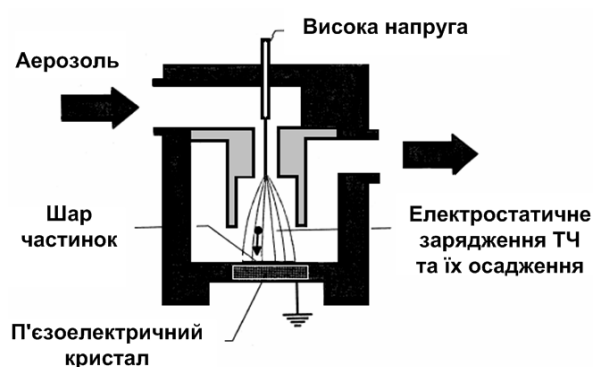


Рис. 2. Схема мікроваги з п'єзоелектричним чутливим елементом

За рахунок дії електростатичних сил заряджені частинки осідають на поверхні кварцового кристалу, частота коливань якого змінюється відповідно до маси 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, що забезпечує надійність датчика при високій роздільній здатності –  $2 \text{ мкг/м}^3$ .

Кореляція результатів QCM та стандартного гравіметричного методу в діапазоні  $0,2...2,5 \text{ мг/м}^3$  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 транзйентних циклів, при цьому варіація результатів між випробуваннями, зробленими в різні дні, складає  $15 \dots 30\%$  [3].

Метод лазерного розжарювання ВГ – *Laser Induced Incandescence - LI* дозволяє одночасно проводити вимірювання масової концентрації дисперсних частинок, розмірів первинних частинок сажі та лічильної концентрації ТЧ одним приладом [5,6,11]. Основний принцип вимірювань полягає у швидкому нагріванні частинок сажі високоенергетичним лазерним імпульсом до температури  $\sim 4000 \text{ К}$  та аналізі термічного випромінювання, 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  $\text{мВт/см}^2$ ) ТЧ досягають температури близько  $4000 \text{ К}$  за кілька наносекунд. При довжині хвилі детектування  $\sim 530 \text{ нм}$  інтенсивність термічного випромінювання збільшується на кілька порядків і стає можливим чітко відділення сигналу детектору від фонового світіння.

Аналізатор LI 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 [11]. Аналізатор забезпечує можливість проведення як автономних, так і системних вимірів з високою роздільною здатністю за часом до  $20 \text{ Гц}$ . Це дозволяє використовувати пристрій при дослідженнях високо динамічних процесів, зокрема при випробуваннях двигунів за циклами змінних режимів (рис. 3).

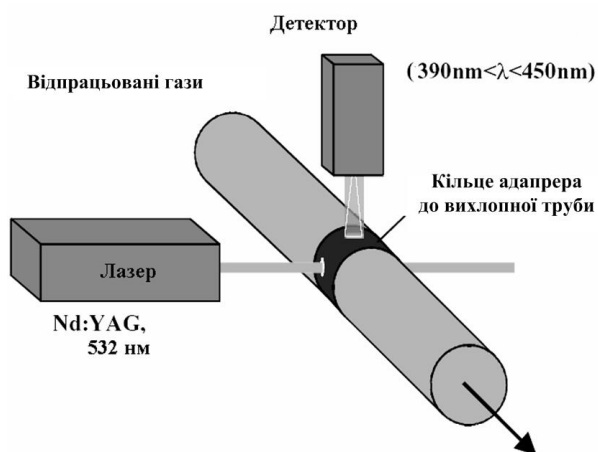


Рис. 3. Схема аналізатору Laser Induced Incandescence

Основні переваги даного методу, крім його високої чутливості – 2 мкг/м<sup>3</sup>, це гнучка придатність як для нерозбавлених, так і для розбавлених ВГ, як для вимірювань в системах CVS, так і в частковопоточних тунелях. Завдяки своїй високій чутливості і високій роздільній здатності за часом вимірювач ЛІІ може бути використаний при випробуваннях двигунів з наднизькими рівнями викидів ТЧ, випробуваннях за всіма стандартними процедурами на динамометричних або моторних стендах. Аналізатор ЛІІ 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 мг/м<sup>3</sup> при випробуваннях за циклами ETC та WHDC, що приблизно відповідає рівням викидів ТЧ – 0,0008 та 0,0012 г/кВт·год [6].

#### Виклад основного матеріалу

Альтернативою представленим вартісним та високотехнологічним методам вимірювань миттєвих концентрацій ТЧ є недорогий, малоінерційний метод динамічного контролю ТЧ з оптичним чутливим елементом. Цей метод реалізується на базі мікротунеля 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. Опис 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 дозволяє встановити максимально допустимі значення коефіцієнту розбавлення ВГ –  $q_{max}$ , при якому величина  $N_{dil}$ , що вимірюється оптичним чутливим елементом досягає межі чутливості за шкалою Hartridge:  $\Delta N = \pm 0,01\%$  [12]. При цьому використовується формула:

$$q_{max} = \frac{N(C_{pt})}{\Delta N}, \quad (1)$$

де  $N(C_{pt})$  – емпірична залежність, яка відображає кореляційний зв'язок між димністю та концентрацією ТЧ у ВГ [13]:

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

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.

*Принцип дії та технічні характеристики мікротунелю МКТ-2.* Мікротунель МКТ-2 (рис. 4) – компактний автоматизований вимірювальний комплекс для гравіметричного контролю викидів ТЧ, спроектований у відповідності до вимог міжнародних нормативних документів [1,14]. Принцип дії МКТ-2 полягає у наступному (рис. 5).

Частина ВГ з масовою витратою  $G'_{exh}$  відбирається з вихлопної труби двигуна – ВТ і через трубопровід транспортування проби – ТП подається в розбавляючий тунель – 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.

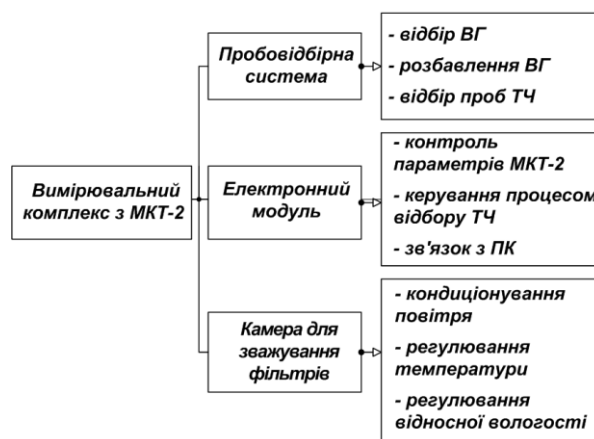


Рис. 4. Структура вимірювального комплексу з МКТ-2 та функції, які вони виконують

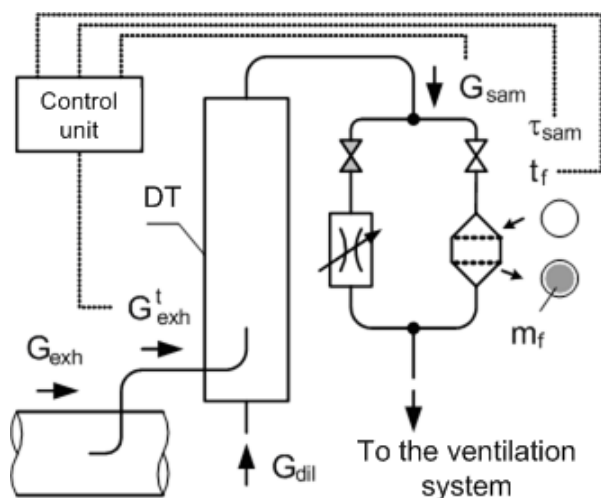


Рис. 5. Принципова схема мікротунелю MKT-2

Масова витрата  $G_t$  створюється штатною газодувкою ГД1 та підтримується постійною на заданому рівні у відповідності до обраного режиму розбавлення ВГ. При цьому температура проби перед фільтром  $t_f$  не перевищує 52 °С.

Величина  $G_t$  вимірюється витратоміром  $V_1$  – колектором з внутрішнім діаметром 8 мм; для визначення масової витрати потоку компенсованого повітря  $G_{com}$ , яка дорівнює величині  $G'_{exh}$ , використовується витратомір  $V_2$  – нормальне сопло з внутрішнім діаметром 3 мм.

Шарові крани K1 і K2, які визначають напрямки 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 K1 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 K2 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

$$q = \frac{G_t}{G_{com}}. \quad (3)$$

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 керування шаровими кранами K1 і K2 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).

*Технічні характеристики мікротунелю MKT-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 мікротунелю 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.

Основними якостями MKT-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 [15].

*Метод динамічного контролю викидів ТЧ з оптичним чутливим елементом для використання в мікротунелі MKT-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) викидів ТЧ. Метод передбачає використання динамічного вимірювача ТЧ, до складу якого входять дві установки (рис. 6):

1) частковопотокова система розбавлення ВГ повітрям – *мікротунель MKT-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.

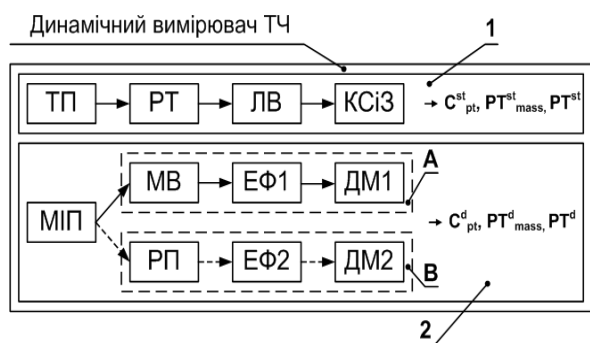


Рис. 6. Основні елементи динамічного вимірювача ТЧ:  
1 – мікротунель МКТ-2; 2 – динамічний детектор ТЧ;  
А – робочий канал; В – контрольний канал

Опис елементів динамічного детектору ТЧ

МП – модуль з ізокінетичним пробовідбірником, призначений для відбору з тунелю пропорційної частки проби розбавлених ВГ, яка дорівнює відношенню площ поперечного перетину пробовідбірника та тунелю (рис. 7); контроль ізокінетичного режиму відбору проби здійснюється за перепадом статичних тисків газових потоків у пробовідбірнику та тунелі –  $\Delta P_{ik}$ , який підтримується на заданому рівні;

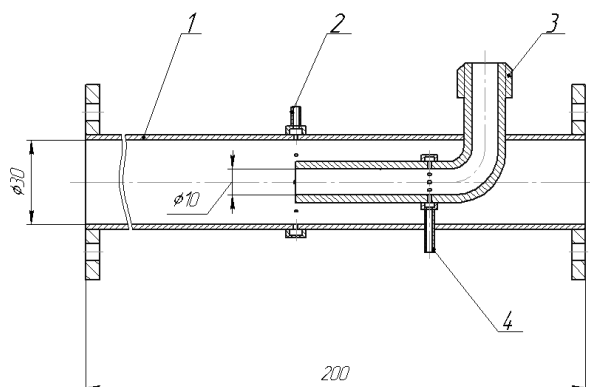


Рис. 7. Модуль з ізокінетичним пробовідбірником:  
1 – трубопровід; 2, 4 – штуцери, 3 – пробовідбірник

МВ – масовий витратомір – сопло Вентурі, призначений для контролю кількості проби, що відбирається з тунелю до робочого вимірювального каналу (рис. 8);

РП – розподільвач 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. 9); регулювання потоків проби здійснюється за допомогою заслінки;

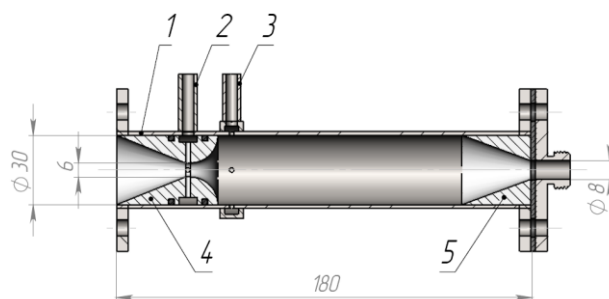


Рис. 8. Масовий витратомір:  
1 – трубопровід; 2, 3 – штуцери; 4 – сопло Вентурі;  
5 – конфузор

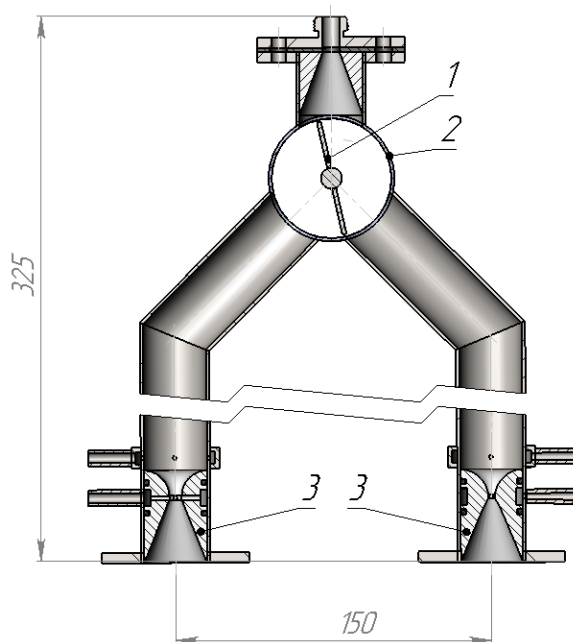


Рис. 9. Розподільвач потоків проби розбавлених ВГ:  
1 – заслінка; 2 – корпус; 3 – сопла Вентурі

ЕФ1, ЕФ2 – електричні фільтри для уловлювання ТЧ, які призначені для очистки потоків проби розбавлених ВГ від ТЧ з високою ефективністю – до 99 % (рис. 10); 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;

ДМ1, ДМ2 – вимірювачі оптичної щільності потоків проби розбавлених ВГ в робочому та контрольному каналах – димоміри (рис. 11); при цьому різниця значень оптичної щільності потоків в цих каналах –  $\Delta N$  пропорційна вмісту ТЧ у ВГ дизеля; залежність величини  $\Delta N$  від концентрації ТЧ ви-



значається в результаті калібрування динамічного детектора ТЧ.

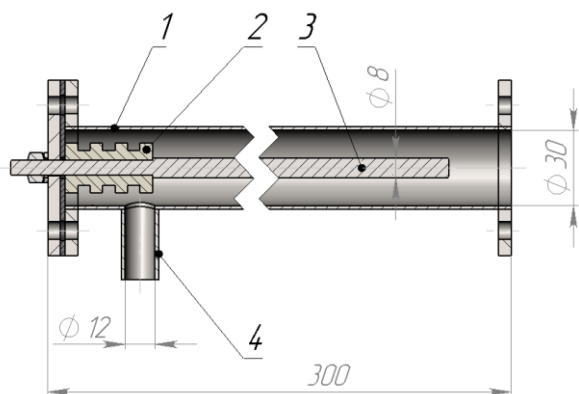


Рис. 10. Електрофільтр для уловлювання ТЧ  
1 – трубопровід - осаджувальний електрод; 2 – ізолятор; 3 – металевий стрижень – коронуючий електрод; 4 – штуцер

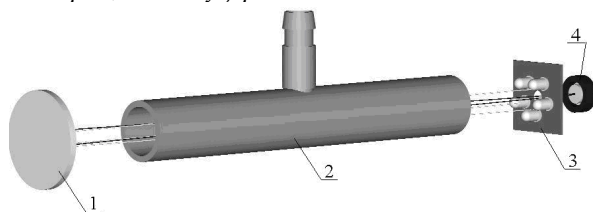


Рис. 11. Вимірювач оптичної щільності потоку проби – димомір:  
1 – відбивач світла; 2 – лінза;  
3 – джерело світла; 4 – фотоприймач

При роботі динамічного детектору ТЧ миттєві значення концентрацій дизельних ТЧ на робочих режимах випробувань визначаються за методикою, яка враховує інструментальні та методичні похибки обладнання [15].

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 стандартів Євро (табл.).

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

Норматив	Нормований викид ТЧ, г/(кВт·год)	Рівень концентрацій ТЧ, 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 викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів. 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 – ЛІ. Встановлено, що точність цих методів забезпечує 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>, 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 (WTVC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) та ін.

2. Створено та оцінено чутливість методу динамічного контролю концентрацій дизельних ТЧ з оптичним чутливим елементом, який реалізується на базі автоматизованої системи гравіметричного контролю ТЧ – мікротунеля МКТ-2. Сутність даного методу полягає у непряму визначенні миттєвих концентрацій ТЧ за показником оптичної непрозорості ВГ дизеля з використанням емпіричної залежності між цими величинами, яка встановлюється в ході калібрування оптичного детектора ТЧ гравіметричною системою МКТ-2. Розглянуто принципову схему даного методу, технічні засоби для його реалізації, до яких відносяться: частково-потоківна система розбавлення ВГ повітрям та динамічний детектор ТЧ. Встановлено максимально допустимі значення коефіцієнтів розбавлення ВГ повітрям в МКТ-2, при яких забезпечується потрібна точність контролю концентрацій ТЧ оптичним детектором з чутливістю  $\pm 0,1$  % за шкалою Naftridge при відповідності рівнів викидів ТЧ з ВГ дизеля вимогам норм Євро 3-6.

### Список літератури:

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. Oswald M. Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Entwicklung von Dieselmotoren / M. Oswald // VDI-BER. – 1988. – № 681. – P. 365-377. 3. Andersson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 1. Heavy Duty Methodology Development / J.D. Andersson // Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd. – 2002. – 136 p. 4. Lianga Z. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC-ToF-MS / Z. Lianga, J. Tiana, S. Rezaeia, Y. Zhanga // School of Mechanical Engineering, University of Birmingham. – 2015. – 31 p. 5. Burtcher H. Literature Study on Tailpipe Particulate Emission Measurement for Diesel Engines / H. Burtcher // GRPE Fachhochschule Aargau, University of Applied Science. – 2001. – 45 p. 6. Anderson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 2. Heavy Duty Methodology Development / J.D. Anderson // Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd. – 2003. – 222 p. 7. Tsugio A. Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving / A. Tsugio, S. Tatsuji, H. Morimasa // SAE Technical Papers. – 1989. – №890468. – P. 151-163. 8. Steven H. Development of Worldwide Harmonized Heavyduty Engine Emissions Test Cycle / H. Steven // Final Report ECE-GRPE WHDC Working Group. Informal document No2 GRPE 42nd session: TRANS/WP 29/GRPE/2001/2. – 2001. – 58 p. 9. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure / Draft Global Technical Regulation (GTR). UN/ECE-WP 29 – GRPE WHDC Working Group. – 2004. – № GRPE-48-7. – 86 p. 10. Polivyanchuk, A. Mathematical modeling of diesel engine operation mode influence on mass emission of particulate matter with exhaust gases using microtunnel / A. Polivyanchuk, I. Gritsuk, E. Skuridina // Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: monograph. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, – 2020. – P. 269-301. Doi: 10.30525/978-9934-588-53-2-56. 11. Schraml S. 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) / S. Schraml, S. Will, A. Leipertz // SAE Technical Papers, 2001. – № 010146. – 8 p. 12. AVL Opacimeter: State-of-the-art emission measurement. URL [електронний ресурс]: <https://avl.com/-/avl-opacimeter>. 13. Hardenberg H. Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. – 1987. – № 2. – P. 51–54. 14. 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.

15. Polivyanchuk A.P. Improving the accuracy of the gravimetric method for control particulate matter in diesel exhaust / A.P. Polivyanchuk, I.V. Gritsuk, E.A. Skuridina // New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2019. – P. 223-244. Doi: 10.30525/978-9934-588-15-0-59.

#### **Bibliography (transliterated):**

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 p. 2. Oswald, M. (1988). Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Entwicklung von Dieselmotoren. VDI-BER, No 681, pp. 365-377. [in English]. 3. Andersson, J.D. (2002). UK Particle Measurement Programme. Phase 1. Heavy Duty Methodology Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd, 136 p. [in English]. 4. 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 p. [in English]. 5. Burtcher, 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 p. [in English]. 6. Anderson, J.D. (2003). UK Particle Measurement Programme. Phase 2. Heavy Duty Methodology Development. Final Report. Ricardo Consulting Engineers Ltd, 222 p. [in English]. 7. Tsugio, A., Tatsuji, S., Morimasa, H. (1989). Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving. SAE Technical Papers, No 890468, pp. 151-163. [in English]. 8. 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 p. [in English]. 9. 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 p. 10. Polivyanchuk, A., Gritsuk I., Skuridina, E. (2020). Mathematical modeling of diesel engine operation mode influence on mass emission of particulate matter with exhaust gases using microtunnel. Theoretical and practical aspects of the development of the European Research Area: monograph. “Baltija Publishing”, pp. 269-301. DOI: 10.30525/978-9934-588-53-2-56. 11. 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, No 010146, 8 p. [in English]. 12. AVL Opacimeter: State-of-the-art emission measurement. <https://avl.com/-/avl-opacimeter>. 13. Hardenberg, H., Albrecht, H. (1987). Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen. MTZ: Motortechn. Z., No 2, pp. 51–54. [in English]. 14. ISO 8178-1: 2017. (2017). Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 150 p. 15. Polivyanchuk, A., Gritsuk, I., Skuridina, E. (2019). Improving the accuracy of the gravimetric method for control particulate matter in diesel exhaust. New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph. “Baltija Publishing”, pp. 223-244. DOI: 10.30525/978-9934-588-15-0-59.

Надійшла до редакції 15.07.2020 р.

**Полив'янчук Андрій Павлович** – доктор техн. наук, проф., професор кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна; e-mail - armail@meta.ua; <http://orcid.org/0000-0002-9966-1938>.

### **РЕАЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ МИКРОТУННЕЛЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЕЙ**

**А.П. Поливянчук**

Проанализированы современные методы динамического контроля выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей. Рассмотрены принципы действия и технические характеристики методов: Method for Real-Time Mass



Microbalances, Tapered element oscillating microbalance - ТЕОМ, Quartz Crystal Microbalance - QCM и Laser Induced Incandescence - ЛІІ. Установлено, что точность этих методов обеспечивает возможность измерений сверхнизких концентраций твердых частиц с чувствительностью до  $\pm 2 \text{ мкг/м}^3$  в диапазонах: 1,25 ... 0,25 ... 0,063  $\text{мг/м}^3$  в соответствии с требованиями норм Евро-3, Евро-4,5 и Евро-6, а быстродействие указанных методов обеспечивает возможность контроля мгновенных значений выбросов твердых частиц в ходе выполнения транзитных испытательных циклов дизелей: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) и др. На основе анализа указанных методов, мирового и отечественного опыта создания и эксплуатации систем экологической диагностики дизелей предложен для практического применения метод динамического контроля концентраций твердых частиц с оптическим чувствительным элементом. Сущность данного метода заключается в косвенном определении мгновенных концентраций твердых частиц по показателю оптической непрозрачности - дымности отработавших газов дизеля с использованием эмпирической зависимости между этими величинами, которая устанавливается в ходе калибровки оптического детектора твердых частиц гравиметрической системой - микротоннелем МКТ-2. Рассмотрены принципиальная схема данного метода, технические средства для его реализации, к которым относятся: частичнопоточная система разбавления отработавших газов воздухом с МКТ-2 и динамический детектор твердых частиц. Установлены максимально допустимые значения коэффициентов разбавления отработавших газов воздухом в МКТ-2, при которых обеспечивается требуемая точность измерений концентраций твердых частиц оптическим детектором с чувствительностью  $\pm 0,1\%$  по шкале Hartridge при соответствии уровней выбросов твердых частиц дизеля требованиям норм Евро 3-6.

**Ключевые слова:** дизель; отработавшие газы; твердые частицы; динамический контроль; микротоннель; концентрация; дымность.

### IMPLEMENTATION ON THE BASIS OF A MICROTUNNEL OF THE DYNAMIC CONTROL METHOD OF PARTICULATE MATTER CONCENTRATION IN THE EXHAUST GASES OF DIESEL ENGINES

*A. Polyvianchuk*

Modern methods of dynamic control of particulate matter emissions from diesel engine exhaust gases are analyzed. The principles of operation and technical characteristics of the methods are considered: Method for Real-Time Mass Microbalances, Tapered element oscillating microbalance - ТЕОМ, Quartz Crystal Microbalance - QCM and Laser Induced Incandescence - ЛІІ. It was found that the accuracy of these methods provides the ability to measure ultra-low concentrations of solid particles with a sensitivity of up to  $\pm 2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  in the ranges: 1.25 ... 0.25 ... 0.063  $\text{mg/m}^3$  in accordance with the requirements of Euro-3, Euro -4.5 and Euro-6, and the speed of these methods provides the ability to control instantaneous values of particulate matter emissions during the execution of transient diesel test cycles: European Transient Cycle (ETC), Worldwide Transient Vehicle Cycle (WTVC), Worldwide heavy-duty transient cycle (WHTC) and others. Based on the analysis of these methods, world and domestic experience in the creation and operation of systems for environmental diagnostics of diesel engines, a method for dynamic control of the concentration of solid particles with an optical sensitive element is proposed for practical application. The essence of this method lies in the indirect determination of the instantaneous concentrations of solid particles by the optical opacity index - the smoke of diesel exhaust gases using the empirical relationship between these values, which is established during the calibration of the optical particle detector with the gravimetric system - the MKT-2 microtunnel. The following are considered: a schematic diagram of this method, technical means for its implementation, which include: a partial-flow system for diluting exhaust gases with air with MKT-2 and a dynamic particle detector. The maximum permissible values of the dilution coefficients of exhaust gases with air in MKT-2 have been established, at which the required accuracy of measurements of particulate concentrations by an optical detector with a sensitivity of  $\pm 0.1\%$  on the Hartridge scale is provided, while the levels of diesel particulate emissions comply with the requirements of Euro 3-6.

**Key words:** diesel engine, exhaust gases, particulate matter, dynamic control, microtunnel, concentration, smoke.