

nost'ju pri utilizaciji tverdyh bytovykh i proizvodstvennykh othodov] [Text], *Ecological Safety*, Kremenchuk: KrNU, no. 2 (18), pp. 24 – 29. [in Russian]. 8. Kondratenko A.N., Strokov A.P., Vambol' S.A., Avramenko A.N. (2014), "Regeneration of particulate matter filter

with bulk natural zeolite for diesel engine", [Regeneracija fil'tra tverdyh chastic dizelja s nasypkoy iz prirnodnogo ceolita] [Text], *Internal Combustion Engines: the All-Ukrainian Scientific and Technical Magazine*, Kharkiv: NTU "KhPI", no. 2, pp. 76 – 81. [in Russian].

Поступила в редакцію 27.03.2015 г.

Вамболь Сергей Александрович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: sergvambol@gmail.com.

Строков Александр Петрович – доктор техн. наук, профессор, заведующий отделом поршневых энергоустановок, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, г. Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

Вамболь Виола Владиславовна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии, экологии и экспертизных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина, e-mail: violavambol@gmail.com.

Кондратенко Александр Николаевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: kharkivjanyn@i.ua.

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

С.О. Вамболь, О.П. Строков, В.В. Вамболь, О.М. Кондратенко

Розглянуто види джерел негативного впливу на навколишнє природне середовище поршневих двигунів внутрішнього згорання – політанти, шкідливі фактори, відходи. На основі системного підходу і принципу багаторівневої декомпозиції запропоновано загальну і деталізовану схеми управління екологічною безпекою експлуатації енергетичних установок з ДВЗ, а також виконано формалізацію вирішення задачі її побудови.

MATHODOLOGICAL APPROACH TO DEVELOPMENT OF MANAGEMENT SYSTEM OF ECOLOGICAL SAFETY OF EXPLOITATION OF POWER PLANTS

S.A. Vambol', A.P. Strokov, V.V. Vambol', A.N. Kondratenko

In present paper described kinds of sources of harmful influence of piston internal combustion engines on nature environment – pollutants, harmful factors, wastes. On basis of systematic approach and principle of multilevel decomposition was proposed general and dialyzed schemes of management system of ecological safety of exploitation of power plants with ICE and also provided formalization of solving of its development problem.

УДК 621.43.068

А.П. Полив'янчук, М.Ф. Смирний, О.О. Холкіна, Ю.І. Шеховцов

АНАЛІЗ МЕТОДУ ДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ КОНЦЕНТРАЦІЙ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛІВ З ОПТИКО- ЕЛЕКТРИЧНИМ ЧУТТЄВИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Проаналізовано сучасні методи динамічних вимірювань масових викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизельних силових установок, вимоги щодо їх точності та швидкодії. Розроблено принципову схему та макетний зразок динамічного вимірювача викидів твердих частинок з оптико-електричним чуттєвим елементом, який дозволяє контролювати миттєві значення концентрацій, масових та питомих викидів твердих частинок від дизелів різних типів.

Вступ

Введення в дію стандартів Євро-4 і Євро-5 викликало необхідність створення малотоксичних дизелів, застосування сажових фільтрів і каталітичних нейтралізаторів, що забезпечують значне зниження викидів твердих частинок (ТЧ). Разом з цим виникли проблеми з об'єктивністю оцінки цих викидів існуючим стандартним методом, заснованим на гравіметричних вимірюваннях. Зокрема, двигуни, обладнані фільтрами сажі, мають такі низькі рівні викидів ТЧ, що гравіметричний аналіз проб здійснюється на рівні межі вимірювання. Похибка визначення масового викиду ТЧ при цьому

досягає таких значень, які позбавляють всякого сенсу всю процедуру тестування двигуна по даному параметру.

Тому виникли нові вимоги до процедури оцінки викидів ТЧ з відпрацьованими газами (ВГ) дизелів. Перспективні методи повинні володіти високою чутливістю і точністю при дуже низьких концентраціях частинок і високою швидкодією (високою роздільною здатністю за часом), що дозволяє проводити безперервні вимірювання в ході випробувань за найбільш динамічними циклами.

Роботи по створенню вітчизняних аналогів сучасних високоточних методів і обладнання для

проведення динамічних вимірювань викидів дисперсних частинок від транспортних та промислових об'єктів, зокрема від двигунів внутрішнього згорання, мають високу актуальність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поступове зменшення допустимих рівнів викидів ТЧ від дизелів приводить до зростання результуючої похибки вимірювань нормованого екологічного показника - середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ. Так, при переході від норм Євро-1 до норм Євро-4, 5 вказаний показник для автомобільних дизелів зменшився у 18 разів – від 0,36 до 0,02 г/кВт-год, а результуюча похибка його визначення, відповідно, збільшилась: з 3 до 20% (у 6,7 разів) - при проведенні досліджень в одній лабораторії; з 12 до 50% (у 4,2 рази) - при проведенні досліджень в різних лабораторіях (рис. 1) [1].

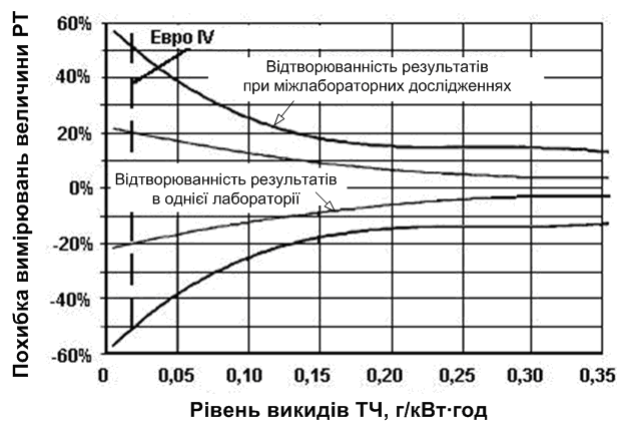


Рис. 1. Збільшення похибки визначення середньоексплуатаційного викиду ТЧ в умовах зниження норм токсичності ВГ дизелів

Для забезпечення потрібної точності визначення масових викидів ТЧ, які знаходяться в діапазоні 0,005...0,02 г/кВт-год, нові динамічні методи вимірювань концентрацій дисперсних частинок повинні мати чутливість 2-5 мкг/м³ [2]. До найбільш відомих високоточних динамічних методів контролю викидів ТЧ відносяться: мікроваги з конічним чутливим елементом, що коливається (Tapered element oscillating microbalance-ТЕОМ), засновані на відповідності резонансної частоти коливань уловлювача, який використовується для збирання частинок, з масою матеріалу, що уловлюється [3-7]; мікроваги з п'єзоелектричним чутливим елементом – кварцовим кристалом, на гранях якого осаджуються ТЧ (Quartz Crystal Microbalance - QCM) [8]; метод кількісного аналізу ТЧ за допомогою індукованого лазером розжарювання ВГ (Laser Induced Incandescence - ЛІІ), який дозволяє одночасно проводити вимірювання масової та лічильної концент-

рацій ТЧ, а також розмірів первинних частинок сажі одним приладом [1, 2, 9] та ін.

Постановка задачі

Роботу присвячено створенню нового метода та обладнання для динамічних вимірювань нормованого екологічного показника – масового викиду ТЧ з ВГ дизелів. Розроблені метод та обладнання дозволяють контролювати миттєві значення концентрацій та викидів ТЧ на стаціонарних та перехідних (транзйєнтних) режимах роботи дизелів різних типів, зокрема на режимах циклів ESC (European steady state cycle) та ETC (European Transient Cycle) [10].

Основні результати досліджень

Сутність запропонованого методу вимірювань полягає у використанні здатності дисперсних частинок, які містяться у ВГ дизелів, до поглинання світлового випромінювання, що проходить через потік представницької газової проби; при цьому змінюється оптична щільність потоку проби, яка має кореляційний зв'язок з концентрацією ТЧ [11].

Принцип дії розробленого методу полягає у наступному (рис. 2). Перед початком аналізу ВГ дизеля з метою імітації природного процесу потрапляння їх у атмосферу попередньо розбавляються чистим повітрям до температури, що не перевершує 52 °С, у системі пробопідготовки та калібрування детектора концентрацій ТЧ (рис. 3) – мікротунелі (МКТ) [12]. Підготовлена таким чином газова проба у спеціальному модулі (рис. 4) розділяється на два потоки з рівними масовими витратами, один з яких спрямовується до порівняльного каналу, а інший – до робочого каналу вимірювача концентрацій ТЧ.

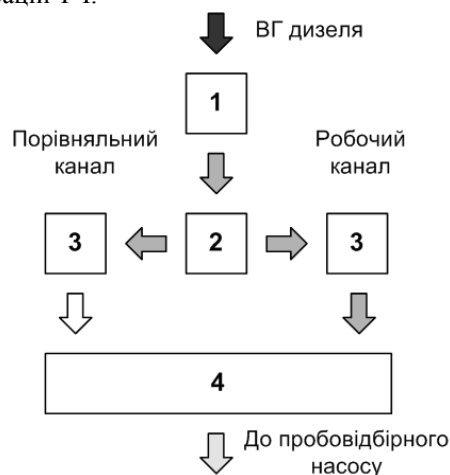


Рис. 2. Принципова схема методу динамічних вимірювань концентрацій ТЧ:

1 – мікротунель; 2 - модуль розподілу витрат потоків проби; 3 - електрофільтри; 4 - фотоелектричний детектор ТЧ

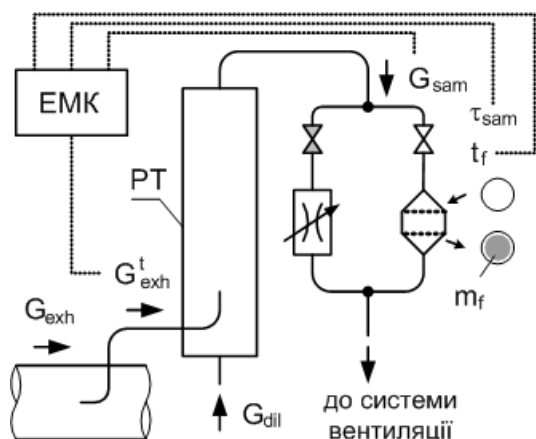


Рис. 3. Принципова схема системи пробопідготовки та калібрування детектора концентрацій ТЧ - МКТ

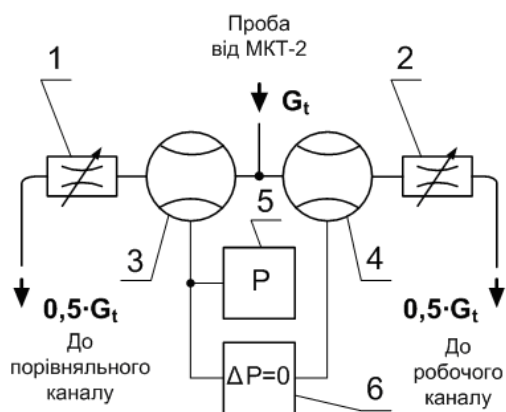


Рис. 4. Принципова схема модулю розподілу витрат потоків проби: 1, 2 – регулятори потоку проби; 3, 4 – витратоміри; 5, 6 – диференційні датчики тиску

В кожному з цих каналів встановлено електричний сажовий фільтр для уловлювання дизельних ТЧ (рис. 5), причому в порівняльному каналі фільтр використовується весь час в ході проведення вимірювань, а в робочому каналі фільтр використовується тільки під час встановлення нуля детектору концентрацій ТЧ.

Потоки газових проб з обох каналів, один з яких не містить ТЧ, потрапляють до детектора ТЧ з оптико-електричним чуттєвим елементом (рис. 6), де визначаються відповідні оптичні щільності потоків, різниця яких є функцією від концентрації ТЧ у ВГ дизеля. Встановлення цієї функції проводиться шляхом калібрування детектору ТЧ за встановленою процедурою.

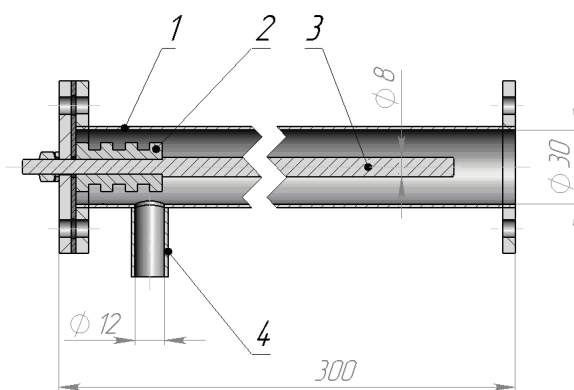


Рис. 5. Електрофільтр ТЧ: 1 – трубопровід; 2 – ізолятор; 3 – металевий стрижень; 4 – штуцер

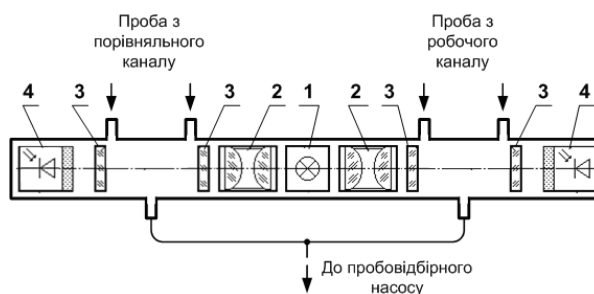


Рис. 6. Принципова схема детектору ТЧ з оптико-електричним чуттєвим елементом: 1 – вузол освітлювача; 2 – система оптичних лінз; 3 – захисні стекла; 4 – фотоприймач з коригувальним світлофільтром

Для реалізації описаного методу розроблено макетний зразок динамічного вимірювача ТЧ, який дозволяє контролювати миттєві значення кількісних характеристик вмісту ТЧ у ВГ дизелів: концентрацій – C_{pt}^d (г/кг), масових – PT_{mass}^d (г/год) та питомих – PT^d (г/кВт·ч) викидів ТЧ.

Методика визначення величин C_{pb}^d , PT_{mass}^d та PT^d передбачає виконання наступного алгоритму:

1. В ході випробувань дизеля на тормозному стенді, оснащеному динамічним вимірювачем ТЧ, визначаються миттєві значення параметрів:

- числа обертів колінчастого вала двигуна – n ($хв^{-1}$) та крутного моменту – M_k (Н·м);
- навантаження на вал двигуна – L (%) = $(M_k / M_{k(max)}) \cdot 100\%$ ($M_{k(max)}$ - максимальне значення крутного моменту при даному n);
- швидкостей змінювання величин n та L за проміжок часу Δt – $(\Delta n / \Delta t)$, $хв^{-1}/с$ та $(\Delta L / \Delta t)$, %/с;
- масової витрати ВГ дизеля у вихлопній трубі – G_{exh} (кг/год);
- оптичної щільності потоків проби розбавлених ВГ, які протікають у робочому – N_1 (%) та кон-

трольному – N_0 (%) каналах динамічного детектора ТЧ.

2. За миттєвими значеннями величин n та L визначається концентрація ТЧ у ВГ дизеля на відповідному сталому режимі роботи двигуна:

$$C_{pt}^{st} = K_{mode}(n, L) \cdot Ln \left(1 - \frac{N_1 - N_0}{100} \right)^{-1}, \text{ г/кг}; \quad (1)$$

де $K_{mode}(n, L)$ – коефіцієнт пропорційності, який залежить від режиму випробувань та визначається в ході калібрування динамічного детектора ТЧ.

Тип залежності для визначення величини C_{pt}^{st} обраний на основі рекомендацій MIRA (The Motor Industry Research Association) по непрямому визначенню концентрацій ТЧ за допомогою показника димності ВГ [11].

3. За значеннями швидкостей змінювання величин n та L за проміжок часу Δt визначається поправка, яка враховує відхилення концентрацій ТЧ, визначених на перехідному та сталому режимах роботи дизеля:

$$\Delta C_{pt} = f \left(\frac{\Delta n}{\Delta t}, \frac{\Delta L}{\Delta t} \right), \text{ г/кг}; \quad (2)$$

де $f(\Delta n/\Delta t, \Delta L/\Delta t)$ – відома експериментальна залежність, визначена в ході попередніх випробувань дизеля на сталих та перехідних режимах роботи з використанням МКТ.

За результатами випробувань дизеля 4СН12/14 встановлено, що ця залежність може бути представлена поліномом 1-го порядку:

$$\Delta C_{pt} = K_n \left(\frac{\Delta n}{\Delta t} \right) + K_L \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \right), \quad (3)$$

де K_n та K_L – коефіцієнти, які визначаються в ході калібрування динамічного детектора ТЧ.

4. Визначаються динамічні значення масової – C_{pt}^d та/або об'ємної – $C_{pt(v)}^d$ концентрацій ТЧ у ВГ дизеля:

$$C_{pt}^d = C_{pt}^{st} + \Delta C_{pt}, \text{ г/кг}, \quad (4)$$

$$C_{pt(v)}^d = C_{pt}^d \cdot \frac{\rho_{dil} (q-1) + \rho_{exh}}{q}, \text{ г/мн}^3, \quad (5)$$

де q – коефіцієнт розбавлення ВГ,
 $\rho_{dil} = 1,293 \text{ кг/мн}^3$ – щільність повітря при н.у.,
 $\rho_{exh} = 1,295 \text{ кг/мн}^3$ – щільність ВГ при н.у. [15].

5. Визначається динамічне значення масового викиду ТЧ з ВГ:

$$PT_{mass}^d = C_{pt}^d \cdot G_{exh}, \text{ г/год}. \quad (6)$$

6. Визначається динамічне значення питомого викиду ТЧ з ВГ:

$$PT^d = \frac{PT_{mass}^d}{P_e}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}, \quad (7)$$

де P_e – ефективна потужність дизеля:

$$P_e = \frac{n \cdot M_k}{9550}, \text{ кВт}. \quad (8)$$

Висновки

1. Проаналізовано сучасні методи динамічних вимірювань масових викидів ТЧ з ВГ дизельних силових установок: мікроваги з конічним чутливим елементом, що коливається (Tapered element oscillating microbalance-ТЕОМ); мікроваги з п'єзоелектричним чутливим елементом (Quartz Crystal Microbalance - QCM); метод кількісного аналізу ТЧ за допомогою індукованого лазером розжарювання ВГ (Laser Induced Incandescence - LII) та ін. Визначено вимоги щодо точності цих методів при вимірюванні концентрації ТЧ - 2-5 мгк/м³.

2. Розроблено принципову схему та макетний зразок динамічного вимірювача викидів ТЧ з оптико-електричним чуттєвим елементом, який дозволяє контролювати миттєві значення концентрацій, масових та питомих викидів ТЧ від дизелів різних типів.

Список літератури:

1. Burtscher H., 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, Switzerland. - March 2001. – 45 p.
2. Anderson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 2 / Heavy Duty Methodology Development // Final Report.– Ricardo Consulting Engineers Ltd. – 2003, August. – 222p.
3. Abe Tsugio, Sato Tatsuji, Hayashida Morimasa. Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. - №890468. – P. 151-163.
4. MacDonald J.C., Barsik N.J., Gross G.P., Shahed S.P., Johnson J.H. Status of diesel particulate measurement methods // SAE Techn. Pap. Ser. – 1984. - № 840345. – P. 1-20.
5. Seito Keizo, Shinozaki Osamu. The measurement of diesel particulate emissions with tapered element oscillating microbalance and an opacimeter // SAE Techn. Pap. Ser. – 1990. - № 900644. – P. 1-5.
6. Oswald M., Nunnemann F. Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Eutwicklung-lung von Dieselmotoren // VDI-BER. – 1988. –No 681. –S. 365-377.
7. Andersson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 1 / Heavy Duty Methodology Development // Final Report. – Ricardo Consulting Engineers Ltd., 2002, July. – 136 p.
8. Измерения в промышленности. Справочник. Кн. 1. Теоретические основы / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с.
9. 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 Techn. Pap. Ser., 1999-01-0146. – 8 p.
10. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehi-cles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fu-elled 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. – 4 May 2011. – 194 p. 11. Hardenberg H. Grenzen der Rubmassbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. – 1987. – 48, № 2. – P. 51-54. 12. Марченко А.П. Влияние режимов работы автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – № 25. – С. 151-155.

Bibliography (transliterated):

1. Burtcher H., 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, Switzerland. - March 2001. – 45 p. 2. Anderson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 2 / Heavy Duty Methodology Development // Final Report. – Ricardo Consulting Engineers Ltd. – 2003, August. – 222p. 3. Abe Tsugio, Sato Tatsuji, Hayashida Morimasa. Particulate matter emission characteristics under transient pattern driving // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. - №890468. – P. 151-163. 4. MacDonald J.C., Barsik N.J., Gross G.P., Shahed S.P., Johnson J.H. Status of diesel particulate measurement methods // SAE Techn. Pap. Ser. – 1984. - № 840345. – P. 1-20. 5. Seito Keizo, Shinozaki Osamu. The measurement of diesel particulate

emissions with tapered element oscillating microbalance and an opacimeter // SAE Techn. Pap. Ser. – 1990. - № 900644. – P. 1-5. 6. Oswald M., Nunnemann F. Die dynamische Partikelmessung ein notwendiges Hilfsmittel bei der Entwicklung von Dieselmotoren // VDI-BER. – 1988. –No 681. –S. 365-377. 7. Andersson J.D. UK Particle Measurement Programme. Phase 1 / Heavy Duty Methodology Development // Final Report. – Ricardo Consulting Engineers Ltd., 2002, July. – 136 p. 8. Izmerenija v promyshlennosti. Spravochnik. Kn. 1. Teoreticheskie osnovy / Pod red. P. Profosa. – M.: Metallurgija, 1990. – 492 s. 9. 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 Techn. Pap. Ser., 1999-01-0146. – 8 p. 10. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (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. – 4 May 2011. – 194 p. 11. Hardenberg H. Grenzen der Rubmassbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. – 1987. – 48, № 2. – P. 51-54. 12. Marchenko A.P. Vlijanie rezhimov raboty avtotraktornogo dizelja na vybrosy tverdyh chastic s otrabotavshimi gazami / A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov, A.P. Polivjanчук // Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. – 2012. – № 25. – S. 151-155.

Поступила в редакцию 26.06.2015 г.

Поливянчук Андрей Павлович – докт. техн. наук, доц., проф. кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, armail@meta.ua, (057) 707-68-48.

Смирный Михаил Федорович – докт. техн. наук, доц., проф. кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, dvs@kpi.kharkov.ua, (057) 707-68-48.

Холкина Елена Александровна – младший научный сотрудник кафедры экологии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, г. Северодонецк, Украина, (06452) 4-03-42.

Шеховцов Юрий Иванович – соискатель кафедры экологии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, г. Северодонецк, Украина, (06452) 4-03-42.

АНАЛИЗ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЕЙ С ОПТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.П. Поливянчук, М.Ф. Смирный, Е.А. Холкина, Ю.И. Шеховцов

Проанализированы современные методы динамических измерений массовых выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизельных силовых установок, требования к их точности и быстродействию. Разработана принципиальная схема и макетный образец динамического измерителя выбросов твердых частиц с оптико-электрическим чувствительным элементом, который позволяет контролировать мгновенные значения концентраций, массовых и удельных выбросов твердых частиц от дизелей различных типов.

ANALYSIS METHOD OF DYNAMIC MEASUREMENT OF THE CONCENTRATION OF PARTICULATE MATTER IN THE EXHAUST GAS OF DIESEL ENGINES WITH OPTOELECTRICALLY SENSING ELEMENT

A.P. Polivianchuk, M.F. Smyrnyi, E.A. Holkina, Y.I. Shekhovtsov

Paper modern techniques of dynamic mass measurement of particulate emissions from diesel exhaust gases of power plants, the requirements for their accuracy and speed. A schematic diagram and model sample dynamic measuring particulate emissions from the opto-electric sensitive element which allows to control the instantaneous concentrations mass and specific emissions of particulate matter from diesel engines of various types.