

УДК 621.43.068.4

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МАСОВОГО ВИКИДУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

**О.М. Кондратенко, пров. інж., к.т.н., О.П. Строков, зав. від., проф., д.т.н.,
ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України,
м. Харків, С.О. Вамболь, доц., д.т.н.,
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків**

Анотація. Висвітлено проблематику особливостей експериментального порівняльного дослідження робочих характеристик фільтрів твердих частинок для дизельних двигунів взагалі та експериментально-розрахункового визначення масових викидів твердих частинок як одного з найшкідливіших поллютантів у відпрацьованих газах автотракторного дизеля зокрема.

Ключові слова: дизель, техногенно-екологічна безпека, тверді частинки, відпрацьовані гази, канцерогени, мутагени, фільтр твердих частинок.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОГО ВЫБРОСА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАННЫХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

**А.Н. Кондратенко, вед. инж., к.т.н., А.П. Строков, зав. отд., проф., д.т.н.,
ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков, С.А. Вамболь, доц., д.т.н.,
Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков**

Аннотация. Освещена проблематика особенностей экспериментального сравнительного исследования рабочих характеристик фильтров твердых частиц для дизельных двигателей вообще, и экспериментально-расчетного определения массового выброса твердых частиц как одного из наиболее вредных поллютантов в отработанных газах автотракторного дизеля в частности.

Ключевые слова: дизель, техногенно-экологическая безопасность, твердые частицы, отработанные газы, канцерогены, мутагены, фильтр твердых частиц.

FEATURES OF DETERMINING MASS EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER IN DIESEL ENGINES EXHAUST GASES

**O. Kondratenko, Ph. D. (Eng.), Lead. Eng., O. Strokoy, Prof., D. Sc. (Eng.),
Chief of the Dept., A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering
Problems of the NASU, Kharkiv, S. Vambol', Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.,
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv**

Abstract. The paper deals with the problems of features of experimental comparative research of particulate filters of performance for diesel engines in general, and experimental and estimated determination of mass emissions of particulate matter as one of the most harmful pollutants in the exhaust gases of the autotractor diesel engine in particular.

Key words: diesel, ecological safety, particulate matter, exhaust gases, carcinogens, mutagens, diesel particulate matter filter.

Вступ

Вимоги до екологічних характеристик дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) автотранспортних засобів (АТЗ) є загальнообов'язковими на територіях України, Європейської Спільноти та Російської Федерації, оскільки їх закріплено на законодавчому рівні. Вимоги до інших показників роботи ДВЗ – основні: паливна економічність, експлуатаційна надійність, собівартість виробництва, а також специфічні: багатопаливність, форсування і дефорсування, конверсія тощо – визначаються лише конкурентною боротьбою виробників двигунів і АТЗ на ринку чи встановлюються безпосередньо споживачем.

Аналіз публікацій

Правилами СЕК ООН № 49 и № 96 [1, 2] визначаються: перелік нормованих поллютантів у відпрацьованих газах (ВГ) дизелів, межові рівні їх масових викидів, методика проведення стендових випробувань дизелів відповідного типу (Пр. № 49 – автомобільні, Пр. № 96 – тракторні) та перелік режимів у стаціонарних (без урахування перехідних процесів та режиму вільного прискорення) випробувальних циклів (Пр. № 49 – 13 режимів, Пр. № 96 – 8 режимів), що являють собою моделі експлуатації таких АТЗ. При цьому встановлюється спосіб визначення масового викиду твердих частинок (ТЧ) – непрямим вимірюванням гравіметричним способом, а також засіб його реалізації – повно- чи частковопоточні тунелі [1–4].

Висока вартість сертифікованих тунелів, що знаходяться у виробництві та експлуатації, вкрай висока наукоємність їх розробки та складність проведення їх сертифікації зумовлюють той факт, що на території України наразі наявні лише два частковопоточні тунелі, лише один з яких сертифіковано (оскільки виготовлений за кордоном) [3].

Такі обставини визначають необхідність і актуальність пошуку способів та засобів визначення масового викиду ТЧ, що альтернативні тунелям та придатні для попередніх і порівняльних лабораторних моторних стендових досліджень.

Мета і постановка завдання

Метою дослідження є пошук можливостей забезпечення попередніх і порівняльних ла-

бораторних моторних експериментальних досліджень екологічних показників автотракторних дизелів і фільтрів твердих частинок (ФТЧ) в умовах дефіциту сертифікованих і стандартизованих засобів.

Завданням дослідження є:

- 1) пошук способів і засобів визначення масового викиду ТЧ з ВГ дизелів, альтернативних гравіметричному;
- 2) пошук методики реалізації стандартизованих випробувальних циклів;
- 3) пошук методики порівняльних експериментальних досліджень ФТЧ різних конструкцій.

Об'єкти досліджень

Результати розробки і вибору раціональної конструкції ФТЧ для транспортних дизелів шляхом математичного і фізичного моделювання процесів у ньому мають підтверджуватися експериментальними дослідженнями робочих характеристик діючих макетних експериментальних зразків ФТЧ у реальних умовах експлуатації [5, 6].

Такі умови створюються на моторному випробувальному стенді (МВС) лабораторії відділу поршневих енергоустановок (ПЕУ) Інституту проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України (ІПМаш НАНУ) з модернізованими системами випуску ВГ і відбору проб ВГ на токсичність. Схему такої системи наведено на рис. 1 [7].

Стенд обладнано автотракторним безнаддувним двоциліндровим чотиритактним двоклапанним дизелем Д21А1 (2С10,5/12) повітряного охолодження з нерозділеною камерою згоряння у поршні, одноплунжерним ПНВТ розподільного типу та всережимним механічним регулятором, з робочим об'ємом 2,0 дм³ та номінальною потужністю 21,3 кВт, виробництва Володимирського тракторного заводу [8].

Головною робочою характеристикою ФТЧ є ефективність очищення ним ВГ від ТЧ, що визначається відповідним коефіцієнтом K_{EO} у % за формулою [7]

$$K_{EO}(G_{TЧ}) = \frac{(G_{TЧ,ДВЗ} - G_{TЧ,ФТЧ}) \cdot 100}{G_{TЧ,ДВЗ}}, \quad (1)$$

де $G_{TЧ}$ – масовий викид ТЧ з ВГ у кг/год; індекси ДВЗ і ФТЧ – стосуються випадків відсутності та наявності ФТЧ.

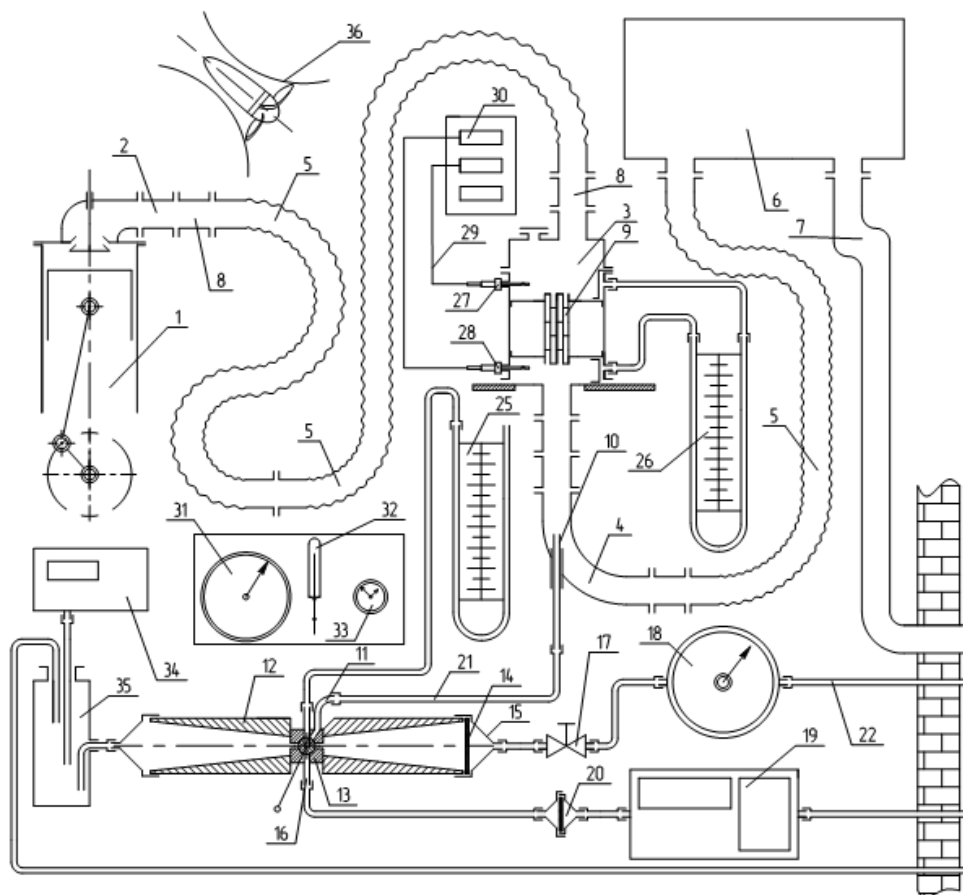


Рис. 1. Схема системи відбору проб ВГ на токсичність і димність МВС:

1, 2 – дизель 2Ч10,5/12 і його випускний колектор; 3, 9 – макетоутримувальна вставка і макет ФТЧ; 4–8 – кутовий і гнучкі газопроводи, глушник шуму, газовидна труба і перехідники відповідно; 10, 21–24 – пробовідбірний зонд і його з'єднувальний газопровід, вивідні газопроводи; 11–16 – відповідно вхідний штуцер, конус, чотириходовий кран, змінний тefлоновий фільтр, ковпак та вихідний штуцер алонжа; 17 – регулюючий кран і вивідні трубопроводи; 18 – витратомір газу ГСБ-400; 19, 20 – п'ятикомпонентний газоаналізатор Автотест-02.03П і його захисний фільтр із тримачем; 25, 26 – дифманометри ДМ; 27–29 – датчики термометричні ТХА та їх дроти; 30 – прилади ОВЕН ТРМ 200; 31 – барометр-анероїд БАММ-1М; 32 – термометр ртутний ТЛ-4; 33 – секундомір СОСпр-26-2; 34 – димомір ІНФРАКАР-Д; 35 – вимірювальний ресивер (6,36 дм³); 36 – повітродувка

При експериментальних дослідженнях екологічних показників дизеля 2Ч10,5/12 і ефективності роботи розробленого ФТЧ на МВС застосовуються наступні підходи.

Підхід до визначення масового викиду ТЧ

Передбачає проведення прямих вимірювань показників димності проб ВГ – коефіцієнта поглинання світлового потоку N_D у % та коефіцієнта пропускання світлового потоку K у м⁻¹, об'ємної концентрації незгорілих вуглеводнів палива і моторного мастила у пробі ВГ C_{CH} у млн⁻¹ (або в об'ємних частинах на мільйон – ppm) та режимних параметрів ро-

боти дизеля – масових витрат палива $G_{пал}$ і повітря $G_{пов}$ дизелем у кг/год на i -му стаціонарному режимі.

Параметри димності проби ВГ на МВС вимірюються димоміром ІНФРАКАР-Д, концентрація вуглеводнів у пробі – п'ятикомпонентним газоаналізатором АВТОТЕСТ-02.03.П, режимні параметри – засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) МВС.

Для отримання значень масових витрат ТЧ з ВГ дизеля $G_{ТЧ}$ у кг/год застосовується відома і достовірна формула перерахунку д.т.н., проф. І.В. Парсаданова [9]

$$G_{\text{ТЧ}} = \left(2,3 \cdot 10^{-3} \cdot N_D + 5 \cdot 10^{-5} \cdot N_D^2 + 0,145 \cdot \frac{C_{\text{СН}} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{\text{пов}} + G_{\text{пал}})}{0,7734 \cdot G_{\text{пов}} + 0,7239 \cdot G_{\text{пал}}} + 0,33 \cdot \left(\frac{C_{\text{СН}} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{\text{пов}} + G_{\text{пал}})}{0,7734 \cdot G_{\text{пов}} + 0,7239 \cdot G_{\text{пал}}} \right)^2 \right) \times \frac{(0,7734 \cdot G_{\text{пов}} + 0,7239 \cdot G_{\text{пал}})}{1000}, \quad (2)$$

де N_D – коефіцієнт поглинання світлового потоку у пробі ВГ, %; $C_{\text{СН}}$ – об’ємна концентрація незгорілих вуглеводнів у пробі ВГ, млн^{-1} ; $G_{\text{пов}}$ – масові витрати повітря дизелем на i -му стаціонарному режимі роботи, кг/год ; $G_{\text{пал}}$ – масові витрати палива дизелем на i -му стаціонарному режимі роботи, кг/год .

Формулу отримано при аналізі результатів сертифікаційних випробувань автотракторного дизеля СМД-31 на моторному стенді фірми Ricardo, обладнаному повнопоточним сертифікованим тунелем [9].

Підхід до реалізації стандартизованих випробувальних циклів

У переліку режимів роботи дизеля, що входять до вищезгаданих стандартизованих стаціонарних випробувальних циклів, є такі, реалізація яких (тобто переведення дизеля на ці режими і автоматичне підтримання його параметрів, що характеризують ці режими, – частоти обертання колінчастого вала $n_{\text{кв}}$ і крутного моменту дизеля $M_{\text{кр}}$) є вкрай складною для дизеля 2Ч10,5/12 та МВС, що не обладнані електронною системою автоматичного керування (САК).

Це, перш за все, режими з нульовою (характеристика холостого ходу) чи близькою до неї ефективною потужністю дизеля (околиця характеристики холостого ходу).

Іншою проблемою при цьому є потрапляння вимірюваних величин до зон нижніх меж діапазонів вимірювання ЗВТ на МВС і, як наслідок, вихід похибки їх вимірювання за межі нормативно встановлених за ГОСТ [10, 11].

Тому значення параметрів роботи дизеля і ФТЧ для режимів зі згаданих переліків отримано шляхом аналізу поліномів 1–4-го ступеня, отриманих описанням методом лінійної регресії [12] результатів моторних випробу-

вань, при яких дизель працював за режимами таких характеристик:

- зовнішня швидкісна (з максимальними навантаженням і паливоподачею у діапазоні $n_{\text{кв}}$ 900–1800 хв^{-1});
- навантажувальна з частотою обертання колінчастого вала режиму максимального крутного моменту (для дизеля 2Ч10,5/12 це 1200 хв^{-1});
- навантажувальна з частотою обертання колінчастого вала режиму номінальної потужності (для дизеля 2Ч10,5/12 це 1800 хв^{-1});
- характеристика холостого ходу (з нульовою ефективною потужністю у діапазоні $n_{\text{кв}}$ 800–1800 хв^{-1}).

Підхід до порівняльних моторних випробувань ФТЧ різної конструкції

Діючі макетні експериментальні зразки різних варіантів конструкції ФТЧ, розробленого у відділі ПЕУ ПМаш НАНУ, випробовуються у складі випускної системи МВС з метою отримання їх робочих характеристик.

Для порівняння цих варіантів конструкції між собою використовуються виміряні та обчислені їх робочі характеристики при роботі дизеля 2Ч10,5/12 за режимами зовнішньої швидкісної характеристики. Цих даних для такого порівняння достатньо, оскільки цьому сприяють такі особливості згаданої характеристики [7].

1. За нею потік ВГ (масові витрати ВГ, що належать до одиниці площі характерного перерізу експериментального зразка), у функції якого змінюється гідравлічний опір зразків (як друга за значущістю робоча характеристика ФТЧ), змінюється у найбільш широким межах для дизеля.

2. Вона містить режим максимального крутного моменту дизеля, на якому зазвичай спостерігається глобальний мінімум коефіцієнта надлишку повітря α у полі робочих режимів дизеля (так звана «межа димління» при α , рівному 1,3) і, як наслідок, глобальний максимум димності ВГ, а значить, і масових викидів ТЧ.

Також на цьому режимі спостерігається глобальний максимум температури ВГ у випускному колекторі дизеля.

Не менш важливим є те, що на цьому режимі для автотракторного дизеля за відсутності електронної САК узгоджуються (шляхом оптимізації та настроювання) решта параметрів його роботи задля досягнення глобального мінімуму питомих ефективних витрат палива.

3. Вона містить номінальний режим роботи дизеля, на якому спостерігається глобальний максимум годинних масових витрат палива і відпрацьованих газів.

4. За її режимами змінюється температура ВГ в межах, достатніх для прогнозування залежності від неї робочих характеристик експериментальних зразків ФТЧ.

Висновки

Таким чином, за результатами проведеного дослідження можна зробити висновок щодо відсутності тунелів для визначення масового викиду ТЧ (гравіметричним методом) у переважній більшості лабораторій вітчизняних наукових установ, обладнаних моторними випробувальними стендами, у тому числі й лабораторії відділу ПЕУ ІПМаш НАНУ. Це зумовлено об'єктивними обставинами.

Однак, незважаючи на вищевказане, при забезпеченості таких лабораторій традиційними засобами аналізу проб ВГ з ТЧ (газоаналізатори і димоміри) попередні та порівняльні експериментальні дослідження екологічних характеристик будь-якого типу дизелів, у тому числі й автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, а також робочих характеристик різних варіантів конструкції експериментальних зразків ФТЧ, у тому числі й ФТЧ ІПМаш, можливі, а їх результати достовірні та мають велике науково-практичне значення для двигунобудівної та транспортної галузей.

Література

1. Regulation № 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 Economics Commission for Europe In-
- land Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505. – 4 May 2011. – 194 p.
2. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. – 109 p.
3. Оценка и контроль выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / В.А. Звонов, Г.С. Корнилов, А.В. Козлов, Е.А. Симонова. – М.: Прима-Пресс-М, 2005. – 312 с.
4. Поливянчук А.П. Повышение точности гравиметрического метода измерений удельного выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 110–113.
5. Кондратенко А.Н. Экспериментальное исследование действующего макета фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. Часть 1 / А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, Н.М. Карасиченко // Двигуни внутрішнього згорання. – 2013. – № 1. – С. 88–92.
6. Кондратенко А.Н. Экспериментальное исследование действующего макета фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. Часть 2 / А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, С.П. Хожайнов // Двигуни внутрішнього згорання. – 2013. – № 2. – С. 92–97.
7. Кондратенко О.М. Стендові випробування автотракторного дизеля 2Ч10,5/12 за стандартизованими циклами для визначення ефективності роботи ФТЧ / О.М. Кондратенко, О.П. Строков, С.О. Вамболь // Вісник НТУ «ХП». Серія «Автомобіле- та тракторобудування». – 2014. – № 10 (1053). – С. 11–18.
8. Эфрос В.В. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода / В.В. Эфрос. – М.: Машиностроение, 1976. – 277 с.
9. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія / І.В. Парсаданов. – Х.: Видавничий центр НТУ «ХП», 2003. – 244 с.

10. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний: ГОСТ Р 18509–88. – [Введен в действие с 1995-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 78 с. – (Стандарт Российской Федерации).
11. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: ГОСТ Р 14846–87. – [Введен в действие с 2002-12-25]. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 42 с. – (Стандарт Российской Федерации).
12. Эберт К. Компьютеры. Применение в химии: пер. с нем. / К. Эберт, Х. Эдерер. – М.: Мир, 1988. – 416 с.

References

1. Regulation № 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 Economics Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505, 4 May 2011. 194 p.
2. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. 109 p.
3. Zvonov V.A., Kornilov G.S., Kozlov A.V., Simonova E.A. Ocenka i kontrol' vybrosa dispersnyh chastic s otrabotavshimi gazami dizel'ev, Moscow, Prima-Press-M Publ., 2005. 312 p.
4. Polivjanichuk A.P. Povyshenie tochnosti gravimetricheskogo metoda izmerenij udel'nogo vybrosa tverdyh chastic s otrabotavshimi gazami dizel'ja. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*, 2010, vol. 2. pp. 110–113.
5. Kondratenko A.N., Stokov A.P., Karasichenko N.M. Eksperimental'noe issledovanie dejstvujushhego maketa fil'truju-shhego elementa fil'tra tverdyh chastic dizel'ja s nasypkoj iz prirodnoho ceolita. Chast' 1. *Dviguni vnutrishn'ogo zgorjannja*, 2013, vol. 1. pp. 88–92.
6. Kondratenko A.N., Stokov A.P., Hozhainov S.P. Eksperimental'noe issledovanie dejstvujushhego maketa fil'trujuushhego elementa fil'tra tverdyh chastic dizel'ja s nasypkoj iz prirodnoho ceolita. Chast' 2. *Dviguni vnutrishn'ogo zgorjanija*, 2013, vol. 2. pp. 92–97.
7. Kondratenko O.M., Stokov O.P., Vambol' S.O. Stendovi vyprobuvannja avtotraktornogo dyzel'ja 2Ch10,5/12 za standartyzovany my cyklamy dlja vyznachennja efektyvnosti roboty FTCh. *Visnyk NTU «KhPI»*. Serija «Avtomobile-ta traktorobuduvannja», 2014, vol. 10 (1053). pp. 11–18.
8. Efros V.V. Dizeli s vozdušnym ohlazhdeniem Vladimirskogo traktornogo zavoda. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 277 p.
9. Parsadanov I.V. Pidvyshhennja jakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnogo palyvno-ekologichnogo kryteriju. Kharkiv, Vydavnychyj centr NTU «KhPI» Publ., 2003. 244 p.
10. Dizeli traktornye i kombajnovye. Metody stendovyh ispytanij: GOST 18509-88. Vveden v dejstvije s 1995-01-01. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1988. 78 p. – (Standart Rossijskoj Federacii).
11. Dvigateli avtomobil'nye. Metody stendovyh ispytanij: GOST 14846-87. Vveden v dejstvije s 2002-12-25. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1987. 42 p. (Standart Rossijskoj Federacii).
12. Ebert K., Ederer H. Komp'jutery. Primenenie v himii: Per. s nem. Moscow: Mir Publ., 1988. 416 p.

Рецензент: О.М. Врублевський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 15 жовтня 2014 р.