

**Кондратенко Александр Николаевич** – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

**Строков Александр Петрович** – доктор техн. наук, проф., зав. отделом поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

**Хожайнов Сергей Петрович** – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЮЧОГО МАКЕТУ ФІЛЬТРУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ФІЛЬТРУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ДИЗЕЛЯ ІЗ НАСИПКОЮ З ПРИРОДНОГО ЦЕОЛІТУ. ЧАСТИНА 2

*О. М. Кондратенко, О. П. Строков, С. П. Хожайнов*

У даній роботі проведені експериментальні дослідження макетного діючого зразка фільтруючого елемента фільтра твердих часток дизеля на моторному випробувальному стенді. У результаті випробувань об'єкта дослідження, який містить у своїй конструкції насипку з природного цеоліту, отримана його витратна характеристика. Також отримано залежності ступеня очищення їм відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок від навантажувальних і швидкісних режимів роботи дизеля 2Ч10,5/12, часу роботи дизеля на режимі максимального крутного моменту і місця його установки вздовж випускного тракту дизеля. Отримані дані добре узгоджуються з результатами досліджень на безмоторній дослідницькій установці. Розроблений фільтруючий елемент характеризується прийнятним значенням ступеня очищення відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE WORKING LAYOUT OF FILTER ELEMENT OF DIESEL PARTICULATE FILTER WITH BULK NATURAL ZEOLITE. PART 2

*A. N. Kondratenko, A. P. Stokov, S. P. Khozhainov*

Present paper describes the experimental studies of the breadboard operating sample of the filter element of diesel particulate filter on the engine test bench. As a result of testing the research object, which contains in its structure bulk natural zeolite, its flow characteristic were obtained. Also, the dependence on the degree of exhaust gases purification from diesel's particulate matter from the load and speed modes of the diesel 2CH10,5/12 was obtained, and also the time of the diesel engine running at peak torque load and the temperature of its exhaust gases. The data obtained are in good agreement with the results of studies on engineless research facility. Designed filter element has an acceptable value of the degree of purification of exhaust gases from diesel particulates.

УДК 621.43.068.4:665.777.2

*И.В. Парсаданов, И.П. Васильев*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

*Рассмотрены особенности определения состава и свойств твердых частиц отработавших газов дизелей. Приведены результаты определения твердых частиц на содержание тяжелых металлов и углеродной фракции. Углеродная фракция определялась фотометрическим методом с использованием специальных фильтров, предварительно растворенных в дихлорэтане. Содержание металлов определялось ртутной полярографией. Выявлено, что с увеличением нагрузки концентрации металлов в твердых частицах отработавших газов дизелей повышаются.*

### Введение

Совершенствование рабочих процессов дизелей и систем нейтрализации отработавших газов (ОГ) приводит с одной стороны к уменьшению выбросов вредных веществ (ВВ), а с другой стороны – к изменению состава ВВ, в частности, твердых частиц (ТЧ), которые представляют собой комплекс веществ органической и неорганической природы [1].

В ОГ современных дизелей наблюдается относительный рост в ТЧ золы (минеральной фракции), включающей в себя продукты износа двигателя и систем нейтрализации, ингредиенты приса-

док к топливу и к моторному маслу, а также частицы пыли, поступающие в цилиндр с воздухом.

Исследования ТЧ с использованием нейтронной томографии выявили, что в составе минеральной фракции содержится около 37% Ca, 19% Zn, 15% S, 8% P и 2% Cu [2].

Некоторые ингредиенты относятся к тяжелым металлам, которые имеют плотность выше, чем Fe и включают Cu, Ni, Co, Pb, Sn, Zn, Cd, Bi, Sb, Hg и их содержание в воздухе рабочей зоны нормируется [3, 4].

Использование альтернативных топлив, в частности, биодизельного топлива, снижая дымность ОГ, приводит к уменьшению дисперсности

углеродных частиц [5]. Из-за малых размеров такие частицы могут преодолевать естественные преграды организма и попадать в мозг и в плаценту человека [6]. При этом отмечается, что металлические частицы оказывают большее вредное воздействие, чем частицы углерода, так как их поверхности имеют более высокую реакционную способность.

В свете этого представляет научный интерес и является актуальной задачей определения различными методами состава и свойств твердых частиц в отработавших газах современных дизелей.

**Цель исследований** – определение состава ТЧ, в частности, содержание минеральной фракции (металлов) и углеродной фракции на различных режимах работы двигателя.

**Объектом исследований** был выбран дизель 4ЧН 12/14 жидкостного охлаждения с непосредственным впрыскиванием топлива, газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха.

**Методики исследований**

Методика отбора ТЧ на фильтры в туннеле представлена в работах [7, 8].

Учитывая, что способы определения металлов и углеродной фракции являются разрушаемыми, то фильтр делился на равные две части, которые затем взвешивались на лабораторных электронных весах серии AN100 фирмы «AXIS» (Польша) с точностью 0,1 мг, а расход ОГ через эти части фильтра принимался равный пропорционально их массе. При этом использовались фильтры марок АФА–ВП–20 и АФА–ХП–20, материал которых имеет свойство растворяться в дихлорэтано.

Для определения металлов в ТЧ вторая часть фильтра сжигалась, и полученная зола обрабатывалась концентрированной HCl и на фоне 0,1 молярного раствора роданида аммония готовился раствор, который анализировался полярографическим методом, основанном на расшифровке вольтамперных кривых, которые получают при электролизе исследуемого раствора в специальной электрополярографической ячейке [9].

В этой ячейке в качестве одного электрода, называемого рабочим, используют ртуть, вытекающую из тонкого капилляра – катода с периодом капания 2...7 с и диаметром примерно 1 мм. Второй электрод – анод, является электродом сравнения. Он представляет собой слой ртути с большой по-

верхностью на дне сосуда. Для количественного определения вещества используется прямо пропорциональная зависимость между силой предельного тока, выраженной высотой полярографической волны, и концентрацией вещества в растворе.

Минимальная определяемая концентрация металлов – 0,1 мкг в пробе, что соответствует примерно 0,01 мкг в одном литре ОГ.

Для определения углеродной фракции в ТЧ использовалась методика, применяемая для определения углеродной фракции в атмосферном воздухе [10], поэтому производились необходимые разбавления отработавших газов.

При обработке фильтров дихлорэтаном материал фильтра (перхлорвинил) и органические вещества растворялись в дихлорэтано. Основная высокодисперсная углеродная фракция переходила во взвешенное суспендированное состояние, а минеральная часть оседала на дно. Содержание углеродной фракции в суспензии определялась фотометрическим методом.

**Результаты исследований**

Вначале проводилась отладка методики анализа состава ТЧ, а затем исследования согласно нижеприведенной программе в табл. 1.

Таблица 1. Программа испытаний дизеля

№ фильтра	Частота вращения коленчатого вала, n, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка, P, %
1	1250	50
2	1500	25
3	1500	50
4	1500	75
5	1750	50
6	1500	50
7	1500	75
8	1500	50
9	1500	25
10	1500	50
11	1750	50
12	1500	75
13	1250	50
14	1750	50
15	1500	75

Результаты отладки методики определения металлов в ТЧ приведены в табл. 2.

В ОГ присутствуют Cu, Zn, Mn. Также обнаружены следы Fe, Pb, Cd, Ni.

Таблица 2. Содержание металлов в ТЧ

№ фильтра	P, %	n, мин <sup>-1</sup>	Масса ТЧ, мг	Объем измеряемых ОГ (V <sub>ОГ</sub> <sup>н<sub>у</sub></sup> ), л	Металл	Масса металла, мг	Масса металла в единице объема ОГ, мг/л
18	25	1000	0,4	134,5			0,003
		1000	0,4	134,5	Cu	0,00428	0,000032
		1000	0,4	134,5	Zn	0,00131	0,00001
		1000	0,4	134,5	Mn	0,00452	0,000034
5	75	1500	0,75	81,4			0,0092
		1500	0,75	81,4	Cu	0,0028	0,000034
		1500	0,75	81,4	Zn	0,00101	0,000012
		1500	0,75	81,4	Mn	0,00511	0,000063
17	100	2000	1,18	81,8			0,0144
		2000	1,18	81,8	Cu	0,00585	0,000072
		2000	1,18	81,8	Zn	0,00152	0,000019
		2000	1,18	81,8	Mn	0,0057	0,000070

Примеры изменения содержания металлов в ТЧ ОГ дизеля по скоростной характеристике согласно табл. 2 приведены на рис. 1, 2, 3.

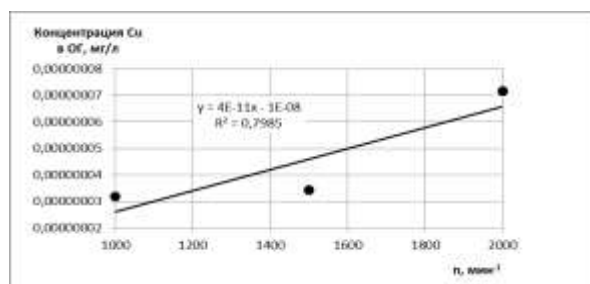


Рис. 1. Изменение концентрации Cu в ОГ по скоростной характеристике

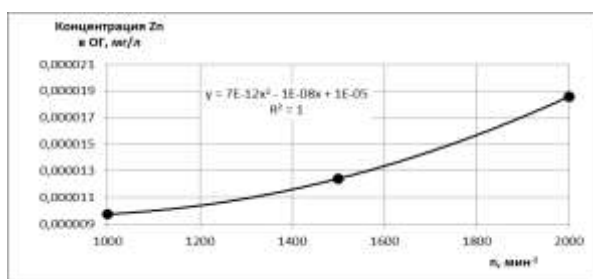


Рис. 2. Изменение концентрации Zn в ОГ по скоростной характеристике

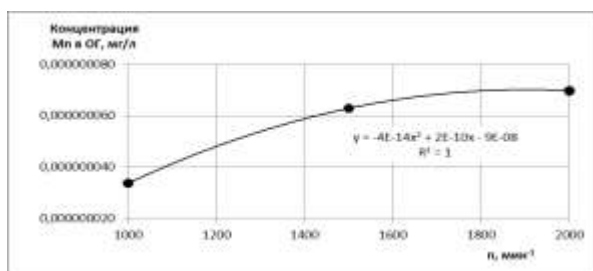


Рис. 3. Изменение концентрации Mn в ОГ по скоростной характеристике

Для Cu, Zn, Mn характерно повышение концентраций при увеличении частоты вращения коленчатого вала. Содержание металлов в ТЧ составляет 1,1...2,5 масс. %, что коррелируется с данными из работы [1].

В дальнейшем на основании этих предварительных результатов оценивалось содержание в ТЧ следующих металлов: Pb, Cu, Ni, Zn согласно программе испытаний, приведенной в табл. 1. Типичные диаграммы состава металлов представлены на рис. 4,5,6.

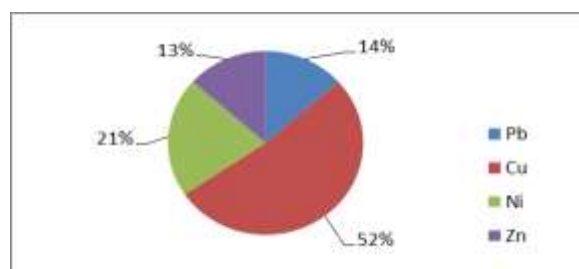


Рис. 4. Концентрации металлов в ТЧ на режиме №1 при Ne=50%, n=1250 мин<sup>-1</sup>

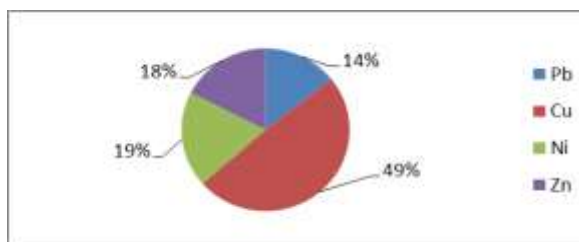


Рис. 5. Концентрации металлов в ТЧ на режиме №5 при Ne=75%, n=1750 мин<sup>-1</sup>

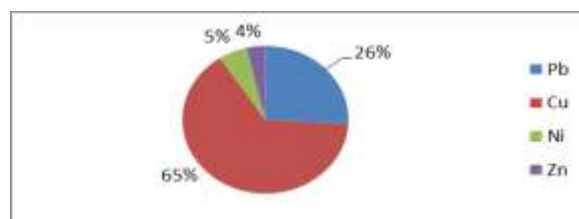


Рис. 6. Концентрации металлов в ТЧ на режиме №12 при Ne=75%, n=1500 мин<sup>-1</sup>

Основное содержание металлов в ТЧ приходится на Cu 45...67 масс. %. На Zn приходится 9...33 масс. %, на Pb – 8...32 масс. %, на Ni – 5...29 масс. % в основном нижняя граница.

По нагрузочной характеристике фиксировано увеличение содержания металлов с повышением нагрузки (рис. 7, 8, 9).

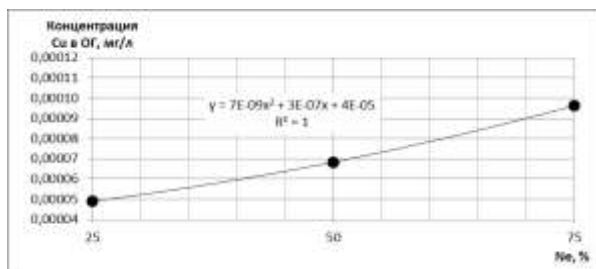


Рис. 7. Изменение концентрации Cu в ОГ по нагрузочной характеристике

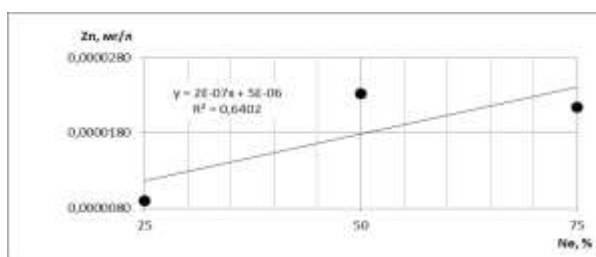


Рис. 8. Изменение концентрации Zn в ОГ по нагрузочной характеристике

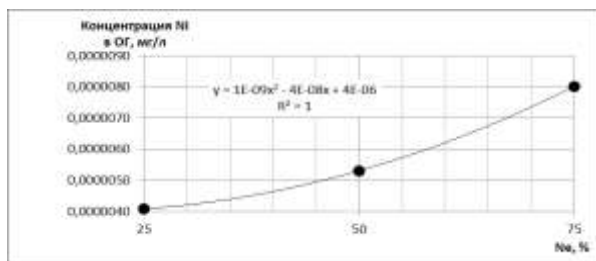


Рис. 9. Изменение концентрации Ni в ОГ по нагрузочной характеристике

Представляло интерес одновременно выявить эти изменения для металлов и углеродной фракции, как ранее указывалось, путем разделения фильтра на две части и проведение анализов отдельных частей фильтров. Выявлено, что отношение суммарной массы металлов к массе углеродной фракции находится в диапазоне от 1 до 6,7 %. В работе [1] среднее отношение массы металлов к средней массе углеродной фракции составило около 2,7 %.

В работе [11] представлена альтернативная стратегия регенерации ТЧ на фильтрах. Предложено получать углеродную фракцию с характеристиками, близкими к аморфной саже, которая имеет более низкую температуру воспламенения в филь-

трах ТЧ. Этого возможно добиться путем подбора соответствующих режимов работы двигателя.

По аналогии, можно, предложить режимы работы двигателей с минимальными выбросами тяжелых металлов в ТЧ, к которым относятся средние нагрузки.

### Заключение

При анализе отработавших газов необходимо уделять внимание не только массовым выбросам твердых частиц, но и их составу.

В состав твердых частиц входят тяжелые металлы, которые, в основном, являются продуктами износа деталей двигателя и ингредиентами присадок к топливу и моторным маслам.

В результате исследований выявлено, что рост выбросов тяжелых металлов, таких как Cu и Zn, связан с повышением нагрузки.

### Список литературы:

1. Звонов В.А. Оценка и контроль выбросов 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.
2. Grünzweig Ch. Visualisierung der Russ- und Ascheverteilung mittels Neutronen-Imaging / Ch. Grünzweig, D. Mannes, A. Kaestner, M. Vogt // *Motor-technische Zeitschrift*. – 2012 (73). – Nr. 4. – S. 326–331.
3. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде. Изд. 2-е, пер. и доп. – Л.: Химия, 1975. – 456 с.
4. Олейник Н.В. Влияние содержания тяжелых металлов в топливах растительного происхождения на вредные выбросы с отработавшими газами дизелей / Н.В. Олейник, Л.Г. Зубова, И.П. Васильев // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля*. – Луганск, 2007. – Ч. 1. – № 8 (114). – С. 161 – 165.
5. Krahl J. Fuel economy and environmental characteristics of biodiesel and low sulfur fuels in diesel engines / J. Krahl, A. Munack, O. Schröder, H. Stein, A. Hassaneen // *Landbauforschung Völknerode*. – 2005 (55). – Nr 2. – S. 99–106.
6. Mayer A.C.R. Qualitätsstandards und Prüfverfahren für Partikelfilter / A.C.R. Mayer, Jan Czerwinski, M. Kasper, G. Leutert, N. Heeb, A. Ulrich, F. Jaussi // *Motor-technische Zeitschrift*. – 2009 (70). – Nr. 11. – S. 72–79.
7. Звонов В.А. Оценка выброса твердых частиц с отработавшими газами автотракторного дизеля / В.А. Звонов, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук И.В. // *Двигатели внутреннего сгорания: сб. ст. НТУ «ХПИ»*. – Х., 2006. – № 2. – С. 64–67.
8. Полівянчук А.П. Дослідження викидів твердих частинок з відпрацьованими газами на стаціонарних та нестационарних режимах роботи автотракторного дизеля / А.П. Полівянчук, С.В. Зубов, С.А. Львов // *Матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»*, НТУ «ХПИ». – Харків, 2008. – Ч. I. – С. 177.
9. Пац Р.Г. Полярнография / Р.Г. Пац // *БСЭ* / М.: Советская энциклопедия, 1975. – Т. 20. – С. 340–341.
10. Соловьева Т.В. Руководство по методам определения вредных веществ в атмосферном воздухе / Т.В. Соловьева, В.А. Хрусталева. – М.: Медицина, 1974. – 300 с.
11. Fiebig M. Einflüsse motorischer Betriebsparameter auf die Reaktivität von Dieselruss / M. Fiebig, M. Schönen, U. Grütering, S.

Pischinger // *Motortechnische Zeitschrift*. – 2010 (71). – Nr 07–08. – S. 524 – 531.

**Bibliography (transliterated):**

1. Zvonov V.A. Ocenka i kontrol' vybrosov dispersnyh chastic s otrabotavshimi gazami dizelej / V.A. Zvonov, G.S. Kornilov, A.V. Kozlov, E.A. Simonova. – M.: Prima-Press-M, 2005. – 312 s. 2. Grünzweig Ch. Visualisierung der Russ- und Ascheverteilung mittels Neutronen-Imaging / Ch. Grünzweig, D. Mannes, A. Kaestner, M. Vogt // *Motortechnische Zeitschrift*. – 2012 (73). – Nr. 4. – S. 326–331. 3. Pre-del'no dopustimye koncentracii vrednyh veshhestv v vozduhe i vode. Izd. 2-e, per. i dop. – L.: Himija, 1975. – 456 s. 4. Olejnik N.V. Vlijanie sodержaniya tjazhelyh metallov v toplivah rastitel'nogo proishozhdenija na vrednye vybrosy s otrabotavshimi gazami dizelej / N.V. Olejnik, L.G. Zubova, I.P. Vasil'ev // *Visn. Shidnokr. nac. un-tu imeni Volodimira Dalja*. – Lugansk, 2007. – Ch. 1.– № 8 (114). — S. 161 – 165. 5. Krahl J. Fuel economy and environmental characteristics of biodiesel and low sulfur fuels in diesel engines / J. Krahl, A. Munack, O. Schröder, H. Stein, A. Hasaneen // *Landbauforschung Völknerode*. – 2005 (55). – Nr 2. – S. 99–106. 6. Mayer A.C.R. Qualitätsstandards und Prüfverfahren für

Partikelfilter / A.C.R. Mayer, Jan Czerwinski, M. Kasper, G. Leutert, N. Heeb, A. Ulrich, F. Jaussi // *Motortechnische Zeitschrift*. – 2009 (70). – Nr. 11. – S. 72-79. 7. Zvonov V.A. Ocenka vybrosa tverdych chastic s otrabotavshimi gazami avtotraktornogo dizelja / V.A. Zvonov, A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov, A.P. Polivjančuk I.V. // *Dvigateli vnutrennego sgoranija: sb. st. NTU «HPI»*. – H., 2006. – № 2. – S. 64-67. 8. Polivjančuk A.P. Doslidzhennja vikidiv tve-rdih chastinok z vidprac'ovanimi gazami na stacionarnih ta nestacionarnih rezhimah roboti avtotraktornogo dizelja / A.P. Polivjančuk, S.V. Zubov, S.A. L'vov // *Materia-li XVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja»*, NTU «HPI». – Harkiv, 2008. – Ch 1. – S. 177. 9. Pac R.G. Poljaro-grafija / R.G. Pac // *BSJe / M.: Sovetskaja jenciklopedija*, 1975. – T. 20. – S. 340–341. 10. Solov'eva T.V. Rukovodstvo po metodam opredelenija vrednyh veshhestv v atmosfernom vozduhe / T.V. Solov'eva, V.A. Hrustaleva. – M.: Medicina, 1974. – 300 s. 11. Fiebig M. Einflüsse motorischer Betriebsparameter auf die Reaktivität von Dieselmotoren / M. Fiebig, M. Schönen, U. Grütering, S. Pischinger // *Motortechnische Zeitschrift*. – 2010 (71). – Nr 07–08. – S. 524 – 531.

Поступила в редакцию 07.05.2013

**Парсаданов Игорь Владимирович** – доктор техн. наук, главный научный сотрудник кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: parsadanov@kpi.kharkov.ua

**Васильев Игорь Павлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры двигателя внутреннего сгорания Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина, e-mail: vasilevkr@gmail.com

**ВИЗНАЧЕННЯ СОСТАВА ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ**

*I.V. Parsadanov, I.P. Vasylev*

Розглянуто особливості визначення складу і властивостей твердих частинок відпрацьованих газів дизелів. Наведено результати аналізів твердих частинок на вміст важких металів і вуглецевої фракції. Вуглецева фракція визначалася фотометричним методом з використанням спеціальних фільтрів, попередньо розчинених у діхлоретане. Вміст металів визначалося ртутної полярографією. Виявлено, що зі збільшенням навантаження концентрації металів у твердих частках відпрацьованих газів дизелів підвищуються.

**DEFINITION OF COMPOSITION OF PM OF DIESEL'S EXHAUST GASES**

*I.V. Parsadanov., I.P. Vasyliiev*

Features of determination of the composition and properties of particulate matters in the exhaust gases of diesel engines are considered. The results of the analysis of particulate matters on the content of heavy metals and carbon fraction are presented. The carbon fraction was determined by the photometric method with the use of special filters, previously pre-dissolved in dichloromethane. The metal content was determined using the method of mercury polarography. It was revealed that if engine load has increased the concentration of metals in particulate matter of diesel's exhaust gases has also increased.

УДК 621.43.068

**А.П. Поливянчук, С.А. Львов**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ САЖЕВОГО ФИЛЬТРА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ СЧЕТНОЙ, ПОВЕРХНОСТНОЙ И МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ**

*Предложена методика комплексной оценки эффективности работы сажевого фильтра дизеля по трем критериям: счетной, поверхностной и массовой концентрациям твердых частиц с учетом их дисперсного состава. Приведены результаты оценки эффективности сажевого фильтра дизеля грузового автомобиля с использованием предложенной методики.*

**Введение**

Сажевые фильтры являются наиболее распространенным средством нейтрализации дизельных твердых частиц (ТЧ) – второго по значимости (после оксидов азота  $NO_x$ ) загрязняющего вещества в

выхлопе дизеля [1]. Для оценки эффективности работы фильтра традиционно используют критерий относительного снижения массовой концентрации –  $C_m$  (или выброса) ТЧ в результате процесса фильтрации. Данный подход к оцениванию эффектив-