

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЗЕЛЯ С КАТАЛИТИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

И.В. Парсаданов, Н.Д. Сахненко, М.В. Ведь, И.Н. Карягин, В.А. Хижняк, Д.С. Андрощук

В статье представлены результаты стендовых исследований эффективности нейтрализации токсических веществ с отработанными газами одноцилиндрового опытного дизеля с нанесенными каталитическими покрытиями на поверхности камеры сгорания в поршне на основе оксидов марганца и кобальта.

THE RESEARCH OF THE DIESEL ENGINE WITH A CATALYTIC COATING ON THE SURFACE OF THE COMBUSTION CHAMBER

I.V. Parsadanov, M.D. Sakhnenko, M.V. Ved', I.N. Kariagin, V.O. Khyzhniak, D.S. Androshhuk

The article deals with the results of bench testing of the efficiency of toxic substances neutralization with exhaust gases of the experienced single-cylinder diesel engine with a catalytic coating on the surface of the combustion chamber in the piston on the basis of manganese and cobalt oxides.

УДК 621.43.068

И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук, Е.А. Холкина, Е.А. Гречишкина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Обоснована необходимость создания новых расчетных методов оценки содержания твердых частиц в отработавших газах при работе дизелей на неустановившихся режимах испытаний. Разработана методика исследований, с помощью которой экспериментально установлена регрессионная зависимость для определения отклонений концентраций твердых частиц в отработавших газах на неустановившихся и установившихся режимах работы автотракторного дизеля 4ЧН12/14.

Введение

Высокая стоимость и трудоемкость обслуживания оборудования для определения массовых выбросов твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) дизелей вызывают необходимость разработки косвенных (расчетных) методов определения содержания ТЧ в ОГ. Расчетные методы основаны на оценке выбросов ТЧ по показателю дымности (оптической непрозрачности) ОГ [1], показателям дымности и концентрации газообразных углеводородов [2], показателям дымности, содержания серы и концентраций тяжелых углеводородов в топливе [3] и др.

Расчетные методы используются при оценке результатов испытаний дизелей на отдельных установившихся режимах и среднеэксплуатационных выбросах ТЧ, которые определяются по результатам испытательных циклов, в частности, циклов ESC (European Stationary Cycle) [4], 8 - ступенчатого цикла R-96 [5] и др.

С началом использования при проведении сертификационных испытаний дизелей транзитных циклов - ETC (European Transient Cycle) [4], WTVС (Worldwide Transient Vehicle Cycle) [6], WHTC (Worldwide heavy-duty transient cycle) [7] и др., которые предусматривают работу дизелей на неустановившихся (переходных) режимах, возникла необходимость в корректировке расчетных методов контроля выбросов ТЧ. Сущность такой кор-

ректировки состоит в учете при косвенном определении содержания ТЧ в ОГ на неустановившемся режиме испытаний поправки ΔC_{pt} :

$$C_{pt}^d = C_{pt}^s + \Delta C_{pt}, \text{ г/кг}, \quad (1)$$

где C_{pt}^d , C_{pt}^s - концентрации ТЧ, определяемые на неустановившемся и установившемся режимах, соответственно, при одинаковых значениях частоты вращения коленчатого вала - n (мин⁻¹) и нагрузки - L (%).

Постановка задачи

Цель исследований состояла в разработке методики установления регрессионной зависимости для определения отклонений концентраций ТЧ в ОГ дизеля на неустановившихся и установившихся режимах режимах - ΔC_{pt} в ходе испытаний автотракторного дизеля 4ЧН12/14 с использованием частичнопоточной системы контроля выбросов ТЧ - микротуннеля МКТ-2 [8].

Результатам предыдущих исследований авто-ров показали, что эта зависимость может быть представлена в виде полинома 1-й степени:

$$\Delta C_{pt} = K_n \left(\frac{\Delta n}{\Delta t} \right) + K_L \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \right), \quad (2)$$

где K_n и K_L - коэффициенты, которые определяют в ходе эксперимента;

Δn , ΔL - приращения в течение продолжительности неустановившегося режима Δt относительных

величин:

$$\bar{n} = \frac{n - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad \bar{L} = \frac{M_k}{M_{k(max)}}.$$

Таким образом, задача установления регрессионной зависимости (2) сводится к определению коэффициентов K_n и K_L .

Методика определения коэффициентов регрессионной зависимости для установления величины ΔC_{pt}

Процедура определения коэффициентов K_n и K_L представляет собой 3 цикла испытаний, проводимых последовательно друг за другом (рис. 1):

А) цикл из 5-ти установившихся режимов работы дизеля;

В) цикл из 10-ти неустановившихся режимов работы дизеля с продолжительностью $\Delta t = 20$ с (который состоит из 4-х пар основных режимов с одинаковыми значениями одной из величин Δn или ΔL при нулевом значении другой величины в каждой паре и 2-х контрольных режимов с различными значениями величин Δn и ΔL);

С) цикл из 3-х повторений неустановившегося режима с $\bar{\Delta L} = 0,35$, $\bar{\Delta n} = 0$ с разной продолжительностью Δt : 10, 20 и 30 с.

В результате выполнения цикла А измеряются значения концентраций ТЧ C_{pt}^{st} , которые соответствуют начальным и конечным значениям параметров n и L неустановившихся режимов испытаний, реализуемых в циклах В и С. При этом величины n и L варьируются в диапазоне 1250 ... 2000 мин^{-1} ($\bar{n} = 0,4 \dots 0,8$) и 30 ... 100% ($\bar{L} = 0,3 \dots 1,0$).

В результате выполнения цикла В определяются коэффициенты:

- K_L при возрастании L на 35% ($\bar{\Delta L} = 0,35$) при различных начальных значениях величины n (циклы 1→2 та 2→3);

- K_L при снижении L на 35% ($\bar{\Delta L} = -0,35$) при различных начальных значениях величины n (циклы 3→2 та 2→1).

- K_n при возрастании n на 250 мин^{-1} ($\bar{\Delta n} = 0,2$) при различных начальных значениях величины L (циклы 4→2 та 2→5);

- K_n при снижении n на 250 мин^{-1} ($\bar{\Delta n} = -0,2$) при различных начальных значениях величины L (циклы 5→2 та 2→4),

а также (на контрольных режимах) оценивается точность зависимости (1) при определении мгновенной концентрации ТЧ при одновременном изменении величин n и L .

В ходе обработки результатов испытаний для каждой из указанных пар основных режимов работы дизеля рассчитываются: среднее значение соот-

ветствующего коэффициента, а также его абсолютное и относительное отклонение.

Для определения величин K_n и K_L на каждом неустановившемся режиме испытаний используются формулы:

$$K_n = \frac{\Delta C_{pt0}}{(\bar{\Delta n} / \Delta t)}, \quad (\text{г} \cdot \text{с}) / \text{кг}, \quad (3)$$

$$K_L = \frac{\Delta C_{pt0}}{(\bar{\Delta L} / \Delta t)}, \quad (\text{г} \cdot \text{с}) / (\text{кг}), \quad (4)$$

где ΔC_{pt0} - отклонения концентраций ТЧ, измеренных на неустановившемся и установившемся режимах работы дизеля с использованием МКТ-2.

В результате выполнения цикла С определяются: среднее значение коэффициента K_L и его среднее квадратичное отклонение (S_{KL}) при возрастании нагрузки на вал двигателя в диапазоне варьирования продолжительности неустановившегося режима $\Delta t = 10 \dots 30$ с:

$$K_L = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 K_{Li}; \quad (5)$$

$$S_{KL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (K_L - K_{Li})^2}{m \cdot (m-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (K_L - K_{Li})^2}{6}}, \quad (6)$$

где i – индекс режима испытаний;

$m = 3$ – количество режимов в испытательном цикле.

Результаты исследований и их анализ

В соответствии с приведенной методикой проведены испытания дизеля 4ЧН12/14 по циклам А, В и С (см. рис. 1), в ходе которых с помощью МКТ-2 были измерены концентрации ТЧ в ОГ на установившихся - C_{pt0}^{st} и неустановившихся - C_{pt0}^d режимах работы дизеля.

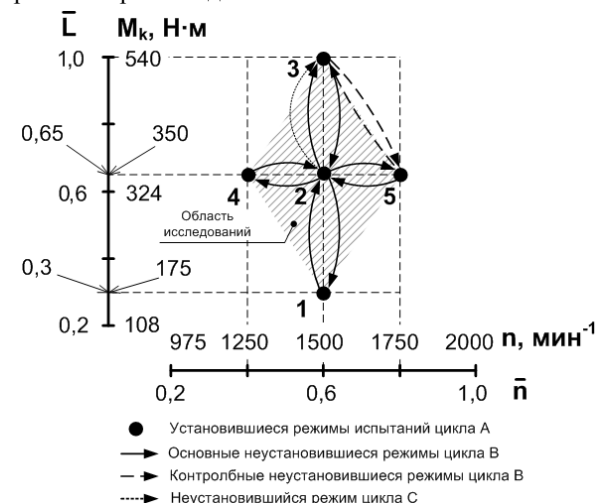


Рис. 1. Установившиеся и неустановившиеся режимы испытаний, которые используются для определения коэффициентов K_n и K_L

В ходе выполнения цикла А установлены значения C_{pt0}^{st} на 5-ти установившихся режимах работы дизеля (рис. 2, табл. 1), которыми начинались и заканчивались неустановившиеся режимы циклов В и С. Значение C_{pt0}^{st} на неустановившихся режимах испытаний определялось как среднее арифметическое из начальной и конечной концентраций ТЧ, определенных на соответствующих установившихся режимах.

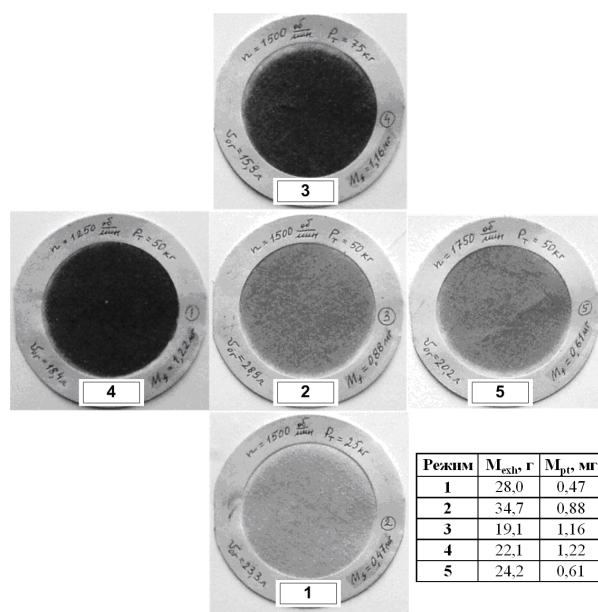


Рис. 2. Фильтры с ТЧ, собранными на установившихся режимах испытаний цикла А

В ходе выполнения цикла В установлены значения коэффициентов K_n и K_L при росте и уменьшении величин $\Delta \bar{n}$ и $\Delta \bar{L}$, а также оценена точность зависимости (2) для определения величины ΔC_{pt} . Результаты исследований, полученные при варьировании величин $\bar{n}$ и $\bar{L}$ в диапазонах $\bar{n} = 0,4 \dots 0,8$ и $\bar{L} = 0,3 \dots 1,0$ и продолжительности не-

установившихся режимов $\Delta t \approx 20$ с, показали следующее (табл. 2, рис. 3):

- при возрастании одной из величин $\Delta \bar{n}$ или $\Delta \bar{L}$ при постоянном значении другой величины средние значения коэффициентов K_n и K_L составляют 0,96 и 1,79, соответственно; при этом абсолютные и относительные отклонения величин K_n и K_L от средних значений составляют: $\pm 0,08$ (г·с)/кг, или 8,3% и $\pm 0,06$ (г·с)/кг, или 3,4%, соответственно; таким образом нагрузка L имеет в 1,9 раз более существенное влияние на величину ΔC_{pt} чем число оборотов коленчатого вала двигателя n ;

- при снижении одной из величин $\Delta \bar{n}$ или $\Delta \bar{L}$ при постоянном значении другой величины значения коэффициентов K_n и K_L являются не существенными и могут не учитываться, поскольку отклонения концентраций ТЧ, измеренных на неустановившихся и установившихся режимах испытаний составляют $\Delta C_{pt0} = -0,005 \dots 0,006$ г/кг, что сопоставимо с пределом чувствительности МКТ-2 - $\pm 0,005$ [8];

- абсолютные отклонения расчетных значений величины ΔC_{pt} , определенных с помощью зависимости (2), от экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения 2-х контрольных неустановившихся режимов, составляют -0,003 г/кг и 0,004 г/кг, что сопоставимо с пределом чувствительности МКТ-2; это подтверждает значимость полученных значений коэффициентов K_n и K_L и практическую пригодность зависимости (2) для определения величины ΔC_{pt} .

В ходе выполнения цикла С исследовано значение коэффициента K_L при возрастании нагрузки L и постоянном значении числа оборотов коленчатого вала двигателя n в диапазоне варьирования продолжительности неустановившегося режима $\Delta t = 10 \dots 30$ с. Результаты исследований показали следующее (рис. 4):

Таблица 1. Результаты измерений концентраций ТЧ на установившихся режимах испытаний цикла А

Режим	Параметры режима			Результаты измерений и вычислений					
	$n, \text{мин}^{-1}$ ($\bar{n}$)	$M_k, \text{Н·м}$ ($\bar{L}$)	$P_e, \text{кВт}$	$G_{exh}, \text{кг/ч}$	q	$\tau_{samp}, \text{с}$	$C_{sam}, \text{г/с}$ ($M_{sam}, \text{г}$)	$M_{pt}, \text{мг}$	$C_{pt0}^{st}, \text{г/кг}$
1	1500 (0,6)	175,7 (0,3)	27,6	403,6	7,13	271,1	0,73 (199,2)	0,47	0,020
2	1500 (0,6)	351,4 (0,65)	55,2	423,3	6,35	301,1	0,74 (220,5)	0,88	0,030
3	1500 (0,6)	527,2 (1,0)	82,8	473,5	6,90	180,9	0,73 (131,9)	1,16	0,073
4	1250 (0,4)	351,4 (0,65)	46,0	332,8	7,01	211,8	0,73 (155,1)	1,22	0,066
5	1750 (0,8)	351,4 (0,65)	64,4	523,8	6,38	211,3	0,73 (154,5)	0,61	0,030

- при увеличении Δt отклонение концентраций ТЧ C_{pt}^d и C_{pt}^{st} уменьшается; так, при увеличении Δt с 10 до 30 с величина ΔC_{pt} уменьшается в 1,8 раза;
 - в исследуемом диапазоне варьирования $\Delta t = 10 \dots 30$ с коэффициент K_L можно считать постоян-

ной величиной, среднее значение которой составляет 1,575; при этом среднеквадратическое отклонение результатов измерений K_L составляет $\pm 0,105$ (г·с)/кг, что составляет 6,7%.

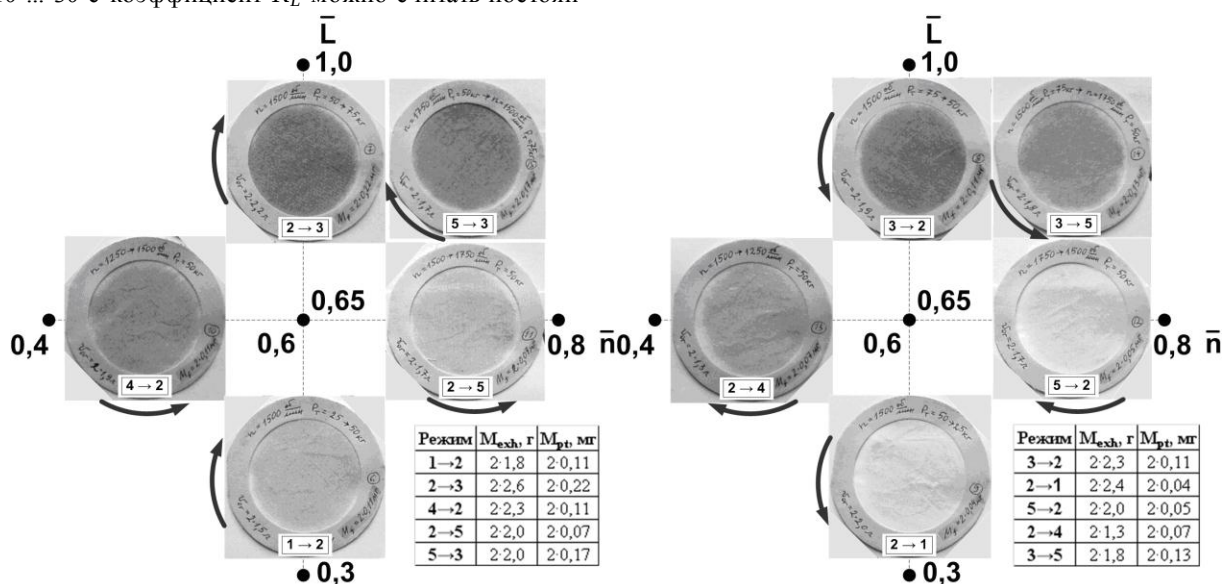


Рис. 3. Фильтры с ТЧ, собранными на неуставившихся режимах цикла В

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований коэффициентов K_n и K_L

Режим	Параметры неуставившихся режимов испытаний				Результаты измерений и вычислений					
	Δn	$\Delta \bar{L}$	$\Delta t = \tau_{сам}$, с	P_e , кВт	C_{exh} , кг/ч	q	C_{pt0}^d , (C_{pt0}^{st}) , г/кг	ΔC_{pt0} , г/кг	K_n^{**} , $\frac{г \cdot с}{кг}$	K_L^{**} , $\frac{г \cdot с}{кг}$
1→2	0	0,35	21,09	41,4	413,5	8,43	0,055 (0,025)	0,030	-	1,79
2→3			22,21	69,0	448,4	6,20	0,080 (0,052)	0,028		
3→2	0	-0,35	21,07	69,0	448,4	6,65	0,057 (0,052)	0,005	-	0,00
2→1			21,27	41,4	413,5	6,43	0,020 (0,025)	-0,005		
4→2	0,2	0	21,30	50,6	378,1	6,82	0,058 (0,048)	0,010	0,96	-
2→5			21,33	59,8	473,6	7,81	0,038 (0,030)	0,008		
5→2	-0,2	0	20,83	59,8	473,6	7,47	0,029 (0,030)	-0,001	0,26	-
2→4			21,11	50,6	378,1	9,83	0,054 (0,048)	0,006		
3→5	0,2	-0,35	20,69	73,6	498,7	7,10	0,064 (0,052)	0,012 0,009*	0,96	0,00
5→3	-0,2	0,35	20,11	73,6	498,7	7,48	0,079 (0,052)	0,027 0,031*	0,00	1,79

Примечание. * - расчетные значения величины ΔC_{pt0} , полученные с помощью зависимости (2); ** - среднеарифметические значения результатов 2-х измерений коэффициента.

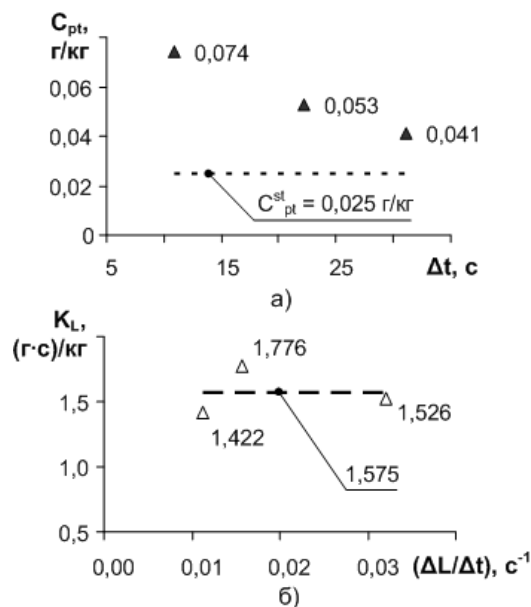


Рис. 4. Результаты исследований влияния продолжительности неустойчившегося режима Δt на величины ΔC_{pt} (а) и K_L (б) в ходе выполнения цикла С

Таким образом с учетом выбранного типа регрессионной зависимости $\Delta C_{pt} = f((\Delta n/\Delta t), (\Delta L/\Delta t))$ (см. формулу (2)) и результатов экспериментальных исследований коэффициентов K_n и K_L формула для определения величины ΔC_{pt} имеет вид:

$$\Delta C_{pt} = 0,96 \left(\frac{\Delta \bar{n}_+}{\Delta t} \right) + 1,575 \left(\frac{\Delta \bar{L}_+}{\Delta t} \right), \text{ г/кг,}$$

где $\Delta \bar{n}_+$ та $\Delta \bar{L}_+$ - положительные значения приращений величин $\bar{n}$ и $\bar{L}$.

Выводы

1. Разработана методика установления регрессионной зависимости для определения отклонений концентраций ТЧ в ОГ дизеля на неустойчившихся и установившихся режимах испытаний - ΔC_{pt} , как функции от прироста по времени безразмерных значений числа оборотов коленчатого вала двигателя и нагрузки - $(\Delta \bar{n}/\Delta t)$ и $(\Delta \bar{L}/\Delta t)$.

2. В результате исследований концентраций ТЧ в ОГ автотракторного дизеля 4ЧН12/14 на установившихся и неустойчившихся режимах испытаний с использованием системы контроля выбросов ТЧ микротуннеля МКТ-2 установлена зависимость $\Delta C_{pt} = f((\Delta \bar{n}/\Delta t), (\Delta \bar{L}/\Delta t))$ в диапазонах варьирования параметров Δt , $\Delta \bar{n}$ и $\Delta \bar{L}$ - 10...30 с, 0,4 ... 0,8 и 0,3 ... 1,0, соответственно, с расхождением расчетных и экспериментальных значений ΔC_{pt} - $\pm 0,003...0,004$ г/кг.

Список літератури:

1. Hardenberg H. Grenzen der Rubmassbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. - 1987. - 48, № 2. - P. 51-54.
2. Парсаданов И.В. Оценка выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов // Авиационно-космическая техника и технология. 2000. - Вып. 19.- С. 176-178.
3. Кульчицкий А.Р. Расчетно-экспериментальное определение выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / А.Р. Кульчицкий // Двигателестроение, 2005, №4. - С. 39-44.
4. 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.
5. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. - 109 p.
6. Steven H. Development of Worldwide Harmonized Heavy-duty Engine Emissions Test Cycle / Final Report ECE-GRPE WHDC Working Group. - April 2001 // Informal document No2 GRPE 42nd session. - 28 May - 1 June 2001. - TRANS /WP 29/GRPE/2001/2. - 58 p.
7. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure / Draft Global Technical Regulation (GTR) / UN/ECE-WP 29 - GRPE WHDC Working Group. - Informal Document No. GRPE-48-7 (48th GRPE, 01-04 June 2004, agenda item 1.1) - 86 p.
8. 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. Hardenberg H. Grenzen der Rubmassbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. - 1987. - 48, № 2. - P. 51-54.
2. Parsadanov I.V. Ocenka vybrosoa tverdykh chastic s otrabotavshimi gazami dizelja / I.V. Parsadanov // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. 2000. - Vyp. 19.- S. 176-178.
3. Kul'chickij A.R. Raschetno-jeksperimental'noe opredelenie vybrosoa dispersnykh chastic s otrabotavshimi gazami dizelej / A.R. Kul'chickij // Dvigatelistroenie, 2005, №4. - S. 39-44.
4. 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.
5. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. - 109 p.
6. Steven H. Development of Worldwide Harmonized Heavy-duty Engine Emissions Test Cycle / Final Report ECE-GRPE WHDC Working Group. - April 2001 // Informal document No2 GRPE 42nd session. - 28 May - 1 June 2001. - TRANS /WP 29/GRPE/2001/2. - 58 p.
7. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure / Draft Global Technical Regulation (GTR) / UN/ECE-WP 29 - GRPE

WHDC Working Group. - Informal Document No. GRPE-48-7 (48th GRPE, 01-04 June 2004, agenda item 1.1) – 86 p. 8. Marchenko A.P. *Vlijanie rezhimov raboty avtotraktorного дизеля na vybrosytverdyh*

chastic s otrabotavshimi gazami / A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov, A.P. Polivjanchuk // *Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu*. – 2012. – № 25. – S. 151-155.

Поступила в редакцію 02.07.2015 г.

Парсаданов Ігор Володимирович – доктор техн. наук, професор, заст. зав. кафедрою двигуни внутрішнього згоряння з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків, вул. Фрунзе, 21, тел.: (057) 707-60-89, E-mail: parsadanov@kpi.kharkov.ua.

Полив'ячук Андрей Павлович – доктор техн. наук, доц., проф. кафедри двигателів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна, e-mail@meta.ua, (057) 707-68-48.

Холкіна Елена Александровна – молодший науковий співробітник кафедри екології Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, г. Северодонецьк, Україна, (06452) 4-03-42.

Гречишкіна Екатерина Алексеевна – соискатель кафедри екології Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, г. Северодонецьк, Україна, (06452) 4-03-42.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ НА НЕСТАЛИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

I.V. Parsadanov, A.P. Poliv'ianchuk, E.O. Holkina, K.A.O. Grechishkina

Обґрунтовано необхідність створення нових розрахункових методів оцінювання вмісту твердих частинок у відпрацьованих газах при роботі дизелів на несталих режимах випробувань. Розроблено методику досліджень, за якою експериментально встановлено регресійну залежність для визначення відхилень концентрацій твердих частинок у відпрацьованих газах на несталих та сталих режимах роботи автотракторного дизеля 4CH12/14.

RESEARCH EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER WITH EXHAUST GASES TO UNSTEADY OPERATION MODES OF AUTOMOTIVE DIESEL ENGINES

I.V. Parsadanov, A.P. Polivianchuk, E.A. Holkina, E.A. Grechishkina

The necessity of creation of new computational methods for evaluation of the particulates in the reflection-bot gases of diesel engines at work on transient test modes. The technique of research, through which experimentally established dependence regression to determine deviations concentration-tions of particulate matter in the exhaust gas in the transient and steady-state modes of autotractor diesel 4CHN12/14.