

К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, Ю.Л. Рапацкий

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ

Определяется длительность впрыскивания топлива, обеспечивающая минимально возможную концентрацию токсичных соединений, в частности оксидов азота, в выхлопных газах дизелей при заданной частоте вращения коленчатого вала и нагрузке на двигатель. Основу решения составляют статистические модели, описывающие зависимости между параметрами дизелей.

Введение

В современных экономических условиях обеспечение конкурентоспособности продукции отечественного автомобилестроения на внутреннем и зарубежном рынках может быть достигнуто, в том числе, расширением модельного ряда и оснащением отдельных серий выпускаемых автомобилей экономичными малолитражными дизелями. Растущая во многих странах популярность дизелей объясняется не только их экономичностью, но и большей надежностью и высоким крутящим моментом по сравнению с бензиновыми двигателями одинакового рабочего объема [1].

Однако повсеместное использование дизелей создает экологические проблемы. Их отработавшие газы (ОГ), особенно для дизелей с большим (2 и более литров) рабочим объемом, устанавливаемых на сельскохозяйственную и дорожно-строительную технику, вызывают серьезные заболевания у животных и, в среднем на 25%, снижают урожайность растений [1]. Выбросы в атмосферу вызывают отравления у людей, иногда не сразу проявляющиеся и негативно влияющие на слизистую оболочку, кровеносные органы и нервную систему. В крупных городах на долю дизелей приходится до 60% от общего объема выбросов вредных веществ в атмосферу [1].

ОГ дизелей состоят из многих компонентов. К ним относятся: пары, дисперсные частицы и капли жидкости. Основными компонентами являются продукты полного (водяной пар, оксид четырехвалентного углерода CO_2) и неполного (монооксид углерода CO , углеводороды C_xH_x , дисперсные твердые частицы, т.е. сажа) сгорания топлива, вещества, образующиеся из воздуха в результате термического синтеза при высоких температурах (оксиды азота NO_x), а также сера и её соединения, альдегиды, продукты полимеризации и т.д.

Нормируемыми токсичными компонентами по действующим экологическим стандартам EURO-2, EURO-3 являются NO_x , CO , C_xH_x и твердые частицы. Определение концентрации этих компонентов в ОГ проводят по результатам специальных дорож-

ных или стендовых испытаний. Программа испытаний зависит от типа двигателя, но всегда предполагает его прогрев после пуска в режиме холостого хода в течение 40 с. Для двигателей грузовых автомобилей и автобусов программа включает их работу на 13 установившихся режимах. Для двигателей легковых автомобилей и автомобилей небольшой грузоподъемности программа включает чередование переходных режимов (разгон-замедление). Измерения параметров производят непрерывно, их удельные значения, отнесенные к единице пройденного пути, или к средней мощности, сравнивают с допустимыми значениями.

Наиболее токсичными (около 45%) компонентами отработавших газов дизелей являются оксиды азота NO (80-90%) и NO_2 (10-20%), далее обозначаемые как NO_x . Их концентрация определяется распределением топливно-воздушной смеси по цилиндрам дизеля, ее составом, моментом воспламенения, длительностью процесса впрыска топлива, а также режимными параметрами дизеля. Так, при максимальных нагрузках содержание NO_x в продуктах сгорания дизелей достигает 10 мг/л [2], однако при обогащении или обеднении смеси это значение резко снижается, в некоторых случаях приборы фиксируют только остатки компонента.

Обзор литературы

Анализ современной научно-технической литературы показал, что большинство исследователей связывают главное направление снижения концентрации токсичных компонентов в ОГ дизелей с использованием новых конструкций камер сгорания или альтернативного топлива и различных присадок к нему, а также нейтрализаторов ОГ [3, 4]. Это требует совершенствования существующих технологий изготовления, а также способов получения дизельного топлива, что неминуемо приведет к увеличению их себестоимости и, следовательно, к снижению спроса на автомобили с дизелями.

По мнению некоторых ученых, токсичность дизелей, с учетом экономии топлива, может быть снижена за счет определения наилучших, с точки

зрения минимума содержания в ОГ токсичных компонентов, соотношений между углом опережения впрыскивания, давлением впрыска и его продолжительностью. Кроме того, целесообразно также оптимизировать рабочие процессы дизелей на базе моделей, отражающих зависимости между параметрами токсичности и показателями рабочих процессов [5, 11]. Например, в работе [6] строятся регрессионные уравнения, связывающие настраиваемый параметр y_i и режимные параметры (частоту вращения коленчатого вала, нагрузку и т.д.) x_i . Здесь β_i – весовые коэффициенты, ε_i – внешние возмущения.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_{i,i} + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_{i,i} x_{j,i} + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{j,i}^2 + \varepsilon_i, \quad (1)$$

Для конкретного дизеля, детально рассмотренного в [6], выражение (1) принимает вид:

$$\text{CH}_i = -15,2 \cdot x_{1,i} + 0,47 \cdot x_{2,i} + 90 \cdot x_{3,i} - 0,6 \cdot x_{1,i} x_{2,i} + 81 \cdot x_{2,i} x_{3,i} + 27,5 \cdot x_{1,i}^2 - 12 \cdot x_{2,i}^2 - 196 \cdot x_{3,i}^2 - 2042, \quad (2)$$

где x_1 – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} , x_2 – нагрузка, %, x_3 – длительность впрыскивания, с.

Аналогичные модели предлагаются в работе [7]. Функционирование исправного судового дизеля с точностью не ниже 90% описывается системой регрессионных уравнений:

$$\begin{cases} P_{i,1} = 0,2084 \cdot H - 0,004 \cdot n - 0,0044 \\ P_{i,2} = H - 0,5 \cdot n - 0,1 \cdot H^2 - 0,3 \cdot n^2 + 0,3 \cdot H \cdot n - 1,15, \\ P_z = 0,4795 \cdot H - 0,0265 \cdot n + 0,014 \end{cases} \quad (3)$$

где P_i – среднее индикаторное давление, P_z – максимальное давление сгорания, H – нагрузка, n – частота вращения коленчатого вала.

Указанные подходы имеют недостатки, основные из которых связаны с ограничением возможностей одновременной настройки (определения оптимальных значений) всех требуемых параметров с учетом зависимостей, существующих между ними. Это может привести к нежелательным последствиям. Например, давно известно, что резкое снижение концентрации оксидов азота в ОГ регулированием угла опережения впрыскивания топлива без контроля значений других параметров приводит к резкому увеличению концентрации углеводородов [8].

Основная часть

Целью работы является определение длительности впрыскивания топлива, обеспечивающей минимально возможную концентрацию токсичных соединений в продуктах сгорания при заданной частоте вращения коленчатого вала и постоянной нагрузке на двигатель. Основу решения задачи со-

ставляют статистические модели, описывающие зависимости между концентрацией токсичных компонентов в продуктах сгорания дизелей, режимными параметрами и длительностью впрыскивания топлива.

Как показал анализ экспериментальных данных, в том числе приведенных в [6], для конкретной модели дизеля при заданных значениях давления впрыскивания и параметрах топливной аппаратуры снижение концентрации NO_x в ОГ может быть достигнуто регулированием длительности впрыскивания топлива τ . Однако изменение длительности впрыскивания топлива вызывает изменение удельного эффективного расхода топлива (g_e), мощности двигателя, количества дисперсных твердых частиц (*Smoke*) в отработавших газах и т.д. Это видно, например, на графиках функциональных зависимостей на рис. 1, 2, построенных в трехмерном пространстве координат $\{\text{Smoke}, \tau, n\}$, $\{g_e, \tau, n\}$ по данным работы [6].

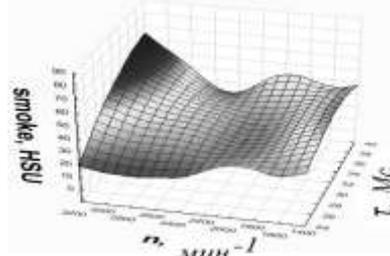


Рис.1. Зависимость $\text{Smoke} = f_1(x)$

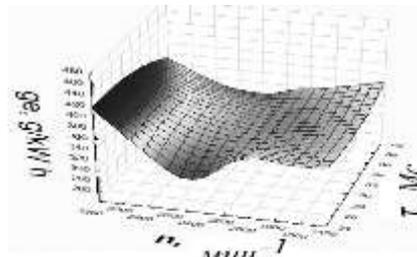


Рис.2. Зависимость $g_e = f_2(x)$

Поэтому задачу нахождения минимума этих функций можно рассматривать как задачу многокритериальной оптимизации [10]:

$$f_1(x) \rightarrow \min_{x \in D}, f_2(x) \rightarrow \min_{x \in D}, \dots, f_m(x) \rightarrow \min_{x \in D}, \quad (4),$$

где m – число настраиваемых параметров, $x_i = (n_i, \text{Mc}_i, \tau_i)^T$ – вектор параметров, характеризующих режим работы двигателя, D – множество возможных значений x_i .

Очевидно, что наилучшим решением задачи будет такой вектор x^* , для которого условия (4) выполняются одновременно для всех функций $f_j(x)$, $j = 1..m$.

Каждая из представленных функций имеет минимум, соответствующий разным значениям вектора x . Однако на практике такое решение не может быть получено, поскольку целевые функции связаны с разными физическими величинами. Каждая функция достигает своего экстремума для одного значения x , и невозможно найти такое значение x^* , для которого условия (4) выполняются одновременно для всех целевых функций. Выход из ситуации заключается в поиске такого решения x^{**} , для которого обеспечивается рациональный компромисс заданных целей. Задача многокритериальной оптимизации сводится к типовой задаче с одним критерием.

Введем одну обобщенную цель, описываемую функцией вида

$$K = \sum_{j=1}^3 b_j f_j(x), \quad (5)$$

где b_j – коэффициенты, отражающие важность соответствующей целевой функции. Предполагается, что коэффициенты нормированы и удовлетворяют условию

$$\sum_{j=1}^3 b_j = 1.$$

В данном случае значение длительности впрыскивания топлива принимается единственным аргументом указанных целевых функций, а конкретные значения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала задаются.

В качестве меры токсичности дизеля в момент времени t принят вектор $y_t = (CH_t, NOx_t, Smoke_t)^T$, элементами которого являются концентрации соответствующих компонентов ОГ. Тогда каждая из целевых функций может быть представлена отклонением концентрации от заданных значений, соответствующих принятым экологическим стандартам.

Целевая функция (5) записывается в виде:

$$K = \sum_{j=1}^3 b_j \frac{|y_j - y_{jb}|}{y_{jb}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где y_{jb} – предельно допустимое значение j -го элемента вектора y_t . Выражение (6) можно переписать в виде:

$$K = \sum_j b'_j c_j \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$c_j = \frac{|y_j - y_{jb}|}{y_{jb}}, \quad b'_j = \frac{b_j}{y_{jb}}.$$

Зависимость между вектором y_t и вектором режимных параметров в окрестностях рабочих то-

чек на установившихся режимах представляется как

$$y_t = A_0 + A_1 x_t + \omega_t, \quad (8)$$

что детально описано в [9]. Здесь ω_t – вектор ошибок моделирования,

$$A_0 = (-1852 \quad 31,2 \quad -54,1)^T \text{ – вектор констант,}$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 7,79 & 0,082 & 60 \\ 0,06 & 0,0006 & 0,91 \\ 0,84 & 0,0003 & 0,86 \end{pmatrix} \text{ – матрица коэффициентов.}$$

тов.

Значения коэффициентов уравнения (6) задаются группой экспертов, исходя из уровня значимости целевых функций для конкретной модели дизеля с учетом действующих норм экологической безопасности. Переход от выражения (6) к выражению (7) при введении ограничений на параметр c_j

позволяет найти оптимальное значение x_t , используя линейное программирование. Для функций, отраженных графиками рис. 1 – 2, получены значения длительности впрыска топлива, минимизирующие концентрацию оксидов азота в ОГ (рис. 3).

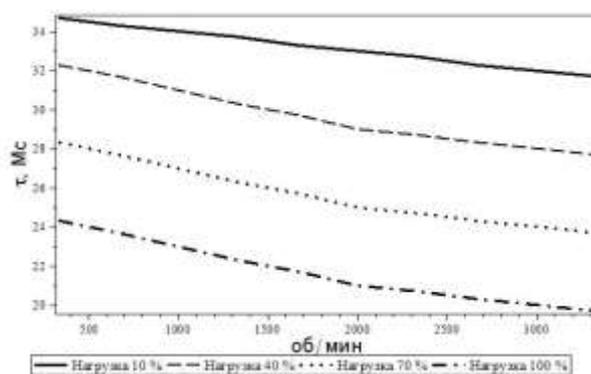


Рис.3. Значения длительности впрыскивания топлива τ , минимизирующие концентрацию NO_x в ОГ при различных значениях оборотов коленчатого вала и нагрузки

Следует отметить, что эффективность предлагаемого подхода и его экономическая целесообразность существенно зависят от конструктивных параметров и режимов работы рассматриваемого дизеля и могут быть предметом дальнейших исследований.

Заключение

Рассмотренный подход позволяет обеспечить снижение концентрации оксидов азота в ОГ дизелей при одновременном обеспечении их топливной экономичности и мощности на основе определения оптимальных значений длительности впрыскивания топлива.

Список литературы:

1. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Макаров, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. - Изд. МГТУ им. Баумана, 2002 – 376 с. 2. Richrd D. Atkins “An Intodaction to Engine Testing and Development”. – Warrendale, PA 2009 – 282 p. 3. Босьяков, В.П. Методика разработки рекомендаций по оптимизации конструктивных и регулировочных параметров для снижения вредных выбросов с отработавшими газами двигателя / В.П. Босьяков и др. // Известия СПГАУ. Научный журнал / СПГАУ. – СПб., 2011. – №24. – С. 227–230. 4. Калинин В.Ф. Снижение токсичности выбросов дизельных двигателей путем применения электроадаптивной системы термостабилизации топлива / В.Ф. Калинин, А.В. Щегольков // Университет им. В.И. Вернадского. – 2008. – №3(13), Том 2. – С.173 – 179. 5. Win, Z. Investigation of diesel engine operating and injection system parameters for low noise, emissions and fuel consumption using Taguchi methods, Proceedings of the institute of mechanical engineers, / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Vol. 219, Part D: J. Automobile Engineering. – 2005. 6. Win Z. Parameter optimization of a diesel engine to reduce noise, fuel consumption, and exhaust emissions using response surface methodology / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Proc. IMechE Vol. 219 Part D: J. Automobile Engineering. – 2004. P.1181 – 1192. 7. Одинцов В.И. Диагностирование технического состояния дизелей по параметрам рабочих процессов / В.И. Одинцов, С.А. Кабышь // Вестник АГТУ, Сер.: Морская техника и технология. – 2012. – С.123 – 127. 8. Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии двигателестроения / В.И. Смайлис // Двигателестроение. – 1991. - №1. – С.3-6. 9. Первухина Е.Л. К вопросу совершенствования методики приемоиспытаний двигателей внутреннего сгорания / Е.Л. Первухина, К.Н. Осипов, Ю.Л. Рапацкий // Проблемы машиностроения и надежности машин, РАН, Рос-сия. – 2012. – № 6. – С. 89-96. 10. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкрато-

ва. – К.: BHV, 2007. 11. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / А.С. Орлин, М.Г. Круглов и др. – М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.

Bibliography (transliterated):

1. Markov V.A. Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej / V.A. Makarov, R.M. Bashirov, I.I. Gabitov. - Izd. MG TU im. Baumana, 2002 – 376 s. 2. Richrd D. Atkins “An Intodaction to Engine Testing and Development”. – Warrendale, PA 2009 – 282 p. 3. Bosjakov, V.P. Metodika razrabotki rekomendacij po optimizacii konstruktivnyh i regulirovochnyh parametrov dlja snizhenija vrednyh vybrosov s otrabotavshimi gazami dvigatelja / V.P. Bosjakov i dr. // Izvestija SPGAU. Nauchnyj zhurnal / SPGAU. – SPb., 2011. – №24. – S. 227–230. 4. Kalinin V.F. Snizhenie toksichnosti vybrosov dizelejnyh dvigatelej putem primenenija jelektroadaptivnoj sistemy termostabilizacii topliva / V.F. Kalinin, A.V. Shhegol'kov // Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – №3(13), Tom 2. – S.173 – 179. 5. Win, Z. Investigation of diesel engine operating and injection system parameters for low noise, emissions and fuel consumption using Taguchi methods, Proceedings of the institute of mechanical engineers, / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Vol. 219, Part D: J. Automobile Engineering. – 2005. 6. Win Z. Parameter optimization of a diesel engine to reduce noise, fuel consumption, and exhaust emissions using response surface methodology / Win, Z., Gakkhar, R. P.; Jain, S. C.; Bhattacharya M. // Proc. IMechE Vol. 219 Part D: J. Automobile Engineering. – 2004. P.1181 – 1192. 7. Odincov V.I. Diagnostirovanie tehničeskogo sostojanija dizelej po parametram rabochih processov / V.I. Odincov, S.A. Kabys'h' // Vestnik AGTU. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2012. – S.123 – 127. 8. Smajlis V.I. Sovremennoe sostojanie i novye problemy jekologij dvigatelestroenija / V.I. Smajlis // Dvigatelistroenie. – 1991. - №1. – S.3-6. 9. Pervuhina E.L. K voprosu sovershenstvovanija metodiki priemosdatochnyh is-pytanij dvigatelej vnutrennego sgoranija / E.L. Pervuhina, K.N. Osipov, Ju.L. Rapackij // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, RAN, Ros-sija. – 2012. – № 6. – S. 89-96. 10. Zgurovs'kij M.Z., Pankratova N.D. Osnovi sistemnogo analizu. / M.Z. Zgurovs'kij, N.D. Pankratova. – K.: BHV, 2007. 11. Orlin A.S. Dvigateli vnutrennego sgoranija: Sistemy porshnevnyh i kombinirovannyh dvigatelej. Ucheb. dlja vtuzov po special'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoranija» / A.S. Orlin, M.G. Kruglov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1985. — 456 s.

Поступила в редакцию 04.07.2013

Осипов Константин Николаевич – канд. техн. наук, старший преподаватель каф. «Автоматизации технологических процессов и производств» Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

Первухина Елена Львовна – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина.

Рапацкий Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доцент, зам. декана факультета «Технологии автоматизации машино-, приборостроения и транспорта» Севастопольского национального технического университета, Украина.

РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ УПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТОКСИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ У ПРОДУКТАХ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВЗ

К.М. Осіпов, О.Л. Первухіна, Ю.Л. Рапацький

Визначається тривалість впорскування палива, що забезпечує мінімально можливу концентрацію токсичних з'єднань, зокрема оксидів азоту, у вихлопних газах дизелів при заданій частоті обертання колінчастого вала та навантаженні на двигун. Основу розв'язання становлять статистичні моделі, що описують залежності між параметрами дизелів.

CALCULATION OF TIMING OF FUEL INJECTION FOR REDUCING THE CONCENTRATION OF TOXIC COMPONENTS IN DIESEL COMBUSTION

K. N. Osipov, E. L. Pervukhina, and Yu. L. Rapatskiy

The paper proposed the method to reduce toxicity of diesel engine by optimization of the fuel injection timing. The main idea is based on statistical models which describe dependencies between parameters of diesel.

И.В. Парсаданов, И.В. Рыкова, А.Н. Маклаков

ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИЦИЛИНДРОВОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАТАЛИЗА В ДВС

Проанализированы результаты проведенных работ, предложена последовательность проведения исследований каталитических процессов в цилиндре двигателя и разработки технических решений с применением нетрадиционных материалов и перспективных технологий для реализации внутрицилиндрового экологического катализа.

Постановка проблемы, анализ проведенных исследований

Показатели качества современных ДВС обеспечиваются интеграцией и высоким уровнем доведенности механических, термодинамических, гидравлических, газодинамических, физических, химических и электрических процессов, что позволяет в определенной степени решать глобальную проблему сохранения окружающей среды при постоянно возрастающей потребности человечества в механической энергии.

Дальнейшее снижение отрицательного воздействия на окружающую среду и улучшение экологических показателей ДВС требует принятия новых технических решений, применения нетрадиционных материалов и перспективных технологий.

Достигнутый уровень экологических показателей ДВС обеспечен в результате многочисленных исследований, доводочных работ и практической реализации технических решений по выбору оптимальной формы камеры сгорания, аэродинамических характеристик воздушного заряда и характеристик топливоподачи. Наряду с повышением эффективности систем газотурбинного наддува и промежуточного охлаждения наддувочного воздуха, уточнением значений степени сжатия и фаз газораспределения современные автомобильные ДВС при увеличении литровой мощности обеспечивают уровень экологических показателей, соответствующий нормам ЕВРО-3.

Последующее совершенствование экологических показателей ДВС требует применения средств нейтрализации и очистки, рециркуляции отработавших газов, изменения характеристик топлив. Эти технические решения активно внедряются, несмотря на усложнение конструкции и увеличение стоимости производства и эксплуатации двигателя.

Перспективной, с точки зрения улучшения экологических показателей ДВС, является реализация возможностей *внутрицилиндрового экологического катализа*. Внутрицилиндровый экологический катализ в ДВС предполагает увеличение скорости окислительных и восстановительных реакций под воздействием каталитического слоя (покрытия), который наносится непосредственно на

поверхность металла-носителя камеры сгорания (КС). В результате каталитических процессов на такте расширения происходит преобразование продуктов неполного сгорания топлива (CO , C_nH_m , C) в безвредные вещества и восстановление оксидов азота (NO_x) до N_2 и, соответственно, снижение выбросов в окружающую среду токсичных компонентов.

Подробный анализ выполненных исследований по внутрицилиндровому экологическому катализу в ДВС приведен в работе [1]. Приведенные в данной работе сведения указывают на противоречивый характер влияния выбранных покрытий на выбросы NO_x и продукты неполного сгорания топлива (CO , C_nH_m , C). Для получения комплексного эффекта (снижение всех видов токсичных веществ) необходимы изменения в регулировках двигателя.

Например, применение оксидных керамических покрытий основных металлов может улучшить процесс сгорания за счет увеличения температуры и уменьшения задержки воспламенения, увеличить механическую энергию за счет предотвращения потерь тепла в систему охлаждения, а также уменьшить выбросы несгоревших углеводородов, оксида углерода и твердых частиц. При этом, не смотря на увеличение температуры рабочего тела, снижается удельный выброс NO_x . [2].

Результаты исследований по применению катализаторов платиновой группы также не однозначны. К тому же недостатком каталитических покрытий из благородных металлов является их высокая стоимость. Поэтому необходимо находить возможность применения переходных неблагородных металлов с сопоставимой каталитической активностью. В работе [3] были исследованы покрытия из меди, никеля и хрома, нанесенные на стенки камеры сгорания. Результаты показали, что все покрытия уменьшили расход топлива, выбросы CO , CH , а выбросы NO_x – увеличились, причем медь оказалась наиболее эффективным катализатором.

Выполненные ранее исследования, в том числе в Национальном техническом университете «ХПИ», дают основание предположить, что применение покрытий на поверхности поршней позволя-

ет влиять на термодинамические, физические и химические процессы в камере сгорания ДВС, создавая условия для снижения выбросов с ОГ токсичных веществ неполного сгорания топлива.

В целом, обзор литературных источников показал, что, несмотря на большое количество трудов по катализу, направление, связанное с внутрицилиндровым катализом ДВС, мало исследовано. Практически отсутствуют работы, в которых результаты экспериментов, проведенных на двигателях с различными видами катализаторов, сочетаются с систематизацией и детальным теоретическим анализом.

Целью данной работы является систематизация направлений исследований ДВС, направленных на выявление возможности снижения загрязнения окружающей среды отработавшими газами применением внутрицилиндрового экологического катализа.

Основной материал статьи

В каталитических нейтрализаторах, которые применяются для очистки продуктов сгорания от токсичных веществ в выпускных системах ДВС, наибольшее распространение получили покрытия, содержащие благородные металлы (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru), а также переходные металлы (Mn, Fe, Cr, V, Mo, Co, Ce, Ni, W, Cu, Sn) и их оксиды [4].

Наиболее эффективными являются покрытия на основе благородных металлов – платины (Pt) и палладия (Pd). Платина является универсальным катализатором, обеспечивающим быстрое протекание реакций окисления и восстановления. Палладий, как правило, используют для ускорения окислительных реакций. Для интенсификации восстановительных реакций применяют радий (Ra), рутений (Ru), оксиды меди, железа, марганца, ванадия, хрома и др. Катализирующая эффективность остальных металлов ниже.

Каталитическое покрытие наносят на поверхность носителя или насыщают его. В качестве носителя покрытия используют оксиды основных металлов (Al_2O_3 , MgO, ZrO_2 , Si_2O_4 и др.) [5]. Носитель не должен изменять каталитические свойства катализатора, иметь пористую структуру для обеспечения нанесения активного компонента в достаточном количестве и обладать высокой механической прочностью, термической и химической устойчивостью [6].

В основу изучения внутрицилиндрового экологического катализа должны быть положены сведения о физических и термодинамических процессах, кинетике и механизмах реакций сгорания с учетом закономерностей и особенностей гетерогенного катализа в КС ДВС.

Гетерогенный катализ на поверхности КС во многом связан с физическими явлениями распределения топлива в КС, его испарениями, подводом продуктов сгорания к каталитической поверхности. К физическим явлениям следует отнести также теплообмен между поверхностью катализатора и газовым потоком.

Сведения о кинетике и механизмах реакций сгорания позволяет исследовать особенности химического взаимодействия реагентов с поверхностью катализатора. На химической стадии сначала происходит физическая адсорбция реагентов, затем превращение ее в химическую форму адсорбции, взаимодействие реагентов с образованием промежуточных поверхностных комплексов, превращение этих комплексов в конечные продукты и десорбция их в газовый объем [6]. Особенности химической стадии в значительной мере определяются малыми концентрациями токсичных веществ, высокими и изменяющимися значениями температуры и давлений газа в цилиндре.

Реализация внутрицилиндрового экологического катализа связана с дополнительными трудностями из-за крайне малого времени, отводимого на протекание каталитического процесса, и обеспечения его химической стабильности в течение продолжительного периода эксплуатации.

Учитывая, что скорость подвода реагирующих веществ к поверхности катализатора, а, следовательно, и скорость реакций пропорциональны величине внешней поверхности и линейной скорости газового потока, целесообразно проводить такие процессы при больших линейных скоростях с использованием пористых катализаторов.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания НТУ «ХПИ» разработана технология обработки поверхности поршней с образованием корундового керамического слоя с высокой адгезией и пористостью. Корундовый слой на поверхности камеры сгорания может быть использован в качестве носителя катализатора, и использоваться непосредственно в качестве катализатора. Результаты стендовых исследований автотракторного дизеля показали, что применение корундового слоя позволяет снизить массовый выброс твердых частиц с отработавшими газами на 19-30% [7,8]. Эффект снижения массового выброса твердых частиц может быть объяснен физической адсорбционной очисткой газов при селективном поглощении частиц сажи пористой поверхностью и ее выгоранием в следующем цикле.

Кроме того, керамический слой создает эффект частичной тепловой изоляции, что способствует повышению температуры и давления в ка-

мере сгорания и, соответственно, влияет на условия более полного выгорания топлива.

Качество катализаторов оценивается, главным образом, по производительности объема контакта и его избирательностью. Катализатор должен обладать достаточной прочностью, термической и химической устойчивостью, что определяет продолжительность цикла каталитического воздействия. Стоимость катализаторов должна быть невысокой.

Работы по созданию катализатора должны начинаться с подбора каталитически активных веществ. Как уже указывалось, во многих каталитических процессах наряду с металлами платиновой группы высокоактивными являются оксиды кобальта, марганца, меди. Хотя оксид кобальта более активен, но и более дорог. Активность оксидно-марганцевых контактов в процессах окислительно-го катализа во многих случаях значительно повышается при введении промоторов-металлов платиновой группы.

Исследования, проведенные на кафедре физической химии НТУ «ХПИ» по оценке каталитических свойств покрытий сложными оксидами группы переходных металлов показали, что по каталитической активности они не уступают свойствам металлов платиновой группы, при этом температура зажигания реакции снижается, что позволяет снижать выбросы NO_x [10, 11]. Следовательно, эффективность использования каталитических покрытий благородными и переходными металлами для снижения на выбросы вредных веществ с отработавшими газами сопоставимы.

Основой для приготовления катализатора может служить пористый носитель АПК, который представляет собой $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с зерном. Это механически прочный и термически стойкий контакт. Может быть использован и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, который характеризуется высокой удельной поверхностью (около $100 \text{ м}^2/\text{г}$) и мелкими порами (средний размер 15 нм) [9]. Оптимальный носитель должен обладать высокой механической прочностью, термической и химической устойчивостью в условиях реакции. Пористая структура носителя должна обеспечивать возможность нанесения активного компонента в минимально достаточном количестве.

Заключение

Рассмотренные особенности внутрицилиндрового экологического каталитического катализа ДВС, результаты проведенных исследований, в том числе и в НТУ «ХПИ», позволяют предложить следующую последовательность разработки технических решений и проведения исследований каталитических процессов в цилиндре двигателя:

- создание высокоэффективных каталитических покрытий на основе переходных металлов и изучение их свойств в условиях камеры сгорания ДВС;
- моделирование и исследование физических, химических и каталитических процессов в камере сгорания ДВС;
- разработка технологии получения прочного и термически стойкого пористого носителя покрытия;
- изготовление опытного образца двигателя с разработанным каталитическим покрытием и носителем;
- проведение комплекса исследований ДВС для оценки эффективности применения разработанных технологий с определением концентраций токсичных выбросов в отработавших газах;
- оценка стабильности каталитических процессов при длительной работе двигателя;
- разработка промышленной технологии внутрицилиндрового экологического катализа.

Список литературы:

1. Рыкова И.В. Пути экологизации рабочего цикла ДВС / Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2013. – №31. – с.111-115.
2. Сибриков Д. А. Снижение теплонпряженности поршневых групп судовых дизелей: автореф. дис. науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)» / Д. А. Сибриков. Новосибирск. – 2004. – 20с.
3. Ponnusamy P. Experimental Investigation on Performance, Emission and Combustion Analysis of a Four Stroke SI Engine with Various Catalytic Coatings / P. Ponnusamy, R. Subramanian, N. Nedunchezian // European Journal of Scientific Research. – 2011. – Vol.63 No.2. – P.182-191.
4. Попова Н.М. Катализаторы очистки газовых выбросов промышленных производств / Н.М. Попова. – М.: Химия, 1991. – 176 с.
5. Cerniviz M. Salman M.S. Ceramic Coating Applications and Research Fields for Internal Combustion Engines // Ceramic Coatings – Applications in Engineering [Electronic resource] – p. 195-234. – Mode of access: <http://www.intechopen.com/download/pdf/29756>.
6. Власенко В.М. Экологический катализ / В.М. Власенко. – К.: Наукова думка, 2010. – 238 с.
7. Шпаковский В.В. Научно-технические основы улучшения показателей ДВС применением поршней с корундовым слоем: дис. ... доктора техн. наук : 05.05.03 / Шпаковский Владимир Васильевич. – Х., 2009.
8. Парсаданов И.В. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания – 2009. – №2 – С. 97-100.
9. Власенко В.М. Влияние модифицированного носителя γ -оксидом алюминия на свойства палладиевого катализатора / В.М. Власенко, В.А. Кузнецов, И.А. Мальчевский. – Доклады Ан УССР. Сер. Б. – 1988. – №3. – с.4–43.
10. Ведь М.В. Каталитическая активность покрытий на основе переходных металлов / М.В. Ведь, Н.Д. Сахненко, М.А. Глушкова, М.Б. Майба, А.В. Дементий А.В. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. –

№3.– С.38-43. 11. Глушкова М.А. Формирование на основе переходных металлов для екотехнологий / М.А.Глушкова, Майба М.В., Ведь М.В., Сахненко Н.Д., Зюбанова С.И. // Интегровани технології промисловості. – 2012. – №3. – С. 104-106.

Bibliography (transliterated):

1. Rykova I.V. Puti jekologizacii rabocheho cikla DVS / Vesnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI».– 2013.– №31.– s.111-115. 2. Sibrikov D. A. Snizhenie teplonaprjazhennosti porshnevnyh grupp sudovyh dizelej: avtoref. dis. nauch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.08.05 «Sudovye jenergetičeskie ustanovki i ih jelementy (glavnye i vspomogatel'nye)» / D. A. Sibrikov. Novosibirsk. – 2004. – 20s. 3. Ponnusamy P. Experimental Investigation on Performance, Emission and Combustion Analysis of a Four Stroke SI Engine with Various Catalytic Coatings / P. Ponnusamy, R. Subramanian, N. Nedunchezian // European Journal of Scientific Research. – 2011. – Vol.63 No.2. – R.182-191. 4. Popova N.M. Katalizatory očištiki gazovyh vybrosov promyšlennyh proizvodstv / N.M. Popova. – M.: Himija, 1991. – 176 s. 5. Ciniviz M. Salman M.S. Ceramic Coating Applications and Research Fields for Internal

Combustion Engines // Ceramic Coatings – Applications in Engineering [Electronic resource] – p. 195-234. – Mode of access: <http://www.intechopen.com/download/pdf/29756>. 6. Vlasenko V.M. Jekologičeskij kataliz / V.M. Vlasenko. – K.: Naukova dumka, 2010. – 238 s. 7. Shpakovskij V.V. Nauchno-tehničeskie osnovy uluchšhenija pokazatelej DVS primeneniem poršnej s korundovym sloem: dis. ... doktora tehn. nauk : 05.05.03 / Shpakovskij Vladimir Vasil'evič. – H., 2009. 8. Parsadanov I.V. Ocenka vlijanija gal'vanoplazmennogo pokrytija poršnja avtotraktornogo dizelja na vybrosy tverdyh chastic s otrabotavšimi gazami / I.V. Parsadanov, A.P. Polivjančuk // Dvigateli vnutrennego sgoranija – 2009. – №2 – S. 97-100. 9. Vlasenko V.M. Vlijanie modifirovannogo nositelja γ-oksidad aljuminija na svoystva palladijovogo katalizatora / V.M. Vlasenko, V.A. Kuznecov, I.A. Mal'čevskij.– Doklady An USSR. Ser. B.– 1988.– №3.– s.4–43. 10. Ved' M.V. Katalitičeskaja aktivnost' pokrytij na osnove perehodnyh metallov / M.V. Ved', N.D. Sahnenko, M.A. Glushkova, M.B. Majba, A.V. Dementij A.V. // Jenergo-tehnologii i resursobereženie. – 2012. – №3.– S.38-43. 11. Glushkova M.A. Formirovanie na osnove perehodnyh metallov dlja ekotehnologii / M.A.Glushkova, Majba M.V., Ved' M.V., Sahnenko N.D., Zjubanova S.I. // Integrovani tehnologii promislivosti. – 2012. – №3. – S. 104-106.

Поступила в редакцію 08.07.2013

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.

Рыкова Инна Витальевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», rykova@kpi.kharkov.ua.

Маклаков Александр Николаевич – студент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ ВНУТРИЦИЛІНДРОВОГО ЕКОЛОГІЧНОГО КАТАЛІЗА В ДВЗ

I.V. Parsadanov, I.V. Rykova, A.M. Maklakov

Проаналізовано результати проведених робіт, запропонована послідовність проведення досліджень каталітичних процесів у циліндрі двигуна і розробки технічних рішень із застосуванням нетрадиційних матеріалів та перспективних технологій для реалізації внутрішньо циліндрового екологічного каталізу.

THE FEATURES OF IN-CYLINDER ECOLOGICAL CATALYSIS IN ICE

I.V. Parsadanov, I.V. Rykova, A.N. Maklakov

As the results of this work, it was proposed the sequence of studies of catalytic processes in the engine cylinder and the developed the technical solutions using non-traditional materials and perspective technologies for the realization of ecological in-cylinder catalysis.

А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, Н.М. Карасиченко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАКЕТА ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ С НАСЫПКОЙ ИЗ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА. ЧАСТЬ 1

В данной работе проведены экспериментальные исследования макетированного действующего образца фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля на моторном испытательном стенде. В результате испытаний фильтрующего элемента, который содержит насыпку из природного цеолита, получены его расходная характеристика и степень очистки им отработавших газов дизеля от твердых частиц. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований на безмоторной исследовательской установке. Выявлены факторы, влияющие на степень очистки фильтром отработавших газов дизеля от твердых частиц. Для выявления степени влияния факторов на этот параметр работы фильтра требуется модернизация моторного стенда и повторные экспериментальные исследования.

Постановка проблемы

Создание эффективного, технологичного и надежного фильтра твердых частиц (ФТЧ) отработавших газов (ОГ) дизелей является актуальной задачей, стоящей перед специалистами в области ДВС. Экспериментальное исследование характеристик работы ФТЧ новой конструкции в реальных условиях эксплуатации позволяет более точно осуществлять математическое и физическое моделирование процессов в фильтрах путем использования полученных характеристик для идентификации математических моделей.

Анализ литературных источников

В предыдущих исследованиях [1-3] авторами предложен ФТЧ новой конструкции, использующий для очистки ОГ дизеля методы фильтрации, адсорбции ТЧ из специальным образом организованного потока ОГ. В соответствии с принципом его работы был разработан и изготовлен действующий макетированный образец фильтрующего элемента (ФЭ) – действующий макет ФЭ с пустыми сетчатыми кассетами (ДМ ФЭ). Он состоял из четырех модулей и двух уплотнительных шторок. Каждый модуль ДМ ФЭ содержал в своих полостях четыре кассеты из стальной нержавеющей тканой сетки, отделенные друг от друга перегородками из стального листового проката. Полости сообщались между собой посредством соединительной пластины с отверстиями овальной формы. Крайние полости модуля сообщались с входной и выходной областями корпуса ФТЧ в шахматном порядке. Эскизы ДМ ФЭ и его модуля, схема, описание работы и перечень средств измерительной техники МИС, а также программа и методика исследований приведены в [3]. Экспериментальное исследование рабочих характеристик ДМ ФЭ на моторном испытательном стенде (МИС) проведено с дизелем 2С10,5/12 (Д21А1). Для проведения исследований МИС модернизирован, при этом изменения косну-

лись системы отбора проб ОГ дизеля на токсичность, схема которой описана в [3]. В ходе исследования ДМ ФЭ помещался в специально разработанную для него и изготовленную макетоудерживающую вставку, установленную по длине выпускного тракта МИС сразу за выпускным коллектором дизеля. Также выполнено расчетное исследование рабочих характеристик ДМ ФЭ, результаты которого хорошо согласуются с экспериментально полученными данными [4]. Степень очистки ДМ ФЭ на режиме максимального крутящего момента дизеля 2С10,5/12 (характеризующегося наибольшим выбросом ТЧ) составила 20 %. Очевидно, что степень очистки ДМ ФЭ ОГ дизеля от ТЧ недостаточна велика.

С целью повышения степени очистки ОГ дизеля от ТЧ в конструкцию ДМ ФЭ введен новый элемент – насыпка кассет из стальной нержавеющей тканой сетки природным среднедисперсным цеолитом (НСЦ), который представляет собой природный туф недорогой жаростойкий сорбент, добываемый на территории Украины. В связи с этим был разработан и изготовлен действующий макет ФЭ с сетчатыми кассетами, заполненными НСЦ на 100 % по объему (ДМЦ ФЭ), со средним диаметром частиц используемой фракции – 3 мм [3]. Природный цеолит в 4-5 раз дешевле синтетического. Основные свойства природного цеолита:

- плотность 1900 – 2600 кг/м³ (в зависимости от химического состава);
- насыпная плотность 620 – 1200 кг/м³ (в зависимости от размера фракции);
- удельная теплоемкость ~ 1 кДж/(кг·град);
- пористость около 50 % (диаметр каналов 0,27 нм);
- способен адсорбировать до 0,2 см³ паров воды на 1 см³ собственного объема.

Цель и постановка задачи исследования

Цель данного исследования – повышение эффективности очистки ОГ дизеля от ТЧ фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля за счет использования в его конструкции цеолита.

Объект данного исследования – ДМЦ ФЭ.

Задачи данного исследования:

- 1) разработка и изготовление объекта исследования;
- 2) модернизация системы отбора проб ОГ МИС;
- 3) экспериментальное исследование характеристик работы объекта исследования в реальных условиях эксплуатации;
- 4) разработка рекомендаций по использованию результатов исследования на практике.

Описание объекта исследования

Разработанный ДМЦ ФЭ содержит 20 модулей, геометрически подобных модулям ДМ ФЭ, а также

две уплотняющие шторки. Однако, модуль ДМЦ отличается от модуля ДМ ФЭ отсутствием соединительной пластины (сетчатые кассеты, наполненные цеолитовой насыпкой, соприкасаются непосредственно между собой) и свободным размещением перегородок между кассетами. Данные конструктивные изменения внесены в конструкцию модуля с целью улучшения его гидравлических характеристик, а также для повышения технологичности его изготовления. Эскизы ДМЦ ФЭ и его модуля представлены на рисунке 1, а его внешний вид – на рисунке 2. Он устанавливается в то же место выпускного тракта МИС, что и ДМ ФЭ – в макетодерживающую вставку. Программа и методика экспериментального исследования параметров ДМЦ ФЭ аналогичны таковым для ДМ ФЭ [3].

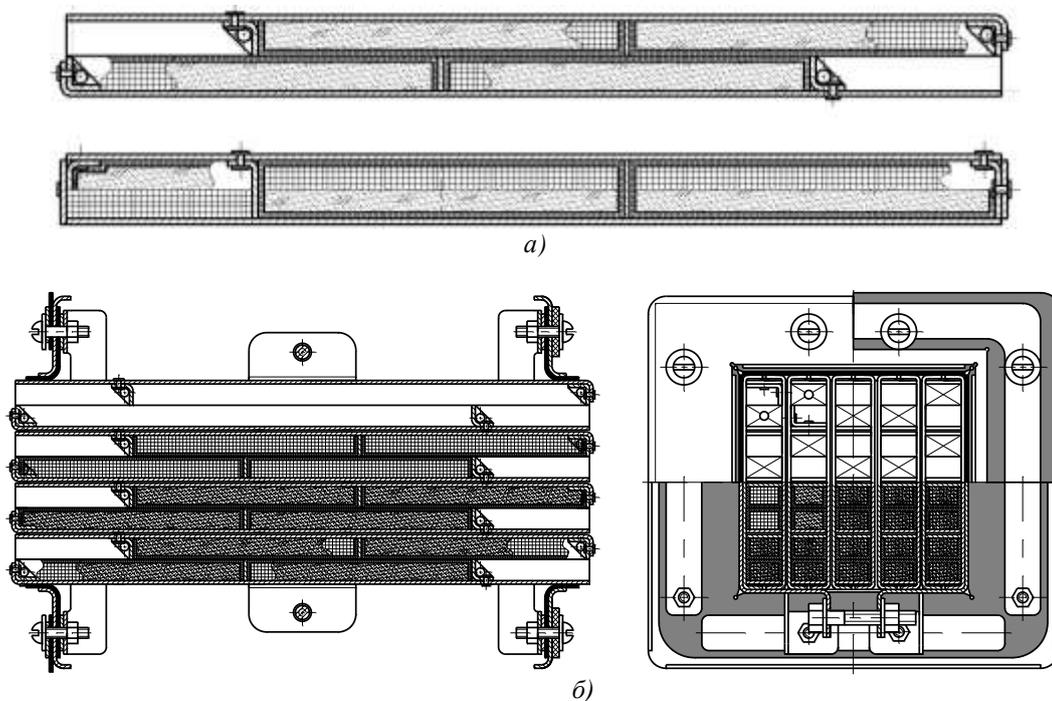


Рис. 1. Эскиз ДМЦ ФЭ и его модуля:
а – эскиз модуля ДМЦ ФЭ; б – эскиз ДМЦ ФЭ

Результаты испытаний

В ходе испытаний были получены расходная характеристика ДМЦ ФЭ (зависимость гидравлического сопротивления объекта исследования от удельного массового расхода ОГ через модуль макета, при работе дизеля 2Ч10,5/12 на режимах внешней скоростной характеристики), а также зависимость перепада температур ОГ на объекте исследования для тех же режимов работы дизеля. Эти зависимости для ДМ и ДМЦ ФЭ представлены на рисунке 3. На рисунке 3 также представлены ре-

зультаты определения гидравлических характеристик прозрачного макета модуля (ПММ) ФЭ, полученные на безмоторной исследовательской установке (БИУ), описанной в [5, 6]. Как можно видеть на рисунке 3, результаты испытаний действующих макетов на МИС хорошо согласуются с результатами испытаний на БИУ. Состояние поверхностей ДМЦ ФЭ и гранул природного цеолита проиллюстрировано на рисунке 4.

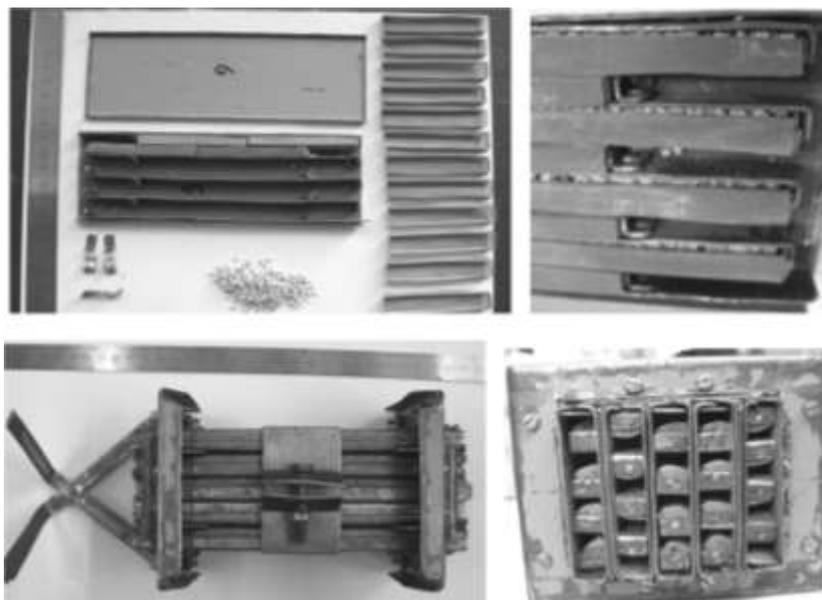


Рис. 2. Устройство и внешний вид ДМЦ ФЭ

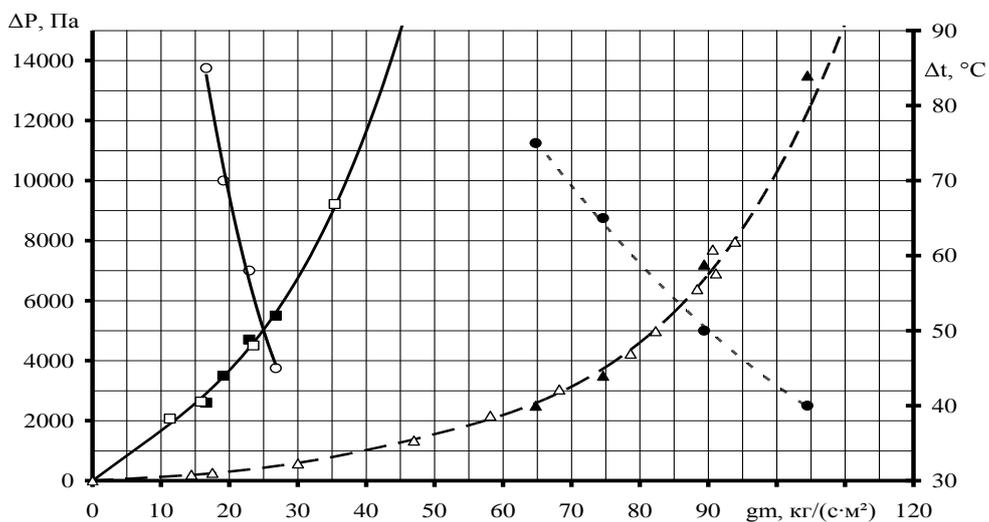


Рис. 3. Результаты испытаний:
 данные, полученные для ДМ ФЭ: ▲ – ΔP ДМ ФЭ; △ – ΔP ПММ ФЭ; ● – Δt ДМ ФЭ;
 данные, полученные для ДМЦ ФЭ: ■ – ΔP ДМЦ ФЭ; □ – ΔP ПММ ФЭ; ○ – Δt ДМЦ ФЭ



Рис. 4. ДМЦ ФЭ и насыпной цеолит после моторных испытаний

Максимальное значение степени очистки ОГ дизеля от ТЧ ДМЦ ФЭ (30 %), полученное на режиме максимального крутящего момента дизеля 2Ч10,5/12, мало отличается от значения, полученного экспериментально для ДМ ФЭ с пустыми сетчатыми кассетами (20 %) на том же режиме работы дизеля. Данный факт не свидетельствует о неэффективности использования цеолита в конструкции ФЭ, а лишь о том, что на результаты исследования оказали влияние следующие факторы:

- место установки макетодерживающей вставки в составе выпускной системы моторного стенда характеризуется большими значениями температуры и скорости потока ОГ, проходящего сквозь ФЭ. Процессы конденсации продуктов неполного сгорания топлива и коагуляции ТЧ в таких условиях далеки от своего завершения, что проявляется в значении размеров ТЧ – около 0,005 мкм при 600 °С [7], в то время как в сечении выпускного тракта на входе в глушитель шума ОГ моторного стенда температура ОГ равна 350 – 400 °С, при которой ТЧ имеют размеры около 0,1 мкм, а при 200 °С и ниже превышают 3 – 5 мкм [7];

- в эксперименте использовался действующий макет с 20 модулями, в то время как для дизеля 2Ч10,5/12 было определено оптимальное количество модулей в ФЭ равное 50, что обеспечивает большую степень расширения потока ОГ при входе его в ФТЧ. Увеличение количества модулей, т.е. суммарного проходного сечения, способствует существенному снижению скорости потока ОГ в ФЭ;

- для повышения насыпной плотности цеолита целесообразно применять брикетирование. Без брикетирования частицы цеолита имеют свободу перемещения, подхватываются потоком ОГ и склонны к утруске, механическому истиранию о сетчатую кассету и соседние частицы, что увеличивает проскок ОГ в ФЭ (т.е. прохождение ОГ через ФЭ без очистки);

- цеолит имеет низкую температуру плавления (900 °С) [3] и использование его в потоке ОГ с температурой, близкой к этому значению, отрицательно сказывается на механических свойствах частиц цеолита. И тем более в процессе регенерации ФЭ при выгорании ТЧ, адсорбированных на поверхностях частиц цеолита.

Таким образом, ФТЧ с цеолитом для повышения его эффективности необходимо располагать вертикально и максимально удаленным по тракту от выпускного коллектора двигателя, возможно, с использованием обдува места установки объекта исследования.

Выводы

В данной части исследования было выполнено экспериментальное исследование рабочих характеристик макетированного действующего образца ФЭ разработанного ФТЧ, содержащего в своей конструкции насыпку сетчатых кассет природным цеолитом.

В результате исследования получены расходная характеристика макетированного действующего образца ФЭ и зависимость перепада температур ОГ на образце от удельного массового расхода ОГ через объект исследования для режимов работы дизеля 2Ч10,5/12 внешней скоростной характеристики.

Степень очистки ОГ дизеля от ТЧ макетированным образцом достигает максимального значения на режиме максимального крутящего момента дизеля 2Ч10,5/12 30 %, что на 10 % больше, чем для макетированного действующего образца без цеолитовой насыпки сетчатых кассет. Такой уровень степени очистки фильтра является неудовлетворительным. Выдвинуты гипотезы о факторах, повлиявших на результаты исследования.

Для экспериментальной проверки степени влияния факторов, которые, предположительно, влияют на степень очистки ОГ дизеля от ТЧ фильтром, требуется повторная модернизация моторного испытательного стенда.

Список литературы:

1. Кондратенко А. Н. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 1: модернизация конструкции фильтра и дополнение базы данных по свойствам пористого тела / А. Н. Кондратенко, А. П. Строков, А. Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1. – С. 82-88.
2. Кондратенко А. Н. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 2: дополнение баз данных по свойствам материалов фильтра и рабочего тела, определение значений краевых условий / А. Н. Кондратенко, А. П. Строков, В. М. Семикин // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 87-92.
3. Кондратенко А. Н. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 3: вопросы использования цеолита в конструкции фильтрующего элемента / А. Н. Кондратенко // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический сборник: Автомобиле- и тракторостроение. Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №60(966) – С. 83-89.
4. Кондратенко О. М. Modellierung der Wärme- und Stoffaustauschprozesse im Filter der festen Partikel des Diesels. Teil 4: Berechnung der Arbeitscharakteristiken des Filters / О. М. Кондратенко, О. П. Строков // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 5 (979). – С. 100–109.
5. Кондратенко О. М. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстрого дизеля /

О.П. Строков, О.М. Кондратенко // *Автомобільний транспорт: збірник наукових праць*. – 2011. Вип. 29. – С. 144–147. 6. Кондратенко О.М. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний збірник: Транспортне машинобудування*. Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – №19 – С. 121–128. 7. Александров А.А. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров, И.А. Ирхаров, В.В. Багров и др. Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. – М.: ООО НИЦ "Инженер", ООО "Онико-М", 2012. 791 с.

Bibliography (transliterated):

1. Kondratenko A. N. Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 1: modernizacija konstrukcii fil'tra i dopolnenie bazy dannyh po svoystvam poristogo tela / A. N. Kondratenko, A. P. Strokov, A. N. Avramenko // *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. – 2012. – № 1. – S. 82-88 . 2. Kondratenko A. N. Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 2: dopolnenie baz dannyh po svoystvam materialov fil'tra i rabocheho tela, opredelenie znachenij kraevykh uslovij / A. N. Kondratenko, A. P. Strokov, V. M.

Semikin // *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. – 2012. – № 2. – S. 87-92 . 3. Kondratenko A. N. Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 3: voprosy ispol'zovanija ceolita v konstrukcii fil'trujushhego jelementa / A.N. Kondratenko // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta "HPI". Sbornik nauchnyh trudov. Tematičeskij sbornik: Avtomobile- i traktorostroenie*. Har'kov: NTU "HPI". – 2012. – №60(966) – S. 83-89. 4. Kondratenko O.M. Modeljuvanja teplo- ta masoobminih procesiv u fil'tri tverdyh chastinok dizelja. Chastina 4: rozrahunkove doslidzhennja robochih charakteristik fil'tra / O.M. Kondratenko, O.P. Strokov // *Visnik NTU "HPI". Serija: Matematične modeljuvanja v tehniči ta tehnologijah*. – H.: NTU "HPI", 2013. – № 5 (979). – S. 100–109. 5. Kondratenko O.M. Jekspiermental'noe opredelenie gidravličeskogo soprotivlenija maketa modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dizelja / O.P. Strokov, O.M. Kondratenko // *Avtomobil'nij transport: zbirnik naukovih prac'*. – 2011. Vyp. 29. – S. 144–147. 6. Kondratenko O.M. Jekspiermental'noe opredelenie gidravličeskogo soprotivlenija maketa modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dizelja. Chast' 2 / O.P. Strokov, O.M. Kondratenko // *Visnik Nacional'nogo tehničeskogo universitetu "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij zbirnik: Transportne mashinobuduvanja*. Harkiv: NTU "HPI". – 2012. – №19 – S. 121–128. 7. Aleksandrov A.A. Al'ternativnye topliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoranija / A.A. Aleksandrov, I.A. Irharov, V.V. Bagrov i dr. Pod red. A.A. Aleksandrova, V.A. Markova. – M.: ООО NIC "Inzhener", ООО "Oniko-M", 2012. 791 s.

Поступила в редакцию 31.05.2013

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.

Карасиченко Николай Михайлович – инженер 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 І

О. М. Кондратенко, О. П. Строков, М. М. Карасиченко

У даній роботі проведені експериментальні дослідження макетованого діючого зразка фільтруючого елемента фільтра твердих частинок дизеля на моторному випробувальному стенді. У результаті випробувань об'єкта дослідження, який містить у своїй конструкції насипку з природного цеоліту, отримані його витратна характеристика і ступінь очищення їм відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок. Отримані дані добре узгоджуються з результатами досліджень на безмоторній дослідницькій установці. Виявлено фактори, що впливають на ступінь очищення фільтром відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок. Для виявлення ступеня впливу цих факторів на цей параметр роботи фільтра потрібні модернізація моторного стенду і повторні експериментальні дослідження

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE WORKING LAYOUT OF FILTER ELEMENT OF DIESEL PARTICLE FILTER WITH BULK NATURAL ZEOLITE. PART I

A. N. Kondratenko, A. P. Strokov, N. M. Karasichenko

Present paper describes the experimental studies breadboard operating sample of the filter element of particulate filter on the engine test bench. As a result of testing of the research object, which contains in its structure bulk natural zeolite, obtained his degree of flow characteristic and purification of diesel's exhaust gases from particulate matter. Obtained data are in good agreement with the results of studies on engineless test-bench research facility. The factors affecting the degree of exhaust gases purification by the filter from diesel particulates are detected. To determine the degree of influence of these factors on the parameter of the filter requires the upgrading of the engine test bench and repeat the experimental study.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

Исследована результирующая погрешность измерений одного из основных экологических показателей дизеля – среднеэксплуатационного выброса твердых частиц с отработавшими газами (δPT). Создана математическая модель данной погрешности. Предложены мероприятия по ее уменьшению. На основе результатов испытаний автотракторного дизеля 4ЧН12/14 оценены инструментальная и методические составляющие погрешности δPT , эффективность предложенных мероприятий.

Введение

С началом действия норм EURO (1993г.) в число основных экологических показателей дизеля введен среднеэксплуатационный выброс твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ). Данная величина имеет обозначение PT (от «particles» - частицы) и размерность – г/кВт·ч [1]. В виду высокой токсичности ТЧ (показатель относительной агрессивности данного вещества по сравнению с окисью углерода равен 200 [2]) нормы на показатель PT в период 1993-2005 гг. уменьшились в 18 раз (с 0,36 до 0,02 г/кВт·ч) [3]. Это привело к возрастанию результирующей погрешности измерений величины PT – δPT : при испытаниях в одной лаборатории – с $\pm 3\%$ до $\pm 12\%$, при межлабораторных исследованиях – с $\pm 12\%$ до $\pm 50\%$ [4]. Как показывают результаты исследований зарубежных [5-7] и отечественных [8,9] авторов погрешность δPT включает в себя как инструментальную составляющую, обусловленную погрешностями измерительного оборудования, так и методические составляющие, обусловленные влиянием условий проведения испытаний дизеля на измеряемую среднюю величину выброса ТЧ. Учет методических составляющих погрешности δPT при проведении испытаний позволяет повысить точность измерений показателя PT .

Постановка задачи

Цель исследований – дать оценку результирующей погрешности измерений средней за цикл испытаний величины выброса ТЧ с ОГ дизеля с учетом значимости отдельных составляющих и предложить мероприятия по ее снижению. Для этого решены следующие задачи: 1) изучение стандартной процедуры измерений показателя PT ; 2) разработка математической модели результирующей погрешности δPT ; 3) предложение мероприятий по повышению точности измерений величины PT ; 4) создание методики оценки погрешности δPT и значимости ее составляющих; 5) оценка погрешности δPT и эффективности мероприятий по ее снижению.

Определение среднеэксплуатационного выброса ТЧ с ОГ автомобильного дизеля

Показатель PT автомобильного дизеля определяется в соответствии с требованиями Правил R-49 [1] в ходе выполнения Европейского стационарного цикла ESC (European Stationary Cycle), который состоит из 13-ти режимов с установленными значениями частоты вращения коленчатого вала, нагрузки, весового фактора (учитывает относительное время работы дизеля на режиме в процессе эксплуатации) и продолжительности испытаний.

На каждом режиме цикла производится отбор проб ТЧ из ОГ дизеля, предварительно разбавленных в специальном трубопроводе – туннеле чистым воздухом, имеющим температуру $t_{dil} = 25 \pm 5$ °С. Температура разбавленных ОГ перед фильтром для отбора ТЧ (используется один фильтр в течение всего цикла) не должна превышать 52 °С, но должна быть большей 42 °С.

По результатам испытаний производится расчет показателя PT :

$$PT = \frac{PT_{mass}}{\bar{P}} = \frac{PT_{mass}}{\sum_{i=1}^{13} (P_i \cdot WF_i)}, \text{ г/кВт·ч}, \quad (1)$$

где PT_{mass} , \bar{P} – средние за цикл: массовый выброс ТЧ и эффективная мощность дизеля, P_i , WF_i – эффективная мощность и весовой фактор i -го режима.

$$PT_{mass} = \frac{m_f}{m_{sam}} \cdot \frac{\overline{G_{edf}}}{1000}, \text{ г/ч}, \quad (2)$$

где m_f – масса ТЧ, собранная на фильтре за цикл, мг; m_{sam} – масса пробы разбавленных ОГ, прошедшая через фильтр за цикл (при условии пропорциональности количества отобранной пробы на каждом режиме соответствующему весовому коэффициенту), кг; $\overline{G_{edf}}$ – средний эквивалентный массовый расход разбавленных ОГ:

$$\overline{G_{edf}} = q_i \cdot G_{exhi}, \text{ кг/ч}, \quad (3)$$

где q_i – коэффициент разбавления ОГ на i -м режиме - отношение массовых расходов разбавленных и неразбавленных ОГ в туннеле; G_{exhi} – массовый расход ОГ дизеля на i -м режиме, кг/ч.

При определении m_f фильтр с ТЧ стабилизируют в специальной камере или комнате при постоянных температуре - t_{st} и относительной влажности - φ_{st} воздуха (могут находиться в диапазонах: $t_{st} = 22 \pm 3^\circ \text{C}$, $\varphi_{st} = 45 \pm 10\%$) в течение промежутка времени $\tau_{st} = 1 \dots 80$ ч.

В туннеле могут поддерживаться различные режимы разбавления (dilution mode) ОГ: **D1** - CVS-режим (от «Constant Volume Sampling») с постоянным массовым расходом разбавленных ОГ в туннеле; **D2** - CVS-режим с воздушным охлаждением туннеля, за счет которого температура перед фильтром - t_f может быть снижена на величину $\Delta t_{f(52)} = 0 \dots 20^\circ \text{C}$; **D3** - режим с постоянным коэффициентом q ; **D4** - режим с постоянным коэффициентом q и воздушным охлаждением туннеля, при котором на фильтре отбирается максимальное количество ТЧ.

Математическая модель результирующей погрешности δPT

На основе анализа результатов исследований фирм Mitsubishi [5] и AVL [6], а также результатов собственных исследований [8,9], предложена математическая модель оценки погрешности δPT , в которой данная величина рассматривается в виде суммы 3-х составляющих:

$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_{tf} + \delta PT_{st}, \quad (4)$$

где δPT_{in} – инструментальная погрешность, обусловленная неточностями измерения величин, с помощью которых вычисляется показатель РТ; δPT_{tf} – методическая погрешность, обусловленная влиянием температуры пробы перед фильтром для отбора ТЧ на результат измерений РТ; δPT_{st} – методическая погрешность, обусловленная влиянием на результат измерений показателя РТ параметров процесса стабилизации рабочего фильтра перед его взвешиванием: температуры воздуха – t_{st} и продолжительности выдержки фильтра – τ_{st} .

Величина δPT_{in} определяется с помощью зависимости для вычисления погрешности результата косвенных измерений:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (5)$$

где y – величина, измеряемая косвенным путем по известной зависимости - $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$; x_i – величины, с помощью которых определяется y , m – их количество.

Погрешность δPT_{tf} численно равна величине $\delta m_{f_i}^{tf}$ – относительному отклонению массы навески ТЧ - $m_{f_i}^{tf}$, измеренной при фактических значениях температур t_{fi} , от массы навески ТЧ - $m_{f_i}^{st0}$, измеренной при значениях температур t_{fi} , принимаемых за

базовые и соответствующих CVS-разбавлению ОГ при $t_{dil} = 20^\circ \text{C}$, $t_{f(max)} = 52^\circ \text{C}$:

$$\delta PT_{tf} = \delta m_{f_i}^{tf} = \frac{m_{f_i}^{tf} - m_{f_i}^{st0}}{m_{f_i}^{st0}} \cdot 100\% = \sum_{i=1}^{13} \delta m_{f_i}^{tf}, \quad (6)$$

где $\delta m_{f_i}^{tf}$ – относительные отклонения массы навески ТЧ на i -м режиме испытаний:

$$\delta m_{f_i}^{tf} = \frac{m_{f_i}^{tf} - m_{f_i}^{st0}}{m_{f_i}^{st0}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Погрешность δPT_{st} численно равна величине $\delta m_{f_i}^{st}$ – относительному отклонению массы навески ТЧ - $m_{f_i}^{st}$, измеренной при фактических значениях величин t_{st} и τ_{st} , от массы навески ТЧ - $m_{f_i}^{st0}$, измеренной при значениях $t_{st0} = 20^\circ \text{C}$ и $\tau_{st0} = 6$ ч, принимаемых за базовые:

$$\delta PT_{st} = \delta m_{f_i}^{st} = \frac{m_{f_i}^{st} - m_{f_i}^{st0}}{m_{f_i}^{st0}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Для вычисления величин $\delta m_{f_i}^{tf}$ и $\delta m_{f_i}^{st}$ используются экспериментальные зависимости [9]:

$$\delta m_{f_i}^{tf} = -(1,20 + 0,148 \cdot \bar{n}_i - 0,552 \cdot \bar{L}_i) \cdot \Delta t_{fi}, \%, \quad (9)$$

где \bar{n}_i , \bar{L}_i – относительные число оборотов и нагрузка на вал двигателя на i -м режиме; $\Delta t_{fi} = t_{fi} - t_{f0i}$ – разности температур.

$$\delta m_{f_i}^{st} = \frac{-5,72 \cdot (1 + 0,071 \cdot (t_{st} - t_{st0}))}{1,508 - 0,003 \cdot (t_{st} - t_{st0})} \cdot \lg \left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}} \right), \%. \quad (10)$$

Величины \bar{n}_i , \bar{L}_i , входящие в выражение (10), вычисляются по формулам:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad \bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}}, \quad (11)$$

где n_{idle} и n_{nom} – число оборотов вала двигателя на холостом ходу и режиме номинальной мощности; $M_{k(max)i}$ – максимальный крутящий момент на валу двигателя при n_i .

Методика исследований погрешности δPT с учетом рекомендаций по ее уменьшению

На основе анализа причин возникновения погрешностей δPT_{tf} и δPT_{st} даны следующие рекомендации по их снижению и повышению за счет этого точности измерений показателя РТ:

а) сокращение в 5 раз допустимых диапазонов варьирования температуры разбавляющего воздуха и максимальной температуры пробы перед фильтром - до интервалов: $t_{dil} = 20..22^\circ \text{C}$, $t_{f(max)} = 50..52^\circ \text{C}$; это позволяет сократить интервалы варьирования температур t_{fi} ;

б) использование в туннеле режима разбавления ОГ D4 с температурным регулированием – D4*, позволяющим поддерживать значения температур t_{fi} такими же, как при режиме CVS (т.е. t_{foi}); это позволяет собрать на фильтре максимальную массу навески ТЧ и уменьшить отклонения δm_{fi}^{tf} (см. формулу (9));

в) сокращение диапазонов варьирования параметров процесса стабилизации рабочего фильтра до интервалов: $t_{st} = 20...22$ °С (сокращен в 3 раза), $\tau_{st} = 6...8$ ч (сокращен в 39,5 раза); это позволяет уменьшить погрешность δPT_{st} - при таких t_{st} и τ_{st} она не превышает $\pm 0,5\%$.

Оценка величины δPT и эффективности сделанных рекомендаций проводилась по алгоритму.

1. Выбор исходных данных для проведения исследований – результатов испытаний дизеля по циклу ESC с указанием всех параметров, влияющих на точность измерений показателя PT .

2. Определение для каждого режима разбавления ОГ инструментальной погрешности δPT_{in} путем последовательного вычисления с помощью выражения (6) погрешностей величин, которые рассчитываются по формулам (1) – (4).

3. Установление (с учетом режима разбавления ОГ) диапазонов варьирования методической погрешности δPT_{if} ; для этого с помощью выражений (7), (10) и метода планирования 2-х факторного эксперимента [10] определяются: а) для режимов разбавления D1 и D3 – зависимости $\delta PT_{if} = f(t_{dil}, t_{f(max)})$ с областью задания функции: $t_{dil} = 20...30$ °С, $t_{f(max)} = 42...52$ °С; б) для режимов разбавления D2 и D4 – зависимости $\delta PT_{if} = f(t_{dil}, \Delta t_{f(52)})$ с областью задания функции: $t_{dil} = 20...30$ °С, $\Delta t_{f(52)} = 0...20$ °С. Абсолютные отклонения величины δPT_{if} , вычисляемые с помощью полученных зависимостей, от значений, рассчитанных по формуле (7), не должны превышать $\pm 0,05\%$.

4. Определение с помощью зависимостей (9), (11) диапазона варьирования методической погрешности δPT_{st} в области допустимых значений величин t_{st} и τ_{st} .

5. Установление диапазона варьирования результирующей погрешности δPT (с помощью выражения (5)), а также значений ширины диапазонов варьирования данной погрешности – δPT^{sum} и ее составляющих – δPT_j^{sum} :

$$\delta PT^{sum} = \delta PT^+ - \delta PT^-; \delta PT_j^{sum} = \delta PT_j^+ - \delta PT_j^-$$

где индексы «+» и «-» соответствуют граничным значениям диапазонов варьирования соответствующих погрешностей в области положительных и отрицательных значений; j – индекс составляющей результирующей погрешности (in, tf или st).

6. Определение относительного вклада (в %) в результирующую погрешность δPT каждой ее составляющей – R_j :

$$R_j = \frac{\delta PT_j^{sum}}{\delta PT^{sum}} \cdot 100\%$$

7. Вычисление величины δPT и ее составляющих при выполнении сделанных рекомендаций.

Результаты исследований и их анализ

В качестве исходных данных для проведения исследований использованы результаты испытаний дизеля I412/14 по циклу ESC. В соответствии с изложенной методикой определены: диапазоны варьирования результирующей погрешности δPT и ее составляющих (табл. 1, рис. 1, 2); относительный вклад каждой составляющей в погрешность δPT ; оценена эффективность сделанных рекомендаций (рис. 3).

Таблица 1. Результаты определения инструментальной погрешности δPT_{in}

Выражение для вычисления погрешности	Значение погрешности, %			
	D1	D2	D3	D4
$\delta M_f = \Delta M_f / M_f$	4,1	2,8	3,4	2,4
$\delta M_{sam} = \delta M_{semi} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} WF_i^2}$	0,6	0,6	0,6	0,6
$\delta q_i = \sqrt{2} \cdot \delta G \cdot (q_i - 1)$	3,8	2,3	2,2	1,2
$\delta G_{edfi} = \sqrt{\delta q_i^2 + \delta G_{exhi}^2}$	4,6	3,6	3,3	2,8
$\delta \overline{G_{edf}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{Gedfi}^{(e)} \cdot \delta G_{edfi})^2}$	1,4	1,1	1,3	1,1
$\delta PT_{mass} = \sqrt{\delta M_f^2 + \delta M_{sam}^2 + (\delta \overline{G_{edf}})^2}$	4,4	3,1	3,7	2,7
$\delta P_i = \sqrt{\delta n^2 + \delta M_k^2}$	3,6	3,6	3,6	3,6
$\delta \overline{P} = \delta P_i \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{P_i})^2}$	1,2	1,2	1,2	1,2
$\delta PT = \sqrt{\delta PT_{mass}^2 + (\delta \overline{P})^2}$	4,5	3,3	3,9	3,0

Анализ полученных результатов показывает:

- составляющие результирующей погрешности измерений показателя PT варьируются в диапазонах: а) при допустимых Правилами R-49 условиях проведения испытаний - $\delta PT_{in} = \pm 2,6... \pm 4,5\%$, $\delta PT_{if} = -8,3...12,6\%$, $\delta PT_{st} = -6,7...4,5\%$; б) при рекомендуемых условиях проведения испытаний - $\delta PT_{in} = \pm 3\%$, $\delta PT_{if} = -0,5...1,2\%$, $\delta PT_{st} = -0,5...0\%$;

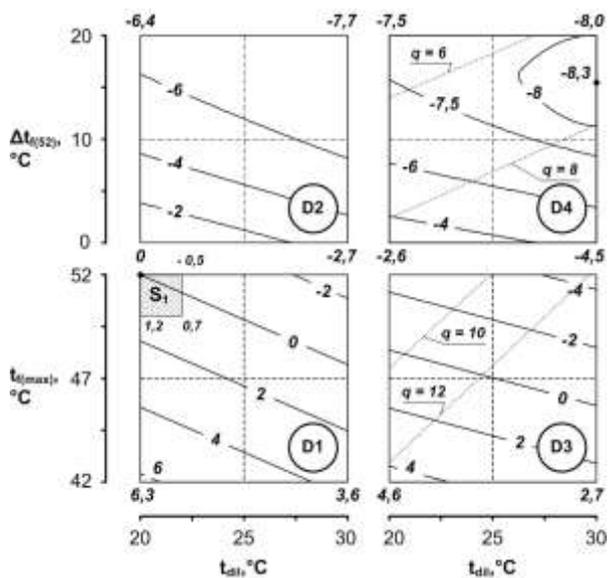


Рис. 1. Диапазоны варьирования погрешности δPT_f : S_1 – область рекомендуемых значений t_{dil} и $t_{f(max)}$

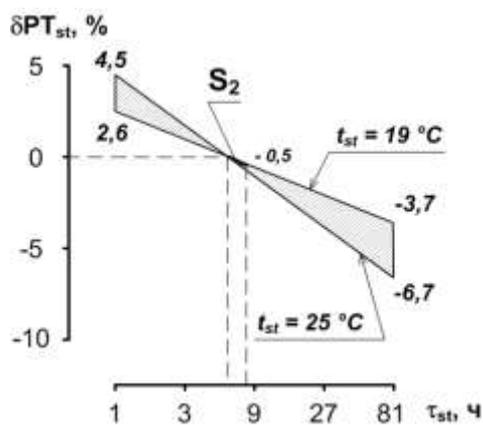


Рис. 2. Диапазон варьирования погрешности δPT_{st} : S_2 – область рекомендуемых значений τ_{st} и t_{st}

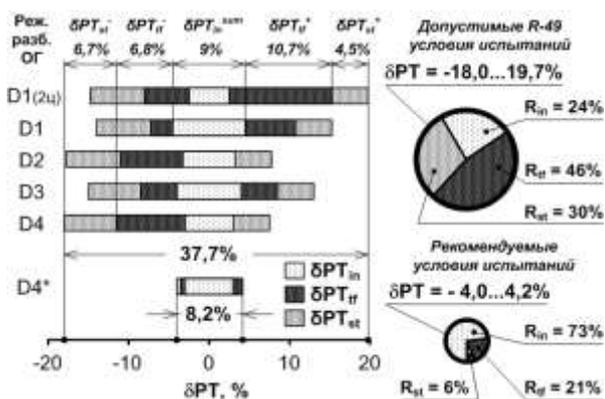


Рис. 3. Результаты исследований погрешности δPT

- при использовании допустимых режимов разбавления ОГ результирующая погрешность δPT варьируется в диапазоне $-18,0...19,7\%$, ширина данного диапазона составляет $37,7\%$; при этом наибольший вклад в δPT вносят методические составляющие – суммарно 76% ; вклад инструментальной составляющей – 24% ;

- повторное выполнение дополнительного цикла ESC при CVS-разбавлении ОГ в туннеле не позволяет повысить точность измерений показателя PT - не смотря на то, что инструментальная погрешность при этом снижается с $4,5\%$ до $2,6\%$, результирующая погрешность возрастает с $-13,9...15,3\%$ (разброс $29,2\%$) до $-14,7...19,7\%$ (разброс $34,7\%$) за счет увеличения методической погрешности δPT_f ;

- в результате выполнения предложенных рекомендаций результирующая погрешность δPT снижается до $-4,0...4,2\%$, ширина диапазона варьирования данной величины ($8,2\%$) уменьшается в $4,6$ раза; при этом вклад инструментальной составляющей в δPT возрастает до 73% , а суммарный вклад методических составляющих снижается до 27% .

Выводы

1. Оценена результирующая погрешность измерения среднеэксплуатационного выброса ТЧ с ОГ автомобильного дизеля (δPT) – она составляет $-18,0...19,7\%$ (т.е. расхождение результатов – $37,7\%$); при этом только 24% от данной величины приходится на инструментальную составляющую, а остальные 76% составляют методические составляющие.

2. Предложены мероприятия по повышению точности измерений показателя PT , которые позволяют уменьшить погрешность δPT до $-4,0...4,2\%$ (расхождение результатов $8,2\%$), т.е. в $4,6$ раза, при этом доля инструментальной составляющей данной величины возрастает до 73% , а суммарная доля методических составляющих уменьшается до 27% .

Список литературы:

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. - 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. – 602 p. 2. Быстров А.С. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский и др. – М.: «Экономика». - 1986. – 96 с. 3. Звонов В.А. Оценка и контроль выбро-

сов 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. 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. 5. Hirakouchi N. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji // SAE Technical Paper Series. - 1989. - № 890181. - 11p. 6. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sampling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p. 7. Johnson J. A Review of Diesel Particulates Control Technology and Emissions Effects / J. Johnson, S. Bagley, L. Gratz, D. Leddy // SAE Technical Paper Series. -1994. - № 940233. - 35 p. 8. Поливянчук А.П. Анализ влияния условий стабилизации рабочих фильтров на массу навески дизельных твердых частиц / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №1. – С. 88-91. 9. Поливянчук А.П. Оценка неопределенности результатов измерений выбросов твердых частиц в ходе экологических испытаний дизелей / А.П. Поливянчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2012. - №5(176), Ч. 2. – С. 121-128. 10. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента / Рафалес-Ламарка Э.Э. // Укр. проектно-констр. и научно-исслед. ин-т «УкрНИИУглеобогаше-ние». - 1969. – 126 с.

Bibliography (transliterated):

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate

pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. - 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 Mar 2011. – 602 p. 2. Bystrov A.S. Vremennaya tipovaya meto-dika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti osushhe-stvleniya prirodooxrannykh mero-priyatij i ocenki eko-nomicheskogo ushherba, prichinyaemogo narod-nomu hozyajst-vu zagryazneniem okruzhayushhej sredy / A.S. Bystrov, V.V. Varankin, M.A. Vilenskij i dr. // М.: «Экономика». - 1986. — 96 s. 3. Zvonov V.A. Ocenka i kontrol vybro-sov dispersnykh chastic s otrabotavshimi gazami dizelej / V.A. Zvonov, G.S. Kornilov, A.V. Kozlov, E.A. Simono-va. – М.: «Prima-Press-M», 2005. – 312 s. 4. 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, Switzer-land. - March 2001. – 45 r. 5. Hirakouchi N. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji // SAE Technical Paper Se-ries. - 1989. - № 890181. - 11p. 6. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sam-pling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p. 7. Johnson J. A Review of Diesel Particulates Control Technology and Emis-sions Effects / J. Johnson, S. Bagley, L. Gratz, D. Leddy // SAE Technical Paper Series. -1994. - № 940233. - 35 p. 8. Polivyanchuk A.P. Analiz vliyaniya uslovij stabilizacii rabochix filtrov na massu navecki dizelnyx tverdix chastic / A.P. Polivyanchuk // Dvigateli vnutrennego sgo-raniya, Xarkov. 2010. - №1. – S. 88-91. 9. Polivyanchuk A.P. Ocenka neopre-delennosti rezul'tatov izmerenij vybrosov tverdix chastic v xode ekologicheskix ispyta-nij dizelej / A.P. Polivyanchuk // Visnik SNU im. V. Da-lya. – 2012, - №5(176), Ch. 2. – S. 121-128. 10. Rafales-Lamarka E.E. Instrukciya por planirovaniyu eksperi-menta / Rafales-Lamarka E.E. // Ukr. proektno-konstr. i nauchno- issled. in-t «UkrNIUgleobogashhe-nie». - 1969. – 126 s.

Поступила в редакцию 25.06.2013

Поливянчук Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры экологии, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, uni@snu.edu.ua, (0642) 34-18-36.

Львов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, uni@snu.edu.ua, (0642) 34-18-36.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ГРАВИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

А.П. Поливянчук, С.О. Львов

Досліджено результуючу похибку вимірювань одного з основних екологічних показників дизеля – середньоексплуатаційного викиду твердих частинок з відпрацьованими газами (δРТ). Створено математичну модель даної похибки. Запропоновані заходи з її зменшення. На основі результатів випробувань автотракторного дизеля 4ЧН12/14 оцінено інструментальну та методичні складові похибки δРТ, ефективність запропонованих заходів.

INCREASING THE ACCURACY OF THE MEASUREMENT ЦЩЕР GRAVIMETRIC METHOD OF PARTICULATE METTER EMISSIONS IN THE DIESEL’S EXHAUST GAS

A.P. Polivianchuk, S.A. Lvov

The resulting error in measurement of one of the main environmental indicators for diesels – average emission of particulate matters in the exhaust gases (δPT) was investigated. The mathematical model of this error was created. Instrumental and methodological errors of δPT components was evaluated based on the results of tests of autotractor diesel 4ЧН12/14. The effectiveness of proposed measures was also evaluated.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

Исследована результирующая погрешность измерений одного из основных экологических показателей дизеля – среднеэксплуатационного выброса твердых частиц с отработавшими газами (δPT). Создана математическая модель данной погрешности. Предложены мероприятия по ее уменьшению. На основе результатов испытаний автотракторного дизеля 4ЧН12/14 оценены инструментальная и методические составляющие погрешности δPT , эффективность предложенных мероприятий.

Введение

С началом действия норм EURO (1993г.) в число основных экологических показателей дизеля введен среднеэксплуатационный выброс твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ). Данная величина имеет обозначение PT (от «particles» - частицы) и размерность – г/кВт·ч [1]. В виду высокой токсичности ТЧ (показатель относительной агрессивности данного вещества по сравнению с окисью углерода равен 200 [2]) нормы на показатель PT в период 1993-2005 гг. уменьшились в 18 раз (с 0,36 до 0,02 г/кВт·ч) [3]. Это привело к возрастанию результирующей погрешности измерений величины $PT - \delta PT$: при испытаниях в одной лаборатории – с $\pm 3\%$ до $\pm 12\%$, при межлабораторных исследованиях – с $\pm 12\%$ до $\pm 50\%$ [4]. Как показывают результаты исследований зарубежных [5-7] и отечественных [8,9] авторов погрешность δPT включает в себя как инструментальную составляющую, обусловленную погрешностями измерительного оборудования, так и методические составляющие, обусловленные влиянием условий проведения испытаний дизеля на измеряемую среднюю величину выброса ТЧ. Учет методических составляющих погрешности δPT при проведении испытаний позволяет повысить точность измерений показателя PT .

Постановка задачи

Цель исследований – дать оценку результирующей погрешности измерений средней за цикл испытаний величины выброса ТЧ с ОГ дизеля с учетом значимости отдельных составляющих и предложить мероприятия по ее снижению. Для этого решены следующие задачи: 1) изучение стандартной процедуры измерений показателя PT ; 2) разработка математической модели результирующей погрешности δPT ; 3) предложение мероприятий по повышению точности измерений величины PT ; 4) создание методики оценки погрешности δPT и значимости ее составляющих; 5) оценка погрешности δPT и эффективности мероприятий по ее снижению.

Определение среднеэксплуатационного выброса ТЧ с ОГ автомобильного дизеля

Показатель PT автомобильного дизеля определяется в соответствии с требованиями Правил R-49 [1] в ходе выполнения Европейского стационарного цикла ESC (European Stationary Cycle), который состоит из 13-ти режимов с установленными значениями частоты вращения коленчатого вала, нагрузки, весового фактора (учитывает относительное время работы дизеля на режиме в процессе эксплуатации) и продолжительности испытаний.

На каждом режиме цикла производится отбор проб ТЧ из ОГ дизеля, предварительно разбавленных в специальном трубопроводе – туннеле чистым воздухом, имеющим температуру $t_{dil} = 25 \pm 5$ °С. Температура разбавленных ОГ перед фильтром для отбора ТЧ (используется один фильтр в течение всего цикла) не должна превышать 52 °С, но должна быть большей 42 °С.

По результатам испытаний производится расчет показателя PT :

$$PT = \frac{PT_{mass}}{P} = \frac{PT_{mass}}{\sum_{i=1}^{13} (P_i \cdot WF_i)}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

где PT_{mass} , \bar{P} – средние за цикл: массовый выброс ТЧ и эффективная мощность дизеля, P_i , WF_i – эффективная мощность и весовой фактор i -го режима.

$$PT_{mass} = \frac{m_f}{m_{sam}} \cdot \frac{\bar{G}_{edf}}{1000}, \text{ г/ч}, \quad (2)$$

где m_f – масса ТЧ, собранная на фильтре за цикл, мг; m_{sam} – масса пробы разбавленных ОГ, прошедшая через фильтр за цикл (при условии пропорциональности количества отобранной пробы на каждом режиме соответствующему весовому коэффициенту), кг; \bar{G}_{edf} – средний эквивалентный массовый расход разбавленных ОГ:

$$\bar{G}_{edf} = q_i \cdot G_{exhi}, \text{ кг/ч}, \quad (3)$$

где q_i – коэффициент разбавления ОГ на i -м режиме - отношение массовых расходов разбавленных и неразбавленных ОГ в туннеле; G_{exhi} – массовый расход ОГ дизеля на i -м режиме, кг/ч.

При определении m_f фильтр с ТЧ стабилизируют в специальной камере или комнате при постоянных температуре - t_{st} и относительной влажности - φ_{st} воздуха (могут находиться в диапазонах: $t_{st} = 22 \pm 3^\circ \text{C}$, $\varphi_{st} = 45 \pm 10\%$) в течение промежутка времени $\tau_{st} = 1 \dots 80$ ч.

В туннеле могут поддерживаться различные режимы разбавления (dilution mode) ОГ: **D1** - CVS-режим (от «Constant Volume Sampling») с постоянным массовым расходом разбавленных ОГ в туннеле; **D2** - CVS-режим с воздушным охлаждением туннеля, за счет которого температура перед фильтром - t_f может быть снижена на величину $\Delta t_{f(52)} = 0 \dots 20^\circ \text{C}$; **D3** - режим с постоянным коэффициентом q ; **D4** - режим с постоянным коэффициентом q и воздушным охлаждением туннеля, при котором на фильтре отбирается максимальное количество ТЧ.

Математическая модель результирующей погрешности δPT

На основе анализа результатов исследований фирм Mitsubishi [5] и AVL [6], а также результатов собственных исследований [8,9], предложена математическая модель оценки погрешности δPT , в которой данная величина рассматривается в виде суммы 3-х составляющих:

$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_{if} + \delta PT_{st}, \quad (4)$$

где δPT_{in} – инструментальная погрешность, обусловленная неточностями измерения величин, с помощью которых вычисляется показатель РТ; δPT_{if} – методическая погрешность, обусловленная влиянием температуры пробы перед фильтром для отбора ТЧ на результат измерений РТ; δPT_{st} – методическая погрешность, обусловленная влиянием на результат измерений показателя РТ параметров процесса стабилизации рабочего фильтра перед его взвешиванием: температуры воздуха – t_{st} и продолжительности выдержки фильтра – τ_{st} .

Величина δPT_{in} определяется с помощью зависимости для вычисления погрешности результата косвенных измерений:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (5)$$

где y – величина, измеряемая косвенным путем по известной зависимости - $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$; x_i – величины, с помощью которых определяется y , m – их количество.

Погрешность δPT_{if} численно равна величине δm_f^{if} – относительному отклонению массы навески ТЧ - m_f^{if} , измеренной при фактических значениях температур t_{fi} , от массы навески ТЧ - m_f^{if0} , измеренной при значениях температур t_{f0} , принимаемых за

базовые и соответствующих CVS-разбавлению ОГ при $t_{dil} = 20^\circ \text{C}$, $t_{f(max)} = 52^\circ \text{C}$:

$$\delta PT_{if} = \delta m_f^{if} = \frac{m_f^{if} - m_f^{if0}}{m_f^{if0}} \cdot 100\% = \sum_{i=1}^{13} \delta m_{fi}^{if}, \quad (6)$$

где δm_{fi}^{if} – относительные отклонения массы навески ТЧ на i -м режиме испытаний:

$$\delta m_{fi}^{if} = \frac{m_{fi}^{if} - m_{fi}^{if0}}{m_{fi}^{if0}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Погрешность δPT_{st} численно равна величине δm_f^{st} – относительному отклонению массы навески ТЧ - m_f^{st} , измеренной при фактических значениях величин t_{st} и τ_{st} , от массы навески ТЧ - m_f^{st0} , измеренной при значениях $t_{st0} = 20^\circ \text{C}$ и $\tau_{st0} = 6$ ч, принимаемых за базовые:

$$\delta PT_{st} = \delta m_f^{st} = \frac{m_f^{st} - m_f^{st0}}{m_f^{st0}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Для вычисления величин δm_f^{if} и δm_f^{st} используются экспериментальные зависимости [9]:

$$\delta m_{fi}^{if} = -(1,20 + 0,148 \cdot \bar{n}_i - 0,552 \cdot \bar{L}_i) \cdot \Delta t_{fi}, \%, \quad (9)$$

где \bar{n}_i , \bar{L}_i – относительные число оборотов и нагрузка на вал двигателя на i -м режиме; $\Delta t_{fi} = t_{fi} - t_{f0}$ – разности температур.

$$\delta m_f^{st} = \frac{-5,72 \cdot (1 + 0,071 \cdot (t_{st} - t_{st0}))}{1,508 - 0,003 \cdot (t_{st} - t_{st0})} \cdot \lg \left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}} \right), \%. \quad (10)$$

Величины \bar{n}_i , \bar{L}_i , входящие в выражение (10), вычисляются по формулам:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad \bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}}, \quad (11)$$

где n_{idle} и n_{nom} – число оборотов вала двигателя на холостом ходу и режиме номинальной мощности; $M_{k(max)i}$ – максимальный крутящий момент на валу двигателя при n_i .

Методика исследований погрешности δPT с учетом рекомендаций по ее уменьшению

На основе анализа причин возникновения погрешностей δPT_{if} и δPT_{st} даны следующие рекомендации по их снижению и повышению за счет этого точности измерений показателя РТ:

а) сокращение в 5 раз допустимых диапазонов варьирования температуры разбавляющего воздуха и максимальной температуры пробы перед фильтром - до интервалов: $t_{dil} = 20 \dots 22^\circ \text{C}$, $t_{f(max)} = 50 \dots 52^\circ \text{C}$; это позволяет сократить интервалы варьирования температур t_{fi} ;

б) использование в туннеле *режима разбавления ОГ D4 с температурным регулированием – D4**, позволяющим поддерживать значения температур t_{fi} такими же, как при режиме CVS (т.е. t_{pi}); это позволяет собрать на фильтре максимальную массу навески ТЧ и уменьшить отклонения δm_{fi}^{tf} (см. формулу (9));

в) сокращение диапазонов варьирования параметров процесса стабилизации рабочего фильтра до интервалов: $t_{st} = 20...22$ °C (сокращен в 3 раза), $\tau_{st} = 6...8$ ч (сокращен в 39,5 раза); это позволяет уменьшить погрешность δPT_{st} - при таких t_{st} и τ_{st} она не превышает $\pm 0,5\%$.

Оценка величины δPT и эффективности сделанных рекомендаций проводились по алгоритму.

1. Выбор исходных данных для проведения исследований – результатов испытаний дизеля по циклу ESC с указанием всех параметров, влияющих на точность измерений показателя PT .

2. Определение для каждого режима разбавления ОГ инструментальной погрешности δPT_{in} путем последовательного вычисления с помощью выражения (6) погрешностей величин, которые рассчитываются по формулам (1) – (4).

3. Установление (с учетом режима разбавления ОГ) диапазонов варьирования методической погрешности δPT_{tf} , для этого с помощью выражений (7), (10) и метода планирования 2-х факторного эксперимента [10] определяются: а) для режимов разбавления D1 и D3 – зависимости $\delta PT_{tf} = f(t_{dil}, t_{f(max)})$ с областью задания функции: $t_{dil} = 20...30$ °C, $t_{f(max)} = 42...52$ °C; б) для режимов разбавления D2 и D4 – зависимости $\delta PT_{tf} = f(t_{dil}, \Delta t_{f(52)})$ с областью задания функции: $t_{dil} = 20...30$ °C, $\Delta t_{f(52)} = 0...20$ °C. Абсолютные отклонения величины δPT_{tf} , вычисляемые с помощью полученных зависимостей, от значений, рассчитанных по формуле (7), не должны превышать $\pm 0,05\%$.

4. Определение с помощью зависимостей (9), (11) диапазона варьирования методической погрешности δPT_{st} в области допустимых значений величин t_{st} и τ_{st} .

5. Установление диапазона варьирования результирующей погрешности δPT (с помощью выражения (5)), а также значений ширины диапазонов варьирования данной погрешности – δPT^{sum} и ее составляющих – δPT_j^{sum} :

$$\delta PT^{sum} = \delta PT^+ - \delta PT^-; \delta PT_j^{sum} = \delta PT_j^+ - \delta PT_j^-$$

где индексы «+» и «-» соответствуют граничным значениям диапазонов варьирования соответствующих погрешностей в области положительных и отрицательных значений; j – индекс составляющей результирующей погрешности (in, tf или st).

6. Определение относительного вклада (в %) в результирующую погрешность δPT каждой ее составляющей – R_j :

$$R_j = \frac{\delta PT_j^{sum}}{\delta PT^{sum}} \cdot 100\%$$

7. Вычисление величины δPT и ее составляющих при выполнении сделанных рекомендаций.

Результаты исследований и их анализ

В качестве исходных данных для проведения исследований использованы результаты испытаний дизеля 1Ч12/14 по циклу ESC. В соответствии с изложенной методикой определены: диапазоны варьирования результирующей погрешности δPT и ее составляющих (табл. 1, рис. 1, 2); относительный вклад каждой составляющей в погрешность δPT ; оценена эффективность сделанных рекомендаций (рис. 3).

Таблица 1. Результаты определения инструментальной погрешности δPT_{in}

Выражение для вычисления погрешности	Значение погрешности, %			
	D1	D2	D3	D4
$\delta M_f = \Delta M_f / M_f$	4,1	2,8	3,4	2,4
$\delta M_{sum} = \delta M_{sami} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} WF_i^2}$	0,6	0,6	0,6	0,6
$\delta q_i = \sqrt{2} \cdot \delta G \cdot (q_i - 1)$	3,8	2,3	2,2	1,2
$\delta G_{edfi} = \sqrt{\delta q_i^2 + \delta G_{exhi}^2}$	4,6	3,6	3,3	2,8
$\delta \overline{G_{edf}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{Gedfi} \cdot \delta G_{edfi})^2}$	1,4	1,1	1,3	1,1
$\delta PT_{mass} = \sqrt{\delta M_j^2 + \delta M_{sum}^2 + (\delta \overline{G_{edf}})^2}$	4,4	3,1	3,7	2,7
$\delta P_i = \sqrt{\delta n^2 + \delta M_k^2}$	3,6	3,6	3,6	3,6
$\delta \overline{P} = \delta P_i \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{P_i})^2}$	1,2	1,2	1,2	1,2
$\delta PT = \sqrt{\delta PT_{mass}^2 + (\delta \overline{P})^2}$	4,5	3,3	3,9	3,0

Анализ полученных результатов показывает:

- составляющие результирующей погрешности измерений показателя PT варьируются в диапазонах: а) при допустимых Правилами R-49 условиях проведения испытаний - $\delta PT_{in} = \pm 2,6... \pm 4,5\%$, $\delta PT_{tf} = -8,3...12,6\%$, $\delta PT_{st} = -6,7...4,5\%$; б) при рекомендуемых условиях проведения испытаний - $\delta PT_{in} = \pm 3\%$, $\delta PT_{tf} = -0,5...1,2\%$, $\delta PT_{st} = -0,5...0\%$;

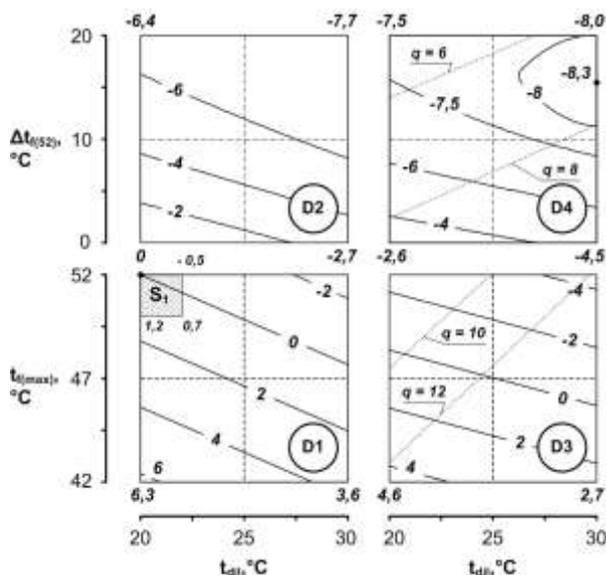


Рис. 1. Диапазоны варьирования погрешности δPT_{if} : S_1 – область рекомендуемых значений t_{dil} и $t_{f(max)}$

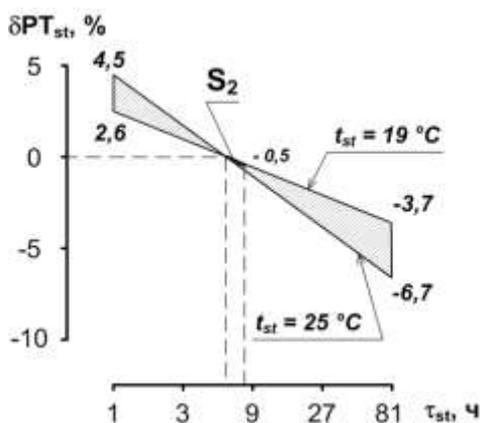


Рис. 2. Диапазон варьирования погрешности δPT_{str} : S_2 – область рекомендуемых значений τ_{st} и t_{st}

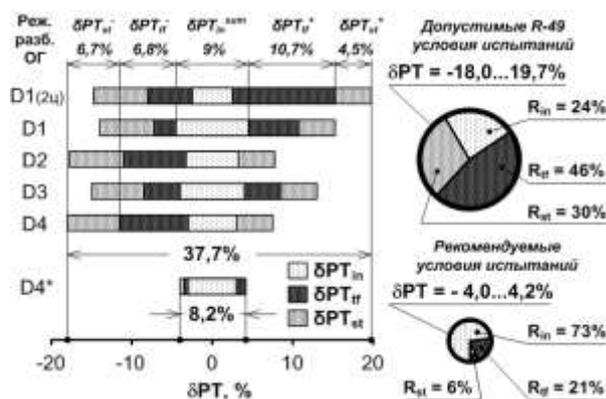


Рис. 3. Результаты исследований погрешности δPT

- при использовании допускаемых режимов разбавления ОГ результирующая погрешность δPT варьируется в диапазоне $-18,0...19,7\%$, ширина данного диапазона составляет $37,7\%$; при этом наибольший вклад в δPT вносят методические составляющие – суммарно 76% ; вклад инструментальной составляющей – 24% ;

- повторное выполнение дополнительного цикла ESC при CVS-разбавлении ОГ в туннеле не позволяет повысить точность измерений показателя PT - не смотря на то, что инструментальная погрешность при этом снижается с $4,5\%$ до $2,6\%$, результирующая погрешность возрастает с $-13,9...15,3\%$ (разброс $29,2\%$) до $-14,7...19,7\%$ (разброс $34,7\%$) за счет увеличения методической погрешности δPT_{if} ;

- в результате выполнения предложенных рекомендаций результирующая погрешность δPT снижается до $-4,0...4,2\%$, ширина диапазона варьирования данной величины ($8,2\%$) уменьшается в $4,6$ раза; при этом вклад инструментальной составляющей в δPT возрастает до 73% , а суммарный вклад методических составляющих снижается до 27% .

Выводы

1. Оценена результирующая погрешность измерения среднеэксплуатационного выброса ТЧ с ОГ автомобильного дизеля (δPT) – она составляет $-18,0...19,7\%$ (т.е. расхождение результатов – $37,7\%$); при этом только 24% от данной величины приходится на инструментальную составляющую, а остальные 76% составляют методические составляющие.

2. Предложены мероприятия по повышению точности измерений показателя PT , которые позволяют уменьшить погрешность δPT до $-4,0...4,2\%$ (расхождение результатов $8,2\%$), т.е. в $4,6$ раза, при этом доля инструментальной составляющей данной величины возрастает до 73% , а суммарная доля методических составляющих уменьшается до 27% .

Список литературы:

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. - 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. – 602 p. 2. Быстров А.С. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский и др. – М.: «Экономика». – 1986. – 96 с. 3. Звонов В.А. Оценка и контроль выбро-

сов 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. 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. 5. Hirakouchi N. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji // SAE Technical Paper Series. - 1989. - № 890181. - 11p. 6. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sampling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p. 7. Johnson J. A Review of Diesel Particulates Control Technology and Emissions Effects / J. Johnson, S. Bagley, L. Gratz, D. Leddy // SAE Technical Paper Series. -1994. - № 940233. - 35 p. 8. Поливянчук А.П. Анализ влияния условий стабилизации рабочих фильтров на массу навески дизельных твердых частиц / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №1. – С. 88-91. 9. Поливянчук А.П. Оценка неопределенности результатов измерений выбросов твердых частиц в ходе экологических испытаний дизелей / А.П. Поливянчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2012. - №5(176), Ч. 2. – С. 121-128. 10. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента / Рафалес-Ламарка Э.Э. // Укр. проектно-констр. и научно-исслед. ин-т «УкрНИИуглеобогащение». - 1969. – 126 с.

Bibliography (transliterated):

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate

pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. - 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 Mar 2011. – 602 p. 2. Bystrov A.S. Vremennaya tipovaya meto-dika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti osushhe-stvleniya prirodooxrannykh mero-priyatij i ocenki eko-nomicheskogo ushherba, prichinyaemogo narodnomu khozajst-vu zagryazneniem okruzhayushhej sredy / A.S. Bystrov, V.V. Varankin, M.A. Vilenskij i dr. // М.: «Экономика». - 1986. — 96 s. 3. Zvonov V.A. Ocenka i kontrol vybro-sov dispersnyx chastic s otrabotavshimi gazami dizelej / V.A. Zvonov, G.S. Kornilov, A.V. Kozlov, E.A. Simono-va. – М.: «Prima-Press-M», 2005. – 312 s. 4. 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 r. 5. Hirakouchi N. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji // SAE Technical Paper Series. - 1989. - № 890181. - 11p. 6. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sampling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p. 7. Johnson J. A Review of Diesel Particulates Control Technology and Emissions Effects / J. Johnson, S. Bagley, L. Gratz, D. Leddy // SAE Technical Paper Series. -1994. - № 940233. - 35 p. 8. Polivyanchuk A.P. Analiz vliyaniya uslovij stabilizacii rabochix filtrov na massu naveski dizelnyx tverdyx chastic / A.P. Polivyanchuk // Dvigateli vnutrennego sgoraniya, Kharkov. 2010. - №1. – S. 88-91. 9. Polivyanchuk A.P. Ocenka neopredelennosti rezul'tatov izmerenij vybrosov tverdyx chastic v xode ekologicheskix ispyta-nij dizelej / A.P. Polivyanchuk // Visnik SNU im. V. Da-lya. – 2012, - №5(176), Ch. 2. – S. 121-128. 10. Rafales-Lamarka E.E. Instrukciya por planirovaniyu eksperi-menta / Rafales-Lamarka E.E. // Ukr. projektно-konstr. i nauchno- issled. in-t «UkrNIUgleobogashhe-nie». - 1969. – 126 s.

Поступила в редакцию 25.06.2013

Поливянчук Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры экологии, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, uni@snu.edu.ua, (0642) 34-18-36.

Львов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина, uni@snu.edu.ua, (0642) 34-18-36.

ІЗДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ГРАВИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

А.П. Поливянчук, С.О. Львов

Досліджено результуючу похибку вимірювань одного з основних екологічних показників дизеля – середньоексплуатаційного викиду твердих частинок з відпрацьованими газами (δPT). Створено математичну модель даної похибки. Запропоновані заходи з її зменшення. На основі результатів випробувань автотракторного дизеля 4ЧН12/14 оцінено інструментальну та методичні складові похибки δPT, ефективність запропонованих заходів.

INCREASING THE ACCURACY OF THE MEASUREMENT OF GRAVIMETRIC METHOD OF PARTICULATE METTER EMISSIONS IN THE DIESEL'S EXHAUST GAS

A.P. Polivyanchuk, S.A. Lvov

The resulting error in measurement of one of the main environmental indicators for diesels – average emission of particulate matters in the exhaust gases (δPT) was investigated. The mathematical model of this error was created. Instrumental and methodological errors of δPT components was evaluated based on the results of tests of autotractor diesel 4CH12/14. The effectiveness of proposed measures was also evaluated.