

УДК.621.1.018

А.П. ПОЛИВЯНЧУК

*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВЫХ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЕЙ

Рассмотрена проблема обеспечения требуемой точности измерений одного из основных экологических показателей дизеля – удельного выброса твердых частиц. Проанализированы факторы, влияющие на результирующую погрешность измерений данного показателя. Разработана методика оценки точности измерений массовых выбросов твердых частиц и проведена ее апробация на примере тепловозного дизеля ПД1М.

**дизель, отработавшие газы, твердые частицы, испытательный цикл, удельный выброс, коэффициент разбавления, результирующая погрешность**

### Постановка задачи

Одним из наиболее опасных загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу с отработавшими газами (ОГ) дизельных двигателей, являются твердые частицы (ТЧ). Вместе с газообразными веществами – монооксидом углерода СО, углеводородами СН и оксидами азота  $\text{NO}_x$  ТЧ входят в число загрязняющих веществ, выбросы которых подлежат ограничению. В качестве нормируемого показателя, ограничивающего поступление ТЧ с ОГ дизеля в атмосферу, является удельный выброс ТЧ, обозначаемый в нормативных документах, как показатель РТ (от англ. «particles» - частицы). С течением времени требования к экологическим показателям дизельных установок ужесточаются, что приводит к снижению нормируемых выбросов загрязняющих веществ. Причем, ввиду высокой токсичности ТЧ, ужесточение норм на показатель РТ происходит более значительно. Так, с 1993 по 2005гг. (при переходе от EURO-I к EURO-IV) нормы выбросов ТЧ дизелями грузовых автомобилей снизились в 18 раз, в то время как уменьшения норм выбросов СО, СН и  $\text{NO}_x$  составили: 3,0; 2,4 и 2,3 раза, соответственно [1]. Резкое снижение норм на показатель РТ приводит к

возрастанию результирующей погрешности измерений данной величины -  $\delta\text{РТ}^{\Gamma}$  [2] и возникновению проблемы обеспечения требуемой точности измерений массовых выбросов ТЧ с ОГ дизелей. С целью решения данной проблемы автором исследованы факторы, влияющие погрешность  $\delta\text{РТ}^{\Gamma}$  и разработана методика оценки точности измерений показателя РТ.

### 1. Анализ факторов, влияющих на точность измерений показателя РТ

Показатель РТ определяется в ходе испытаний дизелей по циклам, состоящим из нормируемых режимов работы двигателя. Для каждого типа дизеля установлено определенное количество режимов испытаний: для тепловозных дизелей – 3, дизелей сельскохозяйственных машин – 8, автомобильных – 13 режимов [3]. В соответствии с технологией измерения массовых выбросов ТЧ, на каждом режиме испытаний ОГ двигателя предварительно смешиваются с чистым атмосферным воздухом (в системе, называемой туннелем), после чего смесь ОГ и воздуха пропускается через пару фильтров для отбора проб ТЧ. После выполнения цикла удельный выброс ТЧ – РТ определяется, как отношение среднего за

цикл массового выброса твердых частиц –  $PT_{mass}^{cp}$  к средней за цикл эффективной мощности дизеля –  $N_e^{cp}$  [4]:

$$PT = \frac{PT_{mass}^{cp}}{N_e^{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n WF_i \cdot PT_{massi}}{\sum_{i=1}^n WF_i \cdot N_{ei}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число режимов испытаний;

$WF_i$  – весовой фактор  $i$ -го режима испытаний;

$PT_{massi}$  – массовый выброс ТЧ на  $i$ -м режиме;

$N_{ei}$  – эффективная мощность дизеля на  $i$ -м режиме.

Величина  $PT_{massi}$  определяется по формуле:

$$PT_{massi} = \frac{M_{fi}}{M_{sami}} G_{edfi}, \quad (2)$$

где  $M_{fi}$  – масса ТЧ, собранная на фильтрах на  $i$ -м режиме;

$M_{sami}$  – масса разбавленных ОГ, прошедшая через фильтры на  $i$ -м режиме;

$G_{edfi}$  – эквивалентный массовый расход разбавленных ОГ на  $i$ -м режиме.

Результаты исследований фирм-разработчиков систем контроля выбросов ТЧ – AVL, Mitsubishi, Perkins показывают, что на точность измерений показателя РТ оказывают влияние два фактора:

1) погрешности измерения параметров, по которым вычисляется удельный выброс твердых частиц – данный фактор определяет *инструментальную погрешность измерений показателя РТ* –  $\delta PT^{inst}$ ;

2) влияние условий разбавления ОГ (коэффициента разбавления ОГ –  $q$  и температуры пробы разбавленных отработавших газов перед фильтрами –  $t_f$ ) на измеряемые значения массовых выбросов ТЧ [5 – 7] (рис. 1) – данный фактор определяет *методическую погрешность измерений показателя РТ* –  $\delta PT^{meth}$ .

Погрешность  $\delta PT^{meth}$  определяется, как относительное отклонение удельного выброса твердых частиц, измеренного при фактических значениях

температуры разбавляющего воздуха –  $t_{dil}$  (может изменяться в диапазоне 20...30 °С) и максимальной температуры пробы перед фильтрами –  $t_{f(max)}$  (может изменяться в диапазоне 48...52 °С) от удельного выброса твердых частиц, измеренного при оптимальных значениях данных температур:  $t_{dil} = 25$  °С,  $t_{f(max)} = 50$  °С.

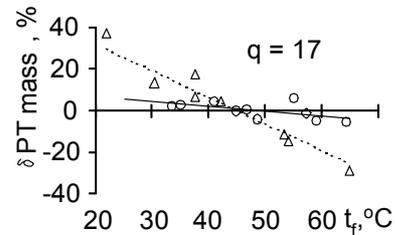
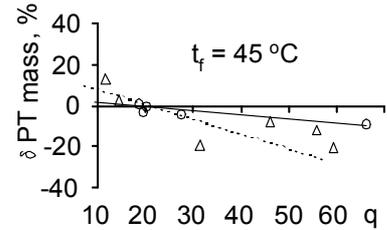


Рис. 1. Влияние на измеряемые выбросы ТЧ условий разбавления ОГ (результаты исследований фирмы AVL [5])

Результирующая погрешность  $\delta PT^r$  определяется, как сумма величин  $\delta PT^{inst}$  и  $\delta PT^{meth}$ ; ее значение не должно превышать максимально допустимой величины –  $\pm 8,5\%$  [4].

## 2. Методика оценки точности измерений показателя РТ

*Определение инструментальной погрешности.* Величина  $\delta PT^{inst}$  вычисляется, как погрешность результата косвенных измерений (табл. 1), по следующей формуле [8]:

$$\delta y = \left[ \left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{y} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{y} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_m} \frac{\Delta x_m}{y} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\delta y$  – относительная погрешность измерений величины  $y$ , определяемой косвенным путем –  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$  – абсолютные погрешности измерений величин  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , по которым вычисляется величина  $y$ .

Таблица 1  
Формулы для вычисления погрешности  $\delta PT^{inst}$

Величина	Погрешность измерения величины
$PT_{mass}$	$(\delta M_{fi}^2 + \delta M_{sami}^2 + \delta G_{edfi}^2)^{0,5}$
$PT^{cp}_{mass}$	$\left( \sum_{i=1}^n (\delta PT_{massi} \cdot WF_i \cdot K_{PT_{massi}})^2 \right)^{0,5}$
$N_e^{cp}$	$\left( \sum_{i=1}^n (\delta N_{ei} \cdot WF_i \cdot K_{Nei})^2 \right)^{0,5}$
$PT$	$\delta PT^{inst} = \left( (\delta PT_{mass}^{cp})^2 + (\delta N_e^{cp})^2 \right)^{0,5}$

*Примечание.* В таблице обозначены:  $K_{PT_{massi}} = PT_{massi} / PT^{cp}_{mass}$  и  $K_{Nei} = N_{ei} / N_e^{cp}$  – безразмерные коэффициенты.

*Определение методической погрешности.* Величина  $\delta PT^{meth}$  вычисляется с помощью выражения:

$$\delta PT^{meth} = \sum_{i=1}^n (WF_i \cdot K_{PT_{massi}} \cdot \delta PT_{massi}), \quad (4)$$

где  $K_{PT_{massi}}$  – безразмерные коэффициенты (см. примечание к табл. 1);

$\delta PT_{massi}$  – методические погрешности измерений массовых выбросов ТЧ на режимах испытаний, определяемые на основе результатов исследований фирмы AVL (см. рис. 1) с учетом рекомендаций, данных в работе [8].

По результатам вычислений величин  $\delta PT^{inst}$  и  $\delta PT^{meth}$  определяется погрешность  $\delta PT^*$ .

### 3. Оценка точности измерений удельного выброса ТЧ дизеля ПД1М

Практическая ценность вышеизложенной методики заключается в возможности использования ее при проведении исследований по установлению условий проведения испытаний, при которых обеспечивается требуемая точность измерений показателя РТ. Такие исследования проведены на примере тепловозного дизеля ПД1М. В качестве исходных данных при этом использовались:

– допустимые значения погрешностей измерений величин, по которым вычисляются массовые выбросы ТЧ:  $\delta M_{fi} = 9,3\%$  (при массе навески ТЧ – 0,75мг),  $\delta M_{sami} = 2\%$ ;  $\delta G_{edfi} = 4\%$  [4];

– результаты испытаний дизеля ПД1М по 3-ступенчатому тепловозному циклу ISO 8178-F (табл. 2).

Таблица 2  
Исходные данные для проведения исследований

№реж	WF	$PT_{mass}$ , кг/час	$Ne$ , кВт	$\delta Ne$ , %
1	0,25	0,43	882	0,9
2	0,15	0,09	289	1,6
3	0,60	0,019	9,4	–

Исследования показали, что в зависимости от значений температур  $t_{dil}$  и  $t_{f(max)}$ , при которых проводятся испытания дизеля ПД1М, результирующая погрешность измерений показателя РТ может составлять –  $\delta PT^* = \pm 7,7 \dots 11,4\%$  ( $\delta PT^{inst} = \pm 7,7\%$ ;  $\delta PT^{meth} = -3,7 \dots +2,8\%$  (рис. 2)) [8]. Для того, чтобы обеспечить требуемую точность измерений показателя РТ, необходимо проводить испытания при температуре  $t_{dil} = 24 \dots 26$  °С (при этом  $\delta PT^{meth} \leq 0,8\%$  и  $\delta PT^*$  не превышает своего допустимого значения –  $\pm 8,5\%$ ).

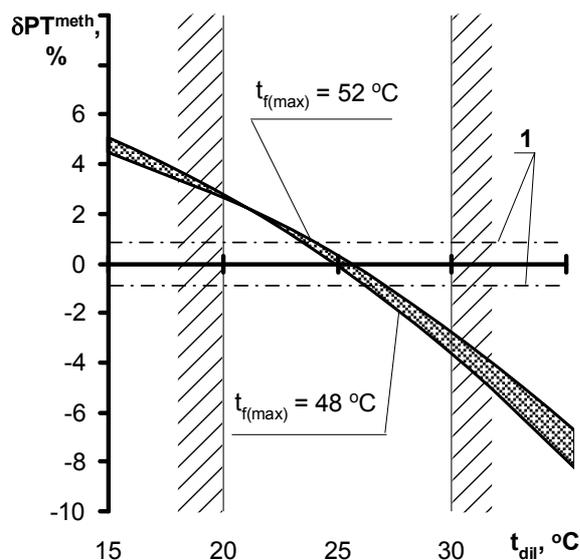


Рис. 2. Результаты вычислений погрешности  $\delta PT^{meth}$ .  
1 — значение  $\delta PT^{meth}$ , при котором обеспечивается требуемая точность измерений показателя РТ

### Выводы

1. В связи с существенным снижением норм на выбросы ТЧ с ОГ дизелей возникает проблема обеспечения требуемой точности измерений показателя удельного выброса ТЧ – РТ.

2. Установлено, что на точность измерений удельного выброса ТЧ влияют два фактора: 1) погрешности измерений параметров, по которым вычисляется показатель РТ (приводят к образованию инструментальной погрешности –  $\delta PT^{inst}$ ); 2) влияние условий разбавления ОГ воздухом в туннеле на измеряемые выбросы ТЧ (приводит к образованию методической погрешности –  $\delta PT^{meth}$ ).

3. Разработана методика определения погрешностей  $\delta PT^{inst}$  и  $\delta PT^{meth}$ , а также результирующей погрешности измерений показателя РТ –  $\delta PT^r$  (сумма величин  $\delta PT^{inst}$  и  $\delta PT^{meth}$ ).

4. На примере тепловозного дизеля ПД1М показана возможность использования данной методики для определения условий проведения испытаний, при которых обеспечивается требуемая точность измерений показателя РТ (величина  $\delta PT^r$  не превышает допустимого значения –  $\pm 8,5\%$ ).

### Литература

1. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология: Уч. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 273 с.
2. Требования норм EURO 4 к технике по анализу эмиссии отработавших газов для грузовых автомобилей / Доклад фирмы «AVL». Авторы: М. Анкович, К. Энгелерингер, В. Шиндлер, П. Зеленка // Современные дизельные двигатели и оборудование для их испытаний – М.: АМО «ЗИЛ», 1999. – 15 с.
3. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications, 1996. – 18 p.
4. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 2: Test – Measurement of gaseous and particulate exhaust emissions at site, 1996. – 22 p.
5. Hirakouchi N., Fukano I., Shoji T. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. SAE Technical Paper Series 890181, 1989. – 11 p.
6. Engeljehring K., Schindler W., Sulzer. Meeting ISO 8178 Requirements for the Measurement of Diesel Particulates with Partial-Flow Dilution Systems. SAE Technical Paper Series 932466, 1993. – 10 p.
7. Исследование влияния условий разбавления отработавших газов двигателя в минутнунеле на точность определения массовых выбросов твердых частиц / В.А. Звонов, М.Ф. Смирный, А.П. Поливянчук и др. // Збірн. наук. праць Луганського держ. агр. ун-ту. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛДАУ. – 2001. – № 10 (22). – С. 115 – 119.
8. Полив'янчук А.П. Удосконалення способу контролю викидів твердих частинок від тепловозів: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Східноукр. націон. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. – 190 с.

Поступила в редакцию 13.05.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.И.Осенин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск.