

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОГО ВЫБРОСА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

### Введение

Сегодня в число основных экологических нормативов дизелей входит показатель РТ (от англ. Particles - частицы) – удельный выброс твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) дизеля. Для определения данной величины используется гравиметрический метод, суть которого состоит в непосредственном измерении массы ТЧ, содержащихся в разбавленном воздухом ОГ при работе двигателя на установленных режимах испытаний.

С ужесточением международных экологических нормативов (с 1993 г. в странах ЕС нормы выбросов ТЧ уменьшились в 18 раз [1]) возросли требования к точности измерительных методов и оборудования, используемых в экологическом диагностировании дизелей. Анализ практического применения гравиметрического метода измерений массовых выбросов ТЧ показывает его несовершенство, которое проявляется в следующем: а) регламентируемая точность измерительного оборудования допускает достаточно высокие инструментальные погрешности измерений показателя РТ; б) установленные требования к условиям проведения испытаний допускают возможность возникновения существенных методических погрешностей измерений величины РТ. В данной работе предлагается ряд мероприятий по усовершенствованию упомянутого метода измерений, позволяющих существенно повысить его точность.

### Постановка задачи

Целью исследований являлось повышение точности гравиметрического метода измерений удельного выброса ТЧ путем снижения инструментальной и методической погрешностей измерений данной величины. Для достижения данной цели решены следующие задачи: 1) анализ несовершенства гравиметрического метода измерений удельного выброса ТЧ и предложение мероприятий по его усовершенствованию; 2) разработка методики определения результирующей погрешности измерений РТ; 3) оценка точности гравиметрического метода измерений до и после совершенствования.

### Анализ исследуемой проблемы. Рекомендации по совершенствованию гравиметрического метода

Удельный выброс ТЧ определяется на основе результатов испытаний дизеля по циклу с помощью зависимостей:

$$PT = \frac{PT_{mass}^{cp}}{P_e^{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n PT_{massi} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^n P_{ei} \cdot WF_i}, \text{ (г/кВт·ч)}, \quad (1)$$

где  $PT_{mass}^{cp}$ ,  $PT_{massi}$  – средний за цикл и измеренный на  $i$ -м режиме массовые выбросы ТЧ (г/ч);  $P_e^{cp}$ ,  $P_{ei}$  – средняя за цикл и измеренная на  $i$ -м режиме эффективная мощность дизеля (кВт·ч);  $WF_i$  – весовой фактор  $i$ -го режима;  $n$  – число режимов испытательного цикла.

$$PT_{massi} = \frac{M_{fi}}{M_{sami}} \cdot q_i \cdot G_{exhi}, \text{ (г/ч)}, \quad (2)$$

где  $M_{fi}$  – масса ТЧ, собранная на фильтрах на  $i$ -м режиме (мг);  $M_{sami}$  – масса пробы разбавленных ОГ, прошедшая через фильтры на  $i$ -м режиме (г);  $q_i$  – коэффициент разбавления ОГ воздухом;  $G_{exhi}$  – массовый расход ОГ в выхлопной системе дизеля (кг/ч).

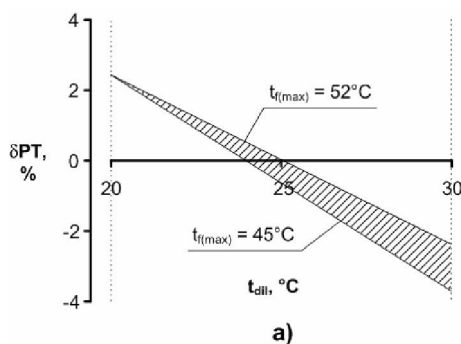
Таким образом показатель РТ – величина, определяемая косвенным путем по результатам прямых измерений величин  $M_{fi}$ ,  $M_{sami}$ ,  $q_i$ ,  $G_{exhi}$  и  $P_{ei}$ . Погрешности определения данных величин, допускаемые нормативными документами [2], соответствуют среднему классу точности измерительного оборудования, их значения в реальных условиях испытаний могут быть уменьшены.

С целью снижения инструментальной погрешности измерений показателя РТ рекомендуется *мероприятие 1*: использовать для измерения параметров, определяемых непосредственно в ходе испытаний, приборы и системы высокого класса точности.

Анализ результатов исследований фирмы Mitsubishi [3] (рис. 1) показывает, что при определении удельного выброса дизельных ТЧ возникают методические погрешности измерений, обусловленные влиянием на результаты испытаний 2-х факторов:

1) условий разбавления ОГ дизеля воздухом, которые характеризуются:

- максимальной температурой отбираемой пробы перед фильтрами –  $t_{f(max)}$ , которая не должна превышать 52 °С;
- температурой разбавляющего воздуха –  $t_{dil}$ , которая может варьироваться в диапазоне 20...30 °С;



2) условий температурной стабилизации рабочих фильтров перед взвешиванием, которые характеризуются:

- температурой атмосферного воздуха –  $t_{st}$ , которая может изменяться в диапазоне 19...25 °С;
- продолжительностью процедуры стабилизации фильтров –  $\tau_{st}$ , которая составляет 1 час и более [2].

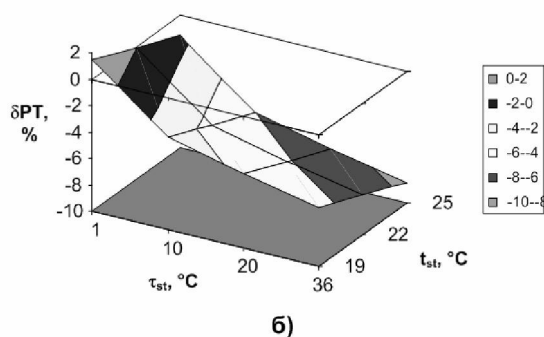


Рис. 1. Влияние условий разбавления ОГ (а) и температурной стабилизации фильтров (б) на результаты измерений показателя РТ

Причина, по которой возникает неопределенность результатов измерений показателя РТ – влияние параметров  $t_{f(max)}$ ,  $t_{dil}$ ,  $t_{st}$  и  $\tau_{st}$  на растворимую органическую фракцию ТЧ, часть которой испаряется с поверхности ТЧ.

С целью уменьшения методических погрешностей измерений показателя РТ рекомендуется:

*мероприятие 2:* зафиксировать максимальную температуру разбавленных ОГ перед фильтрами  $t_{f(max)}$  на уровне 52 °С и сократить ширину допустимого диапазона варьирования температуры разбавляющего воздуха с 10 °С до 2°С –  $t_{dil} = 23...25$  °С;

*мероприятие 3:* сократить ширину допустимого диапазона варьирования температуры воздуха, при которой протекает стабилизация с 4 °С до 2°С –  $t_{st} = 23...25$  °С и установить интервал для продолжительности выдержки фильтров  $\tau_{st} = 20...24$  ч (в данном диапазоне скорость изменения массы рабочих фильтров не превышает 0,1 %/ч [3]).

**Методика определения результирующей погрешности измерений показателя РТ**

Результирующая погрешность измерений удельного выброса ТЧ –  $\delta PT$  определяется, как сумма 3-х составляющих: инструментальной –  $\delta PT_{in}$  и 2-х методических –  $\delta PT_{m1}$  и  $\delta PT_{m2}$ :

$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_{m1} + \delta PT_{m2} \quad (3)$$

Величина  $\delta PT_{in}$  определяется, как погрешность результата косвенных измерений [4] с помощью формул:

$$\delta PT_{in} = \sqrt{(\delta PT_{mass}^{cp})^2 + (\delta P_e^{cp})^2} \quad (4)$$

$$\delta PT_{mass}^{cp} = \delta PT_{massi} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta PT_{massi}}{\delta PT_{mass}^{cp}} \cdot WF_i \right)^2} \quad (5)$$

$$\delta P_e^{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \delta P_{ei} \cdot \frac{\delta P_{ei}}{\delta P_e^{cp}} \cdot WF_i \right)^2} \quad (6)$$

$$\delta PT_{massi} = \sqrt{\delta M_{fi}^2 + \delta M_{sami}^2 + \delta q_i^2 + \delta G_{exhi}^2} \quad (7)$$

Для определения погрешностей  $\delta PT_{m1}$  и  $\delta PT_{m2}$  используются зависимости, полученные в ходе обработки результатов экспериментальных исследований фирмы Mitsubishi (см. рис. 1):

$$\delta PT_{m1} = (-0,46 - 0,02 \cdot (52 - t_f)) \times (t_{dil} - 25) - 0,1 \cdot (52 - t_f) \quad (8)$$

$$\delta PT_{m2} = -0,5 \cdot (t_{st} - 25) - 4,5 \cdot Lg \tau_{st} \quad (9)$$

**Оценка точности гравиметрического метода до и после совершенствования**

С помощью изложенной методики определены диапазоны варьирования результирующей погрешности  $\delta PT$  и ее составляющих для допустимых стандартом ISO 8178 и рекомендуемых условий проведения испытаний (рис. 2, 3). При определении инструментальной погрешности  $\delta PT_{in}$  использовались результаты экологических испытаний тепловозных дизелей по циклу ISO 8178-F [5] (табл. 1).

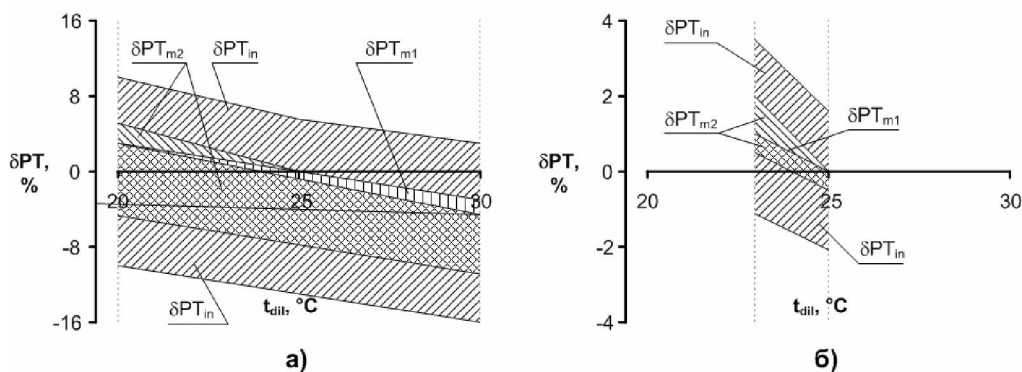


Рис. 2. Возможные диапазоны варьирования погрешности  $\delta PT$ :  
 а) допускаемые нормативными документами;  
 б) при выполнении сделанных рекомендаций

Результаты исследований показывают:

- разброс измеренных значений показателя РТ при допустимых стандартом ISO 8178 условиях проведения испытаний составляет 26,7% ( $\delta PT = -16,3...10,4\%$ ); максимальные значения составляющих результирующей погрешности:  $\delta PT_{in} = \pm 5,6\%$  (разброс показаний 11,2%),  $\delta PT_{m1} = 6,0\%$ ,  $\delta PT_{m2} = 9,5\%$

- разброс измеренных значений показателя РТ при рекомендуемых условиях проведения испытаний составляет 5,7%, т.е. уменьшается в 4,7 раза ( $\delta PT = -2,1...3,6\%$ ); максимальные значения составляющих результирующей погрешности:  $\delta PT_{in} = \pm 1,7\%$  (разброс показаний 3,4%, т.е. снижается в 3,3 раза),  $\delta PT_{m1} = 0,9\%$ , т.е. снижается в 6,7 раза,  $\delta PT_{m2} = 1,4\%$ , т.е. снижается в 6,8 раза.

Таблица 1. Результаты вычислений погрешности  $\delta PT_{in}$

| Величина         | Погрешность измерений величины, % |   |
|------------------|-----------------------------------|---|
|                  | Допускаемая ISO 8178              | Обеспечиваемая высокоточным оборудованием |
| $M_f$            | 2,7                               | 1   |
| $M_{sam}$        | 2                                 | 0,5                                       |
| $q$              | 4                                 | 1   |
| $G_{exh}$        | 4                                 | 2   |
| $P_e$            | 2 от номин. $P_e$                 | 1 от номин. $P_e$                         |
| $PT_{mass}^{cp}$ | 6,6                               | 5,2                                       |
| $P_e^{cp}$       | 2                                 | 1   |
| $PT$             | 5,6                               | 1,7                                       |

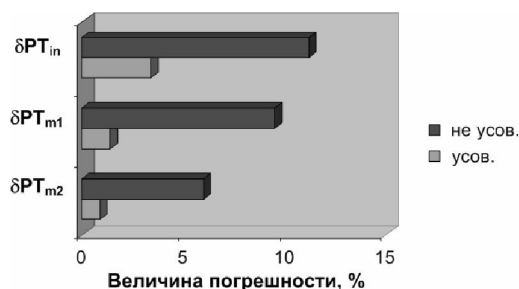


Рис. 3. Изменение составляющих погрешности  $\delta PT$  до и после совершенствования гравиметрического метода измерений

**Вывод**

В результате выполнения рекомендуемых мероприятий по усовершенствованию гравиметрического метода измерений удельного выброса дизельных ТЧ существенно возрастает его точность: разброс измеренных значений показателя РТ уменьшается в 4,7 раза – с 26,7% до 5,7%; составляющие результирующей погрешности снижаются: инструментальная - в 3,3 раза: с  $\pm 5,5\%$  до  $\pm 1,7\%$ ; методическая – в 6,8 раза: 15,5% до 2,3%.

**Список литературы:**

1. Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания / [Звонов В.А., Заиграев Л.С., Черных В.И., Козлов А.В.]; под редакцией В.А. Звонова.- Луганск: изд-во ВНУ им.В.Даля, 2004 - 268с. 2. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996. – 94 p. 3. N. Hirakouchi, Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / Hirakouchi N., I. Fukano, T. Shoji // SAE Technical Paper Series. - 1989. – № 890181. - 11p. 4. Измерения в промышленности. Справ. изд. в 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. Пер. с нем./ Под ред. Профоса П. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с. 5. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications, 1996. – 18 p.