

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).

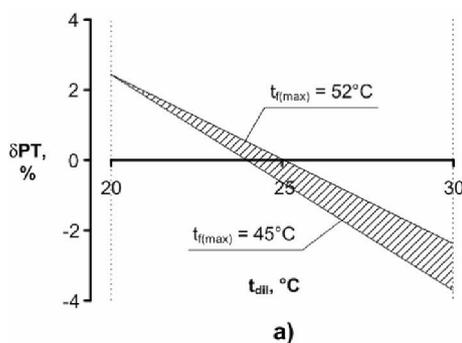
Таким образом показатель РТ – величина, определяемая косвенным путем по результатам прямых измерений величин M_{fi} , M_{sami} , q_i , G_{exhi} и P_{ei} . Погрешности определения данных величин, допускаемые нормативными документами [2], соответствуют среднему классу точности измерительного оборудования, 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 – τ_{st} , которая составляет 1 час и более [2].

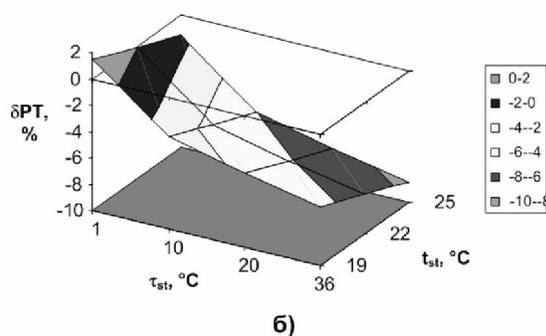


Рис. 1. Влияние условий разбавления ОГ (а) и температурной стабилизации фильтров (б) на результаты измерений показателя РТ

Причина, по которой возникает неопределенность результатов измерений показателя РТ – влияние параметров $t_{f(max)}$, t_{dil} , t_{st} и τ_{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 – δPT определяется, как сумма 3-х составляющих: инструментальной – δPT_{in} и 2-х методических – δPT_{m1} и δPT_{m2} :

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

Величина δPT_{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 δPT_{m1} и δPT_{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 δPT и ее составляющих для допустимых стандартом ISO 8178 и рекомендуемых условий проведения испытаний (рис. 2, 3). При определении инструментальной погрешности δPT_{in} использовались результаты экологических испытаний тепловозных дизелей по циклу ISO 8178-F [5] (табл. 1).

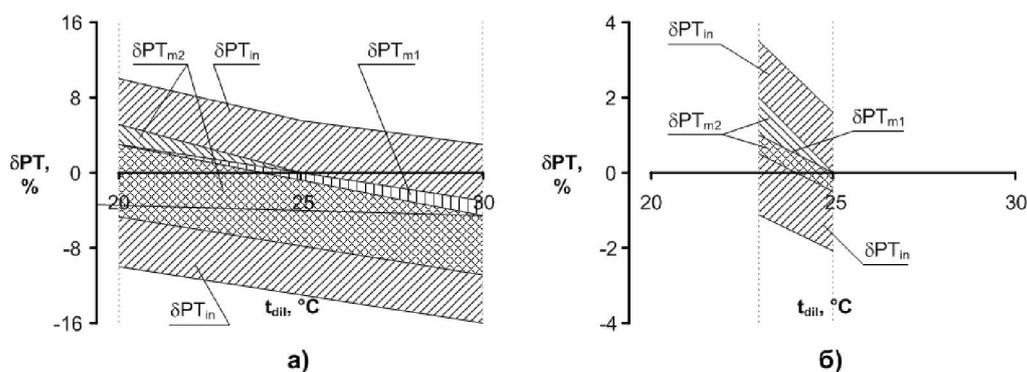


Рис. 2. Возможные диапазоны варьирования погрешности δPT :
 а) допускаемые нормативными документами;
 б) при выполнении сделанных рекомендаций

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 δPT_{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

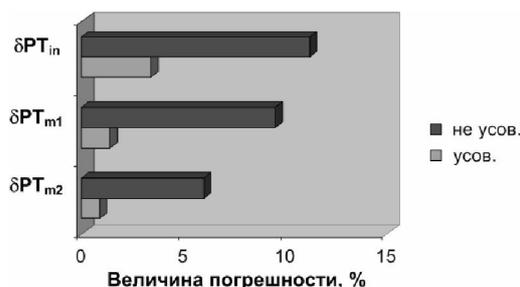


Рис. 3. Изменение составляющих погрешности δPT до и после совершенствования гравиметрического метода измерений

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.