

УДК 621.436.001.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОКИНЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОТБОРА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ В МИНИТУННЕЛЕ

Поливянчук А.П., Холкина Е. А.

RESEARCH ISOKINETIC MODE OF DIESEL EXHAUST GASES SAMPLING IN MINI-TUNNEL

Polivianchuk A., Holkina O.

Исследованы условия, обеспечивающие изокINETИЧЕСКИЙ режим отбора отработавших газов из выхлопной трубы двигателя в частично-поточной разбавляющей системе (минитуннеле). Определена зависимость перепада давления между пробоотборником минитуннеля и выхлопной трубой при изокINETИЧЕСКОМ режиме от параметров потока отработавших газов дизеля. Сделана оценка влияния на точность поддержания данного режима отклонений перепада давления между пробоотборником минитуннеля и выхлопной трубой от требуемых значений, а также пульсаций потока отработавших газов в выхлопной трубе двигателя.

Ключевые слова: минитуннель, отработавшие газы, изокINETИЧЕСКИЙ режим.

Введение

Наиболее токсичным вредным веществом, входящим в состав отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей, являются твердые частицы (ТЧ). Для ограничения поступления их в атмосферу с ОГ дизелей во многих странах установлены нормы на выбросы ТЧ дизельными двигателями и разработаны методы для их определения [1-3].

В Европе действуют Правила R-49-02 ЕЭК ООН, в которых установлена процедура определения массовых выбросов ТЧ дизелями (13-ступенчатый испытательный цикл) и описаны измерительные системы, необходимые для ее реализации. Одной из таких измерительных систем является система разбавления части потока ОГ дизельных двигателей и отбора проб ТЧ (минитуннель (МТ)) с изокINETИЧЕСКИМ пробоотборником (ИПО), схема которой представлена на рис.1.

Процедура определения массовых выбросов ТЧ с помощью МТ заключается в следующем. Дизель последовательно работает на 13-ти режимах с установленными значениями угловых скоростей и крутящих моментов на валу двигателя. При этом

часть ОГ из выхлопной трубы двигателя (ВТ) через ИПО и трубу переноса поступает в МТ, где происходит их смешивание с атмосферным воздухом.

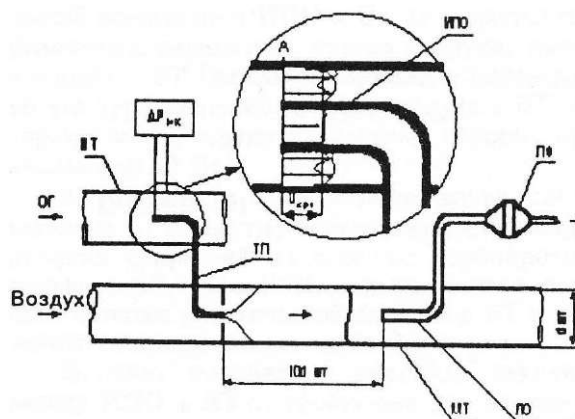


Рис.1. Схема минитуннеля с изокINETИЧЕСКИМ пробоотборником: ОГ – отработавшие газы; ВТ – выхлопная труба двигателя; ТП – труба переноса ОГ; МТ – минитуннель; ЛО – линия отбора проб ТЧ; ПФ патрон с фильтрами; ИПО – изокINETИЧЕСКИЙ пробоотборник; $\Delta P_{ИК}$ – перепад давления между ИПО и ВТ; А – сечение, в котором изменяется перепад давления $\Delta P_{ИК}$; $v_{ср1}$ – средняя скорость потока ОГ в ВТ; $d_{МТ}$ – внутренний диаметр МТ

На каждом режиме испытательного цикла часть разбавленных ОГ, масса которых пропорциональна соответствующему весовому коэффициенту, отбирается из МТ в линию отбора проб и пропускается через фильтры для отбора ТЧ. По массе ТЧ, собранных на фильтрах в ходе испытательного цикла, а также параметрам двигателя и системы разбавления определяется средневзвешенный показатель массовых выбросов ТЧ (г/кВт·ч).

Одним из основных требований, предъявляемых к данному МТ, является

обеспечение изокинетического (ИК) режима отбора ОГ из выхлопной трубы двигателя.

Изокинетическим (равноскоростным) считается такой режим отбора ОГ, при котором равны средние скорости потоков ОГ, протекающих в ИПО и в ВТ двигателя [4]. При этом массовый расход отбираемой части ОГ пропорционален массовому расходу полного потока ОГ двигателя с постоянным коэффициентом пропорциональности $\Gamma_{ик}$ (коэффициентом отбора), равным отношению площадей поперечных сечений ИПО и ВТ.

Для обеспечения ИК режима отбора ОГ Правилами R-49-02 ЕЭК ООН рекомендуется поддерживать перепад давления между ИПО и ВТ двигателя ($\Delta P_{ик}$) на нулевом уровне с точностью ± 2.5 Па. Колебания давления ОГ в ВТ при этом не должны превышать ± 500 Па. Однако, как показали испытания с ИПО, разработанным в НИИПЭ, требуемый $\Delta P_{ик} \neq 0$ и зависит от параметров потока ОГ в ВТ двигателя.

Постановка задачи

Целью исследований являлось определение условий, обеспечивающие ИК режим отбора ОГ из ВТ дизеля в минутуннель и проводилась оценка влияния на его точность различных факторов:

- погрешности перепада давления $\Delta P_{ик}$;
- пульсаций потока отработавших газов.

Исследование влияния параметров потока ОГ на перепад давления между ИПО и ВТ двигателя при ИК режиме отбора ОГ

Рассмотрим уравнение Бернулли [5], составленное для потоков, протекающих в ИПО и ВТ для плоскости А, в которой осуществляется измерение $\Delta P_{ик}$ (см. рис.1):

$$P_1 + \alpha_1(\rho v_{cp1}^2/2) = P_2 + \alpha_2(\rho v_{cp2}^2/2), \quad (1)$$

где P_1, P_2 - статические давления потоков ОГ в ВТ и ИПО, Па; α_1, α_2 - коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей потоков ОГ по сечениям ВТ и ИПО; v_{cp1}, v_{cp2} - средние скорости потоков ОГ в ВТ и ИПО, м/с; ρ - плотность ОГ в ВТ, кг/м³.

Как следует из (1), при ИК режиме отбора ОГ, т.е. в случае $v_{cp1} = v_{cp2}$, условие, когда $P_1 = P_2$ (или $\Delta P_{ик} = 0$) выполняется лишь при $\alpha_1 = \alpha_2$. Если распределения скоростей по сечениям ИПО и ВТ различны ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) $\Delta P_{ик} \neq 0$ и пропорционален скоростному напору потока ОГ в ВТ:

$$\Delta P_{ик} = (\alpha_1 - \alpha_2)(\rho v_{cp1}^2/2). \quad (2)$$

В таблице 1 приведены результаты испытаний на воздухе с ИПО, разработанным в НИИПЭ, по определению влияния параметров потока воздуха, протекающего в ВТ, на перепад давления $\Delta P_{ик}$.

Таблица 1

Результаты испытаний на воздухе с ИПО, разработанным в НИИПЭ, по определению влияния параметров потока воздуха, протекающего в ВТ, на перепад давления $\Delta P_{ик}$.

№№ п/п	Параметры потока воздуха в ВТ			$\rho v_{cp1}^2/2$, Па	$\Delta P_{ик}$, Па
	G, г/с	t, °C	$P_{вт}$, Па		
1	20.0	20	400	40.7	3.9
2	20.2	20	160	41.0	2.0
3	35.1	20	100	124.6	17.6
4	46.6	25	400	224.7	33.3
5	35.3	43	1000	135.9	21.6
6	21.7	70	1000	55.7	5.9
7	35.3	70	400	148.4	16.7
8	34.9	70	700	144.6	22.5
9	35.5	70	100	149.2	17.6
10	35.3	68	1300	146.2	16.7
11	35.2	68	1600	144.9	15.7
12	19.6	120	400	52.4	5.9
13	20.5	125	1600	57.4	4.9
14	42.8	68	1000	215.6	29.4
15	35.4	115	1000	167.8	20.6

По результатам табл.1 с помощью метода наименьших квадратов определена экспериментальная зависимость $\Delta P_{ик}$ от параметров потока воздуха, протекающего в ВТ, по формуле:

$$\Delta P_{ик} = 0.1606(\rho v_{cp1}^2/2) - 4.7. \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение данной зависимости равно 2.2 Па, что соизмеримо с погрешностью микроманометра (≈ 2 Па), используемого для определения $\Delta P_{ик}$.

Анализ (3) показывает, что:

а) разность $(\alpha_1 - \alpha_2) = 0.1606$ — постоянная величина, т.е. характер распределения скоростей по сечениям ИПО и ВТ не меняется при различных параметрах потока воздуха, протекающего в ВТ (данное утверждение справедливо для турбулентного течения воздуха в ВТ, которому соответствуют скоростные напоры, превышающие 40 Па);

б) разность $(\alpha_1 - \alpha_2)$ положительна, следовательно $\alpha_1 > \alpha_2$, т.е. неравномерность распределения скоростей по сечению трубопровода больше в ВТ, чем в ИПО, что приводит к большим потерям кинетической энергии в ВТ и снижению статического давления P_1 .

Исследование влияния отклонений перепада давления между ИПО и ВТ от требуемых для обеспечения ИК режима отбора ОГ значений на погрешность коэффициента отбора

При отклонениях $\Delta_{ик}$ перепада давления между ИПО и ВТ от $\Delta P_{ик}$ средние скорости потоков в этих трубопроводах отличаются на величину

$$\delta v = (v_{cp2} - v_{cp1}) / v_{cp1} \quad (4)$$

Как следует из выражения (4), средняя скорость потока ОГ, протекающего в ИПО, равна

$$v_{cp2} = v_{cp1}(1 + \delta v) \quad 5$$

Определим связь между относительной погрешностью коэффициента отбора δr и относительным изменением скорости потока ОГ, протекающего в ИПО:

$$\delta r = (r - r_{ик}) / r_{ик} = (g/G - g_{ик}/G) / (g_{ик}/G) = (\rho S_2 v_{cp2} - \rho S_2 v_{cp1}) / \rho S_2 v_{cp1} = \delta v, \quad (6)$$

где r – действительный коэффициент отбора ОГ; g , G – массовые расходы потоков ОГ, протекающих в ИПО и ВТ; $g_{ик}$ – массовый расход потока ОГ в ИПО при ИК режиме; S_2 – площадь поперечного сечения ИПО.

Таким образом, погрешность коэффициента отбора равна относительному изменению средней скорости потока, протекающего в ИПО.

Учитывая выражения (5) и (6), уравнение Бернулли для рассматриваемых потоков можно привести к следующему виду:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \alpha_1(\rho v_{cp1}^2/2) - \alpha_2(\rho v_{cp1}^2/2)(1 + \delta r)^2.$$

Выполнив необходимые преобразования и учитывая зависимость (2), получим:

$$\Delta_{ик} = \Delta P - \Delta P_{ик} = -\alpha_2(\rho v_{cp1}^2/2) \times (2\delta r + \delta r^2). \quad (7)$$

В табл.2 приведены результаты экспериментальных исследований на воздухе, в ходе которых определялись погрешности коэффициента отбора δr , обусловленные отклонениями $\Delta_{ик}$, при различных скоростных напорах потока воздуха в ВТ ($\rho v_{cp1}^2/2$, Па).

Таблица 2
Результаты экспериментальных исследований на воздухе, в ходе которых определялись погрешности коэффициента отбора δr , обусловленные отклонениями $\Delta_{ик}$, при различных скоростных напорах потока воздуха в ВТ ($\rho v_{cp1}^2/2$, Па)

$\Delta_{ик}$ Па	64.4 Па	122.6 Па	295.1 Па
-20	13.7	7.9	3.2
-10	7.4	3.3	2.5
-5	3.7	2.1	0.7
0	1.0	0.5	-0.2
5	-4.3	-1.1	-0.6
10	-6.0	-4.0	-1.6
20	-17.1	-7.3	-2.4

По данным табл.2 был рассчитан коэффициент α_2 . Полученный результат ($\alpha_2 = 1.057$) показывает,

что распределение скоростей по сечению ИПО близко к равномерному. Учитывая значение разности коэффициентов α_1 и α_2 , получим $\alpha_1 = 1.218$, что соответствует степенному закону распределения скоростей в ВТ [6].

Решив выражение (7) относительно δr , получим:

$$\delta r = -1 + (1 - 2\Delta_{ик} / \alpha_2 \rho v_{cp1}^2)^{1/2}. \quad (8)$$

С помощью (7) можно определить требования к точности поддержания $\Delta P_{ик}$ на заданном уровне на различных режимах работы двигателя. Для этого необходимо задаться величиной δr и, рассчитав значения скоростных напоров ОГ в ВТ двигателя для различных режимов его работы, определить по (7) допустимые отклонения $\Delta_{ик}$ для каждого режима.

Так, для двигателя Д-240 для обеспечения ИК режима отбора ОГ с погрешностью $\delta r \leq 3\%$ необходимо поддерживать перепад давления $\Delta P_{ик}$ с такой точностью: ± 5 Па на режиме холостого хода; $\pm (20-40)$ Па на режимах со средней скоростью; $\pm (70-80)$ Па на режимах с номинальной скоростью.

Погрешность измерения $\Delta P_{ик} = \pm 2.5$ Па, приведенная в Правилах R-49-02 ЕЭК ООН, обеспечивает погрешность коэффициента отбора $\delta r = 1\%$ и имеет значение только на режиме холостого хода двигателя, на котором скоростной напор минимален.

Исследование влияния пульсаций потока ОГ в ВТ двигателя на погрешность коэффициента отбора

Для оценки возможности применения зависимости (3) в условиях пульсирующего потока были проведены испытания, в ходе которых определялись погрешности коэффициента отбора δr , обусловленные колебаниями потока воздуха в ВТ с различными амплитудой и частотой. Результаты испытаний представлены на рис.2 Колебания давления в ВТ оказывают значительное влияние на коэффициент отбора ОГ, причем амплитуда колебаний давления является преобладающим фактором.

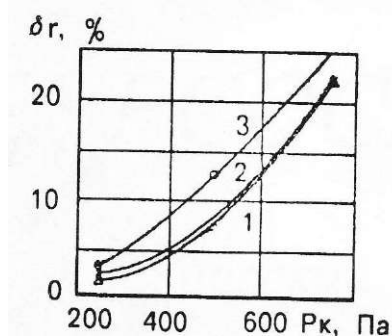


Рис. 2. Влияние пульсаций потока ОГ на погрешность коэффициента отбора δr амплитуды колебаний R_k и частоты колебаний, Гц: 1 - 8; 2 - 16; 3 - 24

Причина данного эффекта заключается в том, что в пульсирующем потоке изменяется характер распределения скоростей по сечениям ИПО и ВТ, что приводит к изменению α_1 и α_2 . Положительное значение погрешности бг говорит о том, что разность ($\alpha_1 - \alpha_2$) увеличивается, т.е. потери кинетической энергии на неравномерность распределения скоростей в ВТ возрастают в большей степени, чем в ИПО.

Таким образом, для обеспечения ИК режима отбора ОГ в условиях пульсирующего потока необходимо либо ограничивать колебания давления в ВТ и использовать зависимость (3) для определения $\Delta P_{ИК}$, либо определять новую зависимость для $\Delta P_{ИК}$ в реальных условиях работы двигателя.

Вывод

Определена экспериментальная зависимость перепада статических давлений между пробоотборником минутуннеля и ВТ дизеля, при котором обеспечивается ИК режим отбора ОГ. Оценена точность данной зависимости и даны рекомендации ее использования в условиях пульсирующего потока ОГ.

Л и т е р а т у р а

1. Walsh M.P. Costs and benefits of diesel particulate control // SAE Techn. Pap. Ser - 1984 - № 840177. - P. 161-169.
2. Environmental Protection Agency. Standard for emission of particulate regulation for diesel-fueled light-duty vehicles and light-duty trucks//Federal Register. - 1980. - Vol. 45, № 45. - March.
3. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. - United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. - E/ECE/TRANS/505. - 4 May 2011. - 194 p.
4. Nobuyoshi Hiracouchi, Isumi Fucano, Taceshi Shoi Measurement of diesel exhaust emission with mini-dilution tunnel //SAE Techn. Pap Ser - 1989 - № 890181. - 12 p.
5. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. - М. : Машиностроение, 1967. — 368 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М. : Машиностроение, 1975 - 559 с

R e f e r e n c e s

1. Walsh M.R. Costs and benefits of diesel particulate control // SAE Techn. Pap. Ser - 1984 - № 840177. - P. 161-169.
2. Environmental Protection Agency. Standard for emission of particulate regulation for diesel-fueled light-duty

vehicles and light-duty trucks//Federal Register. - 1980. - Vol. 45, № 45. - March.

3. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. - United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. - E/ECE/TRANS/505. - 4 May 2011. - 194 p.
4. Nobuyoshi Hiracouchi, Isumi Fucano, Taceshi Shoi Measurement of diesel exhaust emission with mini-dilution tunnel //SAE Techn. Pap Ser - 1989 - № 890181. - 12 p.
5. Nekrasov B.B. Gidravlika i ee primenenie na letatel'nyh apparatah. - M. : Mashinostroenie, 1967. — 368 s.
6. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam. - M. : Mashinostroenie, 1975 - 559 s

Полив'янчук А.П., Холкіна О.О. Дослідження ізокінетичного режиму відбору відпрацьованих газів дизеля у мінітуннелі

Досліджено умови, що забезпечують ізокінетичний режим відбору відпрацьованих газів з викидної труби двигуна у частково-поточній розбавлюючій системі (мінітуннелі). Визначено залежність перепаду тиску між пробовідбірником мінітуннеля та викидною трубою при ізокінетичному режимі від параметрів потоку відпрацьованих газів дизеля. Зроблено оцінку впливу на точність підтримання даного режиму відхилень перепаду тиску між пробовідбірником мінітуннеля та викидною трубою від потрібних значень, а також пульсації потоку відпрацьованих газів у викидній трубі двигуна.

Ключові слова: мінітуннель, відпрацьовані гази, ізокінетичний режим

Polivianchuk A., Holkina O. Research isokinetic mode of diesel exhaust gases sampling in mini-tunnel

The conditions ensuring isokinetic mode of exhaust gases sampling from the engine exhaust pipe in a part-flow dilution system (mini-tunnel) have been investigated The relation of a pressure differential between a sampler of mini-tunnel and exhaust pipe at isokinetic mode from flow parameters of diesel exhaust gases has been determined The assessment of influencing on accuracy of the given mode maintenance of pressure differential deviations between a sample of mini-tunnel and exhaust pipe from desired values, and also flow fluctuations of exhaust gases in a engine exhaust pipe of engine has been carried out.

Keywords: mini-tunnel, exhaust gases, isokinetic mode

Полив'янчук Андрій Павлович – д.т.н., доцент, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП» (м. Харків)

Холкіна Олена Олександрівна – інженер Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Северодонецьк)

Рецензент: Суворін О. В. – д.т.н., доцент.