

СОДЕРЖАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАННЫХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

Г. М. Кашкаров

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Приведены экспериментальные исследования параметров влияющих на качество очистки отработанных газов дизеля. Дисперсный состав частиц регистрировался методом цифровой голографии и определялся по голограмме на ПЭВМ. Установлено, что в фильтрующих элементах остается значительное количество твердых частиц, вносящих существенный массовый вклад в отработанные газы, выходящие из выхлопной трубы, но при этом каталитический нейтрализатор практически не задерживает частицы, средний диаметр которых менее 2,5 мкм. При большом количестве такие частицы обладают значительной площадью поверхности и представляют собой большую экологическую опасность.

Ключевые слова: дисперсный состав твердых частиц, отработанные газы, каталитический нейтрализатор, масса частиц

THE SOLIDS CONTENT IN THE WASTE GASES OF DIESEL

G. M. KASHKAROV

Altai state technical university, Barnaul, Russia

Experimental investigation of the parameters affecting the quality of the diesel exhaust gas purification. The particulate composition of the particles was recorded by a digital hologramgraphy and was determined by the hologram on the PC. It is found that in the filter elements is a significant amount of solids, making a substantial contribution to the mass in the exhaust gases exiting the exhaust pipe, but the catalyst is not substantially retains particles with an average diameter of less than 2.5 microns. With a large number of such particle hour possess large surface area and are a major environmental threat.

Ключевые слова: particulate composition of solid particles, waste gases, the catalytic hercentralizer, the mass of particles

Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработанными газами значительное количество твердых частиц сажи. Твердые частицы при сгорании углеводородных топлив имеют различную дисперсность. В отработанных газах сажа находится в виде образований неправильной формы с линейными размерами от 0,3 до 100 мкм, зависящими от режима эксплуатации дизеля. Наибольшая масса частицы диаметром около 10 мкм, например, имеет массу порядка 10^{-10} мг. [1, 2, 3]. Это позволяет частице сажи длительное время находиться в атмосфере во взвешенном состоянии.

Поскольку спектр выбросов отработанных газов очень широк и зависит как от режима работы двигателя, так и от состава топлива и присадок к нему, методы исследования качественного и количественного состава выбросов чрезвычайно разнообразны.

В данной работе приведены экспериментальные исследования параметров влия-

ющих на качество очистки отработанных газов дизеля. Дисперсный состав частиц регистрировался методом цифровой голографии и определялся по голограмме на ПЭВМ

Экспериментальная установка для измерения дисперсного состава конденсированной фазы отработанных газов дизеля состоит из конструкции по забору сажи из выхлопного коллектора, гелий-неонового лазера ЛГ-72, скоростной видеокамеры VS-СТТ-285-2001, коллиматора, диафрагмы, персональной электронной вычислительной машины, крепежной станины и трубки подвода части отработанных газов (ОГ) от двигателя к установке. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. На рисунке 1 обозначены: 1 – лазер ЛГ-72; 2 – коллиматор; 3 – диафрагма; 4 – трубка-подвод ОГ; 5 – скоростная видеокамера VS-СТТ-285-2001; 6 – крепежная станина; 7 – зонд для отбора ОГ; 8 – прямой участок выхлопного коллектора; 9 – гибкий подвод ОГ к установке.

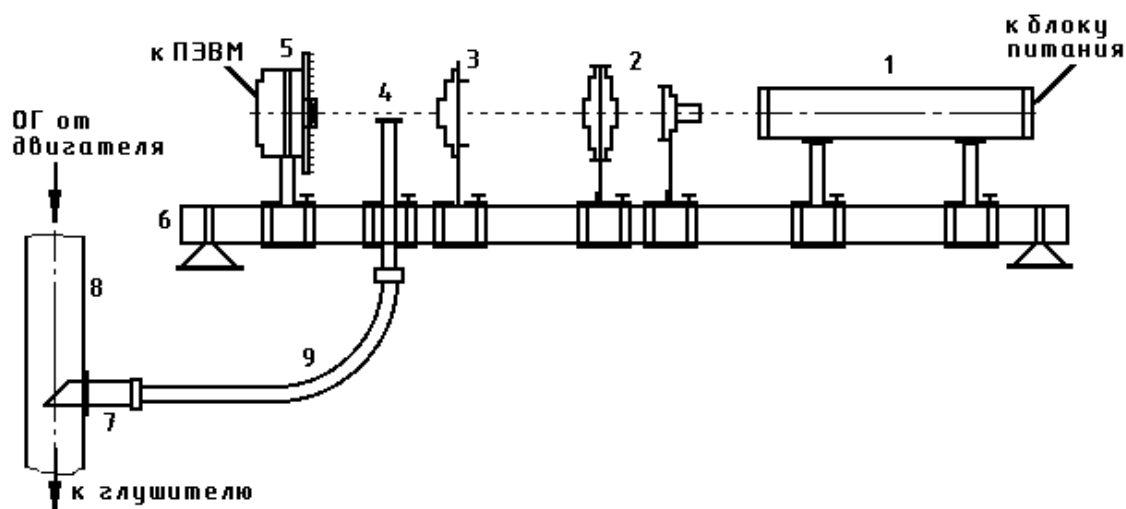


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем: с помощью устройства по забору сажи из выхлопного коллектора, которое представляет собой зонд – 7, в виде металлической трубки, срезанной под углом и вмонтированной в прямой участок выхлопного коллектора – 8, срезом навстречу потоку отработанных газов, отработанные газы по гибкому подводу – 9, через трубку-подвод – 4 поступают в измерительную зону установки. Излучение лазера – 1 через коллиматор – 2, который состоит из 2-х линз и служит для увеличения размеров лазерного луча, что необходимо для полной засветки матрицы видеокамеры, и диафрагму – 3, необходимую для обрезания части луча по размеру матрицы, проходит через область отработанных газов и попадает на матрицу скоростной видеокамеры – 5. Считываемые значения поступают непосредственно в ПЭВМ, где проходят обработку компьютерной программой, которая после обработки экспериментальных данных выдает информацию о размерах твердых частиц в отработанных газах.

При определении влияния избытка окислителя в реакторе фильтра на параметры твердых частиц в конденсированной фазе в качестве источника газов использовался четырехтактный дизель с расходом газов $V_{ог}=1150 \text{ м}^3/\text{ч}$. Параметры фильтров следующие: средний диаметр пор составлял $d_p = 150 \text{ мкм}$, коэффициент извилистости пор $\zeta_n = 1,27$, пористость $P = 0,425$, толщина стенок $\delta_{ст}=12 \text{ мм}$, объем пористого материала фильтра составлял $2,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Методами проведения исследования явилось зондирование полостей реактора в

продольных по сечениям направлениях, отбор газов из полостей реактора для исследования их физических параметров частиц методом цифровой голографии, с последующей компьютерной обработкой результатов.

Испытания дизеля (автомобиль «Урал»), как источника конденсированной фазы, проводились на топливе по ГОСТ 3053-82 Л-0.2-40, использовалось масло МТ-16П. Условия испытаний были следующими: температура окружающей среды $T_0 = 290...398 \text{ К}$, атмосферное давление $P_0 = 756...760 \text{ мм рт. ст.}$, влажность воздуха $W_0 = 50...55 \text{ \%}$.

В таблице 1 приведены сравнительные данные зондирования полостей каталитических нейтрализаторов и прямых измерений содержания твердых частиц в полостях реактора, разделенных пористой проницаемой стенкой СВС - блока, в зависимости от коэффициента избытка воздуха. С ростом коэффициента избытка воздуха от 2,2 до 7,3 удельные выбросы твердых частиц уменьшаются с 2,4 до 0,3 раз. При низких избытках воздуха в реакторах содержание твердых частиц в отработанных газах по результатам оптического зондирования и прямых измерений имеют близкие значения. Удельные выбросы твердых частиц снижаются с увеличением избытка воздуха, что указывает на процесс окисления частиц на катализаторе в присутствии кислорода. Температура газов после прохождения через пористый СВС - фильтр возрастает приблизительно на 25К. Последнее указывает на наличие процесса догорания продуктов неполного сгорания: оксида углерода, углеводородов и твердых частиц (таблица 1). С ростом избытка воздуха перепад температур до и после

СОДЕРЖАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАННЫХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

фильтра достигает 52 градуса. С увеличением коэффициента избытка воздуха α с 2,2 до 7,3 удельная концентрация твердых частиц Стч снижается с 0,12 до 0,01 г/м³ на входе в СВС - блок и на выходе из СВС - блока она находится в пределах 0,01...0,02 г/м³. Эффективность очистки составляет 92 %.

После первой ступени каталитического нейтрализатора концентрация твердых частиц Стч уменьшается на 33 % при $\alpha = 3$ и на 66 % при $\alpha = 6$. С изменением α от 2,2 до 7,3 температура отработанных газов Тог уменьшается на 15,6 %.

Таблица 1 – Выбросы твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания топлива в зависимости от коэффициента избытка воздуха в реакторе

Коэффициент избытка воздуха, α	Оптическое зондирование			Прямые измерения	
	Удельные выбросы твердых частиц, г/(кВт·ч)		Температура: до фильтра/ после фильтра, К	Удельные выбросы твердых частиц, г/(кВт·ч)	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
2,2	0,730	0,049...0,30	775/800	0,72	0,32
3,2	0,557	0,03...0,246	748/775	0,64	0,25
4,0	0,345	0,02...0,23	715/745	0,36	0,22
7,3	0,005	0,001...0,015	643/695	0,01	0,003

Температура конденсированной фазы увеличивается при прохождении через фильтрующую стенку, что свидетельствует о существовании изотермических процессов в реакторе фильтра. Конденсированная фаза после фильтров имеет более высокую плотность вдоль стенок блоков.

На рисунке 2а приведено распределение твердых частиц по размерам средних приведенных диаметров. Из графиков видно, что отдельные частицы имеют $D_{тч} \geq 12$ мкм, но основная их доля до 35 % приходится на частицы с $D_{тч} = 4$ мкм. После фильтра (рисунок 2б) основная доля частиц с $D_{тч} = 2$ мкм составляет всего 7 %. Это свидетельствует о том, что фильтр задерживает частицы и до 3...4 мкм.

При увеличении избытка воздуха до $\alpha = 4,0$ (рисунок 3а) перед фильтром до 14 % составляют частицы с $D_{тч} = 4$ мкм, до 8 % частицы с $D_{тч} = 2$ мкм. После фильтра (рисунок 3б) увеличивается доля частиц с $D_{тч} = 2$ мкм и незначительная доля (до 1 %) приходится на частицы с $D_{тч} = 4...14$ мкм.

Увеличение избытка воздуха в реакторе перед СВС-фильтром с $\alpha = 1,3$ до $\alpha = 2,2$ приводит к тому, что происходит перераспределение соотношения твердых частиц топливного происхождения с 67 до 42 %, возрастает количество частиц масляного происхождения с 33 до 58 %, что

изменяет условия фильтрации через пористую проникаемую стенку (таблица 2).

На основании вышесказанного можно сделать выводы о следующем: увеличение избытка воздуха в реакторе нейтрализатора приводит к более интенсивному окислению продуктов неполного сгорания, сопровождающееся выделением тепла; увеличение избытка воздуха приводит к качественному перераспределению в сторону снижения выбросов частиц топливного и увеличению частиц масляного происхождения, что изменяет условия фильтрования газов; в пористых материалах со средним размером пор до 150 мкм удерживаются твердые частицы с приведенным диаметром до 3 – 4 мкм; конденсированная фаза продуктов сгорания СВС - фильтров имеет более высокую плотность вдоль стенок блоков.

С увеличением противодавления на выходе из реактора содержание твердых частиц (Мтч) в газах увеличивается в 1,3 раза, а эффективность очистки (Стч) снижается с 77 до 72 %.

Из данных таблицы 3 видно, что температура газов после фильтра повышается на 45...60 К. Это свидетельствует о присутствии экзотермической реакции окисления продуктов неполного сгорания в пористых каталитических структурах.

При увеличении противодавления на выходе из реактора с 350 до 1350 мм вод. ст. происходит рост выбросов твердых частиц, причем доля сажистых частиц топливного происхождения (таблица 4) увеличивается с 28 до 38 %, а содержание сажистых частиц масляного происхождения увеличивается с 18 до 21 % по массе.

Результаты обработки экспериментальных данных распределения твердых частиц по размерам средних приведенных диаметров и по различным фильтрам показывают, что при низких противодавлениях преобладающие размеры твердых частиц до СВС - фильтра составляют 2...4 мкм.

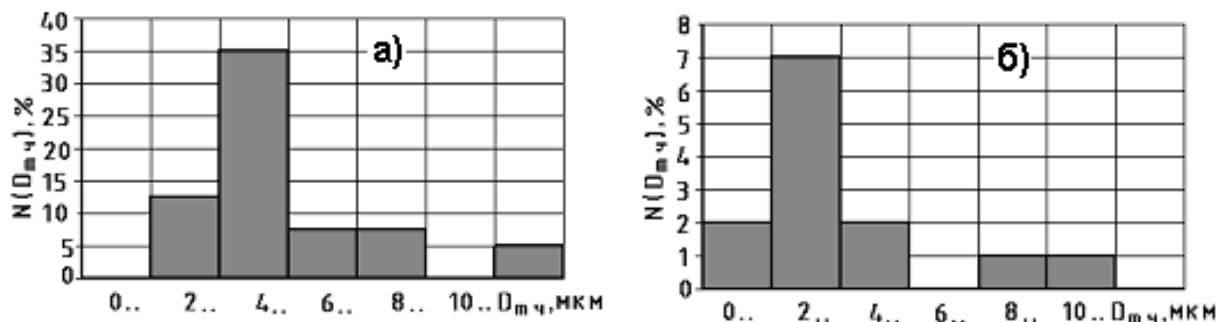


Рисунок 2 – Характер распределения твердых частиц при $\alpha = 2,2$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС-фильтра; б) после СВС-фильтра

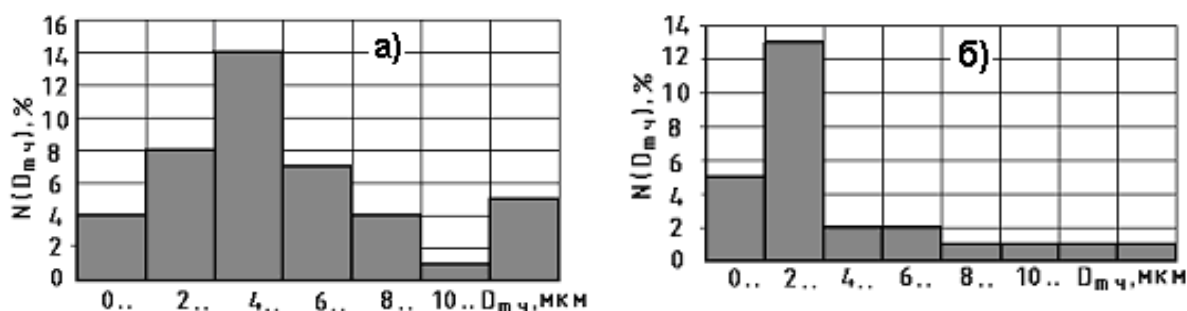


Рисунок 3 – Характер распределения твердых частиц при $\alpha = 4,0$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС - фильтра; б) после СВС - фильтра

Таблица 2 – Состав твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от избытка воздуха в реакторе

Коэффициент избытка воздуха в реакторе, α	Концентрация частиц топливного происхождения, %				Концентрация частиц масляного происхождения, %			
	Сажистые	Органически растворимые	Сульфаты воды	Итого	Сажистые	Органически нерастворимые	Органически растворимые	Итого
1,3	38	17	12	67	3	20	10	33
1,5	30	19	8	57	12	21	10	43
1,75	25	18	7	50	18	22	10	50
2,2	18	16	8	42	21	25	12	58

СОДЕРЖАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАННЫХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

Таблица 3 – Выбросы твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания в пористых проницаемых СВС-блоках при увеличении противодавления на выпуске из реактора

Противодавление на выпуске из реактора нейтрализатора, Рвып, мм вод. ст.	Оптическое зондирование			Прямые измерения	
	Концентрация твердых частиц, $c_{тч}$, г/м ³		Температура: до фильтра/ после фильтра, К	Концентрация твердых частиц $c_{тч}$, г/м ³	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
350	0,167	0,038	720/780	0,165	0,036
700	0,186	0,042	790/820	0,184	0,044
1100	0,211	0,054	835/880	0,205	0,050
1350	0,219	0,062	860/905	0,215	0,052

Таблица 4 – Состав твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания в пористых СВС-блоках в зависимости от противодавления на выпуске из реактора

Противодавление на выпуске из реактора, Рвып., мм вод. ст.	Концентрация частиц топливного происхождения, %				Концентрация частиц масляного происхождения, %			
	Сажистые	Органически растворимые	Сульфаты воды	Итого	Сажистые	Органически нерастворимые	Органически растворимые	Итого
350	28	8	13	50	18	19	13	50
700	30	10	13	53	18	17	12	47
1100	34	14	12	60	19	10	11	40
1350	38	14	12	64	21	5	10	36

Таблица 5 – Выбросы твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от времени, отведенного на процесс сгорания

Время, отведенное на процесс сгорания, $T_{сг}$, мс	Оптическое зондирование			Прямые измерения	
	Концентрация твердых частиц, $c_{тч}$, г/м ³		Температура: до фильтра / после фильтра, К	Концентрация твердых частиц, $c_{тч}$, г/м ³	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
2,6	0,146	0,055	750/800	0,15	0,06
3,0	0,176	0,060	720/790	0,18	0,065
3,1	0,184	0,062	630/700	0,19	0,070
4,5	0,096	0,033	330/470	0,10	0,04

При увеличении противодавления до 1350 мм вод. ст., когда наблюдается неполное сгорание, преобладающими размерами твердых частиц являются 2...10 мкм. При осуществлении фильтрации в пористых блоках при противодавлении 350 мм вод. ст. основная часть твердых частиц имеет размеры 2...4 мкм, а при противодавлении 1350 мм вод. ст. размер частиц 2 мкм составляет только 3 %, частиц до 4 мкм - 6 %. В результате проведенных экспериментов можно сделать выводы о следующем: увеличение противодавления на выходе из реактора с 350 до 1350 мм вод. ст. приводит к увеличению выбросов твердых частиц с газами с 0,167 до 0,219 г/м³; качество очистки в СВС - фильтрах в пределах указанного увеличения противодавления составляет 11...72 %; основная масса неотфильтрованных твердых частиц имеет размеры средних приведенных диаметров в пределах 1...6 мкм. Увеличение времени, отведенного на процесс сгорания с 2,6 до 4,5 мс, приводит к увеличению полного сгорания топлива и снижению содержания твердых частиц в газах в 1,5 раза (таблица 5). Если обратить внимание на изменение температуры газов при прохождении через пористую стенку фильтра, то можно обнаружить ее стабильное увеличение на 50...80°.

ВЫВОДЫ

1. По результатам исследований трехступенчатого каталитического нейтрализатора на автомобиле «Урал» можно в полной мере судить об эффективности процесса очистки. Действительно, в фильтрующих элементах остается значительное количество твердых частиц, вносящих существенный массовый вклад в отработанные газы, выходящие из выхлопной трубы, но при этом данный каталитический нейтрализатор практически не задерживает частицы, средний диаметр которых менее 2,5 мкм. Хотя существенного массового вклада они не вносят,

но при большом их количестве обладают значительной площадью поверхности и представляют собой большую экологическую опасность.

2. На процесс фильтрования частиц оказывает влияние избыток окислителя в реакторе фильтра. По данным зондирования и прямых измерений при увеличении избытка воздуха в реакторе фильтра с $\alpha = 2,2$ до $\alpha = 7,3$ температура после фильтра повышается соответственно на 25...52 градуса, что свидетельствует о наличии экзотермических реакций в пористой стенке фильтра.

3. При увеличении избытка окислителя в продуктах сгорания увеличивается доля частиц масляного происхождения, что изменяет условия фильтрования конденсированной фазы.

4. На качество фильтрования большое влияние оказывает увеличение противодавления на выпуске из реактора сажевого фильтра.

Список литературы

1. Белинский, Л. М. Теплоизлучение в камерах сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия / Л. М. Белинский // Труды НИЛД. - М.: Машгиз, 1955. - № 1 - С.83-113.
2. Lee S.C., Tien C.L. Proc. 18th Int. Symposium. Combustion Inst., 1981, № 1159, P.22-28.
3. Лоскутов, А.С. Исследование механизмов образования топливных окислов азота и сажи в цилиндре дизеля: Дис. канд. техн. наук / ЛПИ. Л., 1983. - 293 с.

Кашкаров Геннадий Михайлович – к. т. н., доцент

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия