

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

В.В. Бразовский, Г.М. Кашкаров, А.А. Ситников,
Н.П. Тубалов, В.И. Яковлев, М.А. Коломеец

Приведены исследования параметров отработанных газов дизельного двигателя при прохождении их через каталитические нейтрализаторы. Дисперсный состав частиц регистрировался методом цифровой голографии с прямым вводом результатов измерений в персональную электронную вычислительную машину (ПЭВМ) и последующей компьютерной обработкой. На качество очистки газов от твердых частиц оказывает существенное влияние избыток воздуха в реакторе нейтрализатора, противодействие на выпуске, угар смазочного масла в дизеле, удельная площадь фильтра, после фильтра повышается температура отработанных газов, что свидетельствует о наличии экзотермических реакций в пористой стенке фильтра.

Ключевые слова: отработанные газы дизеля, каталитический нейтрализатор, дисперсный состав частиц, метод цифровой голографии, концентрация твердых частиц, коэффициент избытка воздуха, противодействие на выпуске, угар смазочного масла, удельная площадь фильтра, температура отработанных газов.

Введение

Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработанными газами значительное количество твердых частиц сажи, часть из которых обладает канцерогенными свойствами [1-4]. Твердые частицы при сгорании углеводородных топлив имеют различную дисперсность. Дисперсность существенно зависит от условий и режимов сжигания топлив. В понятие «твердые частицы», кроме сажевых частиц, включаются частицы топлива, масел, твердые органически нерастворимые и органически растворимые фракции продуктов разложения углеводородов, сульфаты воды.

Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. 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 [5]. 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 вы-

бросов чрезвычайно разнообразны.

В данной работе приведены исследования параметров влияющих на качество очистки отработанных газов дизеля. Дисперсный состав частиц регистрировался методом цифровой голографии и определялся по голограмме на ПЭВМ

Экспериментальная установка

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.

Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем: с помощью устройства по забору сажи из выхлопного коллектора, которое представляет собой зонд - 1, в виде металлической трубки, срезанной под углом и вмонтированной в прямой участок выхлопного коллектора - 2, срезом навстречу потоку отработанных газов, отработанные газы по гибкому подводу - 3, через трубку-подвод -4 поступают в измерительную зону установки. Излучение лазера - 5 через

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

коллиматор - 6, который состоит из 2-х линз и служит для увеличения размеров лазерного луча, что необходимо для полной засветки матрицы видеокамеры, и диафрагму - 7, необходимую для обрезания части луча по размеру матрицы, проходит через область отработанных газов и попадает на матрицу скоростной видеокамеры - 8. 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.

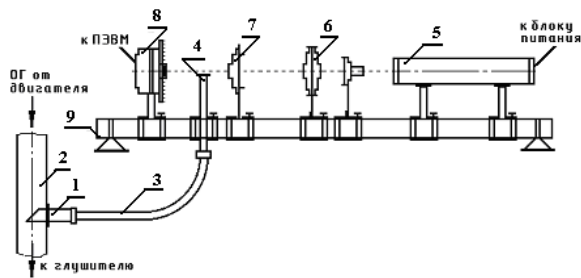


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки:
1 - зонд для отбора ОГ; 2 - прямой участок выхлопного коллектора; 3 - гибкий подвод ОГ к установке; 4 - трубка-подвод ОГ; 5 - лазер ЛГ-72; 6 - коллиматор; 7 - диафрагма; 8 - скоростная видеокамера VS-СТТ-285-2001; 9 - крепежная станина

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 $\zeta_m=1,27$, пористость $P=0,425$, толщина стенок $\delta_{ст}=12 \text{ мм}$, объем пористого материала фильтра составлял $2,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Для проведения исследований производилось 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 $T_о=290..398 \text{ К}$, атмосферное давление $P_о=756..760 \text{ мм рт. ст.}$, влажность воздуха $W_о=50..55\%$.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования концентраций твердых частиц в полостях реактора нейтрализатора, проведенного методом продольного зондирования, и температур в полостях реактора, разделенных СВС - блоками, приведены на графиках рисунка 2. Здесь номера кривых и на последующих рисунках соответствуют линиям зондирования.

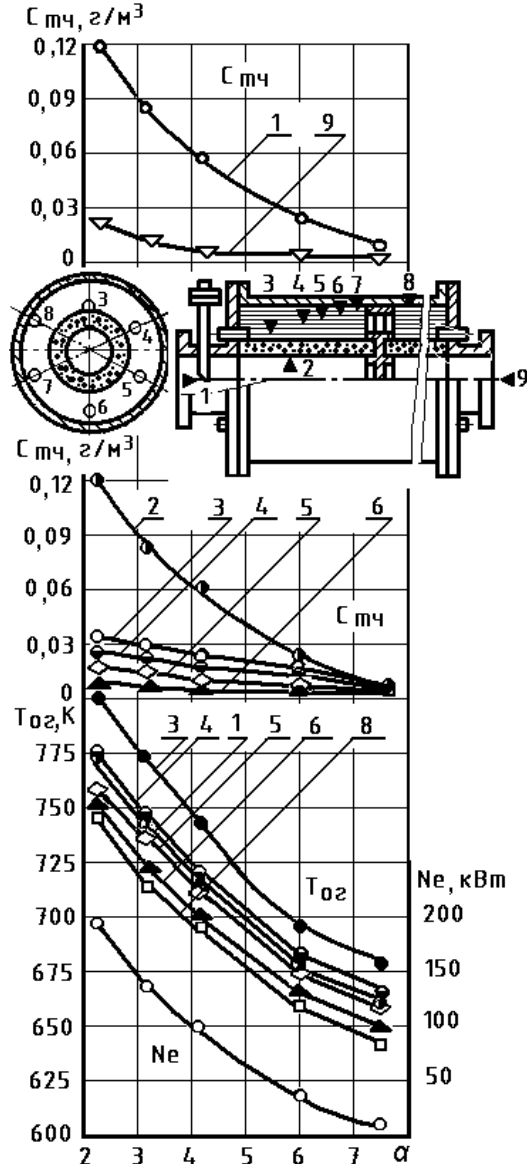


Рисунок 2 - Зависимости качества очистки газов от твердых частиц в пористых СВС -- каталитических фильтрах от коэффициента избытка воздуха в реакторе нейтрализатора

В таблице 1 приведены сравнительные данные зондирования полостей каталитических нейтрализаторов и прямых измерений содержания твердых частиц в полостях реак-

тора, 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, а температура отработанных газов увеличивается с 25 до 52 К.

При низких избытках воздуха в реакторах содержание твердых частиц в отработанных газах по результатам оптического зондирования и прямых измерений имеют близкие значения (см. таблицу 1). 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 25 К. Последнее указывает на наличие процесса догорания продуктов неполного сгорания: оксида углерода, углеводородов и твердых частиц (см. таблицу 1). С ростом избытка воздуха перепад температур до и после фильтра достигает 52 К. 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 (см. рисунок 2). 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 $T_{ог}$ уменьшается на 15,6%.

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 3, а приведено распределение твердых частиц по размерам средних приведенных диаметров. Из графиков видно, что отдельные частицы имеют $D_{т.ч} \geq 12$ мкм, но основная их доля до 35% приходится на частицы с $D_{т.ч} = 4$ мкм. После фильтра (см. рисунок 3, б) основная доля частиц с $D_{т.ч} = 2$ 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 4, а) перед фильтром до 14% составляют частицы с $D_{т.ч} = 4$ мкм, до 8% частицы с $D_{т.ч} = 2$ мкм. После фильтра (см.

рисунок 4, б) увеличивается доля частиц с $D_{т.ч} = 2$ мкм и незначительная доля (до 1 %) приходится на частицы с $D_{т.ч} = 4...14$ 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 проницаемую стенку (см. таблицу 2).

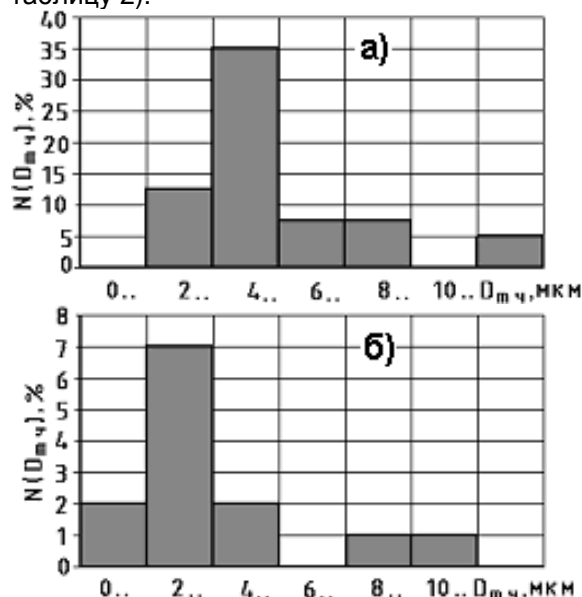


Рисунок 3 - Характер распределения твердых частиц при $\alpha = 2,2$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС - фильтра; б) после СВС - фильтра

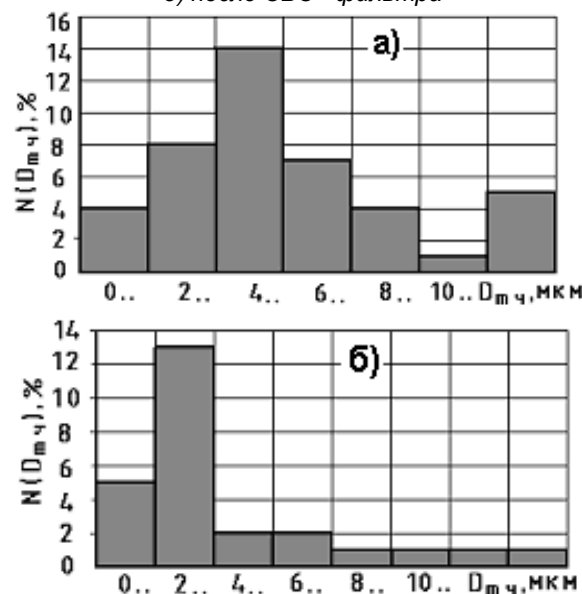


Рисунок 4 - Характер распределения твердых частиц при $\alpha = 4,0$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС - фильтра; б) после СВС - фильтра

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

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 имеет более высокую плотность вдоль стенок СВС - блоков. Результаты исследования концентраций твердых частиц в полостях реактора фильтров, проведенного методом продольного многоканального зондирования и температур в полостях реактора, разделенных СВС - блоками, приведены на графиках рисунка 5. В таблице 3

приведены сравнительные данные зондирования полостей каталитических нейтрализаторов и прямых измерений содержания твердых частиц в полостях реактора, разделенных пористой проницаемой стенкой СВС - блока.

При зондировании полостей реактора данные о содержании твердых частиц в конденсированной фазе имеют хорошую, в пределах 1 ...2%, сходимость результатов с прямыми измерениями методом отбора газов из реактора (см. таблицу 3). 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 графиков рисунков 5 и 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.

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

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

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

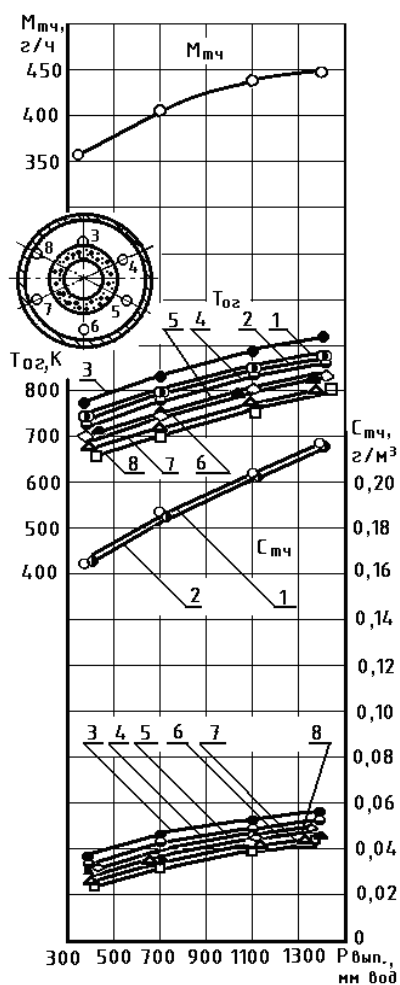


Рисунок 5 - Влияние противодействия на выпуске из нейтрализатора на качество очистки газов от твердых частиц в пористых СВС - каталитических блоках

При увеличении противодействия на выходе из реактора с 350 до 1350 мм вод. ст. происходит рост выбросов твердых частиц, причем доля сажистых частиц топливного происхождения (см. таблицу 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 противодействиях преобладающие размеры твердых частиц до СВС - фильтра составляют 2...4 мкм. При увеличении противодействия до 1350 мм вод. ст., когда наблюдается неполное сгорание, преобладающими размерами твердых частиц являются 2...10 мкм. При осуществлении фильтрации в пористых блоках при противодействии 350 мм вод. ст. основная часть твердых частиц имеет размеры 2...4 мкм, а

при противодействии 1350 мм вод. ст. размер частиц 2 мкм составляет только 3%, частиц до 4 мкм - 6%.

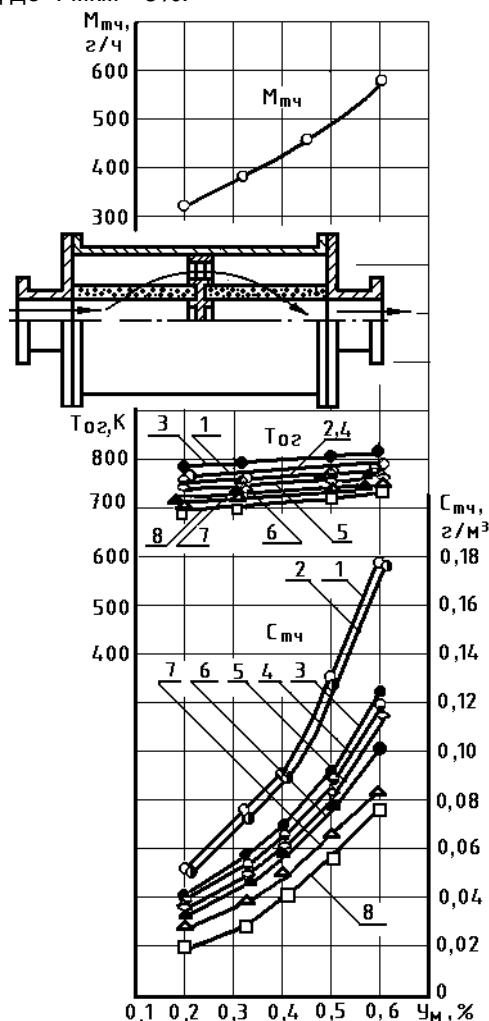


Рисунок 6 - Влияние угара смазочного масла в дизеле на качество очистки газов от твердых частиц в пористых СВС- каталитических блоках

В результате проведенных экспериментов можно сделать выводы о следующем: увеличение противодействия 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 - блоках в пределах указанного увеличения противодействия составляет 11...72%; основная масса неотфильтрованных твердых частиц имеет размеры средних приведенных диаметров в пределах 1...6 мкм.

Рисунок 6 иллюстрирует влияние угара масла на качество очистки газов от твердых частиц. Откуда видно, что угар масла вносит в конденсированную фазу продуктов сгорания значительное количество твердых частиц. Удельная концентрация твердых частиц увеличивается в 9 раз (с 0,02 до 0,18 г/м³) при

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ**

росте коэффициента угара масла с 0,2 до 0,6 %. Температура отработанных газов изменяется незначительно в пределах 700...820 К при росте удельной концентрации твердых частиц по массе с 320 до 580 г/ч. Определено влияние продолжительности выгорания топлива на дисперсность твердых частиц в конденсированной фазе продуктов сгорания углеводородных топлив. Результаты исследования концентраций твердых частиц в полостях реактора нейтрализатора, проведенного методом продольного зондирования и температур в полостях реактора, разделенных СВС - блоками, приведены на графиках рисунка 7. В таблице 5 приведены данные выбросов твердых частиц в зависимости от времени, отведенного на процесс сгорания.

Увеличение времени, отведенного на процесс сгорания с 2,6 до 4,5 мс, приводит к росту полного сгорания топлива и снижению содержания твердых частиц в газах в 1,5 раза (см. таблицу 5). Если обратить внимание на изменение температуры газов при прохождении через пористую стенку фильтра, то можно обнаружить ее стабильное увеличение на 50...80°. Из графиков рисунка 7 и данных таблицы 5 следует, что качество очистки в СВС - блоках практически остается постоянным.

При увеличении времени отведенного на процесс сгорания с 2,6 до 4,5 мс доля твердых частиц топливного происхождения увеличивается с 56 до 61%, масляного происхождения снижается с 44 до 39% (см. таблицу 6).

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_{cf} , 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

Таблица 6 - Состав твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы в пористых СВС - блоках в зависимости от времени, отведенного на процесс сгорания

Время, отведенное на процесс сгорания, T_{cf} , мс	Концентрация частиц топливного происхождения, %				Концентрация частиц масляного происхождения, %			
	Сажистые	Органически растворимые	Сульфаты воды	Итого	Сажистые	Органически нерастворимые	Органически растворимые	Итого
2,6	42	12	2	56	21	13	10	44
3,0	37	13	8	58	21	14	7	42
3,4	35	15	10	60	22	13	5	40
4,5	33	21	7	61	23	12	4	39

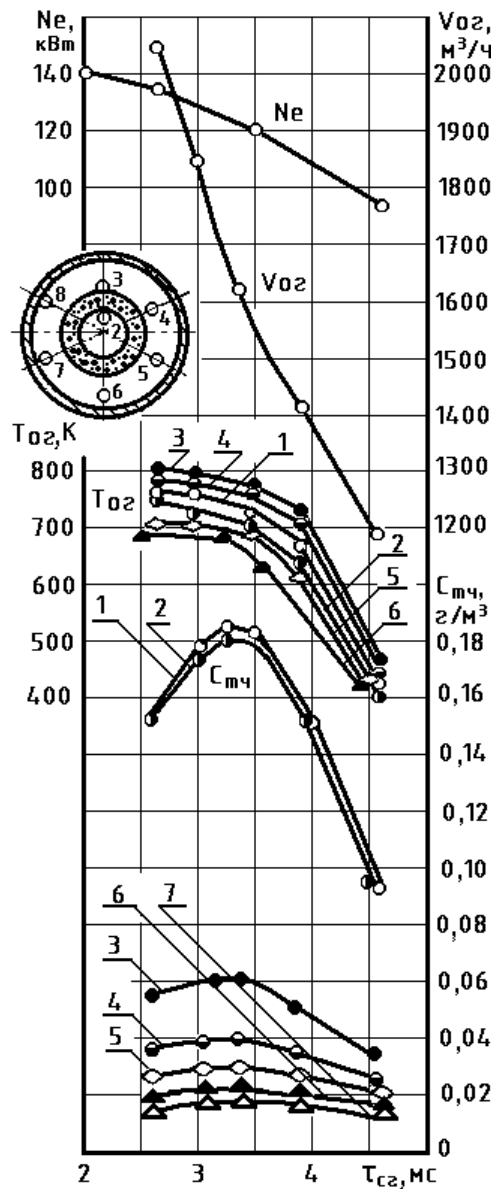


Рисунок 7 - Результаты продольного зондирования реактора в зависимости от времени сгорания топлива дизеля

Удельная площадь фильтра, относительно к расходу газов, характеризующая напор конденсированной фазы на пористую фильтрующую перегородку в значительной степени влияет на качество очистки газов (см. таблица 7, рисунок 8). При отборе газов через реакторы наблюдалось присутствие частиц размером до 36 мкм, а наибольшее количество от 4 до 8 мкм.

Увеличение удельной площади фильтра ($F_{\phi}/V_{ог}$) с $1,63 \cdot 10^{-4}$ до $2,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{м}^3/\text{ч})$ приводит к изменению размеров твердых частиц. Если в первом случае преобладают частицы с размером до 8 мкм и наибольшая их доля составляет 5%, то во втором случае преобла-

дают частицы от 2 до 10 мкм и доля частиц от 4 до 6 мкм составляет 1...6%. Зависимости удельной концентрации твердых частиц $C_{тч}$ от времени сгорания $\tau_{сг}$ имеют максимум при $\tau_{сг}=3,2...3,3 \text{ мс}$ (рисунок 7). За такое время сгорают крупные частицы. При дальнейшем увеличении времени сгорания концентрация твердых частиц резко уменьшается при одновременном снижении температуры отработанных газов. Мощность дизеля уменьшается в 1,4...1,5 раза с одновременным уменьшением объема отработанных газов в 1,6 раза. С увеличением удельной площади фильтрующего элемента с 1,6 до $2,8 \text{ м}^2/(\text{м}^3/\text{ч})$ концентрация твердых частиц уменьшается в 1,2...2,4 раза (рисунок 8). Температура отработанных газов снижается в среднем в 2 раза при резком уменьшении объема отработанных газов в 1,5 раза.

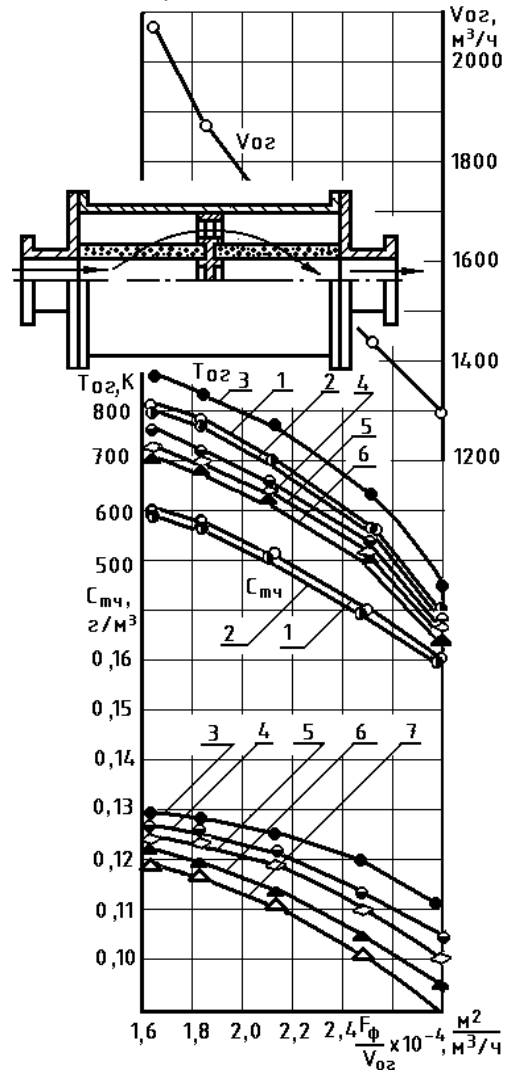


Рисунок 8 - Результаты продольного зондирования реактора в зависимости от удельной площади фильтрующего элемента

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

Таблица 7 - Выбросы твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания углеводородных топлив в пористых СВС - блоках в зависимости от относительной площади фильтра

Относительная площадь фильтра, $m^2 / (m^3/ч)$	Оптическое зондирование			Прямые измерения	
	Концентрация твердых частиц, $С_{тч}, г / м^3$		Температура: до фильтра / после фильтра, К	Концентрация твердых частиц, $С_{тч}, г / м^3$	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
$1,63 \cdot 10^{-4}$	0,188	0,130	800/860	0,195	0,130
$1,82 \cdot 10^{-4}$	0,186	0,128	780/840	0,190	0,130
$2,13 \cdot 10^{-4}$	0,181	0,126	700/770	0,180	0,125
$2,46 \cdot 10^{-4}$	0,180	0,120	580/650	0,180	0,120

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 К, 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

- Белинский, Л.М. Теплоизлучение в камерах сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия //Труды НИЛД. - М.: Машгиз, 1955. №1 - С.83-113.
- Lee, S.C. Proc. 18th Int. Symposium/S.C. Lee, C.L. Tien// Combustion Inst., 1981, № 1159, P.22-28.
- Лоскутов, А.С. Исследование механизмов образования топливных окислов азота и сажи в цилиндре дизеля: Дис. канд. техн. наук /ЛПИ. - Л., ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/1 2012

1983. - 293 с.

4. Шифрин, К.С. Об индикатрисе рассеяния света в области малых углов / К.С. Шифрин, В.А. Пунина //Изв. АН СССР; Сер. ФАО. 1968. - Т. 4, - № 7. - С. 784-791.

5. Бразовский, В.В. Приборы и методы исследования параметров дисперсного состава продуктов сгорания в ДВС. /В.В. Бразовский, О.В. Бразовская, В.Е. Бразовский - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. - 124 с.

Бразовский В.В., к.т.н., докторант кафедры «Экспериментальная физика», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (83532) 331009.

Кашкаров Г.М., к.т.н., доцент кафедры «Начертательная геометрия и графика», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (83532) 345470.

Тубалов Н.П., д.т.н., профессор кафедры «Экспериментальная физика», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46.

Ситников А.А., д.т.н., заведующий кафедрой «Сельскохозяйственное машиностроение», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (83532) 367885.

Яковлев В.И., с.н.с. "ПНИЛ СВС", ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (83532) 368463.

Коломеец М.А., аспирант кафедры «Экспериментальная физика», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46.