

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

В. В. Бразовский, Г. М. Кашкаров

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

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 топ-

лива и присадок к нему, методы исследования

качественного и количественного состава выбросов 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. На рисунке 1 обозначены: 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.

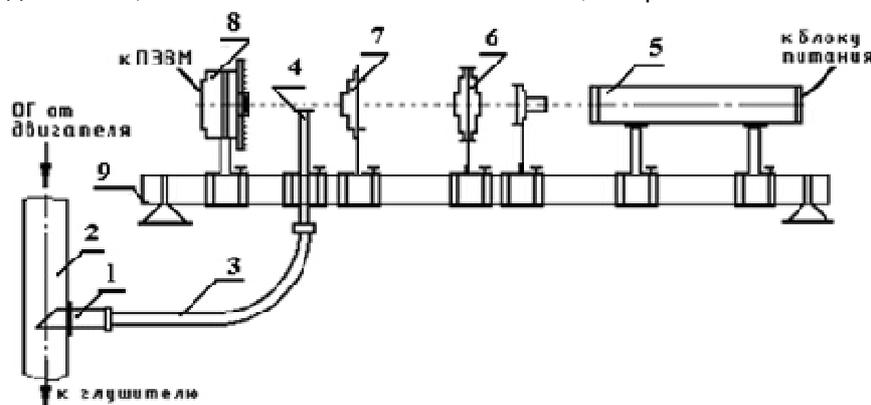


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

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 | | Температура: до фильтра/ после фильтра, К | Прямые измерения | |
|---------------------------------------|--|---------------|---|--|-------|
| | Удельные выбросы твердых частиц, г/(кВт·ч) | | | 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 |

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 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.

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 $V_{ог}=1150$ м³/ч. Параметры фильтров следующие: средний диаметр пор составлял $d_p=150$ мкм, коэффициент извилистости пор $\zeta_i=1,27$, пористость $P=0,425$, толщина стенок $\delta_{ст}=12$ мм, объем пористого материала фильтра составлял $2,13 \cdot 10^{-3}$ м³.

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 $T_0=290..398$ К, атмосферное давление $P_0=756..760$ мм рт. ст., влажность воздуха $W_0=50..55\%$.

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 рисунок 2. Здесь номера кривых и на последующих рисунках соответствуют линиям зондирования.

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

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

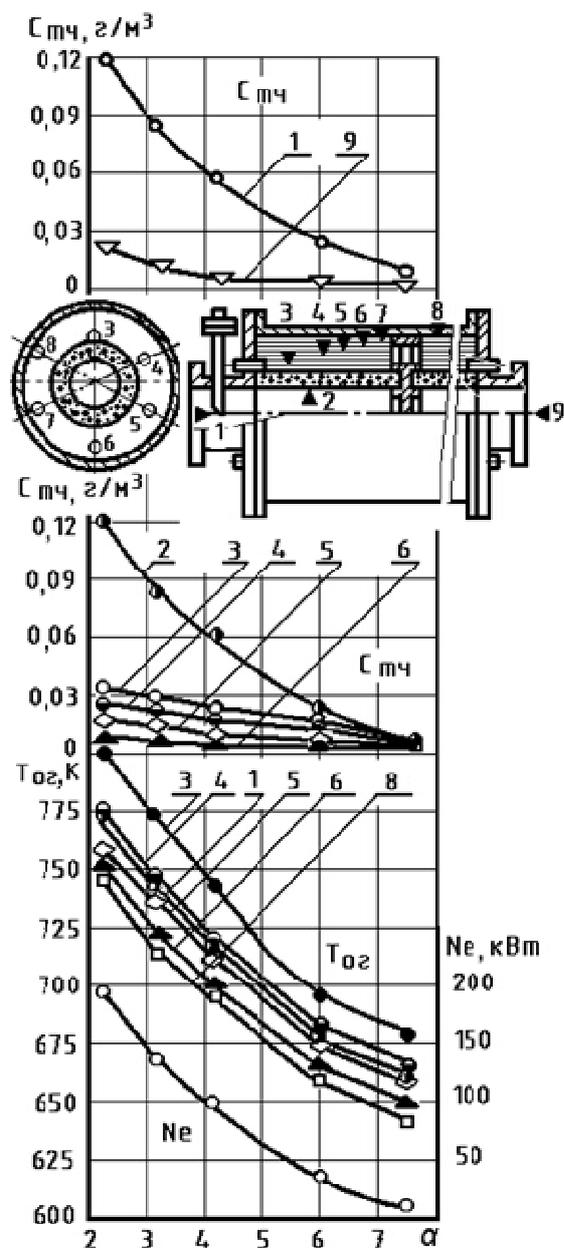


Рисунок 2 – Зависимости качества очистки газов от твердых частиц в пористых СВС – каталитических фильтрах от коэффициента избытка воздуха в реакторе нейтрализатора

При низких избытках воздуха в реакторах содержание твердых частиц в отработанных газах по результатам оптического зондирования и прямых измерений имеют близкие значения (таблица 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 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 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 (рис. 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 рис. 3а 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 (рис. 3б) 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 $\alpha = 4,0$ (рис. 4а) перед фильтром до 14% составляют частицы с $D_{тч} = 4$ мкм, до 8% частицы с $D_{тч} = 2$ мкм. После фильтра (рис. 4б) 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 проницаемую стенку (таблица 2).

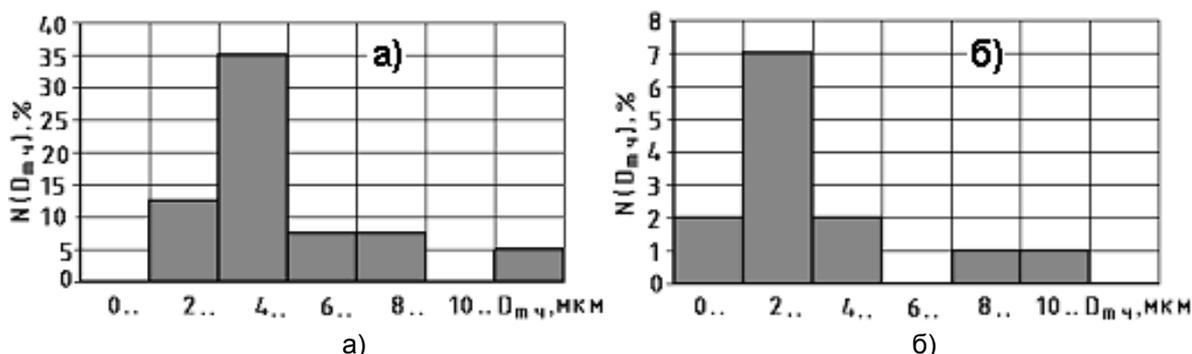


Рисунок 3 – Характер распределения твердых частиц при $\alpha=2,2$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС – фильтра; б) после СВС – фильтра

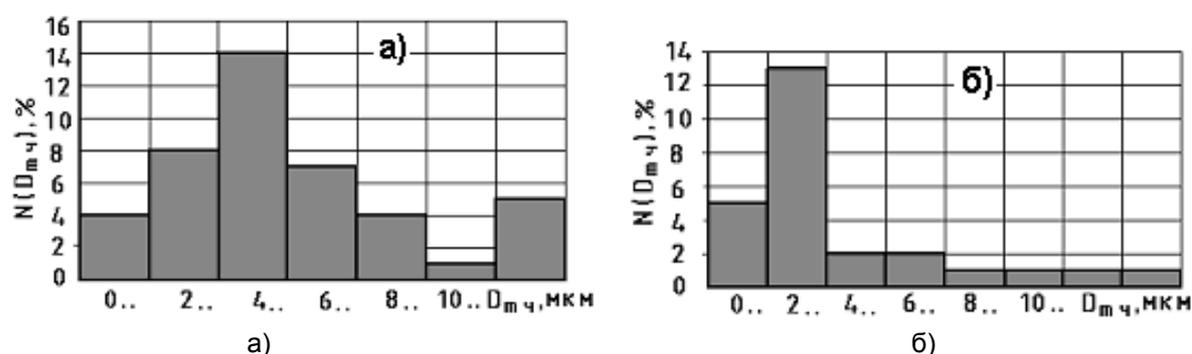


Рисунок 4 – Характер распределения твердых частиц при $\alpha=4,0$ по средним приведенным диаметрам частиц: а) до СВС – фильтра; б) после СВС – фильтра

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 |

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 ча-

стиц масляного происхождения, что изменяет условия фильтрования газов; в пористых материалах со средним размером пор до 150 μm удерживаются твердые частицы с приведенным диаметром до 3-4 μm ; конденсированная фаза продуктов сгорания имеет более высокую плотность вдоль стенок СВС блоков. Результаты исследования концентраций твердых частиц в полостях реактора филь-

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

тров, проведенного методом продольного многоканального зондирования и температур в полостях реактора, разделенных СВС блоками, приведены на графиках рисунок 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 ре-

зультатов с прямыми измерениями методом отбора газов из реактора (таблица 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 рисунок 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.

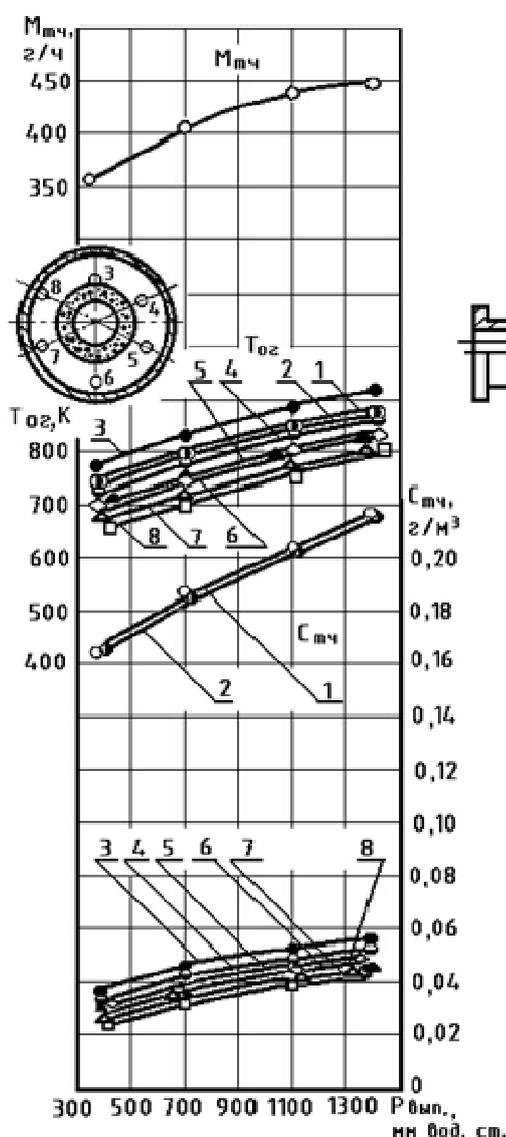


Рисунок 5 – Влияние противодавления на выпуске из нейтрализатора на качество очистки газов от твердых частиц в пористых СВС – каталитических блоках

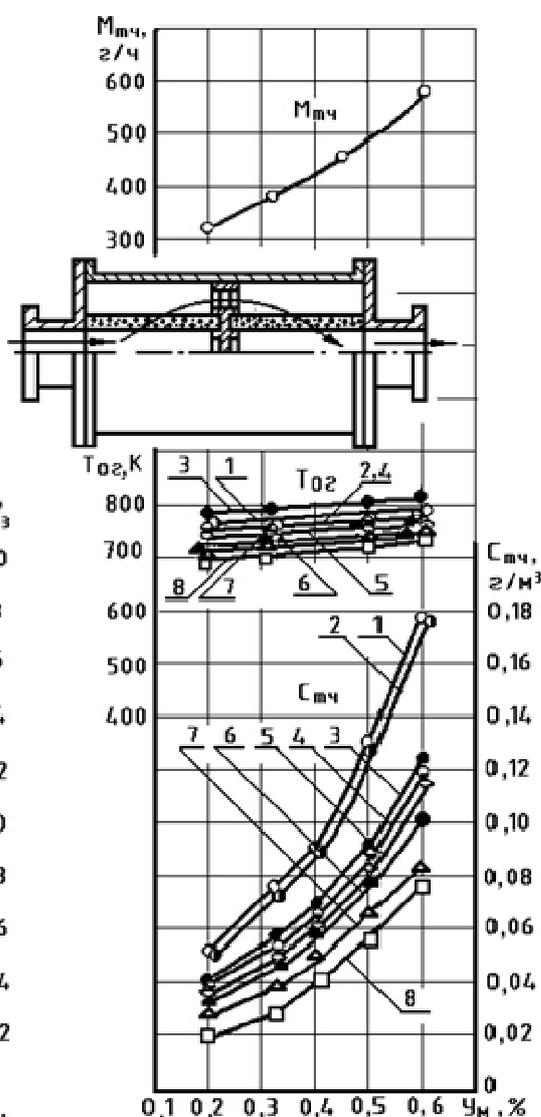


Рисунок 6 – Влияние угара смазочного масла в дизеле на качество очистки газов от твердых частиц в пористых СВС – каталитических блоках

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, Р _{вып} , мм вод. ст. | 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 |
| 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 |

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. При увеличении противодавления до 1350 мм вод. ст., когда наблюдается неполное сгорание, преобладающими размерами твердых частиц являются 2...10 мкм. При осуществле-

нии 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 – блоках в пределах указанного увеличения противодавления составляет 11...72%; основная масса неотфильтрованных твердых частиц имеет размеры средних приведенных диаметров в пределах 1...6 мкм.

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, Р _{вып} , мм вод. ст. | Концентрация частиц топливного происхождения, % | | | | Концентрация частиц масляного происхождения, % | | | |
|--|---|-------------------------|---------------|-------|--|----------------------------|-------------------------|-------|
| | Сажистые | Органически растворимые | Сульфаты воды | Итого | Сажистые | Органически не-растворимые | 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 |

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

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 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 вы-

горания 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.

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 |

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 (таблица 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 рисунок 7 и данных таблица 5 следует, что качество очистки в СВС – блоках практически остается постоянным.

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, $T_{сг}$, мс | Концентрация частиц топливного происхождения, % | | | | Концентрация частиц масляного происхождения, % | | | |
|--|---|-------------------------|---------------|-------|--|---------------------------|-------------------------|-------|
| | Сажистые | Органически растворимые | Сульфиды 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 |

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% (таблица 6).

Удельная площадь фильтра, относительно к расходу газов, характеризующая

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

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, $\text{м}^2 / (\text{м}^3/\text{ч})$ | Оптическое зондирование | | Температура: до фильтра / после фильтра, К | Прямые измерения | |
|---|--|---------------|--|--|---------------|
| | Концентрация твердых частиц, $\text{С}_{\text{ТЧ}}, \text{г} / \text{м}^3$ | | | Концентрация твердых частиц, $\text{С}_{\text{ТЧ}}, \text{г} / \text{м}^3$ | |
| | 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 |

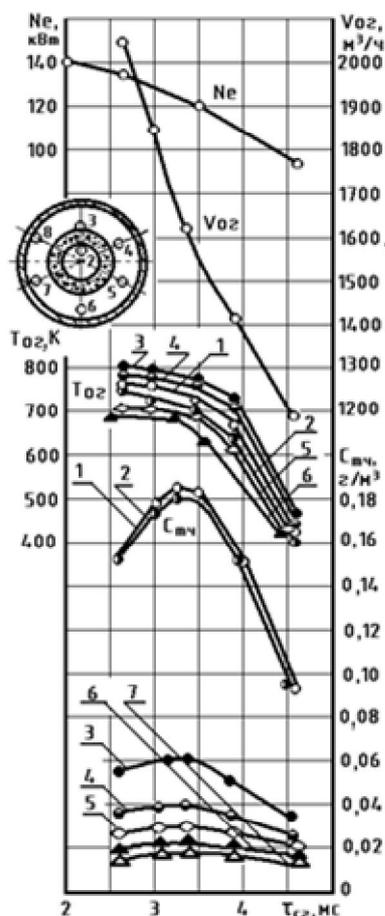


Рисунок 7 – Результаты продольного зондирования реактора в зависимости от времени сгорания топлива дизеля

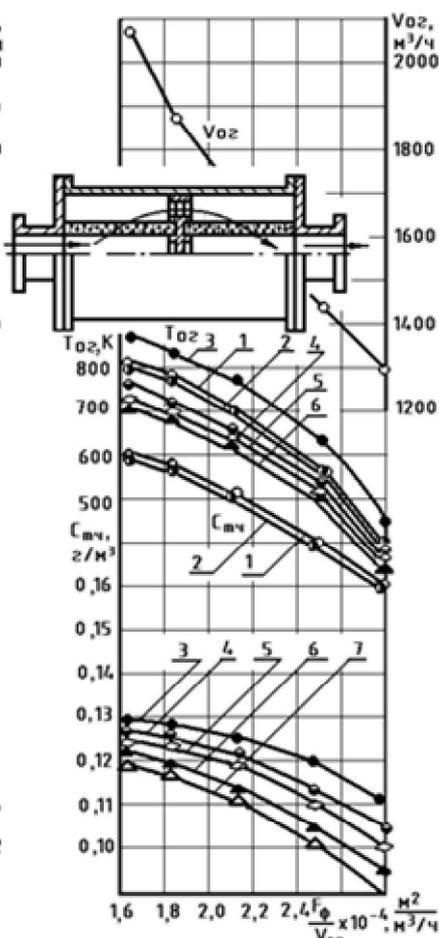


Рисунок 8 – Результаты продольного зондирования реактора в зависимости от удельной площади фильтрующего элемента

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

Увеличение удельной площади фильтра ($F_f/V_{ог}$) с $1,63 \cdot 10^{-4}$ до $2,46 \cdot 10^{-4}$ м²/(м³/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 преобладают частицы от 2 до 10 мкм и доля частиц от 4 до 6 мкм составляет 1...6%. Зависимости удельной концентрации твердых частиц стч от времени сгорания тсг имеют максимум при тсг=3,2...3,3 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 м²/(м³/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.

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 опас-

ность.

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

1. Белинкий Л.М. Теплоизлучение в камерах сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия //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.
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.