

КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ В РАЗЛИЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ

В.В. Бразовский

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
E-mail: altaikompozit@mail.ru

Приведены исследования параметров отработанных газов дизельного двигателя в процессе их очистки многоступенчатыми каталитическими нейтрализаторами. Для регистрации дисперсного состава частиц применен метод цифровой голографии с прямым вводом результатов измерений в персональную электронную вычислительную машину (ПЭВМ) и последующей компьютерной обработкой. На процесс фильтрования частиц оказывает существенное влияние избыток окислителя в реакторе фильтра, противодавление на выпуске, пористость, после фильтра повышается температура отработанных газов, что свидетельствует о наличии экзотермических реакций в пористой стенке фильтра.

Состав продуктов сгорания углеводородных топлив насчитывает более 1200 компонентов. Из них в настоящее время нормируются стандартами только оксид углерода, оксид азота, углеводороды и твердые частицы. В понятие «твердые частицы», кроме сажевых частиц, включаются частицы топлива, масел, твердые органически нерастворимые и органически растворимые фракции продуктов разложения углеводородов, сульфиты воды. Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработанными газами значительное количество твердых частиц сажи, являющихся абсорбентом для полициклических ароматических углеводородов, 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. Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. Удельная поверхность сажи значительна и может достигать 300 м²/г. В отработанных газах сажа находится в виде образований неправильной формы с линейными размерами от 0,3 до 100 мкм, зависящими от режима эксплуатации дизеля. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от сотен до тысяч частиц, отличающихся значительной прочностью. 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 выбросов чрезвычайно разнообразны. Наилучшие результаты в настоящее время достигаются одновременным использованием различных методов, дополняющих друг друга. Промышленностью выпускаются анализаторы частиц серии LS, в них используется стационарная схема измерения частиц размерами от 0,04 мкм до 2000 мкм. Результаты рассчитываются из данных дифракции с использованием теории Фраунгофера и теории Ми и представляются в виде распределения частиц по объему.

Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания, образование сажевых частиц в рабочей камере и выброс последних с отработанными газами в атмосферу относятся к быстротекающим процессам. Очевидно, подобные приборы не могут быть использованы для этой цели, как из-за высокой скорости протекающих процессов, так и по технологическим причинам, наиболее существенными из которых являются чрезвычайно большие градиенты давления, турбулентные потоки с содержанием частиц и, как результат, выход из строя рабочих поверхностей оптических элементов.

Оптические методы обычно строятся на измерении следующих характеристик: прозрачность, степень поляризации рассеянного света, индикатриса рассеяния, дифракционная картина, голографическая картина. В зависимости от диапазона размеров частиц применимы различные методы исследования дисперсности: метод спектральной прозрачности – экспериментально определяется коэффициент пропускания прямо прошедшего излучения через слой рассеивающих частиц определенной толщины при различных длинах волн в некотором спектральном интервале; метод полной индикатрисы – пригоден когда среда содержит оптически мягкие частицы; метод многоволнового обратного рассеяния – разработан применительно к лазерному зондированию атмосферы; статистический метод – в его основе лежит изучение статистических характеристик светового поля и рассеивающей среды, полученной при решении уравнения распространения электромагнитных волн. Диапазон восстанавливаемого распределения частиц в этом методе составляет 0,02...4,0 мкм; метод малых углов – применяется для анализа крупных частиц. В данном методе не учитывается интерференция излучения, рассеянного различными частицами и тепловая неоднородность в газовой струе приводит к неконтролируемым отклонениям рассеянного излучения. С технической точки зрения, одной из существенных проблем для малоугловых методов является разделение падающего и рассеянного излучений [5].

Голографический метод регистрации волновых полей позволяет записать и хранить информацию об исследуемом объекте, в частности, информацию о размерах и пространственном расположении аэрозольных частиц. Детальный анализ ансамблей частиц, компенсация погрешностей и фильтрация шумов могут быть выполнены при восстановлении изображения объекта по голограмме на ПЭВМ с применением методов цифровой голографии. В данной работе приведены исследования дисперсного потока отработанных газов двигателя методом цифровой голографии.

Экспериментальная установка для измерения дисперсности конденсированной фазы отработанных газов дизеля

Для проведения исследований использована экспериментальная установка на базе грузового автомобиля: «УРАЛ». На фундаменте с помощью пружин установлена подмоторная рама с опорами для крепления двигателя. Двигатель соединен муфтой с балансирной машиной, установленной на подмоторной раме. В выпускной коллектор вмонтирован трехступенчатый каталитический нейтрализатор. Номинальная частота вращения 2600 мин⁻¹, полная мощность 160 кВт, удельный расход топлива 224,4 г/кВт·ч (рис. 1).

Экспериментальная установка для измерения дисперсности 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 (ПЭВМ), крепежной станины и трубки-подвода части отработанных газов (ОГ) от двигателя к установке.

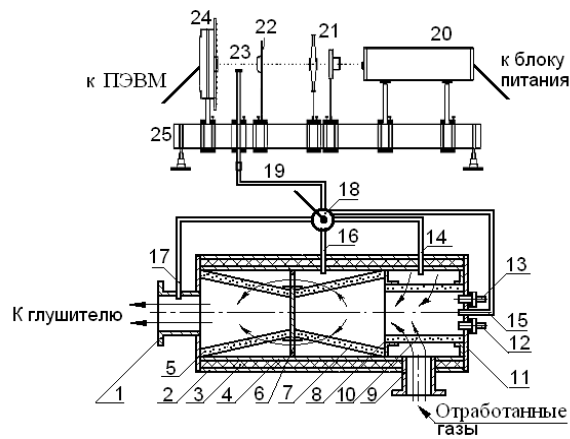


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рис. 1 обозначены: 1 - выпускной патрубок; 2 - кожух; 3 - термоизоляция; 4 - корпус реактора; 5 - восстановительный элемент; 6 - перегородка; 7 - окислительный элемент; 8 - перегородка; 9 - впускной патрубок; 10 - сажевый пористый элемент; 11 - крышка; 12 - свеча накаливания; 13 - газовый клапан; 14-17 - зонды из полостей нейтрализатора; 18 - кран переключения зондов; 19 - гибкий подвод отработанных газов к установке; 20 - лазер ЛГ-72; 21 - коллиматор; 22 - диафрагма; 23 - трубка-подвод отработанных газов; 24 - скоростная видеокамера VS-СТТ-285-2001; 25 - крепежная станина.

Излучение лазера проходит через коллиматор - 21, диафрагму - 22, через область отработанных газов - 23 и попадает на матрицу скоростной камеры - 24. Коллиматор состоит из двух линз и служит для увеличения диаметра лазерного луча, что необходимо для полной засветки камеры матрицы. Диафрагма служит для обрезки луча по размеру матрицы.

Через зонды - 14-17, вмонтированные в каждую полость каталитического нейтрализатора, отработанные газы через многопозиционный кран - 18 по гибкому подводу - 19 через трубку-подвод - 23 поступают к предметной области голографической установки, выполненной по осевой схеме регистрации.

Центр предметной области выбран на расстоянии 5 см от матрицы. Считываемые значения поступают непосредственно в ПЭВМ, где проходят обработку специальной программой, которая после обработки экспериментальных данных выдает информацию о размерах твердых частиц в отработанных газах.

Многопозиционный кран - 18 позволяет производить отбор исследуемого газа поочередно до, и после прохождения одного из фильтрующих элементов, для определения изменения дисперсного состава отработавших газов в процессе очистки.

Регистрация голограммы осуществлялась на цифровую матрицу скоростной камеры VS-СТТ-285-2001 без использования дополнительных оптических элементов.

Стенд многоканального контроля полостей каталитического нейтрализатора

Для обеспечения многоканального продольного индицирования нейтрализаторов и сажевых фильтров в конструкции последних были внесены изменения, не влияющие на физико-химические процессы. На рисунке 2 представлена схема приборного комплекса для многоканального зондирования полостей сажевых фильтров для очистки газов.

На рис. 2 обозначены: 1, 17 - фланцы; 2, 16 - патрубки; 3 - фланец; 4 - корпус; 5, 12, 14 - пористые блоки; 6 - направляющая; 7, 11 - внешние полости реактора; 8, 18, 24 - шланги соединения зондов и установки голографического контроля дисперсного состава; 9, 19, 20, 21, 22, 23 - зонды; 10 - перегородка; 13 - промежуточная полость; 15 - внутренняя полость.

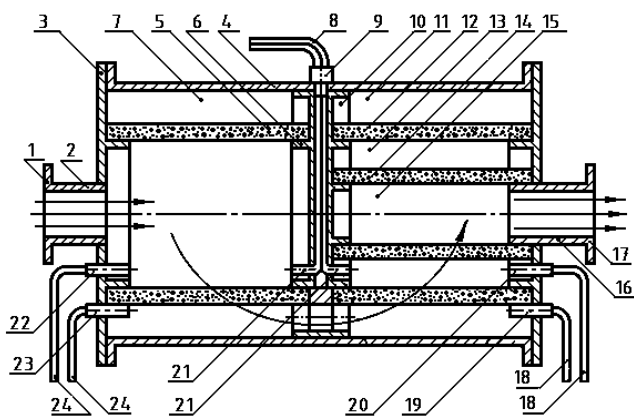


Рис. 2. Продольный разрез каталитического нейтрализатора с встроенными зондами

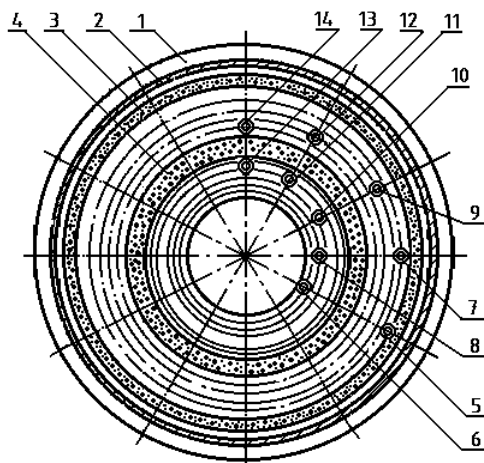


Рис. 3. Расположение каналов продольного зондирования реактора нейтрализатора

Отработанные газы по трубе - 2 подводились к фильтру - 5 и отводились по трубе - 16. Со стороны входа газов в торцевой крышке - 4 устанавливались зонды для отбора части газов, соединенные с установкой голографического контроля дисперсного состава, в шести отверстиях смещенных относительно друг друга на 45° от осевой в продольной плоскости и сдвинутых радиально последовательно на диаметр отверстия (рис. 3).

На рис. 3 обозначены: 1 – фланец; 2 – корпус; 3 – блок изоляции; 4 – каталитический блок; 5, 7, 9, 12, 14 – каналы зондирования внешней полости реактора; 6, 8, 10, 11, 13 – каналы зондирования внутренней полости реактора фильтра.

Зондирование предусматривалось и в поперечном направлении в двух сечениях (рис. 4). Здесь на рисунке 4а показана схема зондирования с внешней и внутренней стороны блока. На рисунке 4б показана схема зондирования внешней и внутренней полости реактора.

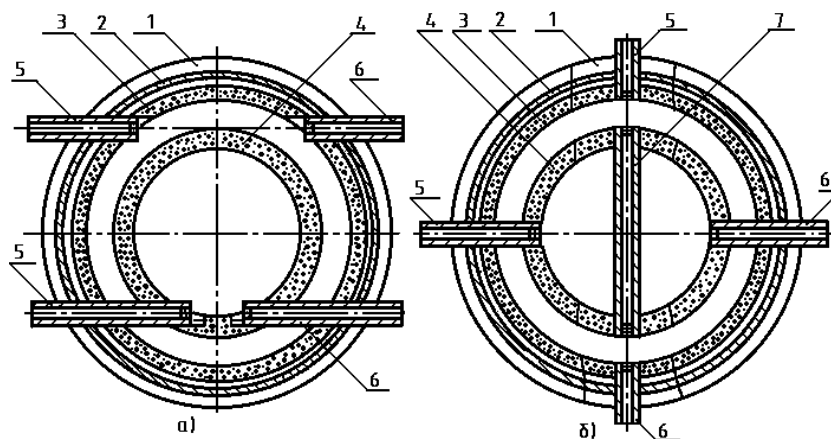


Рис. 4. Поперечные разрезы нейтрализатора: а) в пристеночных областях фильтрующего блока; б) в центральных областях реактора

На рис.4 обозначены: 1 – фланец; 2 – корпус; 3 – теплоизолирующий блок; 4 – внутренний фильтрующий блок; 5, 6 – зонды; 7 – промежуточный канал.

Установка поворотных вертикальных зондов для отбора газов из полостей реактора фильтра с СВС-блоками представлена на рисунке 5.

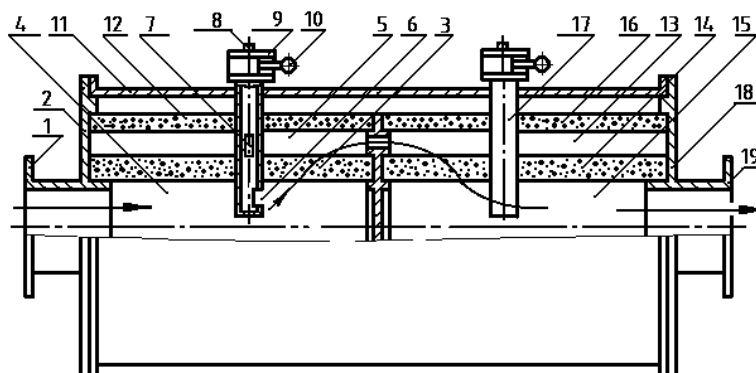


Рис.5. Установка поворотных вертикальных зондов для отбора газов

На рис.5 обозначены: 1 – патрубок входа газов; 2 – фланец; 3 – пористый фильтр; 4 – внутренняя полость реактора; 5 – промежуточная полость; 6, 7 – окна; 8 – штуцер; 9 – крышка отборника; 10 – рычаг поворотный; 11 – корпус; 12, 16 – изолирующие блоки; 14 – пористый блок; 15 – выходная полость; 17 – отборник; 18 – фланец; 19 – патрубок

Результаты экспериментов

Результаты исследования приведены на графиках рисунков 6 и 7. Здесь номера кривых 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. Здесь же для оценки качества фильтрования приведено сравнение полученных результатов.

Из данных таблицы 1 видно, что площадь фильтра, относительно к расходу газов, характеризующая напор конденсированной фазы на пористую фильтрующую перегородку в значительной степени влияет на качество очистки газов. Данные оптического зондирования полостей реактора подтверждаются результатами прямых измерений.

При отборе газов через реакторы наблюдалось присутствие частиц размером до 36 мкм, а наибольшее количество от 4 до 8 мкм.

Таблица 1. Сравнительные данные по изучению выбросов твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания углеводородных топлив в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от относительной площади фильтра

Относительная площадь фильтра, $\text{м}^2 / (\text{м}^3/\text{ч})$	Данные оптического зондирования			Прямые измерения	
	Твердые частицы, $\text{г} / \text{м}^3$		Температура: до фильтра / после фильтра, К	Твердые частицы, $\text{г} / \text{м}^3$	
	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

Увеличение $\frac{F_{\phi}}{V_{ог}}$ с $1,63 \cdot 10^4$ до $2,46 \cdot 10^4$ 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 4...6 мкм составляет 1...6%.

В таблицах 2 и 3 приведены сравнительные данные зондирования полостей каталитических нейтрализаторов и прямых измерений содержания твердых частиц в полостях реактора, разделенных пористой проницаемой стенкой СВС-блока. Здесь же для оценки качества фильтрования приведено сравнение полученных результатов.

Таблица 2. Сравнительные данные по изучению выбросов твердых частиц при фильтровании конденсированных фаз в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от среднего приведенного диаметра пор

Средний приведенный диаметр пор, мкм	Данные оптического зондирования			Прямые измерения	
	Твердые частицы, г/м ³		Температура: до фильтра / после фильтра, К	Твердые частицы, г/м ³	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
120	0,152	0,015	780/820	0,150	0,018
150	0,152	0,036	780/820	0,150	0,040
180	0,152	0,050	780/820	0,150	0,050
240	0,152	0,060	780/820	0,150	0,060

Из данных таблицы 2 видно, что при увеличении среднего приведенного диаметра пор СВС-блоков со 120 до 240 мкм качество очистки от твердых частиц снижается с 90 до 57%. Однако здесь необходимо сказать, что при $d_n = 120$ мкм увеличивается противодавление создаваемое фильтром при прочих равных условиях. Одним из путей сохранения высокого качества очистки является создание мелкопористых фильтров с большой площадью поверхностей F_{ϕ} .

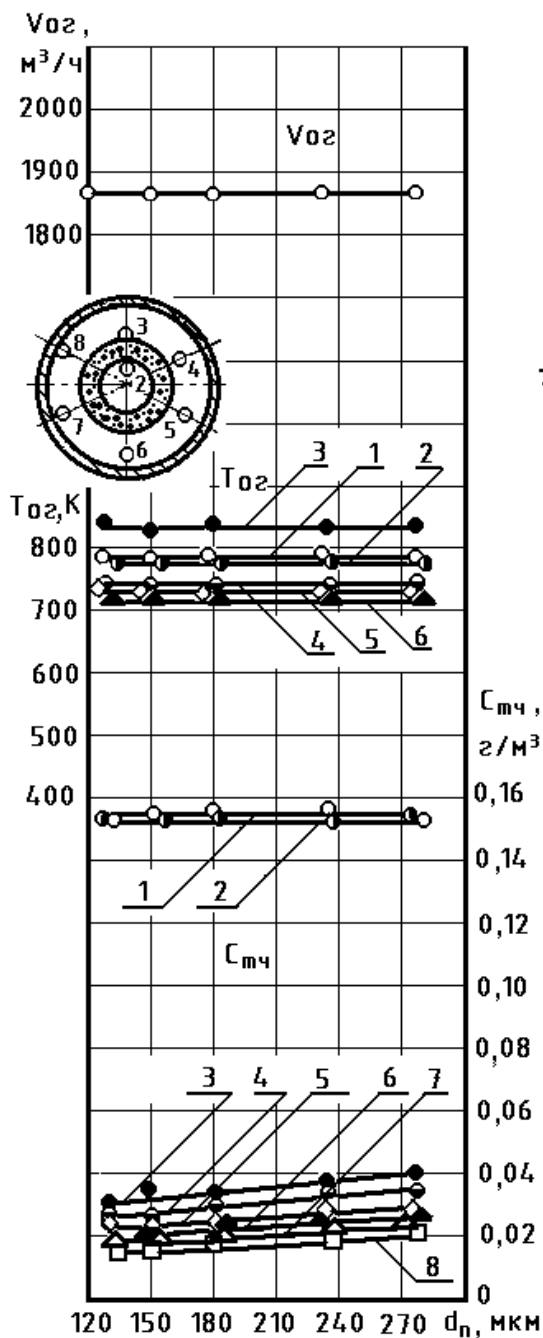


Рис. 6. Влияние среднего диаметра пор СВС-материала на качество очистки газов от твердых частиц

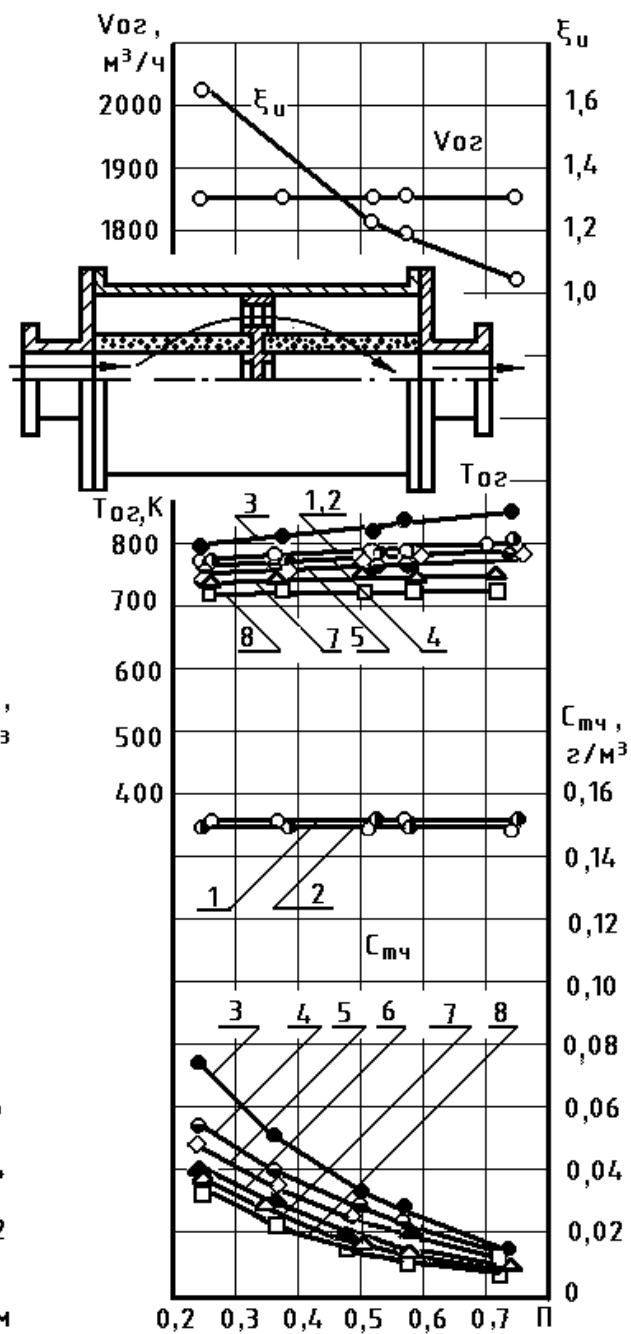


Рис. 7. Влияние пористости, извилистости пор СВС-материала на качество очистки газов от твердых частиц

Результаты исследования концентраций твердых частиц в полостях реактора нейтрализатора, приведены на графиках рис. 6, 7. Здесь номера кривых соответствуют линиям зондирования.

Анализ обработки фильтров говорит о том, что уменьшение диаметра пор позволяет после фильтра иметь в составе газов твердых частиц до 8 мкм, но с долями их содержания не более 4%, что свидетельствует о высоком качестве очистки.

При отборе газов из реактора после фильтров обнаружено, что при пористости $\Pi=0,37$ в конденсированной фазе содержится до 1% частиц размером 2 мкм, до 3% - до 4 мкм, до 2% - 8 мкм.

При увеличении пористости фильтров до $\Pi=0,5$ в конденсированной фазе содержится до 2% частиц размером до 2 мкм, до 6% частиц размером до 6 мкм и до 6% частиц размером до 8 мкм.

Таблица 3. Сравнительные данные по изучению выбросов твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от пористости материала

Пористость материала	Данные оптического зондирования			Прямые измерения	
	Твердые частицы, г/м ³		Температура: до фильтра / после фильтра, К	Твердые частицы, г/м ³	
	до фильтра	после фильтра		до фильтра	после фильтра
0,20	0,152	0,070	780/790	0,15	0,07
0,37	0,152	0,052	785/805	0,15	0,05
0,50	0,152	0,031	790/810	0,15	0,03
0,72	0,152	0,015	800/850	0,15	0,01

Результаты поперечного зондирования реакторов сажевых СВС - фильтров

При изучении влияния диаметра пор на дисперсность твердых частиц в конденсированной фазе отработанных газов для установления идентификации результатов измерений было осуществлено и поперечное зондирование измерений полостей реактора.

В табл. 4 приведены сравнительные данные зондирования полостей каталитических нейтрализаторов и прямых измерений содержания твердых частиц в полостях реактора, разделенных пористой проницаемой стенкой СВС-блока. Здесь же для оценки качества фильтрования приведено сравнение полученных результатов. На рис. 8б приведено распределение твердых частиц по размерам средних приведенных диаметров.

Температура отработанных газов и концентрация твердых частиц в сечениях 1-1, 2-2 не зависит от среднего приведенного диаметра пор и находится в пределах $T_{ог}=780...790$ К, $Стч=168$ г/м³ (рис. 8а, табл. 4). В сечениях 3-3 и 4-4 температура отработанных газов меняется от 780 до 850 К, а концентрация твердых частиц увеличивается с 0,02 до 0,08 г/м³ при росте среднего приведенного диаметра пор с 120 до 270 мкм (рис.8б, табл. 4). Таким образом, с изменением среднего приведенного диаметра пор с 270 до 120 мкм, концентрация твердых частиц, прошедших через фильтр уменьшается более чем в четыре раза.

Из данных табл. 4 видно, что результаты оптического зондирования и прямых измерений имеют высокую сходимость.

Анализ графиков рис. 8а и табл. 4 говорит о том, что поперечное оптическое зондирование можно применять так же успешно, как и продольное.

Таблица 4. Сравнительные данные по изучению выбросов твердых частиц при фильтровании конденсированной фазы продуктов сгорания в пористых проницаемых каталитических СВС-блоках в зависимости от среднего диаметра пор

Средний диаметр пор, мкм	Данные оптического зондирования		Прямые измерения	
	Твердые частицы, г/м ³		Твердые частицы, г/м ³	
	до фильтра по	после фильтра по	до	после

	сечениям 1-1/2-2	сечениям 3-3/4-4	фильтра	фильтра
120	0,168	0,022/0,020	0,17	0,02
180	0,168	0,042/0,038	0,17	0,04
240	0,168	0,067/0,06	0,17	0,06
270	0,168	0,086/0,08	0,17	0,08

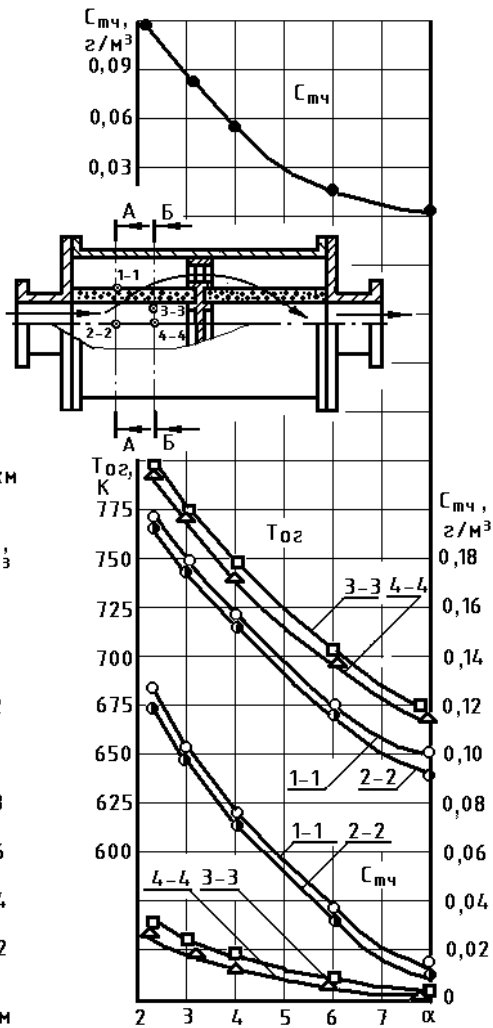
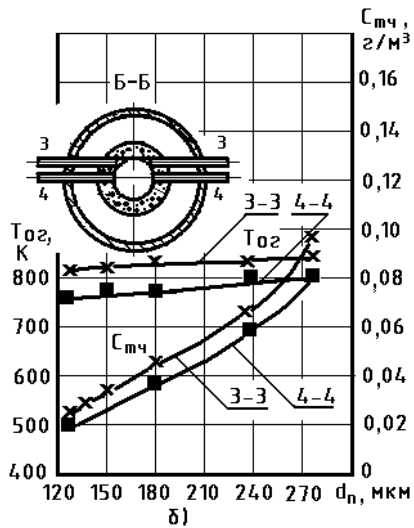
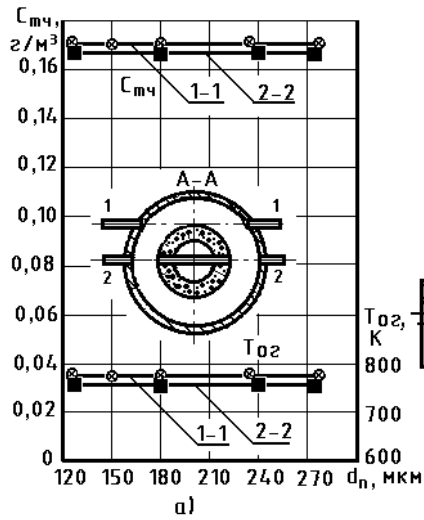


Рис. 8. Результаты поперечного зондирования реактора нейтрализатора от диаметра пор

Рис. 9. Результаты поперечного зондирования реактора нейтрализатора от коэффициента избытка воздуха

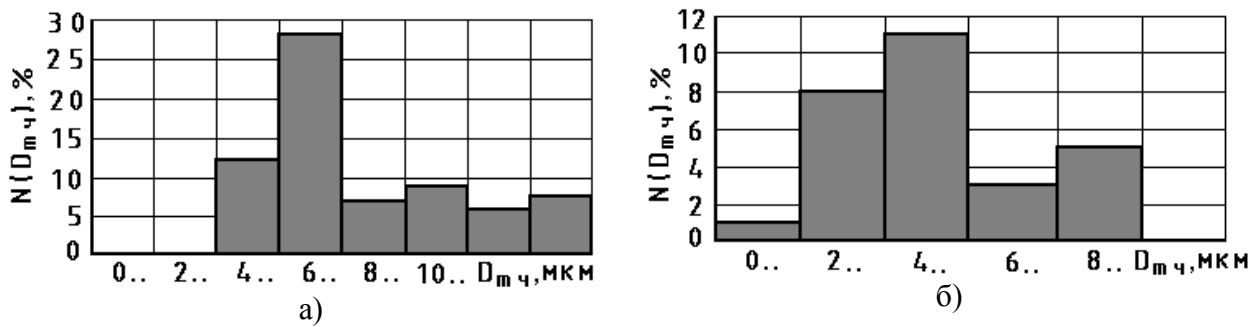


Рис.10. Характер распределения твердых частиц при поперечном зондировании при $d_n = 150$ мкм, $n = 1900$ мин⁻¹, $N_e = 189$ кВт по средним приведенным диаметрам: а) до СВС-фильтра; б) после СВС-фильтра

Сравнивая данные, полученные после СВС-фильтра (рис. 10) можно отметить, что при прохождении через фильтр, например, доля частиц размером 4 мкм остается прежней, доля частиц размером 6 мкм снижается с 28 до 3%. Содержание частиц размером 10, 12, 14, 16 мкм и более не отмечается.

Выводы

По результатам проведенных исследований параметров отработанных газов в процессе их очистки многоступенчатыми каталитическими нейтрализаторами, получены результаты, из которых наиболее существенными являются следующие:

1. Создан экспериментальный для проведения многоканального зондирования полостей СВС – фильтров в продольных и поперечных сечениях, обеспечивающий голографический контроль физических параметров твердых частиц в процессе фильтрования конденсированных фаз с различными температурами.
2. Эксперименты по оценке эффективности каталитического нейтрализатора с СВС-фильтрами на автомобиле с дизелем показали, что снижение выбросов окислов азота в начале испытаний составляло 61-62 %, через 240 часов работы до 66 %. По окиси углерода эффективность очистки в начале испытаний – 57-58 %, через 240 часов – 47-48 %, через 320 часов – 45-46 %.
3. 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 отработавшие 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.
4. 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.
5. При увеличении избытка окислителя в продуктах сгорания увеличивается доля частиц масляного происхождения, что изменяет условия фильтрования конденсированной фазы.
6. На качество фильтрования большое влияние оказывает увеличение противодавления на выпуске из реактора сажевого фильтра.
7. Установлено, что средний приведенный диаметр пор СВС-материалов не характеризует в полной мере фильтрующие свойства, а внутренняя структура поверхности

пор позволяет захватывать частицы со средними приведенными диаметрами меньшими на 1... 1,5 порядка по размеру.

8. Увеличение относительной площади фильтра, при постоянных показателях пористости и извилистости материала, в 1,5 раза приводит к повышению качества очистки всего на 3...5%.

9. Увеличение среднего приведенного диаметра пор в СВС-материале со 120 до 240 мкм приводит к снижению качества очистки конденсированной фазы от твердых частиц в 4 раза.

10. При осуществлении продольного и поперечного оптического зондирования полостей фильтров получены практически идентичные результаты по определению концентраций и температур твердых частиц в конденсированной фазе продуктов сгорания углеводородных топлив.

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 [Текст] / 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.