



**УНГЕФУК**

**Александр Александрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В  
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ВИХРЕКАМЕРНОГО  
ДИЗЕЛЯ**

05.04.02 – «Тепловые двигатели»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул-2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова» (АлтГТУ)

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор Новоселов Александр Леонидович

**Официальные оппоненты:** Юр Геннадий Сергеевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»  
зав. кафедрой

Русаков Вадим Юрьевич  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»  
доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет»

Защита состоится «24» мая 2012 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова», 656038, г.Барнаул, пр.Ленина, 46, АлтГТУ (тел/факс (3852)260516, E-mail: D21200403@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан « 20 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



Свистула А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Двигатели внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия – дизели остаются вне конкуренции в ближайшие десятилетия в составе силовых судовых, транспортных, автотракторных установок и составе энергетических силовых установок. Серьезной проблемой при эксплуатации дизелей являются значительные выбросы твердых частиц с отработавшими газами. Выбросы твердых частиц могут достигать до 1% от расхода топлива в зависимости от технического состояния и организации рабочих процессов.

Понятие «твердые частицы» включает содержание в полидисперсной среде продуктов сгорания частиц топлива, масел, твердых органически растворимых и нерастворимых фракций продуктов разложения углеводородов, сульфаты воды и другие.

Эффективно отличающиеся от других типов дизели с вихрекамерным смесеобразованием, например, ВАЗ – 341 ( $N_e=36,0$  кВт при  $n=4500$  мин<sup>-1</sup>) имеют оценочные показатели по выбросам:  $q_{NOx}=5,00$  г/(кВт·ч);  $q_{CO}=4,53$  г/(кВт·ч);  $q_{CH}=0,13$  г/(кВт·ч).

Дальнейшая эффективность работ по снижению выбросов твердых частиц зависит от уровня знаний и представлений о влиянии параметров рабочего процесса на их структуру и состав. Вопрос о структуре и составе твердых частиц касается и создания противодымных фильтров на выпуске дизелей.

Дизели своими вредными выбросами в окружающую среду создают экологическую проблему, решение которой связано с обеспечением безопасности труда, безопасности дорожного движения, обеспечением здоровья нынешнего и будущих поколений.

Жесткие требования, предъявленные международным сообществом, касаются уровней вредных выбросов. Учитывая, что уже принят стандарт ЕЭК ООН ЕВРО – 5, с 1993 по 2008 год наблюдается ужесточение норм на уровни вредных выбросов дизелей: по углеводородам – с 1,10 до 0,25 г/(кВт·ч); по оксидам азота – с 8,00 до 2,00 г/(кВт·ч); по оксиду углерода – с 4,50 до 1,50 г/(кВт·ч); по твердым частицам – с 0,36 до 0,02 г/(кВт·ч).

Изучение структуры состава твердых частиц позволяет определять основные направления снижения их выбросов за счет совершенствования фильтрации отработавших газов на выпуске.

**Целью работы** явилось изучение структуры и характеристик состава твердых частиц в отработавших газах вихрекамерных дизелей и использование результатов для решения практических задач снижения их выбросов в атмосферу.

**Объект исследования** – твердые частицы в составе отработавших газов четырехтактного вихрекамерного двигателя с воспламенением от сжатия.

**Предмет исследования** – структура и происхождение твердых частиц в составе отработавших газов дизеля.

**Научная новизна** – установлены закономерности структуры и происхождения твердых частиц в составе отработавших газов вихрекамерного дизеля, применены новые инструментальные методы исследования твердых частиц в составе отработавших газов, развито представление о распределении

твердых частиц по размерам в зависимости от режимов работы регулировок дизеля, установлены закономерности изменения состава и размеров твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля.

Работа выполнена как часть целевой комплексной программы СО РАН «Экология», блок «Атмосфера», научно-технической программы Минобразования Российской Федерации, Перспективного плана развития НИР Алтайского государственного технического университета (АлтГТУ) им. И.И. Ползунова.

**Задачами исследования** явились следующие:

1. Методом математического планирования эксперимента получить регрессионную модель выбросов ТЧ с отработавшими газами вихрекамерного дизеля от параметров рабочего процесса и регулировок топливоподачи;

2. Изучить на регрессионной модели влияние различных параметров на массовые выбросы ТЧ в результате их образования в цилиндрах вихрекамерного дизеля;

3. Осуществить стендовые и лабораторные исследования структуры и состава твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля при изменении параметров его рабочего процесса;

4. Изучить на основе экспериментальных исследований влияние регулировочных, скоростных и нагрузочных параметров на состав и структуру твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля;

5. Использовать результаты изучения структуры твердых частиц при создании фильтра с селективной очисткой отработавших газов.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач реализовалось на основе теоретических методов, методов численного эксперимента на математической модели, лабораторном изучении состава твердых частиц и устройств для их улавливания в системе выпуска дизеля.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что выявление структуры и состава твердых частиц в составе отработавших газов вихрекамерного дизеля позволяет направить внимание при решении задач снижения вредных выбросов дизелей на селективную очистку в сажевых фильтрах.

**Реализация** результатов работы заключается в том, что при доводке вихрекамерных дизелей появляется возможность учитывать не только количество по массе, но и структуру твердых частиц при оценке рабочего процесса по недогоранию. Рекомендации и программный комплекс переданы для использования результатов исследований ФГУП ПО «Алмаз».

**Апробация работы.** Материалы исследований, теоретических разработок и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова» в 2006-2012 годах, научно-технических семинарах автотракторного факультета АлтГТУ и ФГБОУ ВПО «Алтайского государственного аграрного университета», ФГБОУ ВПО «Красноярского государственного технического университета», ФГБОУ ВПО «Новосибирской государственной академии водного транспорта», ФГБОУ ВПО «Новосибирского государственного аграрного университета».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных статей, в том числе 3-в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов и списка литературы. Содержит 163 страницы, 50 рисунков, 31 таблицу и 131 цитированный источник.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность работы, сформулированы научная проблема, цель и задачи исследования, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** отмечен вклад отечественных и зарубежных ученых в изучении твердых частиц в составе продуктов сгорания углеводородных топлив.

Вопросу изучения характеристик твердых частиц в составе продуктов сгорания занимались в разное время С.А. Батурич, В.И. Смайлис, А.С. Предводителев и Л.Н. Хитрин, В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов B.S. Haunes, H.G. Wagner, П.А. Теснер, А.Д. Кокурин, Р.З. Магарил. Работы этих авторов были посвящены горению углерода, основам практической теории горения, образования сажи при горении, механизму и кинетике гомогенных термических превращений углеводородов и явились основой для дальнейшего изучения процессов образования твердых частиц при сгорании топлива в дизелях.

Процессы образования сажи, входящей в состав твердых частиц, описали R. Long, D. Chakraborty, A. Spring, S. Georg, J. Donald . Ими были рассмотрены механизмы крекинга, конечным продуктом которого являются сажистые частицы, имеющие кристаллическую структуру, подобную структуре графита. Большой вклад в изучении сажистых частиц внесен Н.А. Баракем, В.Н. Смайлисом, С.А. Батуриным, Ф.Ф. Мачульским, Л.М. Шабаром.

Приведен анализ информативности сведений о характеристиках твердых частиц в отработавших газах дизелей, влияния типов смесеобразования на их содержание, основных направлениях снижения дымности и токсичности. Сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** отбирались критерии и производилось исследование по методике активного планирования эксперимента. Достоинством активного планирования является возможность получения математической модели объекта исследования в виде аппроксимирующей функции, т.е. полинома. В качестве критерия оптимизации были приняты концентрации вредных выбросов твердых частиц – ТЧ, г/м<sup>3</sup>.

Первым фактором был принят коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , вторым- угол опережения начала подачи топлива  $\Theta$ , третьим- продолжительность подачи топлива  $\varphi_{впр}$ , так как в ходе эксперимента было обнаружено влияние этих основных факторов на изменение выбросов твердых частиц.

Проведена оптимизация откликов по программе STATISTICA-6 с изображением трехмерных графиков зависимостей от функции:

$$Y = F(\alpha; \Theta; \varphi_{впр})$$

Для решения этой задачи был выбран ортогональный план второго

порядка, использовались три фактора, каждый из факторов варьировался на двух уровнях.

При решении получена матрица ортогонального плана второго порядка и уравнение регрессии:

$$\hat{y}_{\text{ТЧ}} = 0,2516 - 0,0438x_1^2 - 0,0408x_2^2 - 0,0378x_3^2, \quad (1)$$

При переходе к натуральным величинам получаем:

$$\hat{y}_{\text{ТЧ}} = -2,8095 - 0,0311\alpha^2 + 0,155\alpha - 0,0026\theta^2 + 0,102\theta - 0,031\varphi_{\text{впр}}^2 + 0,1511\varphi_{\text{впр}}, \quad (2)$$

Адекватность модели определялась с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восп}}^2}, \quad (3)$$

$S_{\text{ад}}^2$  - дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}^2 \cdot f_{\text{ост}} - S_{\text{восп}}^2 \cdot f_{\text{восп}}}{f_{\text{ад}}}, \quad (4)$$

$S_{\text{ост}}^2$  - остаточная дисперсия;  $f_{\text{ост}}$  - число степеней свободы остаточной дисперсии;  $f_{\text{восп}}$  - число степеней свободы дисперсии воспроизводимости;  $f_{\text{ад}}$  - число степеней свободы дисперсии адекватности.

для ТЧ:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{\beta}_i)^2, \quad (5)$$

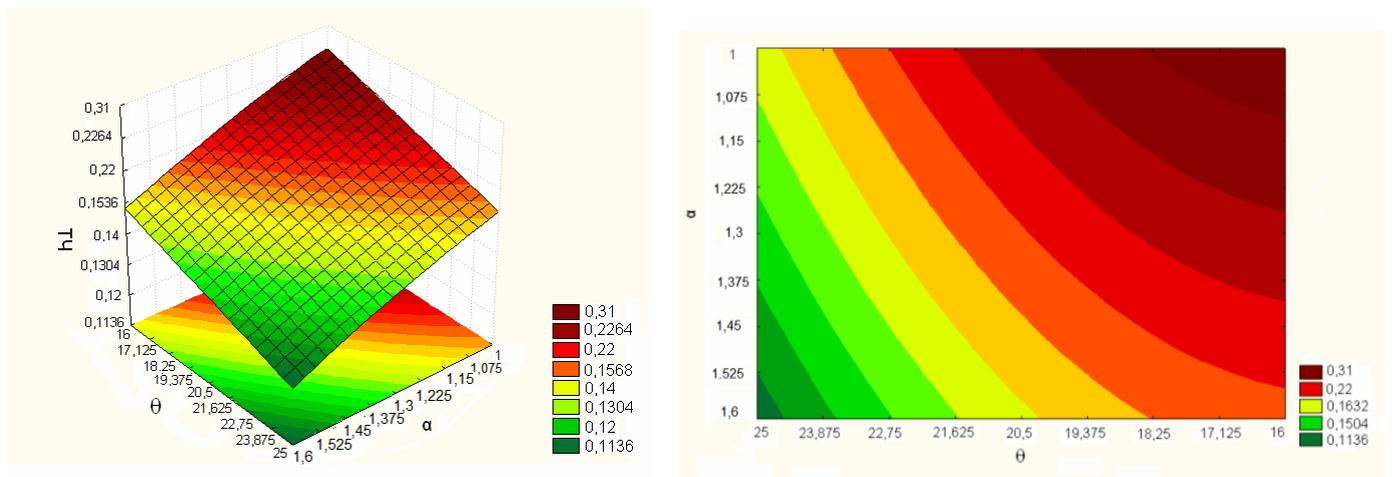
$$S_{\text{ост}}^2 = 2,7768 \cdot 10^{-2}; S_{\text{ад}}^2 = 3,2611 \cdot 10^{-2}; F = 1,93 < 3,6 = F_{0,05}(f_{\text{ад}}; f_{\text{восп}}) = F_{0,05} \quad (6)$$

$N$  - общее количество опытов;  $l$  - количество значимых коэффициентов в уравнении регрессии;  $\hat{y}$  - отклик, вычисленный с помощью уравнений (1).

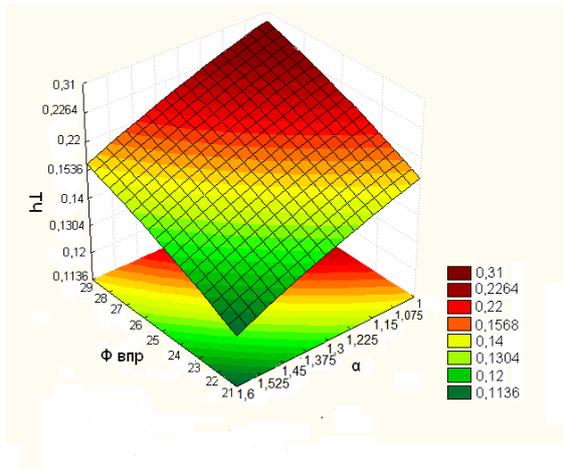
Исходя из того, что вычисленный  $F$  - критерий меньше табличного, сделан вывод: уравнения регрессии адекватно описывает экспериментальные данные с 5 % - м уровнем значимости. Полученная аппроксимирующая зависимость дала возможность построить универсальные характеристики для оценки экологических показателей двигателя, построены поверхности откликов  $\hat{y}_{\text{ТЧ}}$ . Так как уравнения регрессии получены трехфакторные, то эти графики были построены при помощи попеременной стабилизации факторов.

На основании анализа сечений поверхностей отклика (рисунок 1а) можно заключить, что при неизменном  $\varphi_{\text{впр}} = 28,^\circ \text{п.к.в.}$ , для достижения наименьшей концентрации ТЧ оптимальными значениями угла опережения начала подачи топлива являются  $\Theta = 21,5 \dots 25,^\circ \text{п.к.в.}$ , а коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,3 \dots 1,6$ . Как видно на рисунке 1б при стабилизации угла опережения начала подачи топлива  $\Theta = 24,^\circ \text{п.к.в.}$ , для получения наименьших концентраций ТЧ оптимальными значениями продолжительности подачи топлива являются  $\varphi_{\text{впр}} = 21 \dots 24,^\circ \text{п.к.в.}$ , а коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,3 \dots 1,6$ .

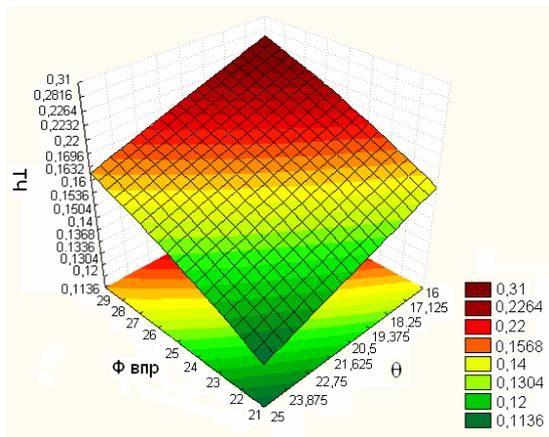
Из рисунка 1в видно, что для снижения концентрации ТЧ при стабилизации переменной  $\alpha = 1,6$ , оптимальными значениями продолжительности подачи топлива являются  $\varphi_{\text{впр}} = 21 \dots 24,^\circ \text{п.к.в.}$ , а угла



а)



б)



в)

Рисунок 1. Поверхности откликов характеризующие изменения концентраций твердых частиц для двигателя ВАЗ-341 (4Ч 7,6/8,4), работающего на дизельном топливе в зависимости от стабилизации переменных: а) при стабилизации продолжительности подачи топлива  $\phi_{впр} = 28, \text{ } ^\circ\text{п.к.в}$ ; б) при стабилизации угла опережения начала подачи топлива  $\Theta = 24, \text{ } ^\circ\text{п.к.в}$ ; в) при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,6$ .

опережения начала подачи топлива  $\Theta = 21,5 \dots 25, \text{ } ^\circ\text{п.к.в}$ .

Таким образом из рисунка 1 можно увидеть как изменяются концентрации вредных выбросов двигателя ВАЗ-341 работающего на дизельном топливе.

**В главе 3** описаны экспериментальная установка и методики проведения испытаний, отдельные методики проведения исследований твердых частиц в составе отработавших газов.

Согласно целям и задачам исследования был проведен комплекс работ, обеспечивающих информацией для анализа структуры и характеристик твердых частиц в составе отработавших газов дизеля в зависимости от параметров рабочего процесса вихрекамерного дизеля.

Моторные исследования были проведены на дизелях 4Ч 7,6/8,4 для легкового автомобиля по внешней скоростной характеристике в диапазоне частот вращения 2700...4500 мин<sup>-1</sup> и нагрузочным характеристикам при 4500 мин<sup>-1</sup> всеми измерениями, предусмотренными ГОСТ 10448-80, ГОСТ Р 41.24-99, ГОСТ Р 51.249-99, ГОСТ 24060.12-79 при работе на дизельном топливе Л-0, 2-40 согласно ГОСТ 305-82, масле APISG/CESAE 15W40 Уфалоб-Супер ТУ 38.30104-61-96.

Продолжительность измерения расхода топлива составляла не менее 30 секунд. Измерения содержания твердых частиц в составе отработавших газов производилось по шесть раз на каждом из режимов испытаний дизеля. Для установления соответствия стандартам ЕЭК ООН было предусмотрено проведение испытаний по 13-режимному испытательному циклу в стендовых условиях.

Поскольку анализ содержания в отработавших газах только твердых частиц не дает полного представления о токсичности дизеля, было предусмотрено измерение содержания оксида углерода СО и углеводородов суммарно С<sub>x</sub>Н<sub>y</sub> с использованием газоанализатора RS-325L, дымности отработавших газов дымомером «BOSCH» EFAW65A с помощью бумажных фильтров диаметром 40 мм с размером пор около 2,5 мкм. Полученные при помощи дымомера фильтры проходили обработку, сушку и представлялись на анализ состава твердых частиц.

Дымность отработавших газов определялась по ГОСТ Р 41.24-99 на моторном стенде. При проведении испытаний в стендовых условиях была использована имитация стационарного 13-режимного цикла, применяемого для двигателей, устанавливаемых на транспортные средства, начиная с категории М1 полной массой более 3,5 т. Оценка вредных выбросов с отработавшими газами проводилась по удельным средневзвешенным оценочным показателям в г/(кВт·ч) согласно ГОСТ Р 41.49-99.

Определение состава твердых частиц по происхождению проводилось путем обработки фильтра, осажденного из отработавших газов дизеля на волокнистый фильтр Петрянова и бумажный фильтр с помощью дымометра «BOSCH» EFAW – 68A.

Перед проведением испытаний фильтры в бюксах, с приоткрытыми крышками помещались в сушильный шкаф над влагопоглощающим веществом – серной кислотой в емкости – на 30 минут. Если два последующих взвешивания после высушивания давали разницу, не превышающую 0,0004г, то масса фильтра считалась постоянной. Бюксы закрывались, маркировались и направлялись на фильтрацию отработавших газов.

После фильтрации отработавших газов фильтры вновь высушивались и взвешивались. В результате определялась масса твердых частиц на фильтре. Бумажные фильтры направлялись после высушивания на определение фракционного состава твердых частиц методом электронно-оптической обработки на микроскопе, соединенном с камерой «SAMSUNG» и ЭВМ.

При изучении дисперсности твердых частиц в составе отработавших газов дизелей использовался специально созданный в АлтГТУ комплекс, включающий микроскоп МС-10, соединенный с цифровой видеокамерой «Samsung» разрешением  $720 \times 576$  точек на  $\text{мм}^2$  и ПЭВМ. Обработка данных цифровой информации производилась по специальной программе «Adobe Premiere 6.0» с получением видеоряда отдельных фрагментов фильтров с осаждением твердыми частицами, статистического распределения для частиц по средним условным диаметрам (в мкм) и статического суммарного распределения частиц по средним условным диаметрам в процентах от общего количества на фильтре.

Используя результаты исследований дисперсности ТЧ, разработан многоступенчатый комбинированный фильтр для очистки газов от твердых частиц (рисунок 2) с секциями имеющими различную пористость фильтров, который обеспечил очистку газов от ТЧ на 90% на всех режимах работы дизеля.

При создании конструкции комбинированного фильтра за прототип принята конструкция ранее созданного в АлтГТУ кассетного каталитического нейтрализатора (патент на изобретение RV 2267014 С1, опубл. 27.12.2005, бюл. №36).

Идея конструкции комбинированного фильтра твердых частиц заключается в очистке газов в зависимости от режимов работы дизеля в фильтрующих материалах с различными средними диаметрами пор.

Такое устройство комбинированного фильтра обеспечивало удельную площадь фильтрации газов равную  $F \frac{УД}{ФП} = \frac{F_{ФП}}{V_{ог}} = 3,75 \cdot 10^{-4} (\text{м}^3/\text{ч})^{-1}$  при различной его пористости, что, в свою очередь, в зависимости от режима работы дизеля позволило вести избирательную очистку отработавших газов от твердых частиц.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований структуры и состава твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля. Оценка экологических показателей дизеля проведена в стендовых условиях в соответствии с ГОСТ 41.49-99 и ГОСТ Р 41.24-99. Для дизеля 4Ч 7,6/8,4 оценочные показатели составили: по оксидам азота  $g_{\text{NO}_x} = 3,97$  г/(кВт·ч); по оксиду углерода  $g_{\text{CO}} = 6,14$  г/(кВт·ч); по углеводородам  $g_{\text{CH}} = 0,14$  г/(кВт·ч), в то время как допустимые выбросы по ЕВРО-4 с 01.10.05г. составляют:  $[g_{\text{NO}_x}] = 3,50$  г/(кВт·ч);  $[g_{\text{CO}}] = 1,50$  г/(кВт·ч);  $[g_{\text{CH}}] = 0,46$  г/(кВт·ч). Выбросы твердых частиц достигают 0,035...0,036 г/(кВт·ч) при норме ЕВРО-4 0,02 г/(кВт·ч).

В результате определения характеристик твердых частиц в зависимости от разрежения на впуске со 100 до 550 мм вод. ст. обнаружено увеличение выбросов с 0,12 до 0,43 г/м<sup>3</sup>. Отмечено укрупнение твердых частиц и увеличение их количества до  $d_{\text{ТЧ}} \geq 12$  мкм, более чем в два раза, что свидетельствует об ухудшении качества сгорания.

подавляющее большинство твердых частиц имеют средние приведенные диаметры 6...8 мкм и свыше 8 мкм. При этом количество частиц топливного

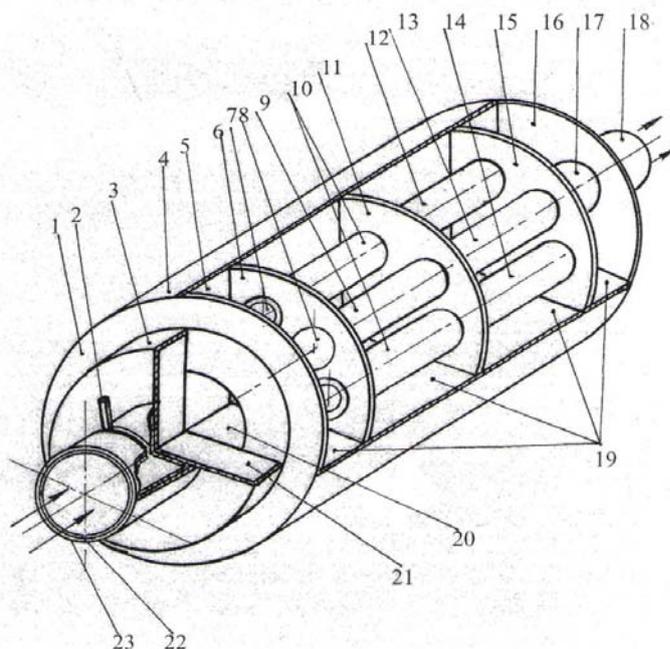


Рисунок 2. Многоступенчатый фильтр для очистки отработавших газов дизеля от твердых частиц. 1,16 - торцевые стенки; 2 - поворотный рычаг; 3 - коллектор газораспределения; 4 - корпус; 5, 19 - продольные перегородки; 6, 11, 15 - поперечные перегородки; 7 - отверстие; 8 - глухая стенка; 9 - фильтр второй ступени; 10 - фильтры первой ступени; 12, 14 - фильтры четвертой ступени; 13 - фильтр третьей ступени; 17 - отверстие; 18 - выпускной патрубок; 20 - окно; 21 - разделительная переборка; 22 - внутренняя поворотная труба; 23 - внешняя труба подвода газов.

происхождения увеличивается с 50 до 68%, количество сульфатов воды с 6 до 17%, сажи топливного происхождения с 20 до 46%.

В результате определения характеристик твердых частиц в отработавших газах при увеличении противодавления на впуске с 1150 до 2300 мм вод. ст. выбросы с 0,10 до 0,50 г/м<sup>3</sup>. происходит снижение выбросов частиц с размерами 2...4 мкм, увеличение выбросов с размерами 4...6 и 6...8 мкм, появляются частицы с размерами 8...10, 10...12, 14...16, и 18...20 мкм. Количество твердых частиц топливного происхождения увеличивается до 46%, что свидетельствует об ухудшении сгорания в дизеле.

Изучены закономерности изменения характеристик твердых частиц при изменении частоты вращения с 2750 до 4500 мин<sup>-1</sup> по внешней скоростной характеристике и по нагрузочной характеристике 4500 мин<sup>-1</sup>.

В результате проведения исследований были установлены закономерности распределения твердых частиц по размерам и происхождению в зависимости от давления начала впрыска топлива обеспечиваемого затяжкой пружины штифтовой форсунки, изменяемого от 12 до 17,5 МПа. При увеличении давления начала подачи топлива в исследуемом диапазоне обнаружено снижение выбросов твердых частиц с 0,42 до 0,14 г/м<sup>3</sup> (таблица 1). Содержание в отработавших газах частиц размерами 2...4 мкм и 4...6 мкм уменьшается соответственно в 1,57 и 2,8 раза, содержание частиц размером 6...8 мкм сохраняется, а размерами с выше 10 мкм снижается в 9 раз.

Таблица 1-Дисперсный состав твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля 4Ч 7,6/8,4 при увеличении давления начала впрыска

Переменная $P_{\phi}$ , МПа	Частотность появления, $N(d_{TЧ})$					
	0-2 мкм	2-4 мкм	4-6 мкм	6-8 мкм	8-10 мкм	свыше 10 мкм
12,0	2	11	14	5	2	9
13,5	2	10	11	5	1,5	8
15,0	2	9	9	5	1,5	4
16,5	2	8	7	5	1,0	2
17,5	2	7	5	5	1,0	1

Увеличение давления начала впрыска топлива приводит к снижению доли частиц топливного происхождения с 58 до 32 %, что свидетельствует об улучшении условий выгорания топлива. Снижается количество органических фракций. Вместе с этим увеличивается с 42 до 68% доля частиц масляного происхождения, что свидетельствует об условиях худших их выгорания. Доля частиц сажи масляного происхождения увеличивается с 26 до 36% (таблица 2).

Распределение ТЧ подчиняется уравнению  $y = 0,007x^2 - 0,272x + 2,609$ .

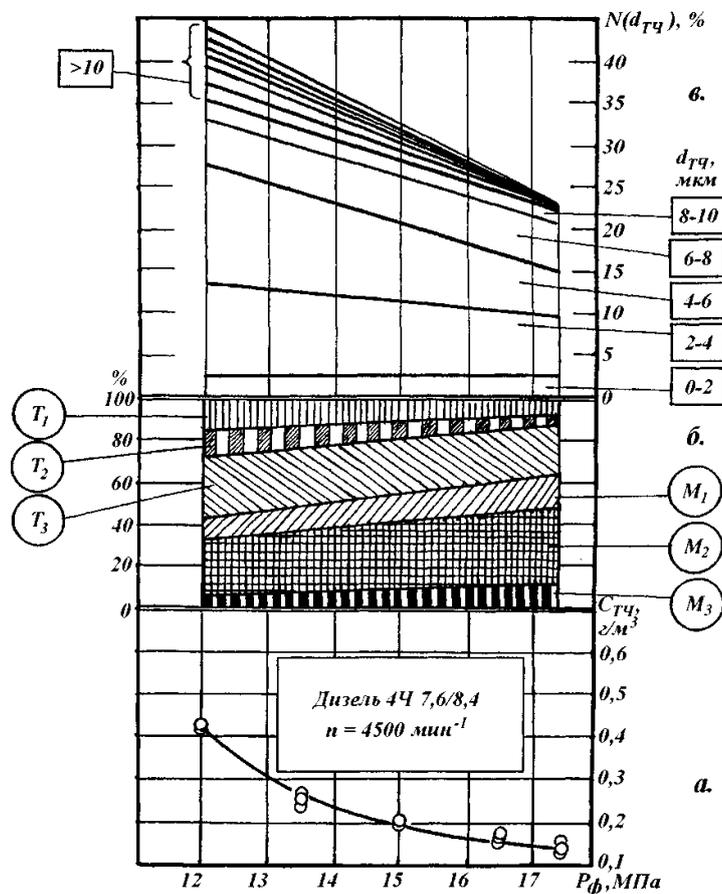
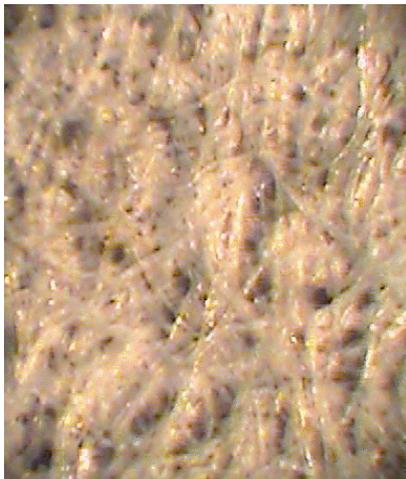


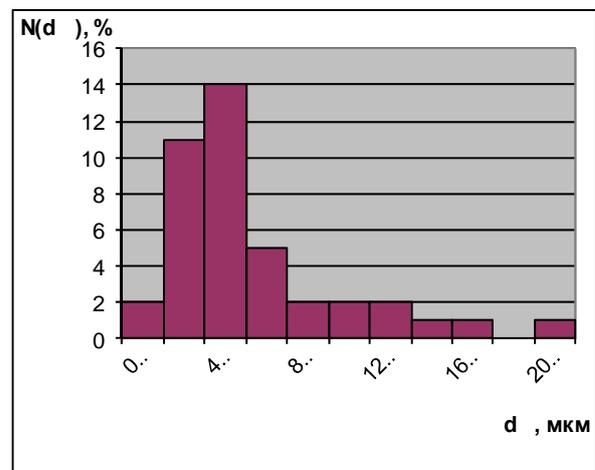
Рисунок 3. Изменение характеристик твердых частиц в составе отработавших газов дизеля 4Ч 7,6/8,4 в зависимости от давления начала впрыска топлива: а - массовые выбросы ТЧ; б - состав ТЧ по происхождению; в - размеры ТЧ и их относительное количество. Где: Т1 – сульфаты воды; Т2 – органически растворимые фракции топлива; Т3 – сажа топливного происхождения; М1 – органически нерастворимые фракции масла; М2 – сажа масляного происхождения; М3 – органически растворимые фракции масла

Таблица 2-Изменение состава твердых частиц в отработавших газах дизеля 4Ч 7,6/8,4 в зависимости от давления начала впрыска топлива

Р <sub>ф</sub> , МПа	С <sub>тч</sub> , г/м <sup>3</sup>	Твердые частицы в отработавших газах, % по массе							
		Топливного происхождения				Масляного происхождения			
		Сульфаты воды	Сажа	Органически растворимые фракции	Всего	Органически нерастворимые фракции	Сажа	Органически растворимые фракции	Всего
12	0,42	14	30	14	58	10	26	6	42
15	0,21	10	26	12	48	12	32	8	52
16,5	0,16	8	24	6	38	14	34	10	58
17,5	0,14	6	22	4	32	16	36	16	68



а



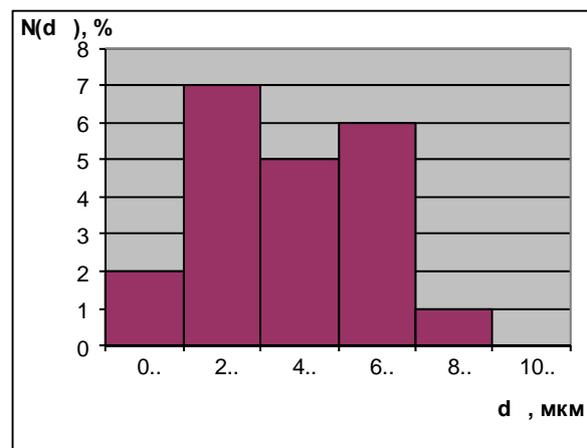
б

Рисунок 4. Характер распределения твердых частиц при Ne = 39 кВт; n = 4500 мин-1, давление начала впрыска топлива Р<sub>ф</sub> = 12 МПа:

а – на бумажном фильтре при отборе газов из коллектора;  
б – по средним приведенным диаметрам частиц.



а



б

Рисунок 5. Характер распределения твердых частиц при Ne = 39 кВт; n = 4500 мин-1, давление начала впрыска топлива Р<sub>ф</sub> = 17,5 МПа:

а – на бумажном фильтре при отборе газов из коллектора;  
б – по средним приведенным диаметрам частиц.

Таблица 3- Изменение состава твердых частиц в отработавших газах дизеля 4Ч 7,6/8,4 в зависимости от величины разрежения, создаваемого на впуске.

$\Delta P_{вп}$ , мм рт.ст.	$C_{тч}$ г/м <sup>3</sup>	Твердые частицы в отработавших газах, % по массе							
		Топливного происхождения				Масляного происхождения			
		Сульфаты воды	Сажа	Органически растворимые фракции	Всего	Органически нерастворимые фракции	Сажа	Органически растворимые фракции	Всего
100	0,12	6	20	24	50	30	13	7	50
300	0,22	8	30	16	54	24	12	10	46
450	0,37	12	42	10	64	16	10	10	36
500	0,42	17	46	5	68	14	8	10	32

Подобным образом изучено влияние на изменение характеристик твердых частиц в зависимости от условий на впуске, выпуске и условий охлаждения, по внешней скоростной и нагрузочной характеристикам, в зависимости от регулировочных характеристик, а также от условий сгорания в камере быстроходного вихрекамерного дизеля.

Оценка экологических показателей дизеля 4Ч 7,6/8,4 показала, что: выбросы оксидов азота превышают нормы ЕВРО-4 в 1,13 раза; оксиды углерода – в 4 раза; выбросы углеводородов укладываются в нормы; выбросы твердых частиц превышают требования норм в 1,6 раза, поэтому дизель требует как доработки рабочего процесса, так и установки каталитического нейтрализатора с фильтром твердых частиц на выпуске.

Выявлен состав и структура твердых частиц по их происхождению, обнаружены изменения числовых характеристик содержания твердых сульфатов воды, сажи, органически растворимых фракций топливного происхождения, органически растворимых, органически нерастворимых фракций и сажи масляного происхождения в зависимости от параметров вихрекамерного дизеля и получены закономерности распределений твердых частиц по средним приведенным диаметрам, при этом:

- при изменении разрежения  $\Delta P_{вп}$  со 100 до 570 мм вод. ст. масса частиц топливного происхождения изменяется с 50 до 68%. Увеличивается с 6 до 17% содержание сульфатов воды, а количество сажи топливного происхождения увеличивается с 20 до 46%. При этом количество органически нерастворимых фракций в твердых частицах уменьшается с 30 до 14%, а сажи масляного происхождения с 13 до 8%. А общее количество твердых частиц масляного происхождения по массе уменьшается с 50 до 32% (таблица 3);

- при изменении противодавления на выпуске с 1150 до 2500 мм вод. ст. масса частиц топливного происхождения изменяется с 26% до 46%. Это свидетельствует прежде всего об уменьшении полноты сгорания в цилиндрах дизеля. Количество ТЧ, представляющих собой сульфаты воды увеличивается с 8% до 12%. Количество органически нерастворимых фракций топливного происхождения уменьшается с 12% до 2%. Количество органически нерастворимых фракций масляного происхождения снижается с 38% до 24%, а органически растворимых фракций масляного происхождения снижается с 12% до 6%;

- при изменении  $t_{\text{охл.}}$  с 60°C до 94°C масса частиц топливного происхождения изменяется с 74% до 67 %, выбросы твердых частиц с отработавшими газами снижаются в 1,24 раза;

- при изменении частоты вращения с 2750 до 4500 мин<sup>-1</sup> масса частиц топливного происхождения изменяется с 50 до 68%. Количество сульфатов воды в составе отработавших газов дизеля увеличивается с 6 до 14%. Количество органически растворимых фракций топлива снижается с 20 до 8%. Количество частиц масляного происхождения снижается с 50 до 32%. При этом количество сажи масляного происхождения снижается с 25 до 20%;

- при изменении относительной нагрузки с 12,5% до 100% масса частиц топливного происхождения изменяется с 40 до 60%. Количество сажи топливного происхождения возрастает при этом незначительно. С увеличением нагрузки увеличение выбросов органически растворимых фракций в два раза, свидетельствует о резком ухудшении условий сгорания в цилиндре дизеля;

- при изменении угла  $\theta$  с 16 до 24 град. п.к.в. до ВМТ масса частиц топливного происхождения остается приблизительно постоянной, равной 66%. При увеличении угла опережения происходит снижение массы частиц сажи топливного происхождения при некотором увеличении массы сульфатов воды. Количественная оценка частиц масляного происхождения показала, что относительная масса частиц сажи масляного происхождения и количество органически растворимых и нерастворимых частиц практически остается неизменным;

- при изменении  $\varphi_{\text{впр}}$  с 21 град. п.к.в. до 28 град. п.к.в. масса частиц топливного происхождения изменяется с 45 до 67%. В основном это изменение происходит за счет увеличения доли сажи топливного происхождения с 21% до 47%. Относительная доля сульфатов воды снижается с 17 до 10%;

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определено влияние изменения разряжения на впуске в пределах 100...570 мм вод.ст., противодавления на впуске в пределах 1150...2500 мм вод.ст., температуры охлаждающей жидкости в пределах 60...94 °С, частоты вращения коленчатого вала в пределах 2750...4500 мин<sup>-1</sup>, изменение относительной нагрузки в пределах 12,5...100%, давление начала впрыска от 12 до 17,5 МПа, угла опережения начала подачи топлива с 16 до 24 град. п.к.в. до ВМТ, продолжительности топливоподачи с 21 до 28 град. п.к.в., коэффициента избытка воздуха в пределах 1,26 до 3,6, позволившее выявить структурный и дисперсионный состав твердых частиц в составе отработавших газов вихрекамерного дизеля.

2. Методом математического планирования эксперимента получена регрессионная модель результирующего выделения твердых частиц по массе с отработавшими газами вихрекамерного дизеля в зависимости от коэффициента избытка воздуха, угла опережения начала подачи топлива, продолжительности подачи топлива, позволившая с точностью 7...8% установить оптимальные значения: продолжительности подачи топлива 24 град. п.к.в., угла опережения начала подачи топлива 24 град. п.к.в. до ВМТ, коэффициента избытка воздуха 1,45.

3. Разработана методика и приведены стендовые и лабораторные исследования, позволившие осуществить изучение дисперсности частиц с определением их среднего приведенного диаметра и получением распределений, разделением частиц по происхождению (топливного, масляного), выделением сульфатов воды, сажи, органически растворимых и нерастворимых фракций.

4. Изучено влияние регулировочных, скоростных и нагрузочных режимов на дисперсность и структурный состав твердых частиц в составе отработавших газов вихрекамерных двигателей, позволяющее использовать данные при моделировании результирующего сажевыделения.

5. Результаты изучения структуры и состава твердых частиц использованы при разработке конструкции селективного фильтра с низким сопротивлением, позволившим добиться очистки отработавших газов на 90% на всех режимах работы.

**Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

***статьи в изданиях, рекомендованных ВАК-***

1. Стопарева Т.А., Грабовская Н.Н., Унгефук А.А., Павлов Ю.В. Уровни вредных выбросов транспортных дизелей / Т.А. Стопарева, Н.Н. Грабовская, А.А. Унгефук, Ю.В. Павлов // Ползуновский вестник. – 2009. – №2. – С.88-92.
2. Новоселова А.Л., Мельберт А.А., Унгефук А.А. и др. Оценка возможности очистки газов пористыми СВС-фильтрами/ Новоселова А.Л., Мельберт А.А., Унгефук А.А. и др.// Экология промышленного производства. – 2008.- №4.- С.16-18.
3. Новоселов А.Л., Батурин Н.В., Унгефук А.А. Возможности замещения благородных металлов при решении экологических проблем транспорта/ Новоселов А.Л., Батурин Н.В., Унгефук А.А. // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока: научный журнал . – 2008. – №1. – С. 194–197.

***публикации в других изданиях-***

4. Мельберт А.А., Унгефук А.А., Щуцкая Л.С. Возможность предварительной оценки вредных выбросов дизелей /А.А.Мельберт, А.А.Унгефук, Л.С.Щуцкая. – Ползуновский альманах – 2011.- №2.- С.132-135.
5. Унгефук А.А., Милюкова И.В. Характеристики твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля в зависимости от угла опережения начала подачи топлива // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: под ред. д.т.н., профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова/ Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011.-С.124-128.
6. Унгефук А.А. Результаты определения характеристики твердых частиц в отработавших газах вихрекамерного дизеля в зависимости от давления начала впрыска топлива// Повышение экологической безопасности автотракторной техники: под ред. д.т.н., профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова/ Российская академия транспорта,

- АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011.-С.110-113.
7. Новоселова А.Л., Унгефук А.А. Характеристики твердых частиц в отработавших газах дизелей в зависимости от продолжительности подачи топлива в вихрекамеру быстроходного дизеля// Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; под редакцией д.т.н., профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова/ Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И.Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011.- С.116-119 .
  8. Мельберт А.А., Новоселов А.Л. Унгефук А.А., Новоселова Н.Д. Особенности состава отработавших газов дизелей /А.А.Мельберт, А.Л. Новоселов, А.А.Унгефук, Н.Д. Новоселова // Снижение вредных выбросов дизелей каталитической нейтрализацией газов : сборник статей / под ред. д.т.н., профессора А.Л.Новоселова / Российский союз НИО Алтайское краевое правление. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 3-6.
  9. Унгефук А.А., Новоселов А.Л. Твердые частицы в отработавших газах дизеля//Научное творчество студентов и сотрудников автотранспортного факультета/67-я н-т конф. студ, аспирант, и ППС тех. ун-та, посвященная 200-летию транспортного образования в России. Ч1 – Барнаул: АлтГТУ 2009 С.88-90.
  - 10.Новоселов А.Л., Мельберт А.А., Унгефук А.А. Возможности математического моделирования вредных выбросов дизелей// Проблемы совершенствования энергетических установок.-Барнаул: Российский союз НИО, 2008.-С.90-95.
  - 11.Новоселов А.Л., Новоселов А.А., Унгефук А.А. Дизель как источник антропогенного загрязнения окружающей среды// Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями.- Барнаул: Российский союз НИО, 2007.- С.29-33.