

Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана

САЖЕУЛОВИТЕЛИ

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана  
1995

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э.Баумана

САЖЕУЛОВИТЕЛИ

Рекомендовано редсоветом МГТУ в качестве учебного пособия  
по курсу  
"Экобиозащита транспортных энергетических установок"

Под редакцией С.В.Велова

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана  
1995

Рецензенты: В.А.Девисилов, Э.П.Пышкина

С14 Сажеуловители: Учеб. пособие по курсу "Экобиозащита транспортных энергетических установок" / Белов С.В., Карпов Е.В., Спиридонов В.С., Кирикова О.В.; Под ред. Белова С.В. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1995. - 32 с., ил.

В пособии рассмотрена экологическая проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания. Наиболее радикальным решением этой проблемы является оснащение дизельных двигателей фильтрами-сажеуловителями.

Для студентов 4 - 5-го курсов и студентов-дипломников.  
Ил. 13. Табл. 3. Библиогр. 4 назв.

ББК 31.365:28.081

Редакция заказной литературы

Сергей Викторович Белов  
Евгений Васильевич Карпов  
Владимир Сергеевич Спиридонов  
Ольга Викторовна Кирикова

Сажеуловители

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалевская

Редактор Е.К.Кашелева

Корректор О.В.Калашникова

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1995.

Подписано в печать 27.10.95. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.  
Печ.л. 2,0. Усл.печ.л. 1,86. Уч.-изд.л. 1,71. Тираж 300 экз.  
Изд. № 81. Заказ № 429. С 127

Издательство МГТУ, типография МГТУ.  
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Несмотря на негативное воздействие отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на здоровье человека и окружающую природу, в мире сохраняется устойчивая тенденция к росту числа эксплуатируемых транспортных средств и стационарных установок с ДВС. По прогнозам, к 2000 г. численность автомобильного парка с ДВС составит 520 млн шт. (400 - легковые, 120 - грузовые).

Высокая тепловая экономичность дизелей (эксплуатационный КПД 30...35%, а с турбонаддувом - до 45% вместо 20...25% у карбюраторных двигателей), способность работать на более дешевом дизельном топливе, возможность получения относительно больших мощностей предопределили доминирующее положение дизеля в мировом грузовом и автобусном парке. Прогнозируется, что к 2000 г. 25...30% всех легковых автомобилей будут иметь дизели.

Увеличение числа дизельных ДВС сопровождается ростом выбросов сажи в атмосферный воздух городов и других населенных мест, отрицательно сказывается на составе воздуха и требует принятия радикальных мер по снижению концентрации сажи в ОГ дизелей всех типов.

На основании прогнозов, к 2000 г. в США значительно возрастут выбросы частиц сажи в атмосферу от работающих дизелей (в 1986 г. выбросы твердых частиц составили 8,7 тыс. т, а к 2000 г. они предположительно составят 100,0 тыс. т). При этом суммарный ущерб от заболеваний, загрязнения почв, воздуха, разрушения материалов, ухудшения видимости на дорогах и т.д. в 1995 г. оценивается суммой свыше 32,36 млрд долл., тогда как затраты на установку системы очистки отработавших газов дизелей составят около 347 млн долл. Следует отметить, что наиболее серьезные опасения вызывает рост онкологических и респираторных заболеваний, обусловленный наличием вредных примесей в воздухе.

Применяемые в настоящее время меры по снижению выбросов сажи сводятся к совершенствованию рабочего процесса сгорания в дизелях; применению различных добавок к дизельному топливу и систем рециркуляции. Наиболее интенсивно при этом применяют фильтры-сажеуловители.

Совершенствование фильтров-сажеуловителей требует решения

ряда принципиально важных задач: создание высокопористой насадки с малым гидравлическим сопротивлением, обладающей высокой коррозионной и тепловой стойкостью; обеспечение периодической регенерации насадки в процессе эксплуатации; достижение длительного ресурса работы сажеловителя; уменьшение массовых и габаритных характеристик; снижение стоимости и др.

В пособии рассмотрены принципиальные схемы сажеловителей в ДВС и их конструктивные решения.

### 1. ТОКСИЧНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Состав токсических примесей в ОГ карбюраторных ДВС и дизелей (табл. I) показывает, что дизель выделяет значительно меньше оксида углерода и углеводородов. В его ОГ содержится меньше оксидов азота, если сравнивать его с бензиновым двигателем с высокой степенью сжатия рабочей смеси. Основными недостатками дизелей являются дымность, неприятный запах ОГ и более высокий уровень шума.

Таблица I

Токсические выбросы ДВС

Токсичное вещество	Количество токсических веществ на 1000 л сжигаемого топлива, кг	
	Карбюраторный ДВС	Дизель
Оксид углерода CO	200	25
Углеводороды $C_n H_m$	25	8
Оксиды азота	20	36
Сажа	1	3
Сернистые соединения	1	30
Итого:	247	102

Повышенный выброс аэрозольных загрязнений наблюдается в дизелях на режимах высоких нагрузок. Анализ данных (см. табл. I) показывает, что дизели выбрасывают в больших количествах сажу, которая в чистом виде нетоксична. Однако частицы сажи, обладая высокой адсорбционной способностью, несут на своей поверхности молекулы

и частицы токсических веществ, в том числе и канцерогенных. Сажа может длительное время находиться во взвешенном состоянии, увеличивая тем самым время воздействия токсических веществ на человека [1 - 3].

Сажа, содержащаяся в выхлопе 2- и 4-тактных дизельных двигателей, является полидисперсной по составу и включает первичную, вторичную и третичную структуры. Причем вторичная и третичная структуры образованы цепочками частиц первичной структуры. Первичные частицы сферичны по форме, размеры их не зависят от режима и токсичности дизельного двигателя. В основном размеры первичных частиц сажи 0,04...0,06 мкм, вторичных - 0,4...0,5 мкм, а третичных - более 5 мкм. Структура сажи изменяется при движении по выпускному тракту. Так, на выхлопе из дизеля ее размер колеблется в пределах 0,02...0,05 мкм (90% от общего состава). В глушителе частиц разного размера всего лишь 40%. В выхлопных газах дизеля преобладают частицы вторичной структуры (рис. I). До 98% сажевых образований в выхлопе имеют неправильную форму. Высокой дисперсностью дизельной сажи определяется значительная удельная поверхность, достигающая 75 м<sup>2</sup>/г.



Рис. I. Состав сажевой частицы вторичной структуры

Наибольшую опасность для здоровья человека представляют сажевые частицы размером от 0,7 до 8 мкм. Частицы размером менее 0,7 мкм и более 8 мкм при вдыхании в легкие не попадают благодаря естественной самозащите дыхательных органов человека.

В ОГ в дисперсном состоянии кроме сажи содержатся капли негоревшего топлива, конденсирующиеся после охлаждения капли воды и серной кислоты, а также продукты окисления некоторых металлоорганических присадок к маслам и топливам, продукты износа трущихся деталей двигателя, продукты коррозии и эрозии материалов выпускного тракта и т.д. Из этих компонентов в последнее время все большее внимание уделяется аэрозолям серной кислоты. При этом важно, что образование серной кислоты существенно возрастает при прохождении ОГ через блок катализатора. Распределение твердых частиц, содержащихся в ОГ дизелей, по размерам показано на рис. 2

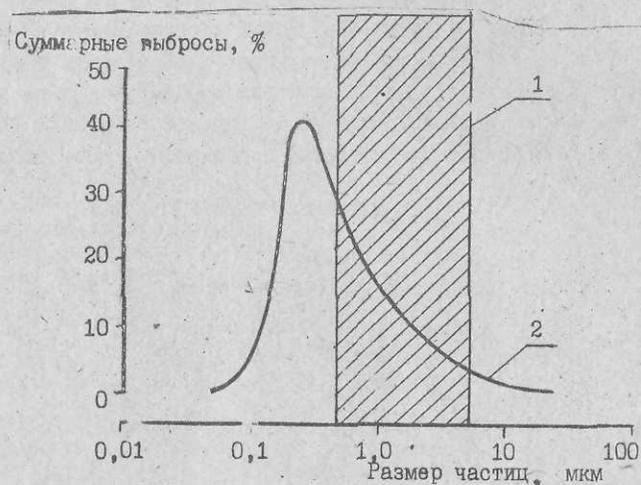


Рис. 2. Дисперсный состав твердых частиц в ОГ дизелей: 1 — диапазон размеров частиц, попадающих в дыхательные пути; 2 — кривая распределения частиц по размерам

В России нормируется предельно-допустимая концентрация (ПДК) веществ в атмосфере. Так, среднесуточная концентрация сажи в атмосфере не должна превышать  $0,05 \text{ мг/м}^3$ , а допустимая дымность ОГ дизельных ДВС определена ГОСТ 21 395-75, ГОСТ 17.2.2.01-84, ГОСТ 24028-80, ГОСТ 17.2.2.02-87.

В США в соответствии с федеральными нормами количество аэрозолей в выхлопных газах не должно превышать  $0,125 \text{ г/км}$  (в Калифорнии —  $0,05 \text{ г/км}$ ).

## 2. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

Токсичность отработавших газов дизелей можно понизить несколькими путями. К ним относятся: повышение экономичности двигателя, изменение режима работы дизеля; применение альтернативных топлив или присадок к дизельному топливу; применение дополнительных устройств-сажеуловителей; контроль за техническим состоянием двигателя и рациональное его использование.

Изменяя конструкцию дизеля, можно снизить токсичность отработавших газов. Так, переход от камеры сгорания обычного тока к вихревой камере позволяет существенно уменьшить выбросы углеводородов и оксидов азота. Применение дизелей с рециркуляцией отработавших газов также способствует уменьшению их токсичности.

Определенное снижение токсичности отработавших газов дизелей вследствие уменьшения содержания в них оксидов азота достигается при уменьшении угла опережения впрыска топлива (например, с  $25$  до  $17$  град). Однако при этом снижается мощность двигателя и растет сажевыделение.

Удельный расход топлива влияет на выделение сажи и оксидов азота из дизеля (рис. 3). Специалисты фирмы "КХД Дойтц" (ФРГ) считают, что одним из возможных путей снижения токсичности ОГ дизелей может быть увеличение удельного расхода топлива, сопровождающееся уменьшением выбросов  $\text{NO}_x$  и увеличением сажевых выбросов. Такие решения допустимы в тех случаях, когда, с одной стороны, токсичность ОГ имеет особо важное значение, а с другой — имеются эффективные сажеуловители.

Эффективным средством снижения эмиссии сажи является ограничение содержания в топливе серы. В настоящее время дизельное топливо содержит в 10 раз больше серы, чем бензин. Снижение содержания серы в дизельном топливе до  $0,05\%$  позволяет уменьшить эмиссию сажи на  $15...60\%$  (в зависимости от типа двигателя).

Снизить токсичность ОГ дизелей удается при переходе от дизельного топлива к газодизельному, представляющему собой смесь дизельного топлива и природного газа. Значительное снижение дым-

ности ОГ дизелей (до 50%) возможно при использовании присадок соединений бария к дизельному топливу в количестве 0,3...0,5% от объема топлива.

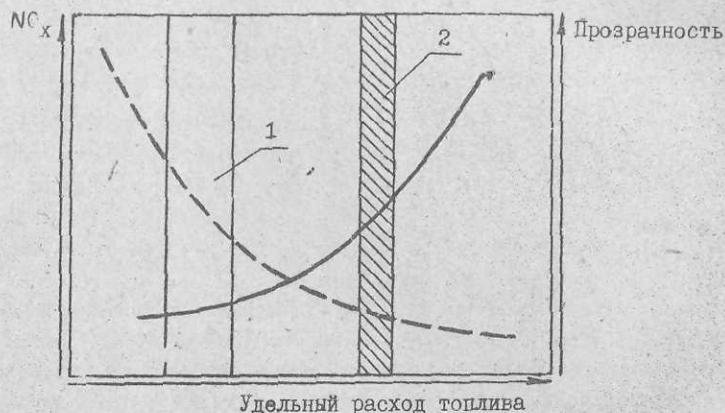


Рис. 3. Влияние удельного расхода топлива на выделение оксидов азота и сажи из дизеля:  
1 — зона экономичной регулировки дизеля; 2 — зона возможной регулировки дизеля с сажеуловителем (— — прозрачность; - - -  $NO_x$ )

Одним из радикальных способов снижения дымности ОГ дизелей является применение ловушек-сажеуловителей, которые устанавливаются в выпускном тракте дизеля и работают, как правило, по принципу фильтрации.

### 3. САЖЕУЛОВИТЕЛИ

К сажеуловителям предъявляется ряд требований: гидравлическое сопротивление сажеуловителя не должно превышать 0,015 МПа;

длительность работы 10 000 км пробега и более; эффективность улавливания сажи не менее 80%; возможность периодической регенерации фильтра; термостойкость не ниже 650°C.

Сажеуловители для дизелей, разрабатываемые зарубежными и отечественными фирмами, находят применение на дизельных автобусах, большегрузных автомобилях, шахтных и рудничных транспортных средствах и др.

Для улавливания сажи в стационарных условиях широко применяются электрофильтры различных исполнений, эффективность которых достигает 0,99. Однако в транспортных средствах они практически не используются, поскольку для их эффективной работы необходима скорость потока газа менее 0,5 м/с, обеспечиваемая очистным устройством больших габаритов.

В промышленности нашли применение комбинированные установки на базе электрофильтров-коагуляторов с последующей сепарацией сажи в высокорасходном циклоне. Применение этих установок на транспорте также ограничено. При использовании же высокоэффективных мультициклонов для очистки ОГ от сажи эффективность очистки была менее 0,60. В то же время гидравлическое сопротивление последних выхлопу составляет до 30 000 Па.

При разработке сажеуловителей используют явление коагуляции мелкодисперсной сажи. Так, в основу работы устройства, представленного на рис. 4, положена кинематическая коагуляция.

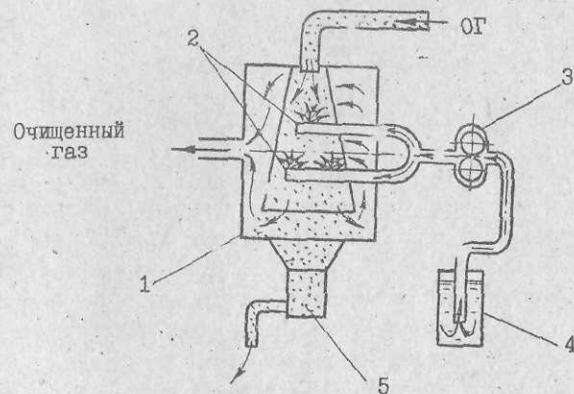


Рис. 4. Устройство для кинематической коагуляции сажи: 1 — корпус; 2 — коллектор для подачи жидкости; 3 — насос; 4 — бак для жидкости; 5 — шламосборник

Этот процесс протекает при относительном движении частиц различных размеров, возникающем под воздействием внешних сил и происходящем при разных скоростях этих частиц. Наиболее распространенный пример кинематической коагуляции – осаждение частиц на каплях, падающих в потоке очищаемых газов под действием силы тяжести.

Очистка ОГ от сажи может быть основана также на градиентной коагуляции (рис. 5), возникающей из-за различия скоростей движения частиц в различных зонах устройства. В качестве примера можно привести фильтр конструкции фирмы Corning Glass (США) и разработки другой американской фирмы Johnson Matthey.

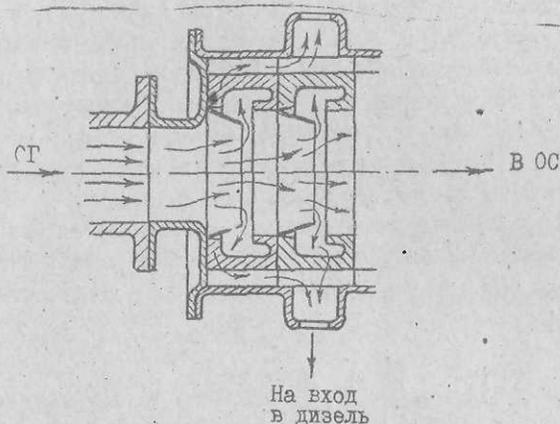


Рис. 5. Устройство для градиентной коагуляции сажи

В Англии получили развитие сажеулавливающие устройства с рециркуляцией выхлопного газа, работающие по принципу эжектора и обеспечивающие циркуляцию обогащенного сажевого облака и его взаимодействие с очищаемой струей ОГ (рис. 6). В сажеуловителях такого типа наряду с коагуляцией происходит зарастание пор в фильтре, приводящее к увеличению эффективности улавливания частиц сажи и росту гидравлического сопротивления фильтра-сажеуловителя.

Фильтрация как метод очистки ОГ от сажи не нова, однако масштабы ее применения ограничивались, с одной стороны, отсутствием материалов, обладающих необходимой и физико-химическими и прочностными свойствами, а с другой – невысокими требованиями к дымности, позволяющими обеспечить действовавшие нормы относительно простыми

10

способами. Высокое допустимое содержание сажи в ОГ ограничивало применение фильтров из-за быстрого накопления твердых частиц и повышения противодавления на выпуске двигателя. По существу, метод фильтрации эффективен и экономически целесообразен лишь в качестве заключительного этапа мероприятий по снижению дымности, т.е. для удаления лишь той сажи, от которой не удалось избавиться обычными способами, например, регулировками двигателя или изменением параметров рабочего процесса.

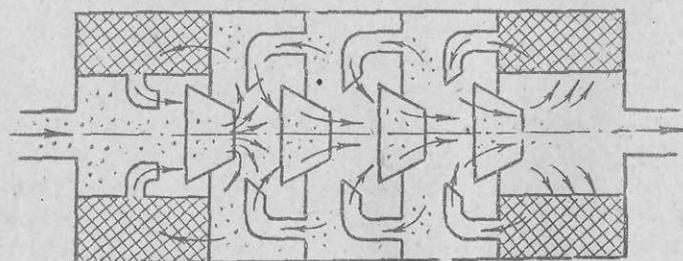


Рис. 6. Устройство для градиентной коагуляции сажи с рециркуляцией

При создании фильтров для очистки ОГ дизелей от сажи необходимо учитывать специфический характер работы таких фильтров. Помимо высокой эффективности фильтрования такие конструкции должны обладать следующими свойствами: минимальным гидравлическим сопротивлением; способностью длительно работать при различных температурах, расходах газа и содержании сажи в потоке; достаточной сажеемкостью. Желательно также сочетание в одной конструкции функций глушителя и фильтра, а в ряде случаев и каталитического нейтрализатора.

Качественно новый уровень разработок метода фильтрации ОГ был достигнут после создания ряда фильтрующих материалов и заметного сокращения дымности ОГ вследствие доводки дизелей. Известны фильтрующие элементы, созданные на базе керамических, металлических и композиционных материалов.

Среди керамических фильтрующих материалов наибольший интерес представляют керамические компактные фильтры с упорядоченной

структурой, разработанные фирмой **Corning Glass** и по форме напоминающие известные монокристаллические носители для каталитических нейтрализаторов (рис. 7). Параллельно расположенные каналы монолита с одной стороны заблокированы в шахматном порядке. В подобном же порядке, но со смещением на одну клетку заблокированы каналы с другой стороны. Стенки каналов выполнены из высокопористой керамики, размеры пор соизмеримы с размерами частиц сажи, а большая часть пор имеет открытый характер.

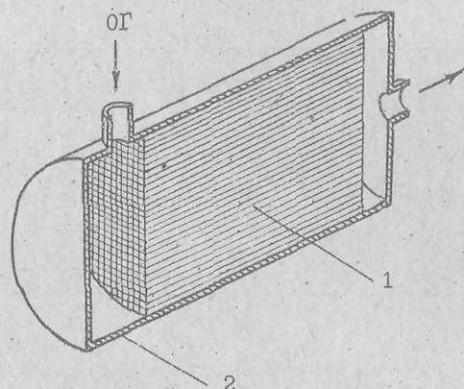


Рис. 7. Керамический монокристаллический сажеуловитель: 1 - керамический моноблок; 2 - корпус

Используя подобную структуру и обеспечивая необходимую пористость стенок каналов, оказалось возможным получать материалы с весьма высокой фильтрующей поверхностью и способностью. Примененные керамики, в частности кордиерита, обеспечивают достаточно высокую термическую и химическую стабильность фильтрующих элементов. Этот же материал, обычно в виде вспенивающейся при обжиге пасты, используют для блокирования каналов.

Применяя различные наполнители, пресс-инструмент и технологии термообработки, можно получить фильтрующие элементы с различной геометрией поверхности, эффективностью улавливания частиц, количеством накопленной сажи. Для изготовления фильтра фирма использует экструзионную технологию, обеспечивающую высокую производительность, качество и необходимые геометрические размеры каналов.

Изменяя конструкцию пресс-инструмента, фирма может изготавливать фильтрующие элементы с различной плотностью каналов. В частности, выпускаются фильтры с плотностью каналов от 16 до 32 на  $1 \text{ см}^2$ , толщиной стенок между каналами  $0,12 \dots 0,63 \text{ мм}$ , общим диаметром до 120 мм. Длина такого фильтра технологией не ограничивается, однако в соответствии с ограничениями по размерам собранной конструкции обычно не превосходит 120...150 мм. Общая пористость материала составляет  $0,40 \dots 0,50$ ; средний размер пор  $10 \dots 35 \text{ мкм}$ . Геометрическая поверхность фильтра с плотностью 16 ячеек на  $1 \text{ см}^2$  и общим объемом около 2 л составляет  $1,3 \text{ м}^2$ . При необходимости получения большей площади фильтрации могут быть использованы составные конструкции, собранные из нескольких элементов.

Следует отметить, что фирма **Corning Glass** постоянно совершенствует фильтры. Чтобы увеличить нагрузки по газу, ячеистый фильтр выполняют с диаметром большим его полезной длины, с продольным и поперечным расположением ячеек; пройдя через пористый фильтр, очищенный газ выходит как через торцевую, так и боковую поверхности или только через торцевую.

Фирма **General Motors Corporation (GMA)** специализируется исключительно на выпуске фильтров для очистки выхлопных газов дизелей. В своих конструкциях фирма делает акцент на монокерамические блоки, в порах которых заложено керамическое волокно. Так же как и фирма **Corning Glass**, она стремится увеличить поверхность контакта фильтра с ОГ с одновременным повышением жаростойкости фильтроэлемента. Кроме того, ведутся разработки по удалению сажи из каналов введением в моноблоки электронагревателей, увеличивающих температуру поверхности фильтра до  $835^\circ\text{C}$ . Фильтры из монокристаллических керамических блоков имеют эффективность очистки на саже до 30%, при сроке службы 1000 ч. Кроме того, в них осуществляется дожигание  $40 \dots 60\%$  оксида углерода и  $60 \dots 70\% \text{ C}_n\text{H}_m$ . Теплота, выделяющаяся при дожигании этих компонентов, обеспечивает интенсивное выгорание отложившихся в фильтре частичек сажи.

В стадии испытаний находятся различные системы сажевых фильтров фирмы "КХД Дойтц". На рис. 8 показана схема сажеуловителя с монокристаллическим керамическим фильтроэлементом. Пористый фильтрующий элемент сотового поперечного сечения находится в герметичном ударопрочном кожухе из коррозионно стойкой жаропрочной стали. Сажевые отложения на фильтрующем элементе периодически выжигают, для чего необходим нагрев до температуры  $600 \dots 650^\circ\text{C}$  от дополни-

тельного источника тепловой энергии. В качестве такого источника используют либо электрический нагреватель, либо горелку, работающую на дизельном топливе. Для сажевых фильтров дизелей автопогрузчиков наиболее экономична система регенерации с электронгревом. Конструкция сажевого фильтра позволяет быстро снять его с автопогрузчика для дожига. Сажевые фильтры могут работать на автопогрузчике 8-10 ч. Процесс дожига фильтра и его последующее охлаждение занимают около 1 ч.

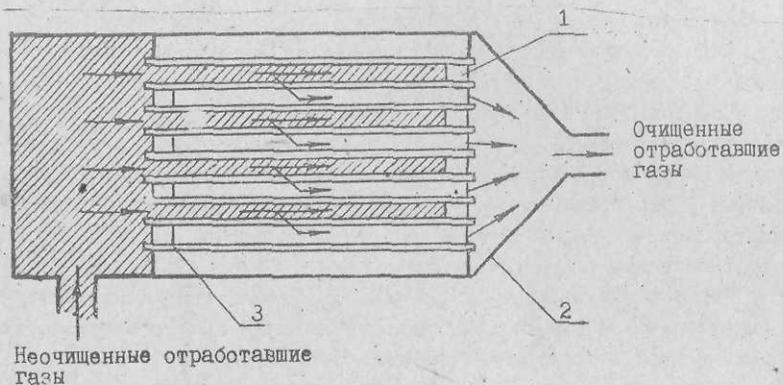


Рис. 8. Монолитный керамический фильтроэлемент фирмы "КХД Дойтц" (ФРГ): 1 - керамические заглушки; 2 - металлический корпус; 3 - пористая керамика

Другим типом керамического фильтрующего элемента являются фильтры фирмы *Brügestone Tive* (США), представляющие собой высокопористое тело со сквозными неупорядоченными каналами. Общая пористость таких элементов может достигать 0,7. Для их получения используется специальная технология, заключающаяся в пропитке пористой полиуретановой массы известью тонкоизмельченного кордиеритового порошка с последующей сушкой и обжигом. Получаемый высокопористый материал сохраняет форму полиуретановой заготовки, что дает возможность выпускать фильтрующие элементы самой разнообразной конфигурации и размеров. В России такая технология хорошо известна и используется при производстве высокопористых ячеистых металлов (ВЯМ), обладающих пористостью более 0,8 [2].

Специалисты фирмы *Johnson Matthey* основное внимание уделя-

ют разработке фильтрующих элементов на основе металлической проволоки или металловаты. Для этой цели обычно используют жаропрочные стали и сплавы типа *Carpenter 20СВ3*, *Inconel 600*, *Fecralloy* и другие, обладающие повышенной жаростойкостью и хорошими технологическими свойствами при их прокатке в волокна или тонкую проволоку диаметром 0,06...0,20 мм. Для развития поверхности и улучшения процесса фильтрации на поверхность проволоки наносят слой оксида алюминия толщиной 0,2...0,4 мм. В дальнейшем такую проволоку или волокно с покрытием прессуют в маты или другие объемные элементы, которые и устанавливают в корпус фильтра.

Ухудшение топливной экономичности двигателя с системой фильтрации на основе металлических волокон с покрытием не превышало 1,8%. При установке фильтрующих элементов на основе металлических волокон с покрытием сокращался также выброс в атмосферу сульфатов на 90%, углеводородов на 50...90% и бенз-*a*-пирена на 50%. Этот эффект обусловлен адсорбционными свойствами уловленной сажи.

Известен ряд разработок композиционных фильтров. Сажевый фильтр с регенерацией фирмы *MAN* (ФРГ) выполнен из перемежающихся слоев волнообразных стальных листов, имеющих пережимы, направленные поперек волн и плоских сетчатых листов. Отработавшие газы проходят по каналам, образованным волнами стальных листов, доходят до пережимов и сквозь сетчатые листы проходят в осевые каналы. Между двумя сетками из металлической проволоки помещают пу- танку из керамических волокон, пропускающую ОГ и улавливающую сажу. Изготовление этих листов достигается прокаткой между зубчатыми вальцами. Регенерация сажеулавливающей вставки достигается благодаря электродам, установленным в пу- танке.

Представляют интерес работы фирмы *Edo corporation* (США), специализирующейся на производстве фильтров многократного использования из жаростойкой ленты, навиваемой на спираль, а также фильтров камерного типа со слоем сыпучего материала.

Фирма *Prosecc Scientific Innovations* (США) идет по пути создания пористого инерционного фильтра из металла. Основой спекаемого металла являются частицы размером 0,5...44,0 мкм, а на поверхностный слой на толщину 0,38 мм наносятся более мелкие частицы размером 0,02...0,50 мкм, которые также спекаются.

В последнее время предложены более совершенные конструкции комбинированных фильтров. В корпусе из листовой стали устанавлива-

ется керамическая сетка. Степень очистки у этой конструкции до 0,99. Вместо керамической сетки иногда применяют так называемую металлическую шерсть, но эффективность очистки падает до 0,60... 0,70.

Специалисты фирмы Daimler Benz (ФРГ) в середине 70-х годов нашли решение проблемы сажеулавливания, применив керамические моноблоки в качестве фильтра. Параллельно с данной работой проводились исследования по созданию так называемых фильтроэлементов, представляющих собой стальные перфорированные трубы, обмотанные керамическим волокном. Фильтры с такими фильтроэлементами имеют минимальное гидравлическое сопротивление и пригодны для очистки больших объемов газа. При этом на них легко собирать фильтровальные блоки любых габаритов (рис. 9).

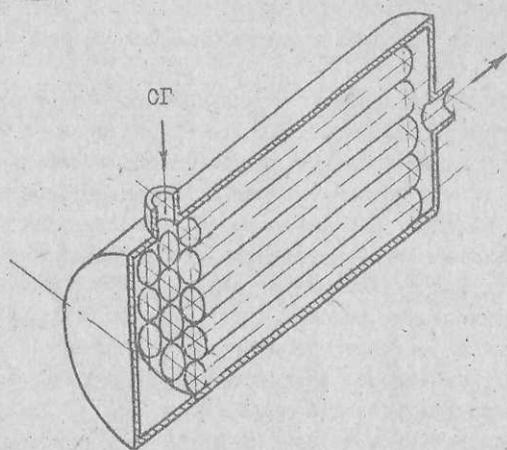


Рис. 9. Сажеуловитель фирмы Daimler Benz с фильтроэлементами из перфорированных труб

В последнее время получила развитие тенденция к комбинированию в одном устройстве нескольких аппаратов, снижающих вредное воздействие ДВС на окружающую среду. Наибольший интерес представляет глушитель шума [4], одновременно очищающий отработавшие газы двигателя от сажи.

В качестве основной компоновочной структуры глушителя-сажеу-

ловителя была использована известная схема глушителей абсорбционного типа с последовательной фрицией, у которых пористый звукопоглощающий материал выполняет роль фильтра для улавливания сажи. Был спроектирован глушитель-сажеуловитель с пористым материалом, установленным поперек канала. В качестве пористого материала был использован БЛЯМ, имеющий следующие параметры: пористость 86%;

$d_{\text{я}} = 0,66$  мм; материал - никель. Испытания проводились на стационарной дизельной установке ДЗ7Е/47 в лаборатории двигателей МГТУ им. Н.Э.Баумана. Глушитель-сажеуловитель присоединяли к выхлопному патрубку двигателя и к вентиляционному каналу. Пористый материал в виде диска диаметром 98 мм и толщиной 10 мм располагали в охлаждаемой трубе и зажимали с помощью отдельных колец, имеющих внутренний диаметр 94 мм. Для охлаждения использовали проточную водопроводную воду.

Испытания показали, что пористый материал может быть успешно использован в дизельных двигателях в качестве сажеуловителя. Двигатель с установленным глушителем-сажеуловителем проработал около двух часов, при этом изменений в работе двигателя в конце испытаний не наблюдалось. Анализ отложения сажи на поверхности пористого металла показал, что сажа налипает на перегородки ячеек пористого металла и повторяет форму и структуру материала.

Предварительные испытания глушителя на продувочном стенде показали, что глушитель обладает незначительным гидравлическим сопротивлением. Зависимость перепада давления на глушителе от расхода ОГ приведена ниже:

Расход, м <sup>3</sup> /ч .....	343	384	412	427	454
Перепад $\Delta P$ , Па ...	1756	2158	2423	2619	2884

Лабораторные испытания акустической эффективности глушителя в акустическом канале с бегущей волной показали, что эффективность вставок из пористого металла определяется толщиной и пористостью материала, а также размерами ячеек. Для выбранных нами пористых вставок (пористость 90%;  $d_{\text{я}} = 0,66$ ;  $h = 10...20$  мм) эффективность колеблется в пределе 5...10 дБ. С увеличением частоты звука эффективность пористых вставок растет, при этом на высоких частотах характер зависимости принимает вид экспоненциальной кривой.

Натурные испытания, проведенные на автомобиле МАЗ-500, пока-

зали удовлетворительное совпадение с лабораторными результатами. Испытания продолжались 2 ч, каких-либо изменений в работе двигателя за это время не наблюдалось. Контрольные взвешивания глушителя-сажеуловителя показали, что на пористых вставках в виде колец и в форме диска осело до 5...6 г сажи. На самом глушителе (завихрителе и трубах) осело менее 1 г сажи.

#### 4. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОЦЕССА САЖЕУЛАВЛИВАНИЯ

Использование сажеуловителей обычно сводится к их установке в выхлопной системе двигателя. Однако в Японии, например, отдают предпочтение схемному решению сажеуловителя с рециркуляцией части ОГ во всасывающий патрубок (рис. 10).

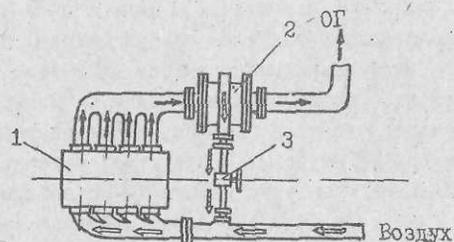


Рис. 10. Схема установки сажеуловителя с рециркуляцией ОГ: 1 - дизель; 2 - сажеуловитель; 3 - клапан для перепуска ОГ

Важной характеристикой фильтрующего элемента сажеуловителя является количество накапливаемой на нем сажи (сажеемкость). С учетом допустимых требований по противодавлению (не выше 15 кПа) и выбранной технологии количество накапливаемой сажи на фильтре объемом около 2 л обычно не превосходит 40 г. Поскольку сажевые конгломераты имеют невысокую плотность - около  $0,06 \text{ г/см}^3$ , это количество сажи занимает объем около трети от общего объема фильтра.

Несложные расчеты показывают, что даже на хорошо отлаженных высокооборотных автомобильных двигателях, выбрасывающих небольшое количество твердых частиц - около  $0,25 \text{ г/км}$ , фильтр с общим объемом 2 л при эффективности фильтрования 0,8 сможет работать на пробеге не более 200 км.

Повышение сажеемкости фильтра увеличением его габаритов неприемлемо; единственно возможным техническим решением является удаление сажи с фильтра (регенерация фильтра) ее сжиганием. В результате сопротивление фильтра снижается почти до исходного уровня и его способность накапливать сажу восстанавливается.

В большинстве случаев температура ОГ дизеля, даже при форсированных режимах, недостаточна для эффективной регенерации фильтра. Для решения этой задачи разработаны несколько способов, которые могут быть объединены в две группы - термические и каталитические способы регенерации.

Термические способы предусматривают искусственное повышение температуры на фильтре до уровня, при котором обеспечивается эффективное сжигание сажи. Каталитическая регенерация заключается в снижении температуры окисления накопленной сажи благодаря наносимому на фильтр или подаваемому в топливо или продукты сгорания катализатору.

Предложен ряд способов повышения температуры или воздействия на другие параметры двигателя, влияющие на процессы горения сажи. Среди них следует отметить:

дросселирование - искусственное повышение числа оборотов двигателя и нагрузки, сопровождающееся увеличением температуры продуктов сгорания;

применение системы байпасирования отработавших газов, функции которой заключаются в периодическом прекращении подачи ОГ на фильтр вследствие их перепуска либо через второй фильтр, либо непосредственно в атмосферу, поскольку в статических условиях процесс регенерации может быть реализован при относительно низких температурах порядка  $300...400^\circ\text{C}$ . Такая схема в ряде случаев достаточно эффективна и экономична;

использование для подогрева газа теплоты экзотермических реакций окисления продуктов неполного сгорания. Для этого ОГ перед подачей на фильтр пропускаются через каталитический нейтрализатор. Иногда содержание продуктов неполного сгорания в ОГ повышают искусственно, например используя системы рециркуляции; такое комплексное применение фильтра, системы рециркуляции и каталитического нейтрализатора позволяет снизить не только содержание сажи, но и остальных токсичных компонентов, в том числе и оксидов азота. Отмечают положительный эффект предварительной обработки продуктов сгорания в каталитическом нейтрализаторе, заключающийся в частици-

ном удалении адсорбированных сажей углеводородов, что улучшает фильтрацию за счет меньшей плотности осадка на фильтре;

Предварительный подогрев воздуха, подаваемого на всасывание, не только повышает температуру в камере сгорания, но и несколько уменьшает соотношение воздух/топливо; в конечном итоге в результате изменения этих факторов температура ОГ может быть доведена до 400°C;

дополнительный разогрев ОГ специально устанавливаемыми в выпускную систему или конструкцию фильтра автономными горелками или другими нагревателями. Несмотря на относительную сложность, подобные методы термической регенерации рассматриваются как наиболее перспективные, поскольку они обладают теми преимуществами перед ранее упомянутыми, к которым относятся надежность, независимость от условий работы двигателя; возможность автоматизации, не требующей модернизации двигателя. Практическое значение имеют три вида нагрева - электрический, за счет установки газовой горелки и за счет использования горелок, в которых используется моторное топливо.

Так, фирма Neoplan (ФРГ) отдает предпочтение последнему варианту (рис. II), достигая полной регенерации фильтра при температуре 600°C. Наибольшие трудности возникают при регенерации крупногабаритных керамических фильтрующих элементов, которые обычно неравномерно покрываются сажей и при регенерации испытывают значительные термические напряжения из-за локальных перегревов.

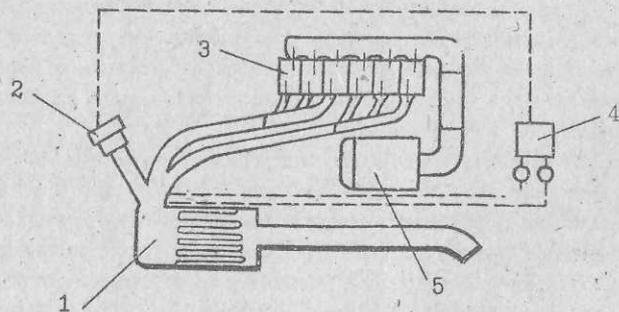


Рис. II. Схема установки сажеуловителя с регенерацией за счет подачи в сажеуловитель дизельного топлива: 1 - сажеуловитель; 2 - блок подачи топлива; 3 - дизель; 4 - блок управления; 5 - входной воздушный фильтр

Более простыми и совершенными представляются каталитические методы регенерации сажевых фильтров. Эти методы основываются на снижении температуры окисления сажи за счет введения в материалы фильтра или в поток ОГ специальных катализаторов и не требуют введения в конструкцию фильтра дополнительных элементов и систем. Например, к всасываемому воздуху или топливу примешивают катализатор (марганец), который позволяет снизить температуру сжигания сажи до температуры ОГ.

Кроме того, используют нанесение катализаторов на поверхность фильтрующего элемента, что позволяет объединить каталитический дожигатель и сажевый фильтр в одном устройстве при минимуме конструктивных изменений системы выпуска.

Из исследованных катализаторов наибольший интерес представляют соли меди, снижающие температуру горения сажи. Добавки к солям меди других активных элементов еще более снижают температуру сажи. Так, нанесение медьсодержащих солей на пенокерамику с предварительно развитой после нанесения подслоя из оксида титана подложкой позволило получить каталитический фильтр, способный регенерироваться при температуре 320...440°C.

Более удачным оказался опыт применения фильтрующих материалов с нанесенным катализатором и дополнительной подачей газообразного топлива на фильтр. Подобная схема была использована фирмой Техасс (США) применительно к металлическим волокновым фильтрам с нанесенным слоем оксида алюминия. На оксид алюминия осаждали благородный металл. Используя эту схему и проводя регенерацию через каждые 240...320 км пробега, удалось обеспечить необходимую эффективность очистки при пробеге до 50 тыс. км.

Несмотря на положительные результаты отдельных экспериментов, введение катализатора в фильтрующие материалы пока расценивается как направление, перспективность которого нуждается в серьезных доказательствах.

Ряд зарубежных фирм в последние годы активно используют сажеуловители для очистки ОГ от сажи. Так, фирма Iveco (Италия) очистку ОГ дизельного двигателя автобуса сводит к устранению дыма. Элементы фильтра: монолитный керамический фильтрующий элемент (КФЭ); горелки для сжигания уловленных частиц; система непрерывного контроля чистоты КФЭ; байпасный клапан перепуска газов во время регенерации КФЭ. Отработавшие газы дизельного двигателя, проходя через КФЭ, оставляют в его порах твердые частицы, по дос-

тижении определенной их концентрации происходит регенерация КФЭ включением на 20 мин горелки, разработанной фирмой.

В ФРГ проводится крупномасштабный эксперимент по исследованию эффективности фильтра очистки ОГ дизельных двигателей от сажи. Одновременно находятся под наблюдением 1500 дизельных автомобилей и автобусов. Большинство автомобилей фирм Iveco (Италия), MAN, Deutz Service (ФРГ), Neoplan, Kassbohrer (ФРГ), Webasto (Италия) оборудованы керамическими монолитными фильтрами с внутренними каналами. Однако, как показывает опыт эксплуатации, из-за отложения сажи на стенках каналов периодически требуется регенерация фильтров, причем при температуре 650°C, а это сопряжено с дополнительными затратами энергии. Фирма Daimler Benz использует металлокерамический фильтр, в котором регенерация осуществляется с помощью окислителя (рис. 12), что позволяет сжигать отложения уже при температуре 250°C. Фильтры обеспечивают степень очистки до 0,9.

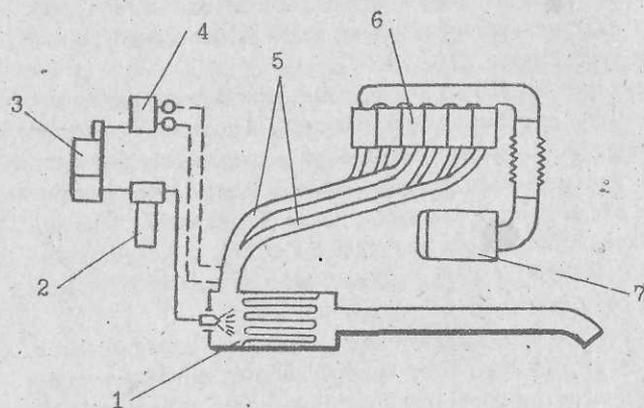


Рис. 12. Схема установки сажеуловителя с регенерацией за счет подачи в сажеуловитель жидкого окислителя: 1 - сажеуловитель; 2 - емкость с окислителем; 3 - клапан наддува; 4 - блок управления; 5 - газопровод; 6 - дизель; 7 - входной воздушный фильтр

Фирма Eberspracher (ФРГ) продемонстрировала на выставке во Франкфурте-на-Майне (ФРГ, 1987) устройство для очистки ОГ дизельных автомобилей от сажи. Основу устройства составляют два керамических фильтра и две горелки. Каждый фильтр попеременно ра-

ботает в режимах фильтрации и регенерации, при этом фильтры работают асинхронно. В процессе регенерации накопившаяся в фильтре сажа выжигается с помощью горелки, создающей температуру 600°C. Предложенное устройство отличается высокой эффективностью и экономичностью.

Обширные исследования, проведенные фирмой VW-AG (ФРГ), показали, что наиболее эффективным устройством, выделяющим сажу из ОГ дизельных двигателей, является керамический фильтр. Для выжигания сажи в фильтрах необходимо снизить температуру ее воспламенения, что достигается добавлением в ОГ марганца, который снижает температуру воспламенения сажи до требуемого уровня. В США было проведено испытание легкового автомобиля с дизельным двигателем, имеющим рабочий объем 1,6 л, и устройством для очистки ОГ от сажи, основанном на использовании керамического фильтра с добавлением в ОГ марганца. После пробега 40 тыс. км содержание сажи в ОГ не превысило нормы, установленной в США.

Фирма "КХД Дойтц" применяет автономные переносные устройства для регенерации керамических сажеуловителей автопогрузчиков, тягачей, работающих в шахтах, компрессорных установках и т.п. Одно устройство может обслуживать до восьми дизелей мощностью до 60 кВт.

При регенерации в сажеуловитель с помощью вентилятора подается воздух, нагретый от электронагревателя до температуры 700°C. Продукты сгорания отложений на сажевом фильтре (главным образом CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и частично CO) выделяются в атмосферу. Устройство для регенерации экономично, удобно и надежно в эксплуатации.

В табл. 2 приведены основные экономические показатели наиболее перспективных систем очистки от частиц сажи для трех классов грузовых автомобилей и автобусов.

Таблица 2  
Экономические показатели систем улавливания сажи

Категория затрат	Стоимость ловушки и системы регенерации, долл.			
	Керамическая с дополнительной горелкой	с присадками к топливу	Проволочная с каталитическим покрытием	Керамическое волокно с впрыском катализатора
I	2	3	4	5
Легкие грузовые автомобили:				

Окончание табл. 2

I	2	3	4	5
изготовление	312,0	232,0	370,0	370,0
эксплуатационные расходы	243,3	170,0	150,0	126,67
Грузовые автомобили среднего класса:				
изготовление	400,0	330,0	570,0	390,0
эксплуатационные расходы	755,0	547,5	517,5	385,0
Тяжелые грузовые автомобили:				
изготовление	660,0	600,0	1070,0	660,0
эксплуатационные расходы	2375,0	2460,0	2950,0	3267,5
Автобусы:				
изготовление	490,0	420,0	730,0	490,0
эксплуатационные расходы	1440,0	1420,0	1080,0	940,0

## 5. РАСЧЕТ САЖЕУЛОВИТЕЛЯ

Пусть требуется рассчитать сажевый фильтр для дизельного двигателя мощностью  $N = 200$  л.с. с массовым расходом ОГ  $m = 1000$  кг/ч при массовой концентрации частиц сажи  $C = 0,1 \dots 1,0$  г/м<sup>3</sup>. Фракционный состав частиц сажи различных размеров в ОГ следующий:

$d_u$ , мкм	0,3...0,5	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...10,0
массовая доля, %	< 48	16...48	< 2	< 2

Объемная доля, %, ОГ:  $H_2O$  (пары) - до 4;  $SO_2$  - 0,05;  $CO_2$  - 1,0...10,0;  $C_nH_m$  - до 0,5;  $N_2$  - 76...78;  $O_2$  - 2...18;  $NO_x$  - до 0,5.

Температура газов  $T = 20 \dots 500^\circ C$ , требуемая эффективность улавливания частиц сажи  $\eta \geq 0,9$ .

В процессе работы фильтр периодически, через  $\tau \geq 60$  мин,

подвергается термической регенерации с кратковременным повышением температуры газов до  $T_{max} = 800^\circ C$ . Предельно допустимый перепад давления на фильтре  $\Delta P_{max} = 6,0$  кПа при температуре отработавших газов  $T = 450^\circ C$ . Предельные размеры фильтра  $D \times L = 300 \times 800$  мм.

Порядок расчета:

I. Определение параметров отработавших газов для смеси осредненного состава (объемные доли, %):  $H_2O$  (пары) - 3;  $CO_2$  - 8;  $O_2$  - 12;  $N_2$  - 77 (остальными компонентами в расчете пренебрегаем).

I.1. Кажущаяся молекулярная масса

$$M_{cm} = \sum_{i=1}^n M_i r_i, \quad (1)$$

где  $M_i$  и  $r_i$  - молекулярная масса и объемная доля  $i$ -го компонента.

$$M_{cm} = 0,77 \cdot 28 \text{ кг/кмоль} + 0,12 \cdot 32 \text{ кг/кмоль} + 0,08 \cdot 44 \text{ кг/кмоль} + 0,03 \cdot 18 \text{ кг/кмоль} = 29,46 \text{ кг/кмоль}.$$

I.2. Массовые доли компонентов:

$$g_i = r_i M_i / M_{cm} \quad (2)$$

Итак,

$$g_{N_2} = 0,77 \frac{28 \text{ кг/кмоль}}{29,46 \text{ кг/кмоль}} = 0,73;$$

$$g_{O_2} = 0,12 \frac{32 \text{ кг/кмоль}}{29,46 \text{ кг/кмоль}} = 0,13;$$

$$g_{CO_2} = 0,08 \frac{44 \text{ кг/кмоль}}{29,46 \text{ кг/кмоль}} = 0,12;$$

$$g_{H_2O} = 0,03 \frac{18 \text{ кг/кмоль}}{29,46 \text{ кг/кмоль}} = 0,02.$$

I.3. Газовая постоянная

$$R_{cm} = R \sum_{i=1}^n (g_i / M_i) = 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot K \left( \frac{0,73}{28 \text{ кг/кмоль}} + \frac{0,13}{32 \text{ кг/кмоль}} + \frac{0,12}{44 \text{ кг/кмоль}} + \frac{0,02}{18 \text{ кг/кмоль}} \right) = 282,4 \text{ Дж/кг} \cdot K.$$

1.4. Плотность смеси при температуре  $T = 450^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{\text{см}} = P / (R_{\text{см}} \cdot T) = 103 \text{ кПа} / (282,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \cdot 723 \text{ К}) = 0,504 \text{ кг/м}^3.$$

1.5. Коэффициент динамической вязкости

$$\mu_{\text{см}} = 1 / \sum_{i=1}^n \left( \frac{g_i}{\mu_i} \right).$$

В связи с тем, что вязкость компонентов газовой смеси зависит от их температуры, в последнее соотношение подставляем значения, найденные по формуле Сатерленда для температуры смеси  $T = 450^{\circ}\text{C}$ :

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{0i} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5} \cdot \frac{273 + C}{T + C}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  и  $C$  - константы, определяемые по табл. 3.

Таблица 3

Константы в формуле Сатерленда

Газ	$\mu_0 \cdot 10^5, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$C, \text{ К}$
$\text{N}_2$	1,66	107
$\text{O}_2$	1,92	126
$\text{CO}_2$	1,37	238
$\text{H}_2\text{O}$ (пары)	0,81	1100

Тогда

$$\mu_{\text{см}} = \left( \frac{0,73}{3,28 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} + \frac{0,13}{3,89 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} + \frac{0,12}{3,14 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} + \frac{0,02}{2,63 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} \right)^{-1} = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

2. Определение объемного расхода ОГ:

$$Q_{\text{см}} = \frac{m}{\rho_{\text{см}}} = \frac{1000 \text{ кг/ч}}{0,504 \text{ кг/м}^3} = 1984 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3. Выбор материала фильтровальной перегородки. В процессе эксплуатации сажевый фильтр подвергается вибрациям с уровнем вибростороности  $L_v = 104 \text{ дБ}$ , а также термическим напряжениям, возникающим при изменении режимов работы двигателя и при термической регенерации фильтра. При таких жестких условиях эксплуатации наибольшей надежностью обладают сажевые фильтры с фильтровальными элементами из проволочных тканых сеток. Окалиностойкость и жаростойкость фильтровальной перегородки в газовом потоке с рабочей температурой до  $T_p = 500^{\circ}\text{C}$  и ее кратковременными повышениями до  $T_{\text{п}} = 800^{\circ}\text{C}$  могут быть обеспечены проволочными сетками из коррозионностойкой хромоникелевой стали аустенитного класса 03Х18Н9Т с рабочей температурой  $T < 650^{\circ}\text{C}$  и температурой интенсивного окисления на воздухе  $T_{\text{ок}} = 850^{\circ}\text{C}$ .

В связи с тем, что основную массу (до 90%) сажи в ОГ составляют частицы с размерами  $d_{\text{ч}} < 1,0 \text{ мкм}$ , выбираем два варианта изготовления сажевого фильтра из наиболее мелких фильтровых сеток: полотняного переплетения П300 (размер ячейки  $d_{\text{я}} = 36 \text{ мкм}$ ) и саржевого одностороннего переплетения 0685 ( $d_{\text{я}} = 20 \text{ мкм}$ ), выпускаемых промышленностью.

Согласно экспериментальным данным, при скорости фильтрования  $w_{\text{ф}} \approx 0,05 \text{ м/с}$  и задымленности отработавших газов  $C \approx 0,5 \text{ г/м}^3$  эффективность улавливания сажи  $\eta_1$  сетками П300 и 0685 достигает 0,55 и 0,70 соответственно.

4. Определение площади фильтрации сажевого фильтра:

$$S_{\text{ф}} = Q_{\text{см}} / (3600 \cdot w_{\text{ф}}) = 1984 \text{ м}^3/\text{ч} / (3600 \cdot 0,05 \text{ м/с}) = 11,02 \text{ м}^2.$$

5. Определение числа слоев сетки  $n$  в фильтровальной перегородке, при котором обеспечивается заданная эффективность улавливания сажи,

$$n = \frac{\lg(1 - \eta_{\text{ф}})}{\lg(1 - \eta_1)}$$

Для фильтровальной перегородки из сетки 0685

$$n = \frac{\lg(1 - 0,9)}{\lg(1 - 0,7)} = 1,9;$$

для фильтровальной перегородки из сетки П300

$$n = \frac{1g(1 - 0,9)}{1g(1 - 0,55)} = 2,9.$$

Принимаем: для сетки С685  $n = 2$ , для сетки П300  $n = 3$ .

6. Определение начального перепада давления на фильтровальной перегородке. Режим фильтрации определяется числом Рейнольдса в порах:

$$Re = \frac{w_{\phi} d_{я} \rho_{см}}{\Pi \mu_{см}}, \quad (4)$$

где  $\Pi$  - пористость сеток (для сетки П300  $\Pi = 0,6$ , для сетки С685  $\Pi = 0,41$ ).

Для сетки С685

$$Re = \frac{0,05 \text{ м/с} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 0,504 \text{ кг/м}^3}{0,4 \cdot 3,31 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} = 0,038;$$

для сетки П300

$$Re = \frac{0,05 \text{ м/с} \cdot 36 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 0,504 \text{ кг/м}^3}{0,6 \cdot 3,31 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}} = 0,046.$$

При  $Re < 1$  наблюдается ламинарный режим фильтрации и перепад давления на фильтровальной перегородке определяется формулой

$$\Delta P = \frac{w_{\phi} \mu h_c n}{K_{\Pi}}, \quad (5)$$

где  $h_c$  - толщина сетки;  $K_{\Pi}$  - коэффициент проницаемости (для сетки П300  $h_c = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $K_{\Pi} = 40 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ; для сетки С685  $h_c = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $K_{\Pi} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ).

Для фильтровальной перегородки из двух слоев сетки С685

$$\Delta P_0 = \frac{0,05 \text{ м/с} \cdot 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2} = 107,6 \text{ Па};$$

для фильтровальной перегородки из трех слоев сетки П300

$$\Delta P_0 = \frac{0,05 \text{ м/с} \cdot 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{40 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2} = 19,9 \text{ Па}.$$

7. Определение стоимости фильтровальной перегородки\*:

\* Стоимость дана на I кв. 1994 г.

$$B_n = S_{\phi} \cdot n \cdot B_1$$

где  $B_1$  - цена 1 м<sup>2</sup> сетки (для С685  $B_1 = 80\,000$  руб.; для П300  $B_1 = 45\,000$  руб.).  
Для сетки П300

$$B_n = 11,02 \text{ м}^2 \cdot 3 \cdot 45\,000 \text{ руб./м}^2 = 1\,487\,700 \text{ руб.};$$

для сетки С685

$$B_n = 11,02 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 80\,000 \text{ руб./м}^2 = 1\,763\,200 \text{ руб.}$$

8. Проверка фильтра на ресурс. При задымленности отработавших газов  $C = 0,5 \text{ г/м}^3$  зависимость перепада давления на сетке П300 от времени работы фильтра  $\tau$  определяется формулой

$$\Delta P_{\tau} = \Delta P_0 \times \exp(0,0233 \tau). \quad (6)$$

Из соотношения (6) определяем ресурс работы фильтра:

$$\tau = 42,9 \frac{\ln(\Delta P_{\tau})}{\ln(\Delta P_0)} = 42,9 \frac{\ln 6000}{\ln 20} = 124,6 \text{ мин.}$$

Ресурс работы фильтра удовлетворяет требованиям  $\tau \geq 60$  мин.

9. Выбор конструктивного исполнения фильтра. Для повышения эффективности использования объема фильтра выбираем фильтровальный элемент в виде гофрированного цилиндра (рис. 13). При высоте гофр  $b = 80$  мм и высоте цилиндра  $H = 800$  мм число гофр

$$n_{\Gamma} = S_{\phi} / (b \cdot H) = 11,02 \text{ м}^2 / (0,08 \text{ м} \cdot 0,8 \text{ м}) = 172,2 \text{ шт.}$$

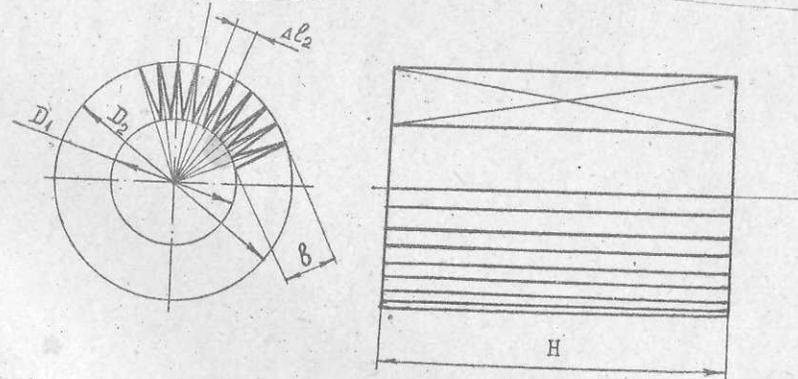


Рис. 13. Конструкция фильтровального элемента из проволочных сеток

Проверяем расстояния между вершинами гофр по внутреннему  $D_1$  и наружному  $D_2$  диаметрам цилиндра:

$$\Delta l = 2\pi D_l / n_{\Gamma} ;$$

$$\Delta l_1 = 2\pi D_1 / n_{\Gamma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 140 \text{ мм} / 172 = 5,1 \text{ мм};$$

$$\Delta l_2 = 2\pi D_2 / n_{\Gamma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \text{ мм} / 172 = 10,95 \text{ мм}.$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов И.Я., Аксенов В.И. Транспорт и охрана окружающей среды. М.: Транспорт, 1986. 175с.
2. Звонов В.А. Токсичность ДВС. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1991. 160с.
3. Белов С.В., Морозова Л.Л. Снижение токсичности выбросов транспортно-энергетических установок. М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана. Ч.1. 1983. 34с.; Ч.2. 1984. 36с.
4. Исследование акустических, гидравлических и структурных характеристик материалов: Отчет о НИР по договору о соц. сотрудничестве МВТУ - ПНИИПИ ППИ /Рук. С.В.Белов, В.Н.Анцифиров. М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1983. 43с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Токсичность отработавших газов двигателей внутреннего сгорания .....	4
2. Снижение токсичности отработавших газов дизелей ...	7
3. Сажеуловители .....	8
4. Схемные решения процесса сажеулавливания .....	18
5. Расчет сажеуловителя .....	24
Список литературы .....	31