

## **ДЫМНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ И ПУТИ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ**

Е. Д. ПЕТУХОВИЧ, студент  
Г. М. КУХАРЕНОК, д-р техн. наук, профессор  
УО «Белорусский национальный технический университет»,  
Минск, Республика Беларусь

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС), представленные в основном бензиновыми двигателями и дизелями, в настоящее время находятся вне конкуренции по отношению к известным альтернативным вариантам энергетических установок, предназначенных для использования на современной автомобильной, тяговой и транспортной технике. При этом в силу ряда причин, обусловленных главным образом различием в технико-экономических показателях, ведущая роль отводится двигателям с воспламенением от сжатия. Ими оснащен весь парк современных тракторов, комбайнов, грузового автотранспорта и сельских тягачей, а также значительная часть парка легковых автомобилей.

Широкомасштабное использование ДВС в различных сферах человеческой деятельности приводит к целому ряду негативных последствий, связанных в первую очередь с загрязнением окружающей среды токсичными компонентами отработавших газов (ОГ) двигателей автомобилей, тракторов и другой тяговой и транспортной техники. Основная доля суммарной токсичности ОГ дизелей обусловлена содержанием в них фракции сажевых компонентов и других классов твердых частиц (ТЧ), являющихся структурными составляющими дымности. Установлено, что сажа токсичнее углеводородов в 30 раз, окиси углерода – в 20 раз, оксидов азота – в 1,7 раза.

Образование сажи при сгорании – специфическая особенность дизелей, и ее количество в ОГ зависит от условий смесеобразования и сгорания, которые определяются такими факторами, как режим работы дизеля, химические и физические свойства топлива, конструктивные особенности камеры сгорания, параметры топливной аппаратуры и т. д. Сажа является основой так называемых твердых частиц (ТЧ), в состав которых входят также адсорбированные на поверхности сажи тяжелые углеводороды, зольные частицы, некоторые продукты износа и т. д.

Наличие сажи в отработавших газах дизелей приводит к потере их прозрачности (увеличению оптической плотности) и появлению облака дыма черного цвета. Оптическая плотность отработавших газов за-

висит от количества и размеров частиц сажи. Видимое дымление дизелей соответствует содержанию сажи в отработавших газах более  $1,1 \text{ г/м}^3$ .

Сажа представляет собой частицы твердого углерода неправильной формы с линейными размерами  $0 \dots 100 \text{ мкм}$  (преимущественно от  $0,2$  до  $1,0 \text{ мкм}$ ). Первичные структуры сажи, образующиеся в камерах сгорания дизелей, являются частицами сферической формы диаметром  $0,015 \dots 0,017 \text{ мкм}$  с удельной геометрической поверхностью  $75 \text{ м}^2/\text{г}$ , которые из-за коагуляции в процессе сгорания образуют вторичные и третичные структуры, выбрасываемые с ОГ из системы выпуска дизеля в атмосферу. Большая часть сажевых образований имеет размеры  $0,4 \dots 5 \text{ мкм}$ .

Удельная поверхность сажи значительна и может достигать  $300 \text{ м}^2/\text{г}$ , а ее плотность довольно низка –  $0,05 \text{ г/см}^3$ . Измерения размеров этих частиц показали, что их распределение по величине практически не зависит от способа смесеобразования, т. е. оно очень близко у двигателей с вихревой камерой сгорания и у двигателей с непосредственным впрыском посредством системы Common Rail или насосфорсунок.

В настоящее время для решения требований экологических стандартов в мире в основном применяются две стандартные технологии:

1. EGR – Exhaust Gas Recirculation – система очистки ОГ дизельного двигателя, основанная на использовании рециркуляции ОГ и установке сажевого фильтра в системе выпуска дизеля;

2. SCR – Selective Catalytic Reduction – система очистки выхлопа ОГ дизельного двигателя, использующая впрыск AdBlue (32,5-процентный раствор карбамида в деионизированной воде) в выхлопную трубу перед SCR-нейтрализатором.

Следует отметить, что сложность борьбы с выбросами сажевых частиц заключается в необходимости улучшения полноты сгорания топлива, связанной с увеличением температуры в камере сгорания дизеля, что ведет к росту выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Для снижения их содержания необходимо снижать температуру, что приводит к неполному сгоранию топлива и образованию твердых частиц. Это, в свою очередь, определяет необходимость использования в системе выпуска двигателя сажевого фильтра. Применение системы очистки EGR определяет жесткие требования к газовому составу свежего заряда и стабильности процесса горения. При этом добавление к свежему заряду ОГ двигателя не способствует улучшению рабочих характеристик. Определенные сложности возникают и при использовании системы очистки SCR, которые заключаются в необходимости организации процесса доставки, хранения и заправки МЭС раствором AdBlue, что

приведет к дополнительным затратам и снижению прибыли предприятия.

Снижение выброса сажевых частиц является сегодня одной из сложнейших задач в области очистки отработавших газов дизелей. Один из эффективных способов очистки газов от сажевых частиц – задержание их посредством специальных фильтров: фильтры с «металлической шерстью», фильтры с керамическими фильтрующими элементами, спиральные фильтры с керамическим наполнителем и др.

В качестве сажевых фильтров наиболее распространены керамические фильтры. Сажевый фильтр состоит из сотобразных керамических модулей из карбида кремния в металлическом корпусе. Керамический модуль разделен на множество мелких каналов, закрытых попеременно с одной или другой стороны, которые создают лабиринт. Стенки фильтра из карбида кремния имеют поры и покрыты слоем из оксида алюминия и окиси церия. На этот слой напылен драгоценный металл платина, который и служит катализатором. Покрытие из окиси церия в сажевом фильтре снижает температуру воспламенения сажи и ускоряет термическую реакцию с кислородом.

По сравнению с каталитическим нейтрализатором со свободным проходом отработавших газов в сажевом фильтре каналы установлены с чередованием открытых и закрытых концов. Так как каналы фильтра закрыты попеременно со стороны впуска и выпуска, газы, содержащие частицы сажи, вынуждены проходить через пористые стенки из карбида кремния. При этом частицы сажи задерживаются во впускных каналах, а газ свободно проходит через поры стенок каналов. В зависимости от пористости керамического тела эти фильтры могут задерживать от 70 до 90 % твердых частиц. Для нормальной работы при длительных условиях эксплуатации сажевые фильтры должны подвергаться регенерации через определенные промежутки времени, при этом осуществляется дожигание сажевых частиц. Частицы сажи, участвуя в реакции с двуокисью азота, превращаются в углекислый газ.

Процесс регенерации сажевого фильтра с каталитическим покрытием разделяют на пассивную и активную регенерацию.

Пассивная регенерация осуществляется при высоких температурах рабочего процесса двигателя порядка 350–500 °С. Для осуществления пассивной регенерации в топливо добавляются специальные присадки, уменьшающие температуру воспламеняемости сажевых частиц отработавших газов. При небольших нагрузках на двигатель температура отработавших газов слишком низка для пассивной регенерации. Сгорание сажевых частиц становится невозможным, поэтому происходит

их скопление в фильтре. В таком случае применяется активная регенерация.

Активная регенерация осуществляется с помощью нагревательного элемента или системой управления двигателя, повышающих температуру отработавших газов до 600–700 °С. В этом температурном диапазоне скопившаяся сажа окисляется в фильтре до углекислого газа. Процесс регенерации длится примерно 10–15 минут.

При регенерации с помощью системы управления двигателя в систему выпуска подается воздух, рециркуляция отработавших газов отключается, чтобы увеличить температуру сгорания и долю кислорода в камере сгорания. Для увеличения температуры сгорания производятся дополнительные впрыски, причем основная фаза впрыска происходит с запаздыванием. Топливо, подаваемое в цилиндры двигателя, не сгорает, а испаряется в камере сгорания. Несгоревшее топливо горит в катализаторе окисления. Вырабатываемая при этом теплота обеспечивает повышение температуры отработавших газов перед сажевым фильтром до температуры сгорания сажевых частиц. Необходимость регенерации определяется датчиком давления.

К недостаткам сажевых фильтров относятся следующие: малая величина сажеемкости; необходимость в периодической регенерации, очистке или замене фильтрующего элемента; зависимость газодинамического сопротивления фильтра от количества собранной им сажи; увеличение сопротивления на выпуске, что приводит к снижению коэффициента наполнения, увеличению коэффициента остаточных газов, удельного расхода топлива и дымности ОГ. Описанные недостатки сажевых фильтров существенно ограничивают их практическое широкомасштабное применение.

К устройствам дополнительной очистки ОГ от ТЧ в процессе выпуска можно также отнести следующие: каталитические окислители сажи, термореакторы, барботажные системы и др. Перспективным направлением в этой области могут стать электроразрядные технологии газоочистки. Электроразрядные газоочистители (ЭРГ) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими альтернативными вариантами. К ним относятся следующие: высокая степень очистки (99 % и более); малая величина удельных энергозатрат процесса газоочистки; незначительная величина газодинамического сопротивления устройства и ее независимость от количества собранных ТЧ; возможность очищать газовые потоки от твердых частиц и газообразных токсичных компонентов в одном газоразрядном объеме.

Известные в настоящее время конструкции ЭРГ можно разделить на две группы: электрофильтры (ЭФ) и плазмохимические очистители

(ПХО). Конструкции ЭФ, хорошо зарекомендовавшие себя в промышленности, абсолютно не пригодны для очистки ОГ дизелей от сажи в силу следующих причин: на мобильной технике должен использоваться малогабаритный газоочиститель, что автоматически требует производить очистку газового потока при высокой скорости прохождения газов через устройство, чего не могут обеспечить электрофильтры; дизельная сажа имеет хорошую электропроводность, что способствует быстрому выходу из строя высоковольтных изоляторов либо прекращению процесса очистки по причине короткого замыкания высоковольтной цепи через слой сажевых частиц, осевших на поверхности изоляторов; высокая температура очищаемых газов и широкий интервал ее изменения (100...650 °С), высокая химическая активность среды значительно повышают требования к качеству изготовления устройств и материалу электродных систем.

Известные в настоящее время конструкции плазмохимических систем используются для очистки газовых потоков от оксидов азота и других газообразных токсичных компонентов. Несмотря на довольно успешные практические результаты, полученные в данной области (90 % по степени очистки от NO<sub>x</sub>), применение плазмохимических систем для дизелей ограничено лишь модельными образцами. Данный факт объясняется тем, что существующие конструкции плазмохимических систем довольно чувствительны к наличию в ОГ электропроводящей сажи и предполагают очистку газовых потоков, не содержащих дисперсных аэрозольных частиц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альферович, В. В. Токсичность ДВС / В. В. Альферович. – Минск: БНТУ, 2009. – 51 с.
2. Альферович, В. В. Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / В. В. Альферович. – Минск: БНТУ, 2011. – 39 с.
3. Майорова, Л. П. Защита атмосферы: практикум / Л. П. Майорова, В. П. Тищенко, А. А. Черенцова; под общ. ред. Л. П. Майоровой. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. – 115 с.
4. Система нейтрализации отработавших газов на основе высокопористых блочных ячеистых катализаторов / А. И. Козлов, А. Н. Пивкин, В. Н. Грунский, А. В. Беспалов // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – № 2 (95). – С. 66–71.
5. Тришкин, И. Б. Использование электрофильтра в качестве системы очистки выхлопа дизельного двигателя от сажи / И. Б. Тришкин, Н. П. Стражев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 45–58.
6. Электроразрядные технологии очистки отработавших газов дизельных двигателей от токсичных компонентов / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2002. – 282 с.