

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Д.А. Чернецов, В.П. Капустин**

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор И.М. Курочкин*

**Ключевые слова и фразы:** дизельные двигатели; камера сгорания; коэффициент полезного действия; отработавшие газы; процесс образования; углеводородное топливо; углеводороды.

**Аннотация:** Представлены основные положения образования токсичных компонентов в отработавших газах дизельных двигателей, химические реакции, описывающие данные процессы. Проведен анализ состава и образования основных токсичных компонентов в отработавших газах дизелей.

Отработавшие газы (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представляют собой многокомпонентную смесь газов, паров, капель и жидкостей и дисперсных твердых частиц (более 1000 различных химических образований).

При идеальном протекании процесса сгорания стехиометрической смеси углеводородного топлива с воздухом в продуктах неполного сгорания должны присутствовать лишь  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . В реальных условиях ОГ содержат так же продукты неполного сгорания (оксид углерода (II) и (IV), углеводороды, альдегиды, твердые частицы, перекисные соединения, избыточный кислород), продукты термических реакций взаимодействия азота с кислородом (оксиды азота) и неорганические соединения тех или иных веществ, имеющих в топливе (сернистый ангидрид и т.д.).

Рассмотрим подробнее процессы образования в цилиндрах дизеля основных токсичных компонентов.

Выделение сажи – специфическая особенность дизелей, и ее количество в ОГ зависит от условий смесеобразования и горения, которые, как известно, определяются очень многими факторами: режимами работы дизеля, химическими и физическими свойствами топлива, конструктивными особенностями камеры сгорания, параметрами топливной аппаратуры и т.д.

---

Чернецов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Автомобильная и аграрная техника», e-mail: Blak77780@mail.ru; Капустин Василий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильная и аграрная техника», ТамбГТУ, г. Тамбов.

Сажа, смешанная с ОГ, образует дым. Различают два его цвета – серый и черный. Первый в своем составе имеет пары, капли топлива, масла и воды, то есть в нем много несгоревших углеводородов, но мало сажи. Он наблюдается при пуске и в период прогрева двигателя. Черный же дым состоит из почти свободной от углеводородов сухой сажи. Дым оценивается как «видимый» уже при содержании в нем  $133 \text{ мг/м}^3$  ОГ и как дым средней черноты – при  $600 \text{ мг/м}^3$  [1].

Сажа представляет собой частицы углерода неправильной формы с линейными размерами  $0,3 \dots 100 \text{ мкм}$  [2]. Первичные структуры сажи, образующиеся в камерах сгорания дизелей, являются частицами сферической формы диаметром  $0,015 \dots 0,17 \text{ мкм}$  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 [3].

Образование сажи – объемный процесс термического разложения углеводородов при недостатке кислорода (пиролиз). Происходит при значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,33 \dots 0,7$  и описывается уравнением [2]



Количество образующейся сажи находится в прямой зависимости от температуры и давления в зоне пиролиза. С ростом температуры и давления это количество резко увеличивается. На образование сажи оказывают влияние также и свойства топлива. Схема образования сажи показана на рисунке [1, 2].

Максимальное содержание сажи в продуктах горения соответствует равновесной температуре, то есть температуре, при которой процесс характеризуется равновесием между скоростями горения и распада топлива. Уменьшение или увеличение температуры по сравнению с равновесной уменьшает содержание сажи.

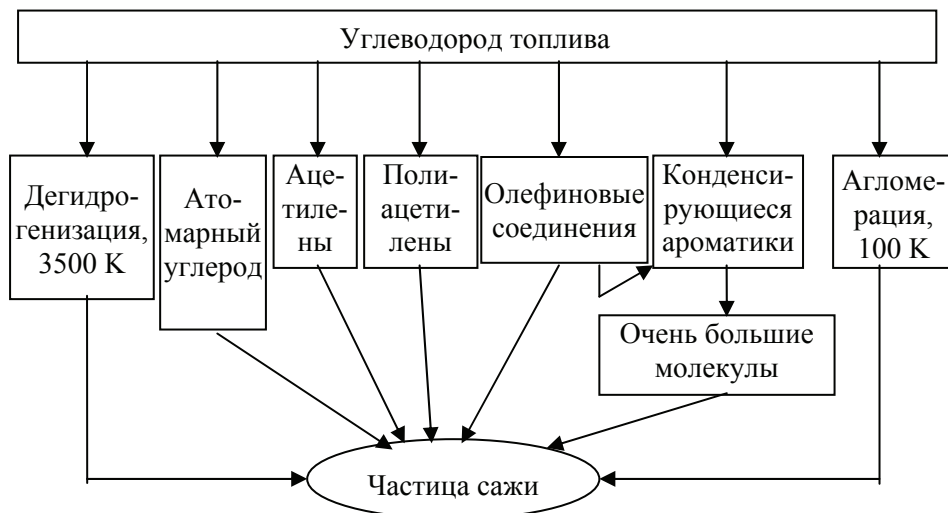


Схема образования сажи

Из множества полициклических ароматических углеводородов, обладающих канцерогенным действием, в ОГ дизеля в больших количествах содержится бензапирен. Поэтому канцерогенные свойства ОГ принято характеризовать бензапиреном. Бензапирен  $C_{20}H_{12}$  хорошо адсорбируется и удерживается на дизельной саже [1, 3].

Бензапирен образуется в результате гидролиза тяжелых фракций топлива и моторных масел при температуре 670...970 К при значительном недостатке кислорода [3]. Износ цилиндропоршневой группы и повышенный расход масла в десятки раз увеличивают содержание бензапирена в ОГ дизеля [4].

В отличие от других токсичных компонентов ОГ дизеля, являющихся продуктами неполного сгорания топлива, его частичного окисления и термического разложения, образование  $NO_x$  не связано непосредственно с реакциями горения, а имеет термическую природу. Уменьшение выбросов соединений азота связано с определенными трудностями, так как условия их снижения совпадают с условиями образования вредных продуктов неполного сгорания и наоборот. Если образование продуктов неполного сгорания топлива определяется в целом несовершенством процесса сгорания, то возникновение  $NO_x$  – его совершенством, с точки зрения эффективности использования энергии топлива. Чем выше максимальная температура цикла, тем выше его коэффициент полезного действия и тем больше образуется оксидов азота.

В отработавших газах содержится до 10 различных оксидов азота, однако более 95 % образовавшихся оксидов азота приходится на долю NO [2, 3, 5]. Остальные мгновенно распадаются до  $NO_2$  и кислорода.

При температурах ниже 400 °С оксид азота начинает окисляться до  $NO_2$  по следующей реакции [6]



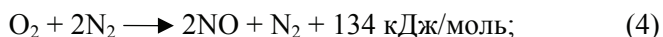
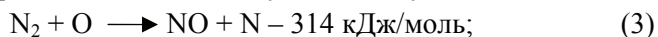
Образование оксидов азота в цилиндрах двигателя в настоящее время рассматривается по двум моделям:

1) разработанной на основании термической теории Н.Н. Семёнова, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого (цепной механизм);

2) в основе которой лежит бимолекулярный механизм.

Общепринятой теорией образования оксида азота (II) из атмосферного азота и кислорода в процессе сгорания является термическая теория [2].

Окисление азота происходит по цепному механизму:



Газовая смесь может содержать также водяные пары. В этом случае образование NO дополняется следующими реакциями:



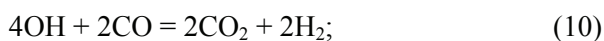
Из рассмотренных уравнений химических реакций определяющей является реакция (3), идущая с поглощением теплоты. Скорость данной реакции в большей степени зависит от концентрации атомарного кислорода.

Применение бимолекулярного механизма для анализа образования NO в некоторых случаях дает достаточно хорошее совпадение его опытных и расчетных концентраций. Однако расчеты, сделанные В.А. Звоновым, показывают, что при условиях, существующих в цилиндре двигателя в процессе сгорания, доля бимолекулярного механизма в общем процессе образования NO незначительна (по сравнению с цепным механизмом).

Образование окиси углерода (II) в большей мере происходит по следующим причинам: из-за неполного смешивания топлива с воздухом в зоне горения, так как неравномерное распределение топлива в зоне факела приводит к наличию отдельных участков с богатой смесью; вследствие возникновения CO в высокотемпературных зонах топливного факела, в которых химическое равновесие смещено в сторону диссоциации оксида углерода (IV) [1–3, 5].

Оксид углерода (II) представляет собой основной промежуточный продукт сложного многостадийного процесса горения углеводородных топлив. Горение оксида углерода (II) возможно при наличии кислорода в результате прохождения цепной реакции.

Модель механизма цепной реакции может быть представлена следующими элементарными стадиями:



Максимальные концентрации CO в камере сгорания дизеля могут достигать нескольких процентов по объему, но в ОГ их не более 0,2 % [2]. Это объясняется интенсивным догоранием CO в такте расширения и выпуска при общем избытке воздуха.

В отработавших газах дизелей содержится свыше 200 различных углеводородов, основными из которых являются этан, метан, этилен, бензол, пропан, ацетилен [1, 3, 5].

Углеводороды в ОГ дизеля состоят из исходных и промежуточных соединений углеводородов топлива. Основным местом образования углеводородов в камере сгорания является «зона гашения пламени» шириной 0,05...0,38 мм [2], реакция горения смеси в этой зоне замедляется, «замораживая» продукты промежуточных реакций. Данные зоны образуются в результате гашения пламени вблизи сравнительно холодных стенок камеры сгорания. Также СН образуются в зонах срыва пламени, ядре, хвосте струи, на топливной пленке, стенках и в результате вторичного впрыскивания топлива [3].

Количество СН в ОГ зависит от отношения поверхности камеры сгорания к ее объему, количества остаточных газов в цилиндре, степени турбулентности заряда, состава смеси, давления и температуры процесса сгорания, протекания процесса догорания, а также от наличия подтекающего смазочного масла и топлива, что способствует повышению выброса сажи.

Альдегиды образуются в период предпламенных реакций с выделением тепла при условии протекания части процесса при низких температурах, что наблюдается при охлаждении смеси холодными поверхностями камеры сгорания и в конце процесса сгорания очень обедненной смеси в двигателях с послойным смесеобразованием.

Наибольшие концентрации альдегидов в ОГ отмечаются при работе дизеля на малых нагрузках.

Анализ состава и образования основных токсичных компонентов в цилиндре дизеля показал, что они делятся на две основные группы: продукты неполного сгорания (сажа, оксид углерода (II), углеводороды и т.п.) и продукты, имеющие термическую природу образования (оксиды азота). Это является определяющим при выборе способов воздействия на рабочий процесс дизельного двигателя и средств очистки отработавших газов в его выпускной системе.

#### *Список литературы*

1. Горбунов, В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. – М. : Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2008. – 214 с.
2. Дмитриевский, А. Токсичность автомобильных двигателей / А. Дмитриевский // Осн. средства. – 2000. – № 2. – С. 89–93.
3. Лиханов, В.А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В.А. Лиханов, А.М. Сайкин. – М. : Агропромиздат, 1991. – 120 с.
4. Говорущенко, Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте / Н.Я. Говорущенко. – М. : Транспорт, 1990. – 135 с.
5. Гутаревич, Ю.Ф. Охрана окружающей среды от загрязнения выбросами двигателей / Ю.Ф. Гутаревич. – Киев : Урожай. – 2002. – 223 с.

---

## **Analysis of the Building-up Process of Toxic Components in a Combustion Chamber of Diesel Engines**

**D.A. Chernetsov, V.P. Kapustin**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** building-up process; combustion chamber; diesel engines; efficiency; fulfilled gases; hydrocarbon fuel; hydrocarbons.

**Abstract:** The paper presents the main provisions of toxic components building-up in the exhaust gases of diesel engines, chemical reactions, describing these processes, as well as the analysis of the composition and formation of the main toxic components the exhaust gases of diesel engines.

---

© Д.А. Чернецов, В.П. Капустин, 2011