

УДК: 629.33(043.3)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ
БЕНЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ЕЕ СГОРАНИИ
В ЦИЛИНДРАХ ДВИГАТЕЛЯ**

Глазунов Д.В., Глазунов В.И.

КРСУ им. Б.Ельцина, Бишкек, Кыргызстан, eakr.info@mail.ru

Аннотация: Даны теоретических методов изучения путей образования токсических продуктов в поршневых двигателях.

Ключевые слова: оксид, углерод, горение, окисление, топливо, углеводород.

**RESEARCH OF CHEMICAL COMPONENTS OF THE FUEL-AIR SYSTEM
MIXTURE WHEN IT IS BURNED IN THE ENGINE CYLINDERS**

Glazunov D.V., Glazunov V.I.

Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan

Annotation: Theoretical methods of studying the ways of formation of toxic products in piston engines are given.

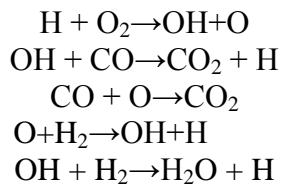
Key words: oxide, carbon, combustion, oxidation, fuel, hydrocarbon.

Горение углеводородов не всегда завершается догоранием оксида углерода, который образуется в начальной стадии процесса горения бензовоздушной смеси. Процесс догорания оксида углерода для углеводородного пламени определяет общее время реакции окисления топлива. При зарождении цепи окисления создается некоторое количество свободных радикалов, реагирующих с кислородом, затем появляются перекисные радикалы, которые реагируя с углеродной молекулой, образуют молекулу гидроперекиси. На образование углеводородов большое влияние оказывают компактность камеры сгорания, т.е. величина отношения поверхности камеры сгорания к ее объему, температура стенок, камеры сгорания, турбулентность заряда, возможность догорания его после гашения пламени у стенок. Для снижения содержания в отработавших газах СН следует стремиться к относительно малой поверхности камеры сгорания при максимальном объеме, так как при этом уменьшается объем пристеночного слоя горящей смеси, в котором процесс сгорания идет малоэффективно, с выделением большого количества СН и альдегидов.

По этой причине концентрация активных частиц различных промежуточных реакций окисления ничтожно мала и вероятность реакций между самими этими частицами за малые отрезки времени практически равна нулю; следовательно, следует учитывать только реакции этих частиц с молекулами среды. Научно-исследовательские работы по снижению токсичности ОГ поршневых двигателей способствуют совершенствованию как экспериментальных, так и теоретических методов изучения путей образования токсических продуктов в этих двигателях. Основным токсическим компонентом отработавших газов по количеству выделения, бензиновых двигателей является оксид углерода, содержание которого на некоторых режимах может достигать 10% от общего объема ОГ. Затем идут оксиды азота, содержание которых также около 10%, но которые отличаются значительно более сильной ядовитостью, не сгоревшие углеводороды и др.

Механизм образования оксида углерода и влияние различных факторов на их выход достаточно хорошо изучены. Горение углеводородов не всегда завершается догоранием оксида углерода, который образуется в начальной стадии процесса

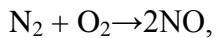
горения бензовоздушной смеси. Процесс догорания оксида углерода для углеводородного пламени определяет общее время реакции окисления топлива. При зарождении цепи окисления создается некоторое количество свободных радикалов, реагирующих с кислородом, затем появляются перекисные радикалы, которые реагируя с углеродной молекулой, образуют молекулу гидроперекиси. Дальнейшее окисление CO происходит по цепному механизму. По Н. Семенову и Я. Зельдовичу [2] схема окисления CO в присутствии воды выглядит так:



Полнота окисления CO в основном зависит от состава горючей смеси, ее гомогенности, тепло и массообмена в камере сгорания.

Содержание оксида углерода определяется в основном составом горючей смеси. Расчетами реакций окисления паров топлива при недостатке воздуха можно определить концентрацию CO в продуктах сгорания. Газовые анализы показывают, что при коэффициенте избытка воздуха, α равном 1,05... 1,15 также образуется CO, (хотя кислорода в смеси вроде и достаточно) - это объясняется диссоциацией части CO_2 , неравномерностью состава смеси по цилиндрам двигателя и неравномерностью распределения паров топлива в объеме поступающей в цилиндры смеси. Влияние температуры и давления воздуха на выделение CO также исследовали С. Краузе. и М. Манос [1]. Эти параметра влияют на состав приготовляемой горючей смеси и соответствующим образом на выделение CO, что имеет место при эксплуатации автомобилей в условиях повышения температур окружающего воздуха (в теплое время года) и высокогорья (горные автодороги). Механизм образования оксидов азота носит сложный характер, и он еще полностью не раскрыт, существует несколько способов, позволяющих вести расчеты. Сложность здесь заключается в том, что выделяющийся в процессе реакции окисления (горения смеси) – в цилиндрах двигателя оксид азота практически не токсичен, но при выходе ОГ наружу, а атмосферу, под действием солнечного света он доокисляется в диоксид азота, который очень токсичен, - в 70 раз токсичнее CO. Поэтому борьба с диоксидом азота имеет значительные сложности. Образование окислов азота активно идет при горении (окислении) имеет при высоких температурах рабочего цикла. На основании исследований Шварцбауера [2], показавших, что содержание атомарного кислорода в зоне пламени и примыкающей к ней зоне реакции окисления значительно превышает концентрацию молекулярного кислорода, автор в расчетах принимает, что концентрация атомарного кислорода в пять раз выше молекулярного. Образованием NO_2 и N_2O_5 в расчетах можно пренебречь и учитывать только образование NO. Расчет следует вести только для сгоревшей части заряда, при этом необходимо учитывать температурные градиенты частей заряда.

Другие авторы принимают простую двухмолекулярную схему образования NO:



Это показывает, что при условиях сгорания в бензиновых ДВС концентрация NO не успевает достигнуть равновесного состояния. При богатой смеси концентрация NO сразу после начала сгорания резко нарастает, однако максимальное содержание NO ограничивается из-за недостатка избыточного кислорода. Кроме того, имеет место заметное разложение NO (до 30% от максимальной величины). При

сгорании обедненных смесей наблюдается «замораживание» окислов азота в процессе расширения. Ланге К. нашел [1], что повышение степени сжатия, ϵ при работе на обедненных смесях в режиме полной нагрузки сопровождается увеличением эмиссии NO_x . Это объясняется ростом максимальной температуры цикла и уменьшением количества остаточных газов в цилиндре. На режимах частичных нагрузок величина степени сжатия на образование NO_x практически не влияет. Эффективным средством снижения эмиссии NO в цилиндрах двигателя является рециркуляция части отработавших газов из выпускной трубы во впускной трубопровод. Хансель в результате испытаний автомобиля Плимут на стенде с беговыми барабанами пришел к выводу, что при отношении воздух-топливо 16...18 ($\alpha = 1,07 \dots 1,2$) снижение уровня выбросов NO_x до 0,62 г/км получают в случае рециркуляции 20% отработавших газов, одновременно с этим расход топлива увеличивается на 10%. Пропуски зажигания начинаются при рециркуляции 25% ОГ [1].

Повышенное содержание отработавших газов в свежем заряде может быть достигнуто соответствующим выбором или регулированием в процессе работы двигателя фаз газораспределения. Наилучшие результаты дает этот метод во время работы двигателя, но механизмы автоматического изменения фаз газораспределения при этом весьма сложны по устройству. Положение периода перекрытия клапанов по углу ПКВ также влияет на образование NO_x . Для раннего закрытия выпускного и раннего открытия впускного клапанов характерно повышение количества остаточных газов в цилиндре и заброс их во впускной канал, что является эффективной мерой по снижению концентрации NO_x , вот, особенно в диапазоне высоких скоростных режимов двигателя. При перемещении точки перекрытия клапанов в сторону запаздывания, наблюдается обратное засасывание отработавших газов в цилиндр и понижение образования NO_x , особенно в диапазоне малых скоростей вращения коленчатого вала. По мнению Ланге К., форма и компактность камеры сгорания, в частности, наличие вытеснителей и их площадь, влияет на турбулентность, созданную в ходе сжатия смеси и снижает токсичность ОГ. Повышенная турбулентность заряда обуславливает снижение цикловых разбросов рабочих параметров и улучшение теплоотдачи в стенки камеры сгорания, что способствует уменьшению выброса NO_x . Таким образом, о влиянии турбулентности заряда на образование NO_x имеются различные мнения. При затухании пламени в щелевых пространствах переферии камеры сгорания, головки поршня и вытеснителях образуются продукты неполного сгорания топливо-токсичные углеводороды и альдегиды. Исследования, проведенные Даниелем и Готенбергом показали [1], что в пристеночном слое заряда толщиной 0,05...0,38 мм находится зона тушения фронта пламени. Наличие этой зоны и обуславливает появление несгоревших углеводородов в отработавших газах. Поэтому, на образование углеводородов большое влияние оказывают компактность камеры сгорания, т.е. величина отношения поверхности камеры сгорания к ее объему, температура стенок, камеры сгорания, турбулентность заряда, возможность догорания его после гашения пламени у стенок. Для снижения содержания в отработавших газах СН следует стремиться к относительно малой поверхности камеры сгорания при максимальном объеме, так как при этом уменьшается объем пристеночного слоя горящей смеси, в котором процесс сгорания идет малоэффективно, с выделением большого количества СН и альдегидов.

Положительными мероприятиями при этом являются увеличение рабочего объема цилиндра, отношения $\frac{s}{V}$ и снижение ϵ . Снижению образования СН спо-

собствуют также повышение температуры стенок камеры сгорания и уменьшение толщины пристеночного слоя горящей смеси. Последнее может быть достигнуто усилением турбулизации заряда, способствующей переносу активных частиц из пламени в пристеночный горящий слой. Существенное снижение выделения СН наблюдается в двигателях с послойным смесеобразованием и сжиганием заряда при работе на частичных нагрузках. Уменьшение температуры окружающего воздуха вызывает увеличение выделения СН, вследствие ухудшения процесса смесеобразования. С учетом санитарных норм концентрации всех компонентов отработавших газов бензинового двигателя можно привести к концентрации СО и по сумме приведенных концентраций оценивать суммарную токсичность бензинового двигателя в целом:

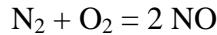
$$C^{CO} = C_{CO} + 0,67C_{CH} + 10C_{N_xO_y} + 10C_{альд},$$

где: C_{CO} - концентрация СО в отработавших газах; C_{CH} - концентрация углеводородов; $C_{N_xO_y}$ - концентрации окислов азота; $C_{альд}$ - концентрация альдегидов.

В ходе экспериментов многими исследователями установлено, что сгорание паров топлива (обедненных смесей) при высокой температуре сгорания смеси в цилиндре поршневого двигателя приводит к образованию окислов азота. Известные методики расчета учитывают эти особенности не полностью, что снижает возможности их применения для анализа влияния различных факторов на образование окислов азота. Рассмотрим эти особенности. В бензиновом двигателе при продвижении фронта пламени в камере сгорания возникает большая температурная неравномерность. Перед фронтом пламени горючая смесь имеет сравнительно невысокую температуру и здесь образование NO не происходит; во фронте пламени реагируют чрезвычайно активные частицы углеводородных молекул, при этом количество азота ничтожно мало, вероятность реакций между самими этими частицами за малые промежутки времени практически равна нулю.

В расчетах поэтому следует учитывать лишь реакции этих частиц с молекулами среды горения (N_2 , CO_2 , H_2O , CO , O_2). Особенность протекания реакций окисления (горения) в бензиновых поршневых ДВС заключается в чрезвычайно малом времени, отводимом на их завершение. Расчеты показывают, что химические реакции веществ, требующих большой энергии активации: диссоциация продуктов сгорания, окисление N_2 , за такое малое время не могут полностью завершиться равновесными концентрациями продуктов сгорания. Отдельные участки зоны продуктов сгорания имеют не только различные температуры, но и находятся в различных временных условиях. У источника зажигания действуют наивысшие температуры (3000 К) и имеется наибольшее время для химических реакций. По мере удаления от источника зажигания снижаются температуры горящей смеси и уменьшается время, отводимое для реакций окисления. После достижения максимального давления в цилиндре, вследствие движения поршня вниз, к НМТ, происходит резкое падение давления и температуры, и реакции окисления N_2 немедленно прекращаются. По этой причине расчет реакций образования NO и диссоциации CO_2 и H_2O должны производиться последовательно, в малых объемах участков камеры сгорания через малый угол поворота коленчатого вала, с учетом текущих температур, действующих в этих участках. В предлагаемой методике образование NO и CO расчитывается последовательно, в малых объемах камеры сгорания, через малые интервалы поворота коленчатого вала. При этом производится суммирование текущих количеств NO и CO в каждом такого объема и затем во всем объеме продуктов сгорания за фронтом пламени. В результате строятся графики нарастания концентраций NO и CO по углу ПКВ. Другая особенность заключается в том, что

весь комплекс реакций, приводящий к образованию NO, происходит в инертной среде продуктов сгорания. По этой причине концентрация активных частиц различных промежуточных реакций окисления ничтожно мала и вероятность реакций между самими этими частицами за малые отрезки времени практически равна нулю; следовательно, следует учитывать только реакции этих частиц с молекулами среды. При наличии в продуктах сгорания свободного кислорода образование оксида азота может идти по реакции:



Скорость протекания реакции равна:

$$\frac{d[NO]_i}{d\tau} = K_i [N_2][O_2],$$

Константа скорости этой реакции вычисляется по уравнению:

$$K_i = 10^{24,96} T^{-\delta/2} \exp\left(-\frac{12800}{RT}\right),$$

Концентрация остаточного кислорода при $\alpha > 1$ в продуктах сгорания равна:

$$[O_2] = \frac{0,21}{\beta} * \frac{\alpha-1}{\alpha},$$

Концентрация азота будет:

$$[N_2] = \frac{0,79}{\beta},$$

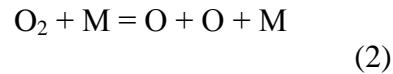
Возможен и другой путь окисления азота свободным кислородом: вначале, под воздействием высоких температур, происходит диссоциация кислорода, а затем уже осуществляется реакция соединения азота с атомарным кислородом.

Диссоциация кислорода может проходить по двум схемам с различным энергетическим уровнем:



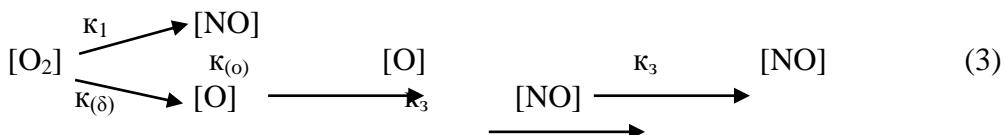
$$\text{с константой скорости: } K_{(0)} = 10^{19,9} \exp\left(-\frac{39000}{RT}\right)$$

и



$$\text{с константой скорости: } K(\delta) = 10^{18,5} \exp\left(-\frac{118000}{RT}\right)$$

Схему параллельно-последовательной реакции окисления азота с учетом всех трех реакций можно представить так:



Константа скорости реакции



$$\text{равна: } K_3 = 10^{13,7} \exp\left(-\frac{75000}{RT}\right)$$

Суммарную скорость реакции окисления азота (3) определяем по уравнению

$$d[NO]_{1,a,\delta} = [O_2]K_1 + K_a K_3 + K_\delta K_3, \quad (5)$$

При воздействии на продукты сгорания высоких температур процесса сгорания, происходит диссоциация части молекул CO_2 и H_2O , в результате чего образуются дополнительные окислители для N_2 . Реакции образования окислителя и окисления N_2 могут быть последовательными и параллельно-последовательными.

Использованная литература

1. Глазунов Д.В. Моделирование процессов смесеобразования и сгорания в автомобильных двигателях. Монография. – Б., 2013. – 100 с
2. Семенов Н.Н. Цепные реакции. – М., 1964. – 165 с.