

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ОЗОНИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА ВО ВПУСКНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ДИЗЕЛЯ

Канд. техн. наук, доц. ВЕРШИНА Г. А., асп. ПИЛАТОВ А. Ю.

Белорусский национальный технический университет

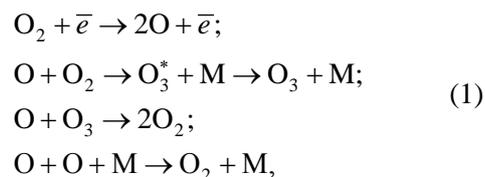
В последнее время существенно возрос интерес к проблеме использования в качестве обработки свежего заряда на впуске озонирования воздушного заряда путем пропускания воздушного потока через тлеющий разряд определенной мощности. Согласно имеющимся на данном этапе сведениям и исходя из физико-химических свойств озона известно, что он является высокоактивным окислителем. Повышение его концентрации в воздушном коллекторе двигателя до 2 % по объему существенно улучшает пусковые качества двигателя, повышает реакционную способность смеси, полноту сгорания и мощность двигателя [1].

Вопросу практической реализации и описанию соответствующих устройств уделено достаточное внимание в исследованиях. В то же время согласно законам химической кинетики применительно к процессам образования и одновременного распада озона известна достаточно явно выражаемая неустойчивость химического соединения O_3 . Таким образом, одновременно с образованием озона в тлеющем разряде идет его распад. В связи с этим встает вопрос об обеспечении или сохранении требуемых концентраций озона в воздушном потоке в коллекторе двигателя, что на сегодняшний день остается малоизученным. Поэтому следует обратить внимание на точное определение уровня энергии озонирования воздушного заряда с целью сохранения при последующем неизбежном повышении температуры свежего заряда с использованием наддува и последующего сжатия необходимой объемной концентрации озона в воздушном потоке для обеспечения необходимой заранее установленной концентрации озона в потоке воздушного заряда, осуществляющего более качественное протекание рабочего процесса дизельного двигателя.

Как отмечено, концентрация до 2 % по объему во впускном коллекторе дизеля может существенно повысить качество рабочего процесса дизеля. В данной работе предлагается метод,

согласно которому определяется требуемое количество энергии для обеспечения указанной концентрации озона в объеме коллектора с учетом его неустойчивости и повышенной склонности к распаду, особенно при росте температуры.

На практике считается, что при прохождении через зону разряда молекулы кислорода частично в общем случае диссоциируют по схеме:

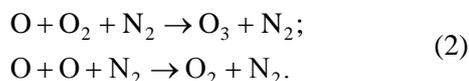


где M – любая третья частица, представляющая один из благородных газов и выступающая в роли акцептора; O_3^* – возбужденная молекула озона.

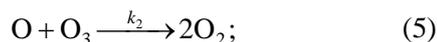
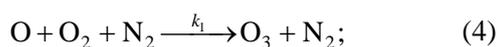
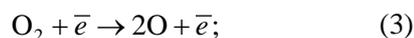
Первая реакция является схемой диссоциации молекулы кислорода в электрическом поле. Затем образовавшийся атомарный кислород реагирует с молекулой кислорода, образуя озон. Параллельно этому процессу идет соединение атомарного кислорода с трехатомным озоном и образованием двух молекул кислорода. Конкуренция этих двух реакций ограничивает возможность увеличения концентрации озона в газе свыше 5–7 % по объему [2]. Также в литературных источниках отмечается, что озон является весьма неустойчивым соединением. При этом процесс его распада может ускоряться с повышением температуры. Поэтому при применении озонирования следует учитывать возможность его распада путем расчета по законам химической кинетики с учетом действующих констант скорости реакций (1) первого и второго порядка, а также зависимость последних от температуры, что особенно важно при использовании наддува.

Исходя из литературных данных, во второй и четвертой реакциях схемы (1) в качестве не-

обходимого акцептора М могут выступать с различной эффективностью молекулы N_2 , CO_2 , Ar , He , N_2O и др. В ряде проводимых исследований [3] установлена возможность протекания следующих реакций:



Так, в воздушном потоке концентрация азота N_2 превалирует по массе и объему над концентрацией других указанных газов, суммарное содержание которых находится в пределах 1 %, в разработанном методе принимается допущение, что осуществление реакций синтеза озона (1) происходит в среде N_2 , который и является в свою очередь акцептором в указанных реакциях. Таким образом, схема (1) с учетом (2) может быть записана в виде:



где k_1 – константа скорости реакции (4); k_2 – то же (5); k_3 – то же (6).

Массовый расход воздуха через двигатель определяется по формуле

$$G = \frac{nV_S i}{30z} \rho_k \varphi_a \eta_u, \quad (7)$$

где z – тактность; n – частота вращения коленчатого вала; V_S – рабочий объем двигателя; ρ_k – плотность свежего заряда; φ_a – коэффициент продувки; i – число цилиндров; η_u – коэффициент наполнения.

Масса воздуха, проходящего через впускной коллектор двигателя, определяется

$$M_B = G \Delta t, \quad (8)$$

где Δt – время впуска.

Объем воздуха, входящего в цилиндры двигателя:

$$V_B = \frac{M_B}{\rho_B}, \quad (9)$$

где ρ_B – плотность воздуха на впуске.

Плотность воздуха на впуске определяется из уравнения Клайперона – Менделеева

$$\rho_B = \frac{P_B}{RT_B}, \quad (10)$$

где p_B – давление воздуха на впуске; R – газовая постоянная для воздуха; T_B – температура в воздушном потоке.

Молярную концентрацию кислорода по объему в рассматриваемом воздушном потоке считаем

$$C_{O_2} = 0,23 \left(\frac{M_B (1 - \eta_O)}{\mu_{O_2}} \right) \frac{1}{V_B}, \quad (11)$$

где μ_{O_2} – молярная масса кислорода; η_O – процентный выход по массе атомарного кислорода в озонаторе.

Молярная концентрация атомарного кислорода по объему в потоке, проходящем через тлеющий разряд и принимающем участие в реакциях (1), определяется следующим образом:

$$C_O = 0,23 \left(\frac{M_B \eta_O}{\mu_O} \right) \frac{1}{V_B}, \quad (12)$$

где μ_O – молярная масса атомарного кислорода. Молярную концентрацию азота можно найти

$$C_{N_2} = 0,79 \left(\frac{M_B}{\mu_{N_2}} \right) \frac{1}{V_B}, \quad (13)$$

где μ_{N_2} – молярная масса молекулы азота.

Процесс образования и одновременного распада молекул озона может быть описан с помощью системы дифференциальных уравнений, задающих закон $C_{O_3} = f(t)$ изменения концентрации озона во времени. Численно определив характер его протекания, можно рассчитать по исходным начальным условиям (11)–(13) концентрацию в конечный момент времени и в то же время решить обратную задачу по заранее установленной концентрации в конечный момент времени можно определить исходные необходимые для воздействия озона на рабочий процесс концентрации атомарного C_O молекулярного C_{O_2} кислорода. С целью определения объемных концентраций озона в текущий момент времени следует записать исходя из законов химической кинетики на основании (1) систему дифференциальных уравнений. В качестве начальных условий используется начальная объемная концентрация молекулярного (11) и образованного атомарного кислорода (12):

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} &= -k_1(C_{O_2}C_{O_3})C_{N_2} - k_2(C_{O_2}C_{O_3}) - k_3(C_{O_2})^2 C_{N_2}; \\ \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} &= k_2(C_{O_2}C_{O_3}) - k_1(C_{O_2}C_{O_3})C_{N_2} + k_3(C_{O_2})^2 C_{N_2}; \\ \frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} &= k_1(C_{O_2}C_{O_3})C_{N_2} - k_2(C_{O_2}C_{O_3}),\end{aligned}\quad (14)$$

где C_{O_3} – мольная объемная концентрация озона.

Константы скорости реакций определены в [3]. Система (14) описывает процесс синтеза озона в озонаторе. Одним из ее решений является зависимость $C_{O_3} = f(t)$, что дает возможность (в предлагаемой методике за конечный момент времени принимается время окончания такта впуска, начальный момент времени отнесен к моменту воздействия тлеющего разряда на рассматриваемую массу свежего заряда) определить начальные концентрации атомарного C_O молекулярного C_{O_2} кислорода, обеспечивающие получение в конечный момент времени требуемую концентрацию озона в коллекторе. Зависимость значения концентрации озона в момент окончания такта впуска от массового соотношения атомарного и молекулярного кислорода в начальный момент времени представлена на рис. 1.

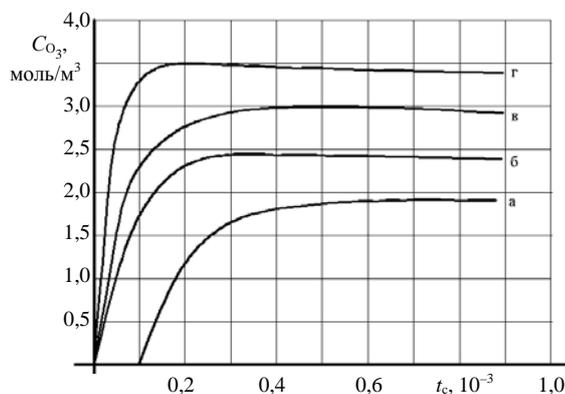


Рис. 1. Изменение текущей концентрации озона в воздушном потоке на впуске в зависимости от массового соотношения атомарного и молекулярного кислорода: а – 10 % O и 90 % O₂; б – 20 % O и 80 % O₂; в – 30 % O и 70 % O₂; г – 40 % O и 60 % O₂

Учитывая склонность озона к распаду при повышении температуры [1, 2, 4–10] на втором этапе согласно предлагаемому методу количественно оценивается часть массы озона, которая не может находиться в цилиндре в момент воспламенения топливовоздушной смеси к кон-

цу такта сжатия вследствие ее термического разложения.

Схема термического разложения озона описана в [3] и представляется следующим уравнением:



Константа скорости реакции разложения озона как функция температуры описывается законом Аррениуса

$$k(t) = 10^{-14} \exp\left\{\frac{E_a}{RT(t)}\right\}, \quad (16)$$

где E_a – энергия активации реакции (15); R – универсальная газовая постоянная; $T(t)$ – закон изменения температуры в ходе впуска и сжатия.

Дифференциальное уравнение, описывающее ход течения реакции (15), выглядит как

$$\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} = -k(T(t))(C_{O_3})^2, \quad (17)$$

где $k(T(t))$ – функциональная зависимость константы скорости реакции (15) от температуры в ходе впуска и сжатия, зависящей в свою очередь от времени.

Ход распада молекул образовавшегося на впуске озона по (17) отражен на рис. 1 в зависимости от температуры во впускном коллекторе для двигателя рабочим объемом $V_h = 4,75 \text{ дм}^3$.

Согласно полученному решению уравнения (17) в интервале времени такта сжатия определено, что существенное повышение температуры в конце такта сжатия и в момент начала воспламенения не способно существенным образом интенсифицировать распад образованных на впуске молекул озона.

В конце по известной и определенной на первой стадии расчета мольной концентрации атомарного кислорода, образованного диссоциацией молекул кислорода в воздушном потоке на впуске и необходимого для генерации реакций синтеза озона, определяется количество энергии, выделяющейся в разрядном промежутке озонатора, идущей на разрыв межатомных ковалентных связей молекулы кислорода и необходимой для создания требуемой концентрации атомарного кислорода в воздушном потоке на впуске.

Затраты энергии на разрушение молекулы кислорода зависят от способа воздействия на связь. При термическом воздействии на связь она разрушается при энергии 5,13 эВ, а при механическом воздействии на связь достаточно затратить 2,56 эВ энергии. Поскольку диссоциация молекулы кислорода в озонаторе – механический, а не термический процесс, то в качестве энергии нужно принять 2,56 эВ. При этом энергия возбуждения одного из кислородных атомов до метастабильного состояния равна 1,96 эВ.

Количество диссоциированных атомов можно оценить как

$$N = N_A (C_{O_2}^o - C'_{O_2}) V_B, \quad (18)$$

где N_A – число Авогадро; $C_{O_2}^o$ – мольная концентрация молекулярного кислорода при полном отсутствии диссоциации; C'_{O_2} – то же за вычетом определенной части диссоциированных его молекул.

Затраты энергии на диссоциацию требуемого количества молекул кислорода и образования в последующем синтеза озона, который посредством своего воздействия на рабочий процесс повышает его качество протекания, определяются как

$$P = E_a Ni, \quad (19)$$

где E_a – энергия разрыва молекулярной связи молекулы кислорода; i – число тактов в единицу времени.

ВЫВОД

Разработанный метод определения энергетических затрат в двигатель позволяет установить численную взаимосвязь между заранее известным требуемым количеством озона в со-

отношении с воздухом во впускном коллекторе в цилиндр и энергетическими затратами, идущими на диссоциацию части молекул кислорода и генерацию процессов синтеза озона в входном потоке воздуха. Данный метод может быть применен в двигателестроении при проектировании и компоновке средств обработки воздушного заряда, применяемых с целью более качественного воздействия на воздушный заряд.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Адамович, Б. А.** Способ улучшения пусковых характеристик, повышения мощности и уменьшения токсичности отходящих из камеры сгорания газов двигателей внутреннего сгорания и устройство для его реализации: пат. 2180051 РФ / Б. А. Адамович // Бюл. изобр. – 2002. – № 6.
2. **Разумовский, С. Д.** Озон и его реакции с органическими соединениями / С. Д. Разумовский, Г. Е. Заиков. – М.: Наука, 1974.
3. **Кондратьев, В. Н.** Константы скорости газозависимых реакций / В. Н. Кондратьев. – М.: Наука, 1970.
4. **Лунин, В. В.** Физическая химия озона / В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко. – М.: Изд-во МГУ, 1998.
5. **Самойлович, В. Т.** Физическая химия барьерного разряда / В. Т. Самойлович, В. И. Гибалов, К. В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989.
6. **Masuda, S.** A ceramic-based ozoniser using high frequency discharge / S. Masuda // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1988. – № 2. – P. 45–67.
7. **Филиппов, Ю. В.** Электрическая теория озонаторов. Статические вольтамперные характеристики озонаторов / Ю. В. Филиппов, Ю. М. Емельянов // ЖФХ. – 1958. – № 12. – С. 54–63.
8. **Филиппов, Ю. В.** Об активной мощности озонаторов / Ю. В. Филиппов, Ю. М. Емельянов // ЖФХ. – 1959. – № 5. – С. 23–35.
9. **Энгельшт, В. С.** Высокочастотный озонатор: пат. 2075433 РФ / В. С. Энгельшт // Бюл. изобр. – 2001. – № 33.
10. **Энгельшт, В. С.** Устройство для инициирования физико-химических реакций: пат. 2080171 РФ / В. С. Энгельшт // Бюл. изобр. – 2001. – № 33.

Поступила 25.05.2007