
ПОЖАРНАЯ ТАКТИКА, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ

ОРГАНИЗОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В ДВИГАТЕЛЯХ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

**В.Н. Ложкин, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ;**

В.А. Буравцов;

**Б.В. Гавкалюк, кандидат технических наук. Санкт-Петербургский
университет ГПС МЧС России**

Посвящена теоретическому обоснованию термохимических представлений горения углеводородных топлив и образования вредных веществ в двигателях пожарных автомобилей. Разработанная методология может составить теоретическую основу диагностирования топливно-экономических и экологических показателей эксплуатации пожарных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, двигатель, горение, углеводородное топливо, материальный баланс, отработавшие газы, токсичность

ORGANIZED BURNING PROCESSES OF THE HYDROCARBON FUELS IN THE ENGINES OF THE FIRE-ENGINES AND TOXIC SUBSTANCES GENERATION

V. N. Lozhkin; V. A. Buravsov; B. V. Gavkaluk.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Article is devoted to the theoretical foundation of the thermo-chemical concepts of the hydrocarbon fuels burning and toxic substances generation in the engines of the fire-engines (automobiles). This elaborate methodology can help constitute the theoretical base for diagnosis of fuel, economic and environmental indicators of the exploitation of fire-engines with internal combustion engines.

Key words: fire-engine, engine, burning, hydrocarbon fuel, material balance, exhaust gases, toxicity

Устанавливаемые на пожарных автомобилях (ПА) двигатели внутреннего сгорания (ДВС) поставляют в окружающую среду значительные количества токсичных и канцерогенных веществ [1]. Состав отработавших газов (ОГ) ДВС и количественные соотношения в них отдельных компонентов зависят главным образом от состава сжигаемой рабочей смеси, развиваемых в цилиндрах двигателей температур горения и степени завершенности окислительных реакций.

Повышение боеспособности и уровня экологической безопасности ПА обеспечивается сегодня законодательными нормами и научно-техническими средствами [1]. Первые связаны с реализацией системы действующих международных и государственных законов, стандартов и правил, устанавливающих нормы и процедуры контроля токсичных

веществ. Второе направление реализуется путем совершенствования конструкции базовых шасси ПА и их двигателей, внедрением методов безразборной диагностики систем двигателя, применением альтернативных видов топлив и т. д. [1–3].

Разработка методов безразборной диагностики систем и экологическое совершенствование двигателей внутреннего сгорания ПА требует от эксплуатационников и разработчиков глубокого понимания процессов горения углеводородного топлива и создания на этой основе экспериментально расчетных диагностических методов.

Рассмотрим термохимическую модель горения углеводородных топлив в двигателях ПА на основе материального баланса реагирующих веществ.

Основным источником теплоты при сгорании топлив является окисление атомов углерод С и водорода Н. Кроме того, в топливах могут содержаться в незначительном количестве сера, соединения азота, кислородсодержащие соединения (спирты, эфиры и др.), тяжелые металлы (табл. 1) [2, 3].

Вид условной «молекулы» запишем как $C_xH_yO_z$ (для азотосодержащих топлив – $C_xH_yO_zN_g$, для серосодержащих – $C_xH_yO_zN_gS_k$). Материальный баланс устанавливаем по элементному составу топлива, выражающему относительное массовое содержание отдельных элементов при полном и неполном сгорании топлива. Рабочую массу топлива, содержащего примеси азота, серы, золы, влаги, определяем по формуле.

$$W_C + W_H + W_O + W_N + W_S + W_3 + W_{вл}$$

Для приведенных в табл. 1 топлив содержание в мазуте и каменном угле золы W_3 и влаги $W_{вл}$ доходит соответственно до 0,2 и 9 % (мазут малосернистый), 10–40 и 4–15 % (каменный уголь).

Массовые доли W отдельных элементов в 1 кг топлива $C_xH_yO_z$ находим по соотношениям:

$$W_C = 12x / (12x + y + 16z) = 12x / M_r; \quad (1)$$

$$W_H = y / (12x + y + 16z) = y / M_r; \quad (2)$$

$$W_O = 16z / (12x + y + 16z) = 16z / M_r, \quad (3)$$

где M_r – молярная масса «условной» молекулы топлива; $12x$, y , $16z$ – масса углерода, водорода, кислорода в молекуле топлива; $W_C + W_H + W_O = 1$.

Таблица 1. Свойства топлив, используемых в ДВС

Топливо	Элементный состав, % (по массе)					L_0 , кг/кг	H_u МДж/кг
	W_C	W_H	W_O	W_N	W_S		
Водород	-	100	-	-	-	34,34	119,6
Сжатый природный газ	71,0	23,2	0,4	5,3	0,1	13,63	46,9
Сжиженный нефтяной газ	84,0	16,0	-	-	0,01	15,1	45,5
Метанол CH_3OH	37,5	12,5	50,0	-	-	6,5	19,6
Диметилэфир CH_3OCH_3	52,2	13,0	34,8	-	-	9,0	28,8
Бензин	85,5	14,5	-	-	0,02	14,8	44,0
Дизтопливо	86,5	13,3	-	0,02	0,2	14,5	41,3
Мазут	85,6	11,3	0,5	0,3	2,3	13,8	40,9
Каменноугольная пыль	80,5	6,0	11,5	1,5	0,5	10,8	32,3

Примечание: L_0 – потребное количество воздуха для сжигания топлива; H_u – удельная теплота, выделяемая при горении

В большинстве товарных сортов бензина и дизельных топлив наличием кислорода можно пренебречь (условная «молекула» топлива C_xH_y , $M_r = 12x + y$). Смесь газовых топлив состава $\sum C_xH_yO_z + N_2$ с объемной (молярной) долей каждого газа φ имеет следующий элементный состав для 1 к·моль (1 м^3):

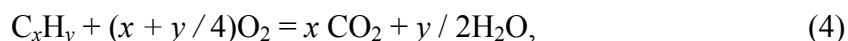
- молярная масса смеси газов:

$$M_r = \sum (M_{C_xH_yO_z})_i \varphi_i + 28 N_2; \sum \varphi_i + \varphi N_2 = 1$$

и массовые доли газов:

$$W_C = 12 \sum x_i \varphi_i / M_r; W_O = 16 \sum z_i \varphi_i / M_r.$$

Полное окисление топлива. Соотношение между количеством исходных продуктов (топливо плюс воздух) и продуктов сгорания определяем по уравнениям химических реакций при следующих допущениях: все химические соединения состоят из атомов отдельных элементов, связанных между собой в определенных числовых соотношениях; при химических реакциях атомы сохраняют свою индивидуальность и происходит только их перегруппировка. Полное окисление (сгорание) молекулы C_xH_y до конечных продуктов (диоксида углерода CO_2 и водяного пара H_2O) описывается уравнением (исходные и конечные продукты реакции даны в к·моль) [2, 3]:



где x атомов С в 1 к·моль C_xH_y дают x к·моль CO_2 , $N(CO_2) = x$; y атомов Н в 1 к·моль C_xH_y дают $y/2$ к·моль H_2O , $N(H_2O) = y/2$. Состав продуктов сгорания в пересчете на 1 кг топлива ($1/M_r$ к·моль) будет:

$$N(CO_2) = x / M_r = x / (12x + y), \quad N(H_2O) = (y/2) / M_r = (y/2) / (12x + y)$$

и через элементный состав с учетом уравнений (1) – (3)

$$N(CO_2) = W_C / 12, \quad N(H_2O) = W_H / 2,$$

в реакции участвует $x+y/4$ к·моль O_2 , $N(O_2) = x+y/4$.

Если в состав топлива входит кислород $C_xH_yO_z$, то правая часть уравнения (4) останется неизменной, а необходимое для сгорания количество кислорода воздуха (к·моль) уменьшается соответственно на $z/2$:

$$N(O_2) = x + y/4 - z/2.$$

Количество кислорода (к·моль) $N(O_2)$, необходимое для полного сгорания топлива и называемое стехиометрическим, определяется на основании уравнения (4) по следующему соотношению:

- количество (к·моль) O_2 на 1 к·моль топлива:

$$N(O_2) = x + y/4 = (W_C / 12) M_r + (W_H / 4) M_r;$$

- количество (к·моль) O_2 на 1 кг топлива:

$$l_0' = N(O_2) M_r = (x + y/4) / (12x + y) = (W_C / 12) + (W_H / 4);$$

– масса (кг) O_2 на 1 кг топлива:

$$L_0' = l_0' M(O_2) = (32x + 8y) / (12x + y) = (W_C / 12) + (8 / 3)W_C + 8 W_H.$$

Теплота сгорания топлива H_u (МДж/кг топлива), то есть тепловой эффект реакций, идущих с образованием CO_2 и H_2O , определяется по формуле Д. И. Менделеева

$$H_u = 34,013 W_C + 125,6 W_H - 10,9 (W_O - W_S) - 2,512 W_{вл}.$$

Масса кислорода, потребляемая из атмосферы для полного сгорания топлива (кг/кг) топлива,

$$m(O_2) = 0,23 \alpha L_0, \quad (5)$$

где L_0 – стехиометрическое число. Принимая объемную долю кислорода в воздухе 21 % и массовую 23,2 %, находим стехиометрическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива:

– количество (к·моль) воздуха на 1 кг топлива:

$$l_0 = l_0' / 0,21 = (1 / 0,21) (x + y / 4) / (12x + y) = (1 / 0,21) [(W_C / 12) + (W_H / 4)];$$

– масса (кг) воздуха на 1 кг топлива:

$$L_0 = L_0' / 0,232 = 138 (x + y / 4) / (12x + y) = 138 [(W_C / 12) + (W_H / 4)].$$

Для газовых топлив, представляющих смесь углеводородов состава $\sum C_xH_yO_z$ с объемной долей φ_i углеводородов, l_0 {[к·моль (m^3) воздуха] / [к·моль (m^3) топлива]}:

$$l_0 = \sum (x + y - z / 2) \varphi_i / 0,21.$$

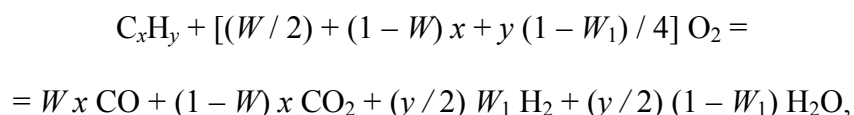
В формуле (5) α – коэффициент избытка воздуха – отношение количества воздуха, содержащегося в топливовоздушной смеси G_B к его минимальному количеству, которое теоретически необходимо для полного сгорания всего находящегося в нем топлива G_T :

$$\alpha = G_B / (G_T L_0),$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч; $G_T L_0$ – минимальное, теоретически необходимое для полного сгорания топлива количество воздуха, кг/ч. Если $\alpha = 1$, то смесь стехиометрического состава; $\alpha > 1,0$ – смесь бедная; $\alpha < 1,0$ – смесь богатая. Для дизелей $\alpha = 1,4 - 2,2$ (номинальный режим) и 4–5 – холостой ход; бензиновый ДВС $\alpha = 0,8 - 1,2$. В табл. 2 приведены данные о потреблении кислорода и выделении углерода, паров воды в результате полного сгорания топлива.

В результате полного сгорания топлива потребляется 1,5–7,9 кг кислорода воздуха, а выделение CO_2 (для используемых в настоящее время топлив) составляет порядка 3 кг, воды – 0,8–2,3 кг, азота – 10,4–13,3 кг.

Неполное окисление. Если количество кислорода будет меньше стехиометрического, то окисление будет неполным: часть углерода окислится лишь до CO , а часть водорода не сгорит вообще. Окисление углеводородной молекулы C_xH_y идет по уравнению:



где W – массовая доля углерода, окислившегося до CO ; W_1 – массовая доля несгоревшего водорода.

Таблица 2. Объемы потребления кислорода воздуха и выделения различных веществ при полном сгорании 1 кг топлива, кг

Топливо	Потребление O_2	Выход веществ в результате сгорания		
		H_2O	N_2	CO_2
Водород	7,94	8,94	26,41	-
Сжатый природный газ	3,13	2,25	13,28	2,8
Сжиженный нефтяной газ	3,47	1,59	12,0	3,0
Метанол	1,5	1,13	4,98	1,37
Диметилэфир	1,92	1,08	-	1,84
Бензин	3,04	1,46	11,74	3,1
Дизтопливо	3,34	1,29	11,39	3,16
Мазут	3,17	0,78	10,4	3,5
Каменный уголь	2,48	-	8,86	3,0

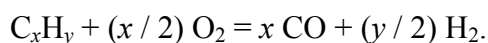
В продуктах сгорания появляется несгоревший водород $N(\text{H}_2)$ и оксид углерода $N(\text{CO})$. Тогда

$$N(\text{CO}) + N(\text{CO}_2) = x; \quad N(\text{H}_2) + N(\text{H}_2\text{O}) = y / 2.$$

На 1 кг топлива (к·моль):

$$N(\text{CO}) + N(\text{CO}_2) = W_C / 12; \quad N(\text{H}_2) + N(\text{H}_2\text{O}) = W_H / 2.$$

С уменьшением количества кислорода в продуктах сгорания будет увеличиваться содержание CO и H_2 и уменьшаться содержание H_2O и CO_2 . При $W_1 = W = 1$ в продуктах сгорания будут содержаться только CO и несгоревший кислород H_2 . Соответствующее уравнение окисления имеет вид



Количество кислорода (к·моль) $N(\text{O}_2) = x / 2$ соответствует условию, когда число атомов углерода равно числу атомов кислорода, то есть $\text{C} / \text{O} = 1$. При дальнейшем уменьшении содержания кислорода $\text{C} / \text{O} > 1$ в продуктах сгорания появляется несгоревший углерод (сажа).

Величина выбросов загрязняющих веществ зависит не только от вида топлива, но и физико-химических механизмов образования их в цилиндре двигателя. В камерах сгорания тепловых двигателей на механизм образования продуктов неполного сгорания и характер побочных реакций, протекающих при горении, влияет структура фронта пламени [2, 3].

В диффузионном пламени дизеля топливо и окислитель диффундируют во фронт пламени, где в узкой области смешения протекает химическая реакция и достигается максимальная температура. К этой области примыкает со стороны топлива область его термического распада, в которой в отсутствие окислителя образуются наряду с промежуточными продуктами распада водород и сажа. Водород, диффундируя во фронт пламени, сгорает, а частицы сажи увеличиваются за счет распада на их поверхности углеводородов и коагуляции отдельных сажевых частиц при их диффузии и выгорают во фронте пламени со значительно меньшей скоростью.

Часть сажевых частиц диффундирует в сторону топлива. Со стороны окислителя к фронту пламени примыкает область образования NO, который диффундирует в обе стороны. При диффузии в сторону фронта пламени NO разлагается с высокой скоростью при температуре пламени в области, ограниченной содержанием в смеси кислорода. При диффузии от фронта пламени NO также разлагается, но по мере снижения температуры происходит закалка, то есть концентрация перестает изменяться при уменьшении равновесного значения концентрации NO.

В пламени, распространяющемся по гомогенной смеси в двигателях с внешним смесеобразованием, полнота сгорания зависит в первую очередь от состава смеси. Если избыточным компонентом является топливо ($\alpha < 1$), то имеет место неполнота его окисления (например, до CO), а если избыточным компонентом является окислитель ($\alpha > 1$), то более интенсивными будут реакции образования NO. Однако благоприятные для образования NO условия ограничены ($\alpha < 1,05$), и при росте избытка окислителя из-за снижения температуры концентрация оксидов азота в продуктах сгорания уменьшается.

Если температура в области горения гетерогенной смеси невысока, теплоты, подводимой в зону распада углеводородов, может не хватить для обеспечения их распада до конечных продуктов. Температура при этом будет падать, эндотермический процесс начнет протекать вяло. В результате в продуктах сгорания будут присутствовать несгоревшие углеводороды испарившегося топлива. Причиной падения температуры является также охлаждение смеси в пристеночной зоне.

Вредные вещества, содержащиеся в отработавших газах двигателей в зависимости от механизма их образования, можно разделить на группы:

а) углеродосодержащие вещества – продукты полного и неполного сгорания топлива (CO₂, CO, углеводороды, в том числе полициклические ароматические, сажа);

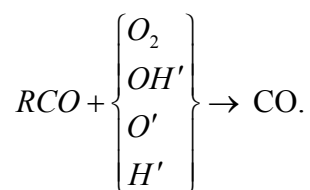
б) вещества, механизм образования которых непосредственно не связан с процессом сгорания топлива (оксиды азота – по термическому механизму);

в) вещества, выброс которых связан с примесями, содержащимися в топливе (соединения серы, свинца, других тяжелых металлов), воздухе (кварцевая пыль, аэрозоли), а также образующимися в процессе износа деталей (оксиды металлов). Рассмотрим механизмы образования тех из веществ, содержание которых в отработавших газах двигателей нормируется.

Моноксид углерода CO – образуется в ходе предпламенных реакций, при сгорании углеводородного топлива с некоторым недостатком воздуха, а также при диссоциации CO₂ (при температурах более 200 К). Образование CO можно представить как:

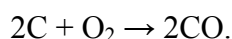


Реакция радикала RCO, приводящая к образованию CO, может протекать в результате одновременного взаимодействия с четырьмя компонентами (это вероятно для бензиновых двигателей):

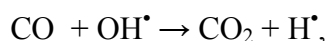


В дизелях, работающих при ($\alpha > 1$), вероятность указанных превращений во фронте пламени мала и в отработавших газах содержится меньше CO, но имеются дополнительные источники его появления: низкотемпературные участки пламени на стадии воспламенения топлива; капли топлива, поступающие в камеру на поздних стадиях впрыска и сгорающие в диффузионном пламени при недостатке кислорода; частицы сажи, образовавшейся в период

распространения турбулентного пламени по гетерогенному заряду. В последнем при общем избытке кислорода могут создаваться зоны с его дефицитом, в которых протекает реакция:



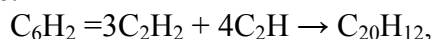
Диоксид углерода CO_2 является нетоксичным, но вредным веществом в связи с фиксируемым повышением его концентрации в атмосфере планеты и его влиянием на изменение климата. Основная доля образовавшегося в камере сгорания CO окисляется до CO_2 , не выходя за пределы камеры, ибо замеренная объемная доля диоксида углерода в отработавших газах составляет 10-15 %, то есть в 300-450 раз больше, чем в атмосферном воздухе. Наибольший вклад в образование CO_2 вносит реакция



которая является необратимой. Окисление CO в CO_2 происходит в выпускной трубе, а также в нейтрализаторах (дожигателях) отработавших газов, которые устанавливаются на современных автомобилях для принудительного окисления CO и несгоревших углеводородов до CO_2 . Величина выбросов CO_2 зависит от физико-химических и теплофизических свойств топлив (см. табл. 2) и их расхода. При использовании в качестве моторного топлива водорода в продуктах сгорания CO_2 будет отсутствовать.

Углеводороды C_xH_y образуются в результате: реакций цепочно-теплого взрыва – пиролиза и синтеза (ПАУ, альдегиды, фенолы); неполноты сгорания в результате прекращения реакций окисления при низких температурах, неоднородности топливовоздушной смеси, пропусков зажигания в отдельных циклах или цилиндрах двигателя (несгоревшие компоненты топлива и масла).

Наиболее токсичны из углеводородов ПАУ. Максимальный уровень токсичности (агрессивность \times концентрация) имеет бенз(α)пирен $C_{20}H_{12}$. Гипотетическая реакция образования $C_{20}H_{12}$ при пиролизе углеводородных топлив при температуре более 873 К может быть записана в форме:



где C_6H_2 – полирадикал, представляющий зародыш сажи; C_2H_2 , C_2H – «элементные строительные блоки». Бенз(α)пирен образуется одновременно с сажей по сходному механизму, который рассматривается ниже [2, 3].

Частицы включают *нерастворимые* вещества (твердый углерод, оксиды металлов, диоксид кремния, сульфаты, нитраты, асфальты, соединения свинца) и растворимые в органическом растворителе (смолы, фенолы, альдегиды, лак, нагар, тяжелые фракции, содержащиеся в топливе и масле). Частицы в отработавших газах дизелей с наддувом состоят на 68–75 % из нерастворимых веществ, на 25–32 % – из растворимых.

Сажа (аморфный углерод) является основным компонентом нерастворимых частиц. Образуется при объемном пиролизе (термическом разложении углеводородов в газовой или паровой фазе при недостатке кислорода). Механизм образования включает несколько стадий: образование зародышей; рост зародышей до первичных частиц (шестиугольных пластинок графита); увеличение размеров частиц (коагуляция) до крупных конгломератов, включающих 100-150 атомов углерода; выгорание.

Выделение сажи из пламени происходит при $\alpha = 0,33 - 0,7$. В отрегулированных двигателях с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием (бензиновых, газовых) вероятность появления таких зон невелика. У дизелей локальные переобогащенные топливом зоны образуются чаще и в полной мере реализуются перечисленные процессы сажеобразования. Поэтому выбросы сажи с отработавшими газами у дизелей больше, чем у двигателей с искровым зажиганием. Образование сажи зависит от свойств топлива: чем больше отношение C / H в топливе, тем выход сажи больше.

Уровень эмиссии сажи при горении определяется также ее выгоранием в высокотемпературном турбулентном газовом потоке при температурах более 850 К. В процессе выгорания в результате диффузии и сорбции на поверхности частиц сажи образуются твердые иглообразные образования ПАУ.

В состав твердых частиц кроме сажи входят соединения серы. Сера, содержащаяся в моторном топливе, во время горения интенсивно окисляется в SO_2 по механизму, схожему с механизмом образования CO . Диоксид серы может окисляться (с существенно меньшей скоростью) до SO_3 по уравнению:



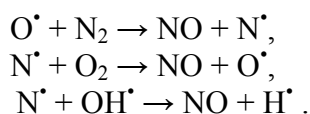
Далее происходит реакция SO_3 с парами воды. Приводящая к образованию H_2SO_4 , которая протекает на стенках при температуре ниже 815 К.

Оксиды азота NO_x представляют следующие соединения: N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 и N_2O_5 . Преобладает NO (99 % в бензиновых двигателях и более 90 % в дизелях).

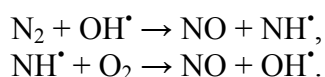
В камере сгорания NO может образовываться:

- 1) при высокотемпературном окислении азота воздуха (термический NO);
- 2) в результате низкотемпературного окисления азотсодержащих соединений топлива (топливные NO);
- 3) из-за столкновения углеводородных радикалов с молекулами азота в зоне реакций горения при наличии пульсаций температуры (быстрый NO).

В камерах сгорания доминирует термический NO . Он образуется из молекулярного азота во время горения бедной топливовоздушной смеси и смеси, близкой к стехиометрической, за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания. Преимущественно при сгорании бедных и умеренно богатых смесей ($\alpha > 0,8$) реакции протекают по цепному механизму [2]:



В богатых смесях ($\alpha > 0,8$) возможны также реакции:



В бедных смесях выход NO определяется максимальной температурой цепочно-теплого взрыва (максимальная температура 2800-2900 К), то есть кинетикой образования. В богатых смесях выход NO перестает зависеть от максимальной температуры взрыва и определяется кинетикой разложения. При горении бедных смесей значительное влияние на образование NO оказывает неравномерность температурного поля в зоне продуктов сгорания и присутствие паров воды, которая в цепной реакции окисления N_2 является ингибитором.

Высокая интенсивность процесса нагревания, а затем охлаждения смеси газов в цилиндре ДВС приводит к образованию существенно неравновесных концентраций реагирующих веществ. Происходит замораживание (закалка) образовавшегося NO на уровне максимальной концентрации, который появляется в выпускных газах из-за резкого замедления скорости разложения NO . Азотсодержащие составляющие топлива (амины, циклические соединения в виде пиридина, карбазола) являются также источниками образования топливного NO уже при температурах 1300 – 1400 К, так как на это требуется энергии меньше, чем на разрушение связей молекулярного азота. Эти вещества легче вступают в реакцию окисления, чем атмосферный азот.

Можно выделить четыре характерные для образования оксидов азота температурные области [2, 3]:

- 1 – (до $T < 850$ К, каталитическое окисление топлива) – NO, как правило, образуется в незначительных количествах;
- 2 – (до $T < 1500$ К) – образуются преимущественно топливные NO;
- 3 – (до $T < 2000$ К) – образуется NO по всем трем рассмотренным механизмам, а при более высоких температурах основной компонент – термический NO;
- 4 – ($T = 2800 - 3200$ К) – следует ожидать максимального выхода термических оксидов азота.

Обоснованная методология теоретического анализа термохимических и кинетических процессов, протекающих в цилиндрах двигателей ПА, используется в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России в отработке методик безразборной диагностики технического состояния двигателей по составу ОГ, при назначении коэффициентов выбросов загрязняющих веществ в расчетных исследованиях их воздействия на оперативный состав подразделений ГПС, конструировании пламенных и каталитических нейтрализаторов ОГ, разработке процессов утилизации отходящей теплоты отработавших газов двигателей в комбинированных и газогенераторных энергосиловых установках [1–3].

Литература

1. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник / В.С. Артамонов, Ю.Г. Баскин, В.А. Гадышев [и др.]. СПб.: СПб ун-т ГПС МЧС России, 2007. 482 с.
2. Ложкин В.Н. Теория и практика безразборной диагностики и каталитической нейтрализации отработавших газов дизелей: дис. ... д-ра техн. наук / СПбГТУ. СПб., 1995.
3. Ложкин В.Н., Гавкалюк Б.В., Афанасьев Е.В., Буравцов В.А. Теория и практика эколого-технического диагностирования применительно к сервисному обслуживанию автотранспортных средств // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2008. № 2. С. 6–15.