

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИЗЕЛЯХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА

С.А. Чесноков, д.т.н., Н.Н. Фролов, к.т.н., С.А. Потапов, к.т.н., П.В. Михайлов, инж.
Тульский государственный университет

В статье рассмотрены возможности метода химического турбулентного теплообмена (ХТТ) для моделирования процессов горения в двигателях с непосредственным впрыском топлива и образования вредных веществ. Синтез теории химической кинетики горения, турбулентности и теплообмена позволяет получать поля скорости, коэффициента избытка воздуха, температуры и состава продуктов сгорания в течение цикла работы двигателя — от начала впрыска топлива до выпуска. Применение метода для малоразмерного дизельного двигателя, при допущениях иногда носящих радикальный характер, позволило теоретически оценить количественные показатели выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Рассматривается следующая физическая модель смесеобразования в малоразмерном дизеле с непосредственным впрыском топлива. Как известно, в дизельных двигателях используются топлива, «средний» состав которых близок к тетрадекану $C_{14}H_{30}$. За счет большой степени сжатия скорость движения воздуха в камере сгорания перед впрыском топлива достаточно мала ($<0,3$ м/с). Средний размер капель (жидких частиц) составляет ~ 20 мкм. Испаряющиеся частицы, двигаясь со скоростью более 200 м/с, увлекают за собой воздух, формируя турбулентную паровоздушную струю. Значительная часть частиц не успевает испариться в воздухе и, попадая на горячую поверхность поршня, практически мгновенно испаряется. Образовавшиеся пары топлива, перемешиваясь с потоком воздуха, постепенно образуют циркуляционную зону с окружной скоростью 40–10 м/с.

Все приведенные количественные оценки являются результатами пробных расчетов. В качестве объекта моделирования принят одноцилиндровый дизельный двигатель ТМЗ-450Д-04 производства ОАО «Тульский машиностроительный завод». Рабочий объем двигателя $0,454 \cdot 10^{-3}$ м³, диаметр цилиндра 85 мм, ход поршня 80 мм, номинальная мощность 8,1 кВт,

степень сжатия 20, доля остаточных газов в цилиндре 5 %.

Внутри неоднородного паровоздушного потока происходит постепенное, в разных точках в различное время, самовоспламенение фрагментов смеси. Момент самовоспламенения в каждой точке определяется временем задержки самовоспламенения $\tau_{\text{зад}}$ ($\sim 0,2-1$ мс), которое зависит от начальной температуры T_n ($\sim 800-900$ К), местного значения коэффициента избытка воздуха α ($\sim 0,3-3$) и давления p ($\sim 3-10$ МПа). Богатые горючим фрагменты смеси ($\alpha < 1$) воспламеняются быстрее, так как для них $\tau_{\text{зад}}$ мало. Бедные фрагменты воспламеняются за счет повышения их начальной температуры (а также давления) при подводе тепла от ранее сгоревших фрагментов смеси. Фронт горения разделяет горючую смесь и продукты сгорания.

Достаточно быстро ($\sim 0,1$ мс) самовоспламенение охватывает весь объем камеры сгорания, что приводит к образованию неоднородных и перемещающихся полей температуры горения и полей концентрации продуктов сгорания.

Отметим, что все указанные процессы происходят одновременно и общее математическое описание является настолько громоздким, что решение становится невозможным. Выделим три наиболее характерных процесса:

- > впрыск, испарение и турбулентное конвективно-диффузионное распространение паров горючего в воздухе;
- > самовоспламенение и горение неоднородной паровоздушной (горючей) смеси;
- > химический турбулентный теплообмен (ХТТ) в объеме цилиндра, то есть догорание за фронтом пламени при турбулентном конвективно-диффузионном перемешивании горючих и окисляющих компонентов продуктов сгорания вплоть до выпуска отработавших газов (ОГ).

Задачи для первого и третьего процессов решены в монографии [1] для двигателя GDI «Mitsubishi» с непосредственным впрыском топлива. Показано, что основным процессом, определяющим содержание оксидов NO и CO в ОГ, является третий процесс.

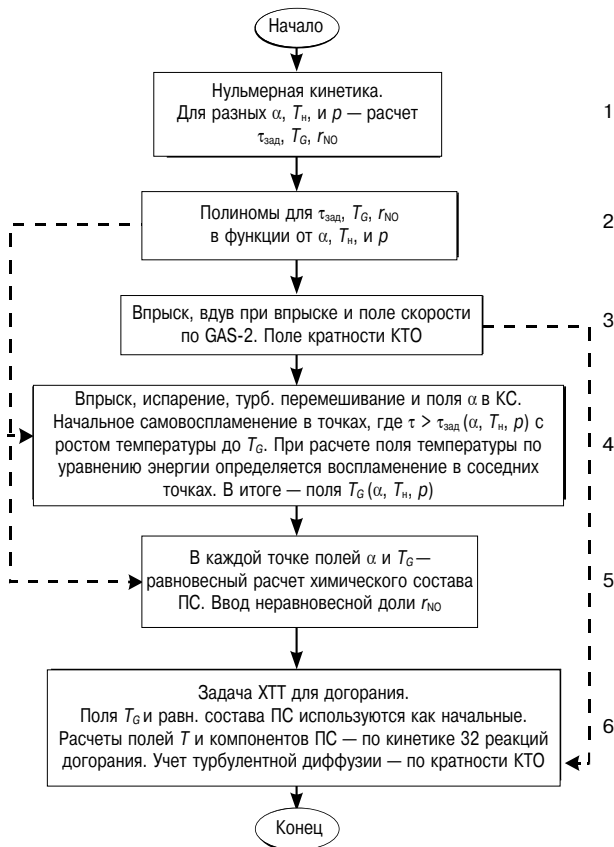


Рис. 1. Блок-схема моделирования воспламенения, горения и образования оксидов NO и CO

Таблица 1

Характерные значения времени задержки самовоспламенения, температуры горения и неравновесной доли оксида азота ($p = 6$ МПа)

T_n, K	α	0,3	0,9	1,5	3,9
900	$t_{зад}, мс$	0,11	0,38	0,70	—
	T_G, K	2354	2845	2356	—
	r_{NO}	$0,98 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	—
1100	$t_{зад}, мс$	0,022	0,060	0,092	1,0
	T_G, K	2633	3111	2673	1776
	r_{NO}	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$
1300	$t_{зад}, мс$	—	—	0,007	0,13
	T_G, K	—	—	2942	2039
	r_{NO}	—	—	$0,31 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Пустые ячейки таблицы находятся в зонах поля решения, данные для которых не используются.

Полный алгоритм решения

Для условий горения в дизеле алгоритм решения представлен в виде блок-схемы на рис. 1

Блок 1. Решена задача нульмерной (в точке) химической кинетики на основе реакций для модельного топлива — тетрадекана $C_{14}H_{30}$, легких углеводородов и оксида азота. Кинетический

механизм составлен на основе кинетики горения углеводородов проф. В.Я. Басевича [2, 3] и включает 288 реакций для 37 частиц. Расчеты проводились для различных значений коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,3 / 0,9 / 1,5 / 3,9$; начальной температуры горючей смеси $T_n = 900 / 1100 / 1300$ К и давления $p = 3 / 6 / 9$ МПа. При задании состава горючей смеси учитывалось наличие остаточных газов в цилиндре [1].

По результатам расчетов определялись: время задержки воспламенения $\tau_{зад}$, температура горения T_G , и неравновесная мольная доля оксида азота r_{NO} (табл. 1). Содержание остальных компонентов близко к равновесному.

Блок 2. Данные табл. 1 аппроксимированы экспоненциальным двумерным полиномом $y = f(x_1, x_2)$:

$$y = \exp(z); \quad (1)$$

$$z = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_1x_2 + Ex_1^2 + Fx_2^2 + Gx_1^2x_2 + Hx_1x_2^2 + Ix_1^3,$$

где x_1 и x_2 — безразмерные аргументы: $x_1 = (\alpha - 1,5)/0,6$; $x_2 = (T_n - 1100)/200$; $A, B, C, D, E, F, G, H, I$ — коэффициенты полинома, значения которых зависят от давления.

Блок 3. Задача впрыска топлива решается по алгоритму, приведенному в работе [4]. Скорость впрыска топлива 200 м/с; его продолжительность 2 мс; размер капель 20 мкм; тангенс полуугла распыла 0,26; сечение выходного отверстия форсунки 0,4 мм²; средний по объему КС коэффициент избытка воздуха $\alpha_{cp} = 1,5$.

Движение воздуха внутри топливного факела рассматривается как струя вдува в полость камеры сгорания (КС), заполненную неподвижным воздухом. Скорость вдува используется в качестве граничного условия при решении задачи турбулентной газодинамики с помощью программы GAS-2 проф. В.А. Дунаева. Поскольку средние

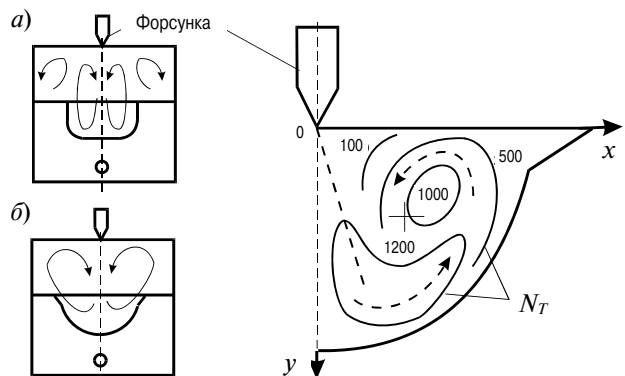


Рис. 2. Циркуляция в цилиндре для цилиндрической (а) и сферической (б) КС ($\tau = 6$ мс)

Рис. 3. Циркуляция и поле кратности коэффициента турбулентного обмена после впрыска в сферическую КС ($\tau = 2$ мс)

молекулярные массы воздуха, горючей смеси и продуктов сгорания близки, расчеты проводятся от начала впрыска топлива до выпуска ОГ. На рис. 2 и 3 показана циркуляция смеси как результат воздействия вдува факела в различные КС. Время τ отсчитывается от начала впрыска.

На рис. 2 приведены два варианта геометрии КС дизеля — цилиндрический и сферический (одинакового объема). Схемы циркуляции и поля скорости после впрыска существенно отличаются. Для цилиндрической КС характерно образование двух тороидальных противоположно направленных циркуляционных зон, каждая из которых перемешивает продукты сгорания в своей области.

Более выгодной является сферическая форма КС, для которой один тороидальный циркуляционный поток охватывает всю полость цилиндра, что обеспечивает полное перемешивание смеси и, как следствие, снижение расчетного уровня оксидов СО и NO в ОГ в 1,5–2,0 раза.

Поле турбулентной вязкости рассчитывалось по k - ϵ модели турбулентности в рамках программы GAS-2. Для характеристики влияния турбулентности удобно использовать кратность коэффициента турбулентного обмена (КТО) N_T как отношение турбулентной и ламинарной вязкостей. Поле кратности КТО по окончании впрыска изображено на рис. 3. Среднее по объему значение кратности КТО при воспламенении $\bar{N}_T \approx 900$. В дальнейшем, для упрощения математических моделей, считаем его неизменным, а на протяжении такта расширения монотонно уменьшающимся — $\bar{N}_T(\tau)$, в соответствии с данными k - ϵ модели турбулентности.

Блок 4. При полученных полях скорости процессы впрыска и испарения определяют поля коэффициента избытка воздуха α . Решение проводится аналогично приведенному в работе [4], а результаты приведены на рис. 4.

Описание алгоритма самовоспламенения заключается в следующем. Считаем, что самовоспламенение происходит только в парогазовой фазе (после испарения частиц). Для текущего момента времени и каждой ячейки поля решения, содер-

жащей фрагмент горючей смеси, определяется путь, который прошел этот фрагмент. По известному полю скорости находится средняя скорость на этом пути, а отношение пути к скорости позволяет найти время существования фрагмента. Как только это время превысит время задержки самовоспламенения $\tau_{\text{ззд}}$, определяемое локальным значением α , начальной температурой T_n и текущим давлением p , фрагмент считается сгоревшим. При этом его температура увеличивается до температуры горения $T_G = f(\alpha, T_n, p)$. Данные табл. 1 используются в виде полиномов (1). Сгоревшие фрагменты расширяются, а затем, по мере сгорания остальных, снова сжимаются до прежнего объема. Этот процесс носит хаотически быстрый и взаимно компенсирующий характер. Поэтому в первом приближении эти эффекты учитываться не будут и влиянием их на поле α и поле скорости пренебрежем.

Естественно предположить, что сгоревшие фрагменты подогревают несгоревшие соседние, а это повышает их начальную температуру T_n и на фоне растущего давления уменьшает время задержки самовоспламенения $\tau_{\text{ззд}}$, что ускоряет их воспламенение. Таким образом, процесс воспламенения носит лавинообразный характер и продолжается в течение всего $\sim 0,1$ мс, при этом массообменом между фрагментами можно пренебречь. Обозначим общим символом T и температуру для сгоревших фрагментов T_G , и начальную температуру T_n для несгоревших. Теплообмен между фрагментами происходит посредством турбулентной конвекции и теплопроводности и, при общих допущениях, принятых в работе [5], его можно описать уравнением энергии (2) при источнике $F_Q = 0$.

В этих расчетах турбулентный коэффициент температуропроводности продуктов сгорания $a_T = a_{\text{лам}} \cdot \bar{N}_T$. Начальное условие до впрыска: при $\tau = 0$ $T = 900$ К. Граничные условия на стенке КС для короткого периода воспламенения: $\partial T / \partial n = 0$. Давление вычислялось по известным уравнениям термодинамики.

Результаты решения по описанному алгоритму представлены на рис. 5. Зоны горючей смеси,

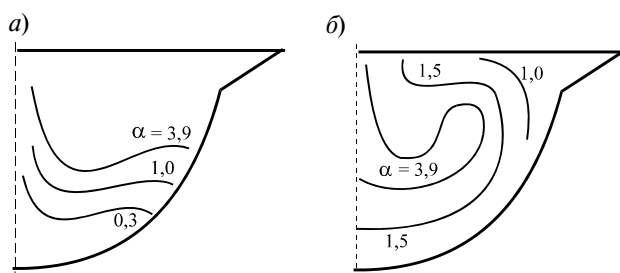


Рис. 4. Поля коэффициента избытка воздуха в середине впрыска (а) и в конце (б); ($\alpha_{\text{сп}} = 1,5$)

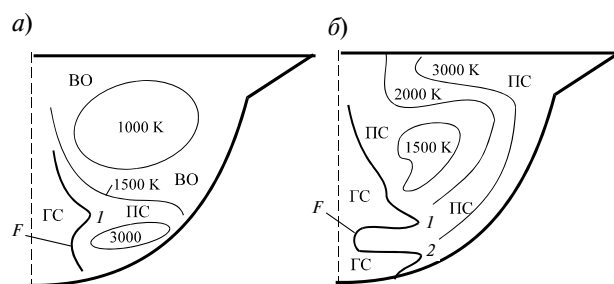


Рис. 5. Поля температур в середине (а) и в конце (б) впрыска

продуктов сгорания и воздуха обозначены, соответственно, как ГС, ПС и ВО; фронт горения — F . Форма фронта меняется в течение всего впрыска и определяется двумя факторами — испарением частиц горючего в потоке (1) и испарением на поверхности КС (2).

Блок 5. Полученные сразу после полного воспламенения горючей смеси поле распределения температуры T_0 и поле коэффициента избытка воздуха α_0 определяют (вместе с давлением p) равновесный состав продуктов сгорания (ПС) в каждой точке поля. Известно, что содержание основных компонентов (кроме NO) по окончании горения близко к равновесному с погрешностью 10–15 %, что соответствует точности расчетов химической кинетики. Неравновесная доля оксида азота r_{NO} определена в табл. 1 и используется в виде полинома (1). Расчеты рав-

новесного состава ПС позволяют избежать менее точных кинетических расчетов с последующей обработкой результатов в виде полиномов. Данные равновесного состава для всех ячеек поля решения образуют поля массовых долей компонентов g_{i0} , которые вместе с полем температур T_0 рассматриваются как начальные для задачи химического турбулентного теплообмена при догорании и расширении смеси.

Блок 6. Ранее показано [5], что при догорании за фронтом, в котором участвуют лишь легкие углеводороды, число обратимых реакций можно сократить до 25 для 14 компонентов. Дополним их реакциями образования «быстрых» молекул NO по данным работы [6]. Полученный кинетический механизм представлен в табл. 2. Параметры констант скорости реакций соответствуют выражению $k = AT^n \exp(-E/RT)$. Те-

Таблица 2

Детальный кинетический механизм догорания и расширения

№	Реакции	H , кДж/ моль	Прямые реакции			Обратные реакции		
			A , моль, м ³ , с	n	E , кДж/моль	A , моль, м ³ , с	n	E , кДж/моль
1	OH+H ₂ =H+H ₂ O	63	2,2E+02	1,5	14,6	1,78E+05	0,867	84,82
2	OH+O=H+O ₂	67	2,8E+09	-0,8	-0,42	6,99E+12	-1,435	74,13
3	OH+H=O+H ₂	8,4	6,9E+06	0	29,3	7,62E+07	-0,196	39,59
4	OH+OH=O+H ₂ O	71	6,0E+02	1,3	0	5,38E+06	0,472	80,51
5	OH+H=H ₂ O	495	6,8E+07	0,1	0	3,90E+14	-0,598	507,84
6	H+NO ₂ =H ₂ +O ₂	235	6,0E+06	0	0	4,03E+05	0,472	216,89
7	H+O ₂ =H ₂ O	197	1,2E+06	0,6	0	1,26E+11	0,063	220,73
8	H+NO ₂ =OH+OH	155	2,0E+07	0	0	4,87E+01	1,302	132,05
9	O+NO ₂ =O ₂ +OH	226	6,0E+07	0	0	3,65E+05	0,667	206,59
10	OH+NO ₂ =O ₂ +H ₂ O	298	6,0E+06	0	0	3,27E+08	-0,161	287,11
11	OH+H ₂ O ₂ =HO ₂ +H ₂ O	130	1,8E+06	0	1,25	4,80E+06	-0,018	149,02
12	OH+OH=H ₂ O ₂	210	3,4E+04	1	0	3,00E+16	-0,982	228,07
13	O+H ₂ O ₂ =O ₂ +H ₂ O	357	2,8E+07	0	26,8	4,54E+05	0,650	381,11
14	HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	168	2,4E+07	0	6,3	4,91E+08	-0,143	145,69
15	CO+OH=CO ₂ +H	109	1,2E+01	1,4	-1,68	3,49E+08	-0,085	109,73
16	CO+NO ₂ =CO ₂ +OH	260	1,3E+08	0	96,4	9,21E+09	-0,184	339,88
17	CO+O=CO ₂	533	1,0E+01	1	10,5	1,86E+11	-0,355	549,25
18	CO+O ₂ =CO ₂ +O	37,8	2,5E+06	0	201	2,91E+10	-0,851	237,88
19	H+CO=HCO	126	1,2E+02	0	-71,2	2,78E+07	-0,694	-0,48
20	HCO+O ₂ =HO ₂ +CO	71	6,0E+07	0	30,2	2,72E+07	0,157	180,21
21	OH+HCO=CO+H ₂ O	369	6,0E+07	0	0	1,49E+09	-0,004	437,12
22	H+HCO=H ₂ +CO	306	6,0E+07	0	0	1,83E+06	0,629	366,9
23	N+NO=N ₂ +O	314	1,3E+07	0	0	1,47E+07	0,160	312,4
24	N+O ₂ =NO+O	134	1,8E+02	1,5	25,0	2,39E+01	1,562	158,4
25	N+OH=NO+H	168	4,2E+07	0	0	1,38E+10	-0,572	207,94
26	CH+N ₂ =HCN+N	-8,4	8,0E+8	0	23,3	1,5E+11	-0,43	16,3
27	HCN+H=CN+H ₂	-88	1,2E+12	-0,6	51,9	3,2E+9	0	10,5
28	HCN+OH=CN+H ₂ O	-26	2,0E+8	0,6	10,5	2,9E+6	1,15	-1,2
29	CN+O ₂ =CO+NO	458	3,2E+8	0	0	1,3E+8	0,11	229,5
30	CN+OH→CO+NH	229	6,0E+10	0	0	—	—	—
31	NH+OH→NO+H ₂	303	5,0E+10	0	0	—	—	—
32	NH+NO→N ₂ +OH	411	1,2E+10	0	0	—	—	—

пловые эффекты реакций H считаем постоянными.

При допущениях работы [1] уравнение энергии продуктов сгорания и уравнения сохранения массы компонентов в осесимметричной системе координат запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial y} = a_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + F_Q; \quad (2)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial \tau} + u \frac{\partial g_i}{\partial x} + w \frac{\partial g_i}{\partial y} = D_T \left(\frac{\partial^2 g_i}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial g_i}{\partial x} + \frac{\partial^2 g_i}{\partial y^2} \right) + F_{Mi} \quad (3)$$

(при $i = 1, 2, \dots, N$).

Источники теплоты и массы компонентов:

$$F_Q = \frac{1}{c_p} \left[\sum_{j=1}^M H_j (S_j^p - S_j^o) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \tau} \right]; \quad (4)$$

$$F_{Mi} = \mu_i \sum_j \pm (S_j^p \mp S_j^o),$$

где g_i — массовая доля i -го компонента; S_j^p и S_j^o — скорости прямой и обратной j -й реакции.

Турбулентные характеристики переноса определяются ламинарными параметрами и кратностью КТО: $a_T = a_{\text{лам}} \bar{N} T(\tau)$; $D_T = D_{\text{лам}} \bar{N} T(\tau)$. Время τ отсчитывается от конца горения до начала выпуска.

Начальные условия: $T = T_0(x, y)$; $g_i = g_{i0}(x, y)$ для $i = 1, 2, \dots, N$.

Граничные условия задаются на поверхности ламинарного подслоя у стенки: $T = T_0'$; $\partial g_i / \partial n = 0$ для $i = 1, 2, \dots, N$.

Толщина подслоя и тем самым температура его поверхности T_0' задаются из сравнения расчетной и экспериментальной температур выпуска [1].

В выражениях (4) скорость реакции и константа скорости вычисляются следующим образом:

$$S_j^{p,0} = k_j^{p,0} g_{\alpha} g_{\beta} / (\mu_{\alpha} \mu_{\beta}),$$

$$k_j^{p,0} = c_T A T^n \exp(-E / RT),$$

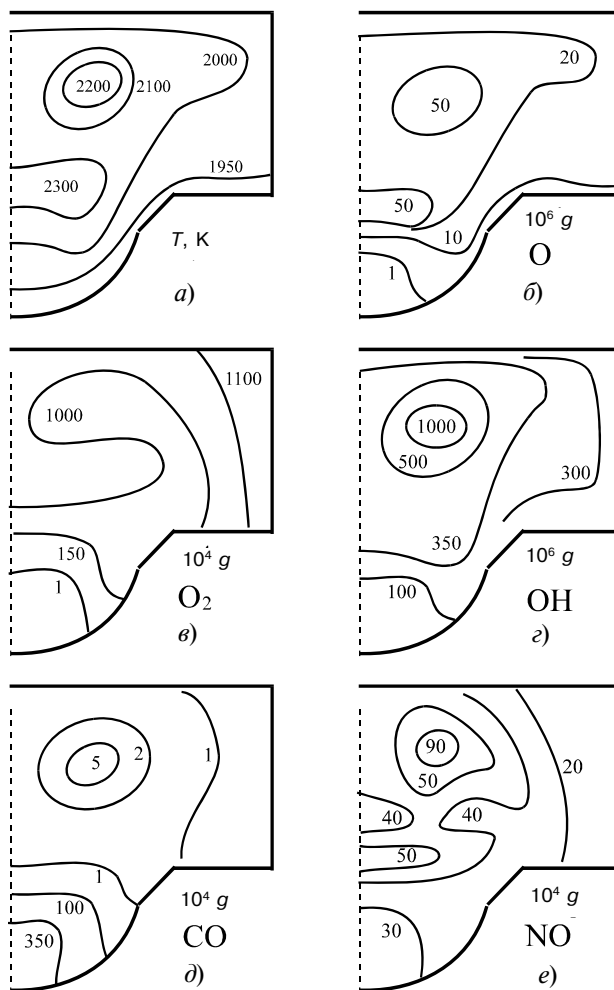


Рис. 6. Поля температуры и массовых долей основных компонентов в середине такта расширения ($\alpha_{\text{ср}} = 1,5$)

где α и β — различные значения i ; m — молярная масса; c_T — коэффициент, учитывающий влияние пульсаций температуры и содержания радикалов; $c_T > 1$ [7].

При решении задачи ХТТ использовались методы расщепления шага, прогонки и для вычисления источников по формуле (4) — метод переменного порядка точности Гира.

Результаты расчетов. Доля «быстрых» NO, определяемая концентрацией радикала CH,

Таблица 3

Мольные доли основных компонентов в отработавших газах при номинальном (Н) и позднем (П) горении

$\alpha_{\text{ср}}$	Горение	H ₂	O	O ₂	OH	CO	CO ₂	NO
1,1	Н	.851E-02	.220E-07	.260E-05	.955E-05	.284E-02	.937E-01	.503E-02
	П	.241E-01	.798E-07	.394E-06	.162E-04	.639E-01	.682E-01	.377E-02
1,5	Н	.361E-02	.125E-05	.262E-01	.573E-04	.105E-03	.101E+00	.905E-02
	П	.384E-03	.223E-05	.246E-02	.890E-04	.208E-02	.122E+00	.609E-02
2,0	Н	.541E-07	.120E-06	.596E-01	.131E-04	.238E-06	.873E-01	.114E-01
	П	.291E-02	.214E-05	.535E-01	.720E-04	.823E-06	.880E-01	.293E-02

наиболее существенна во фронте горения (см. табл. 2, реакции 26–32). В зоне догорания роль этого механизма мала по сравнению с «термическими» реакциями образования NO (реакции 23–25). Для бедных смесей из-за снижения температуры горения содержание «термических» NO уменьшается и становится соизмеримым с долей «быстрых» NO, что соответствует данным проф. В.А. Звонова [6]. Кроме того, известно, что при низких температурах в выпускной магистрали (<250–300 К) возможно образование диоксида NO₂ по реакции $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$ [8, 9].

В табл. 3 приведены результаты решения задачи ХТТ для различных средних по объему КС значений α_{cp} в двух вариантах — при номинальном и позднем горении ($n = 2000$ об/мин). Впрыск в номинальном режиме начинается с обычным опережением ~10–15° ПКВ. В режиме позднего горения начало впрыска смещается на 2 мс (24° ПКВ). Известно, что в этом случае снижается уровень температур и, соответственно, уменьшается содержание оксида азота в ОГ. В то же время возрастает доля оксида углерода. Данные табл. 3 подтверждают это. Образование сажистых частиц здесь не рассматривается, поэтому результаты по оксиду СО представляются завышенными.

Для середины процесса расширения (рис. 6) представлены поля температуры и наиболее активных компонентов. Общим для всех полей является наличие зоны максимальных температур и массовых долей радикалов O, OH, CO и NO. Эти зоны практически совпадают друг с другом, что объясняется кинетическим характером образования радикалов.

Поле молекулярного кислорода O₂ определяется преобладанием конвективного переноса, а не химических реакций. Сравнение с полями α на рис. 4, б, показывает соответствие максимальной концентрации СО и зоны богатой смеси, а также наибольшего содержания остальных компонентов в области бедной смеси.

При открытии выпускного клапана продукты сгорания мгновенно перемешиваются, что резко ускоряет реакции догорания. Тем не менее при температурах в выпускной магистрали менее ~1500 К снижение содержания оксидов СО и тем более NO отсутствует.

Результаты измерения содержания NO_x в ОГ одноцилиндрового дизельного двигателя ТМЗ-450Д-04 достаточно точно совпадают с результатами расчета. Среднее квадратичное

отклонение экспериментальных и расчетных данных не превышало 20 %.

Полученные на основании расчетов результаты показывают, что на основных достаточно напряженных режимах работы дизелей содержание NO_x в ОГ практически не зависит от образования «быстрых» NO во фронте горения и диоксида NO₂ в выпускной магистрали. Применение рециркуляции ОГ в количестве 10–15 % значительно (на 30–40 %) снижает образование оксидов NO [1] так же, как и режим «позднего» впрыска и горения.

Описанный в настоящей работе метод моделирования внутрицилиндровых процессов в дизелях, основанный на процессах химического турбулентного теплообмена, демонстрирует его перспективность и многогранные возможности, однако требует дальнейшего развития в целях повышения точности расчетов.

Литература

1. *Чесноков С.А.* Химический турбулентный теплообмен в двигателях внутреннего сгорания. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2005. — 466 с.
2. *Басевич В.Я., Веденев В.И., Арутюнов В.С.* Моделирование задержек самовоспламенения метановоздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания // ФГВ. — 1994. — № 2. — С. 7–14.
3. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Беляев А.А., Гоц А.Н.* Моделирование горения и образования токсичных веществ в двигателе внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия // Химическая физика. — 2004. — № 8. — С. 50–57.
4. *Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Дунаев В.А., Кузьмина И.В.* Модели смесиобразования и горения в ДВС с непосредственным впрыском // Двигателестроение. — 2005. — № 1. — С. 3–5.
5. *Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Дунаев В.А., Кузьмина И.В.* Моделирование горения и образования токсичных веществ в ДВС с непосредственным впрыском топлива // Двигателестроение. — 2005. — № 2. — С. 18–22.
6. *Звонов В.А., Гиринович М.П.* Анализ механизмов образования оксидов азота при сгорании углеводородных топлив в камере сгорания ДВС // Приводная техника. — 2004. — № 5. — С. 27–34.
7. *Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Потапов С.А., Тишин С.А.* Турбулентность при горении в ДВС // Двигателестроение. — 2008. — № 1. — С. 13–16.
8. *Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.* Токсичность отработавших газов дизелей. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 376 с.
9. *Лиханов В.А., Сайкин А.М.* Снижение токсичности автотракторных дизелей. — М. : Колос, 1994. — 224 с.