

## ЗАДЕРЖКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ С СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2011 П.К. Сеначин, А.П. Сеначин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Поступила в редакцию 17.03.2011

Приведены результаты исследований глобальной кинетики модельного дизельного топлива на основе смеси цетана и 1-метилнафталина путем численного решения обратной задачи динамики самовоспламенения топливно-воздушного факела дизеля па основе экспериментальных данных, полученных на лабораторной одноцилиндровой установке. Построена уточненная математическая модель для расчета задержки воспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи повышенного давления аккумуляторного типа.

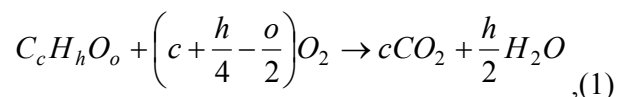
*Ключевые слова:* дизель, задержка воспламенения топлива, глобальная кинетика, математическая модель, система топливоподачи повышенного давления

Процесс горения топливно-воздушного заряда в дизеле начинается только после самовоспламенения порции топлива, впрыснутого системой топливоподачи, то есть после истечения некоторого периода индукции, величина которого заранее неизвестна и определяется исключительно на основе экспериментальных данных или эмпирических формул, имеющих весьма ограниченное применение [1-7]. В настоящее время в литературе практически отсутствуют попытки определения задержки воспламенения топлива в дизеле теоретическими методами [8-11]. Эта задача теории горения относится к классу задач динамического теплового взрыва, в настоящее время еще недостаточно разработанному [12]. Ранее нами рассматривались приближенные подходы к определению задержки воспламенения топлива в дизеле аналитическими и численными методами на основе известной макрокинетики (прямая задача), в результате были получены только качественные зависимости параметров процесса на задержку воспламенения топлива [13-15]. В работе [16] предпринята попытка постановки задачи определения задержки воспламенения топлива в дизеле на основе модели самовоспламенения некоторого локального объема (ЛО) топливно-воздушной смеси в камере сгорания.

В данной работе рассматривается обратная задача (определения констант макрокинетики по экспериментальным данным). При этом

термодинамические свойства топлива (энтальпии, теплоемкости и прочие) приняты для модельной системы, состоящей из 50% цетана  $C_{16}H_{34}$  и 50% 1-метилнафталина  $C_{11}H_{10}$  (эталонное топливо). Определение констант макрокинетики производится путем численного моделирования процесса воспламенения топлива в дизеле типа АЧ13/14 и сопоставления полученных результатов с собственными экспериментальными данными, полученными на опытной одноцилиндровой экспериментальной установке УК-8 ОАО «Алтайдизель».

**Состав газов в начале процесса сжатия.** В задаче необходимо задать коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  и 5 компонентов объемных долей атмосферного (наддувочного) воздуха, например, средней влажности: кислорода  $a_{O_2}=0,20642$  (индекс 1), азота  $a_{N_2}=0,76952$  (индекс 2), паров воды  $a_{H_2O}=0,01450$  (индекс 3), аргона  $a_{Ar}=0,00923$  (индекс 4) и двуокиси углерода  $a_{CO_2}=0,00033$  (индекс 5), а также значения коэффициентов наполнения цилиндра  $\eta_v$ , остаточных газов  $\gamma_r$  и их состав, например, с учетом полного сгорания заряда [17]. Тогда, с учетом процесса сгорания при  $\alpha > 1$  по реакции макрокинетики



находим количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива  $L_0$ , массу  $m_z$  и число молей топлива  $v_z$ , поступающего в камеру сгорания за один цикл, и количество молей  $v_{1a}, v_{2a}, v_{3a}, v_{4a}, v_{5a}$ , массу  $m_a$  и молекулярную массу  $\langle M_a \rangle$  газа в начале процесса сжатия  $\varphi_a$  (закрывтия впускного клапана), температуру  $T_a$ , давление  $p_a$ , объем  $V_a$ , а также другие характеристики.

*Сеначин Павел Кондратьевич, доктор технических наук, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания. E-mail: senachinpk@mail.ru*

*Сеначин Андрей Павлович, инженер кафедры двигателей внутреннего сгорания. E-mail: andrey.senachin@myttk.ru*

**Локальный объем.** В качестве исходных примем следующие допущения относительно физико-химических процессов, протекающих в некотором достаточно малом ЛО и в системе в целом до момента воспламенения факела:

1) топливно-воздушный факел поджигается от воспламенившегося ЛО, находящегося вне факела, образовавшегося практически в момент начала подачи топлива в цилиндр из испарившихся мельчайших капель (или одной капли) на периферии топливно-воздушной струи (факела);

2) капли испаряются за счет внутренней энергии ЛО, который в дальнейшем вплоть до самовоспламенения, не обменивается энергией и массой с окружающим газом, другими каплями и с самим факелом;

3) для упрощения задачи полагаем, что образовался один ЛО;

4) физическое время задержки воспламенения топлива [7] не учитываем.

Начальное (в момент начала подачи топлива  $\varphi_1$ ) и текущее уравнения состояния газа в ЛО запишутся в виде:

$$p_1 w_1 = v_{ЛО}^{(1)} R \theta_1 = R \theta_1 \sum_{j=1}^5 v_{jЛО}^{(1)}, \quad (2)$$

$$p w = v_{ЛО} R \theta = R \theta \sum_{j=1}^6 v_{jЛО}, \quad (3)$$

где  $w$  – локальный объем, приходящийся на одну каплю диаметром  $\langle d_{ЛО} \rangle$ .

В ЛО протекает предпламенная брутто-реакция (1). В условную молекулу смесового топлива  $C_c H_h O_o$  ( $j=6$ ) входит  $c$  – атомов углерода,  $h$  – атомов водорода и  $o$  – атомов кислорода. Начальный состав смеси в ЛО в расчете на одну каплю может быть определен на основе состава газа в начале процесса сжатия, с учетом заранее заданного для него коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ЛО}$  и количества испарившегося топлива (капли):

$$v_{6ЛО}^{(1)} = (\pi/6) \langle d_{ЛО} \rangle^3 \rho_f / M_f, \quad (4)$$

$$v_{1ЛО}^{(1)} = \alpha_{ЛО} (c + h/4 - o/2) v_{6ЛО}^{(1)}, \quad (5)$$

$$v_{jЛО}^{(1)} = (v_{ja} / v_{1a}) v_{1ЛО}^{(1)}, \quad j = 2...5. \quad (6)-(9)$$

Из (2) и (4)-(9) могут быть записаны относительные начальные концентрации компонентов смеси в ЛО

$$a_{jЛО}^{(1)} = v_{jЛО}^{(1)} / v_{ЛО}^{(1)}, \quad j = 1...6$$

Исходная температура смеси в ЛО непосредственно после момента начала подачи топлива  $\varphi_1$  находится из уравнения баланса энергии (энтальпии), с учетом процессов прогрева капли от температуры подачи топлива из сопла  $T_0$  до температуры кипения  $T_s$  и полного испарения, с теплотой испарения  $L_s$

$$\theta_1 = \frac{T_1 \sum_{j=1}^5 v_{jЛО}^{(1)} C_{pj} + [(T_0 - T_s) C_f - L_s] v_{jЛО}^{(1)}}{\sum_{j=1}^5 v_{jЛО}^{(1)} C_{pj} + v_{jЛО}^{(1)} C_{p6}} \quad (10)$$

Скорость брутто-реакции в ЛО в реальном масштабе времени, в предположении, что порядки реакции по горючему и окислителю равны  $s_6=s_1=s/2$ , а также скорости по компонентам смеси запишутся следующим образом:

$$W = k(a_1 a_6)^{s/2} \left( \frac{p}{R\theta} \right)^s \exp\left( -\frac{E}{R\theta} \right) \quad (11)$$

- для паров топлива ( $j=6$ ) и кислорода  $O_2$  ( $j=1$ )

$$W_6 = -W, \dots W_1 = \left( c + \frac{h}{4} - \frac{o}{2} \right) W, \quad (12)-(13)$$

- для двуокси углерода  $CO_2$  ( $j=5$ ) и паров воды  $H_2O$  ( $j=3$ )

$$W_5 = c W, \dots W_3 = \frac{h}{2} W, \quad (14)-(15)$$

- для инертных компонентов, азота  $N_2$  ( $j=2$ ) и аргона  $Ar$  ( $j=4$ )

$$W_2 = 0, \quad W_4 = 0. \quad (16)-(17)$$

При этом скорости изменения количества молей компонентов смеси в ЛО в процессе самовоспламенения по закону макрокинетики (1) запишутся:

$$\dot{v}_{1ЛО} = -W \left( c + \frac{h}{4} - \frac{o}{2} \right) \frac{R\theta v_{ЛО}}{2\pi r p}, \quad (18)$$

$$\dot{v}_{2ЛО} = 0, \quad \dot{v}_{4ЛО} = 0, \quad (19)-(20)$$

$$\dot{v}_{3ЛО} = W \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{R\theta v_{ЛО}}{2\pi r p}, \quad (21)$$

$$\dot{v}_{5ЛО} = W_c \cdot \frac{R\theta v_{ЛО}}{2\pi r}, \quad (22)$$

$$\dot{v}_{6ЛО} = -W \cdot \frac{R\theta v_{ЛО}}{2\pi r}, \quad (23)$$

где точка над символом обозначает производную  $\dot{v}_j = dv_j/d\varphi$  (по углу ПКВ).

Из решения уравнений (18)-(23) находим общее число молей смеси в ЛО и другие характеристики

$$v_{ЛО} = v_{1ЛО} + v_{2ЛО} + v_{3ЛО} + v_{4ЛО} + v_{5ЛО} + v_{6ЛО}, \quad (24)$$

$$a_{jЛО} = v_{jЛО} / v_{ЛО}, \dots \langle M_{ЛО} \rangle = \sum_{j=1}^6 a_{jЛО} M_j, \quad (25)-(26)$$

$$m_{ЛО} = v_{ЛО} \langle M_{ЛО} \rangle, \dots \langle C_{pЛО} \rangle = \sum_{j=1}^6 a_{jЛО} C_{pj}. \quad (27)-(28)$$

Уравнение энергии смеси в ЛО может быть представлено зависимостью

$$\langle C_{pЛО} \rangle \dot{\theta} = \frac{R\theta}{p} \cdot \dot{p} - \frac{1}{v_{ЛО}} \sum_{j=1}^6 \dot{v}_{jЛО} H_{jЛО}$$

или с учетом (18)-(23), записано в упрощенном виде

$$2\pi \cdot \frac{P}{R\theta} \cdot \langle C_{pЛО} \rangle \dot{\theta} = 2\pi \cdot \dot{p} + W \times \left[ \left( c + \frac{h}{4} - \frac{o}{2} \right) H_{1ЛО} - \frac{h}{2} H_{3ЛО} - c H_{5ЛО} + H_{6ЛО} \right]. \quad (29)$$

**Математическая модель.** Поскольку ЛО мал по сравнению с общим объемом, то протекающие в нем предпламенные химические реакции не оказывают влияния на динамику давления в системе, объемом жидкого топлива по сравнению с газовой фазой также пренебрегаем. Система уравнений процесса самовоспламенения ЛО в объеме камеры сгорания с начальными условиями, кроме (2)-(11) и (18)-(29), включает уравнения:

- динамики объема системы (для аксиального механизма)

$$\dot{V} = \frac{V_c(\varepsilon - 1)}{2} \sin\varphi \left( 1 + \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1/\lambda^2 - \sin^2\varphi}} \right), \quad (30)$$

- закона поступления жидкого топлива (для  $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_z$ )

$$\dot{m}_f = \frac{2\pi m_z}{\varphi_z} \sin^2 \left( \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \cdot \pi \right), \quad (31)$$

(здесь  $\varphi_z$  - длительность цикловой подачи топлива).

- массы испарившегося топлива - скорости образования газовой фазы

$$\dot{m}_s = \text{Nu}_m \frac{3\lambda_g M_f}{\pi m_0 \rho_f \langle a \rangle^2 L_s} m_f (T - T_s), \quad (32)$$

- состояния воздушного заряда (смеси общее)

$$RT = pV / \left( \sum_{j=1}^5 \frac{m_j}{M_j} + \frac{m_s}{M_f} \right), \quad (33)$$

- динамики давления (уравнения энергии всей смеси)

$$\dot{p} V \left( \frac{\langle C_p \rangle}{R} - 1 \right) = -p \dot{V} \frac{\langle C_p \rangle}{R} + \frac{C_f (T_0 - T_s)}{M_f} \dot{m}_f +$$

$$\frac{C_{pf} (T_s - T) - L_s}{M_f} + \frac{1}{2\pi n} \sum_n \alpha_n F_n (T_n - T). \quad (34)$$

Расчет задержки воспламенения топлива в ЛО дизеля по уравнениям (2)-(11) и (18)-(29), совместно с (30)-(34), проводится путем численного интегрирования системы до тех пор, пока степень выгорания топлива в ЛО не достигнет заданной величины, например 99%, то есть период индукции, определяемый критическим значением угла ПКВ  $\varphi^*$ , заканчивается при условии

$$v_{6ЛО} / v_{6ЛО}^{(1)} \leq 0,01. \quad (35)$$

При этом до момента начала подачи топлива  $\varphi_1$  блок уравнений ЛО (2)-(11) и (18)-(29) не подключен и решается задача сжатия и подготовки воздушного заряда по уравнениям (30)-(34) от момента закрытия впускного клапана  $\varphi_a$ , в результате которой имеем исходные параметры процесса  $p_1, T_1, V_1$  и другие. В системе температурные зависимости теплоемкостей и энтальпии частиц взяты из справочных данных или определены одним из аддитивно-групповых методов. Как известно, задержка воспламенения топлива в дизеле есть сумма двух времен - физического и химического времени задержки, то есть  $\tau_i = \tau_{\text{физ}} + \tau_{\text{хим}}$ . Физическое время задержки воспламенения в данной работе не учитывается -  $\tau_{\text{физ}} = 0$  и  $\tau_i = \tau_{\text{хим}}$ .

**Оценка энергии активации.** Для численного решения задачи о задержке воспламенения необходимо знать константы макрокинетики в уравнении (11) – энергию активации  $E$ , предэкспонент константы скорости  $k$  и суммарный порядок химической реакции  $s$  (по горючему  $s_6$  и окислителю  $s_1$ ). Следует отметить, что эти макрокинетические константы для дизельного топлива в настоящее время неизвестны или известны с весьма низкой точностью, не позволяющей непосредственно приступить к численному решению задачи.

В эмпирических формулах разных авторов для расчета задержки воспламенения топлива в дизеле, обычно имеющих вид формулы О.М. Тодеса [18, 19]

$$\tau_i = Bp^n \exp(E/RT), \quad (36)$$

теоретически полученной для периода индукции адиабатического теплового взрыва, в качестве энергии активации  $E$  и суммарного порядка реакции  $s$  принимаются существенно отличающиеся друг от друга величины [7]. Другая проблема выбора констант макрокинетики заключается в том, что и для легких и для тяжелых углеводородов макрокинетика самовоспламенения замечательна тем, что энергия активации суммарной реакции в области температур 700-900 К испытывает довольно резкий излом, как например в [19], или же переходная область довольно широкая (до 200 К) с весьма неопределенной величиной энергией активации, как например в [20]. Такое поведение энергии активации макрокинетической реакции в переходной области температурного интервала, по-видимому, связано с известной двухстадийностью самовоспламенения углеводородов. Согласно формуле О.М. Тодеса (36), энергия активации определяется из графика зависимости задержки воспламенения топлива от обратной температуры  $\lg \tau_i(1/T)$  по двум точкам по формуле [7, 19]

$$E = 2,303R \cdot \frac{\lg \tau_1 - \lg \tau_2}{1/T_1 - 1/T_2}. \quad (37)$$

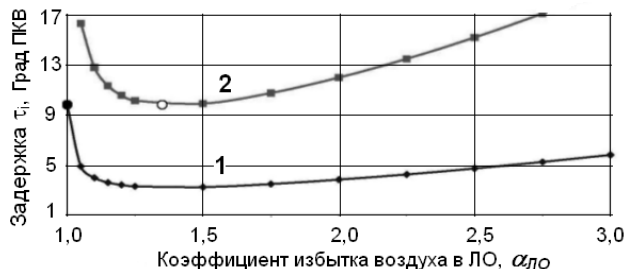
Вычисляя по экспериментальным данным [19], полученным при постоянном давлении  $p = const$ , имеем для высокотемпературной области энергию активации суммарной реакции  $E = 25$  кДж/моль, а для низкотемпературной – около 90 кДж/моль. В работе [7] приводятся близкие данные – высокотемпературная область 25140, низкотемпературная – 76670 Дж/моль. Таким образом, при моделировании задержки воспламенения топлива в дизеле с

помощью макрокинетического уравнения (1) возникает проблема выбора оптимальной величины энергии активации химической реакции, поскольку при самовоспламенении термодинамическое состояние смеси последовательно проходит интервал от низких до высоких температур, включая переходную область.

**Численное моделирование и определение макрокинетики.** При численном моделировании вначале была принята энергия активации  $E = 25140$  Дж/моль, характерная для высокотемпературной области (при  $T > 900$  К), и рассмотрено влияние коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ЛО}$  в ЛО на задержку воспламенения топлива. Моделирование процесса самовоспламенения топлива в ЛО производилось следующим образом. Для  $\alpha_{ЛО} = 1$  по известной из экспериментальных данных задержке воспламенения, полученной на опытной одноцилиндровой установке, определялась эффективная константа скорости суммарной реакции при порядке реакции  $s = 1,5$ . Далее для этой константы скорости варьировался коэффициент избытка воздуха в ЛО. Расчеты показывают, что при увеличении  $\alpha_{ЛО}$  задержка воспламенения сначала уменьшается, а затем медленно возрастает, минимум соответствует  $\alpha_{ЛО} = 1,35$  (рис. 1, кривая 1). Затем для нового коэффициента избытка воздуха в ЛО  $\alpha_{ЛО} = 1,35$  определялась новая эффективная константа скорости для тех же экспериментальных данных. При этом варьирование величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ЛО}$  в ЛО подтверждало наличие минимума задержки при  $\alpha_{ЛО} = 1,35$  (рис. 1, кривая 2).

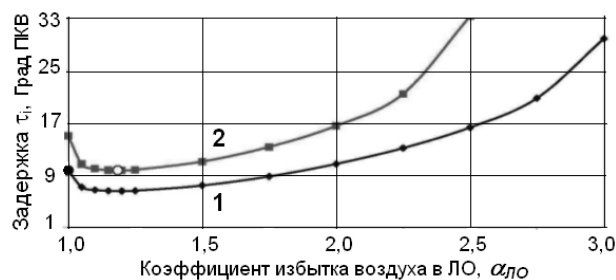
Аналогичные расчеты были проведены для энергии активации  $E = 76670$  Дж/моль, характерной для низкотемпературной области (рис. 2, кривая 1). При варьировании коэффициента избытка воздуха в ЛО получили минимум при величине  $\alpha_{ЛО} = 1,19$ . Для этого значения нашли новую константу скорости и также убедились в наличии минимума при  $\alpha_{ЛО} = 1,19$  (рис. 2, кривая 2). Как показывает численный эксперимент, вариация энергии активации в широких пределах при постоянном суммарном порядке химической реакции  $s = 1,5$  выявляет зависимость оптимального коэффициента избытка воздуха в ЛО (с точки зрения минимальной задержки воспламенения) – при увеличении энергии активации  $E$  от 25140 до 76670 Дж/моль оптимальный коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{ЛО}$  в ЛО монотонно уменьшается от значения 1,35 до 1,19. При этом предэкспонент константы скорости суммарной химической реакции  $k$ , соответствующий оптимальному значению  $\alpha_{ЛО}$ , монотонно растет

от значения  $2,18 \cdot 10^8$  до  $5,85 \cdot 10^9$  моль<sup>-0,5</sup>М<sup>1,5</sup>с<sup>-1</sup>. При окончательном выборе величины эффективной энергии активации, мы остановились на значении  $E=38000$  Дж/моль, являющемся средней величиной между низкотемпературной и высокотемпературной областями, то есть характерной для переходной области.



**Рис. 1.** Зависимость задержки воспламенения топлива в дизеле от коэффициента избытка воздуха в ЛО при энергии активации  $E=25140$  Дж/моль и порядке химической реакции  $s=1,5$ :

$$1 - \alpha_{ЛО}=1,0, k=9,69 \cdot 10^8; 2 - \alpha_{ЛО}=1,35, k=2,18 \cdot 10^8 \text{ моль}^{-0,5} \text{М}^{1,5} \text{с}^{-1}$$



**Рис. 2.** Зависимость задержки воспламенения топлива в дизеле от коэффициента избытка воздуха в ЛО при энергии активации  $E=76670$  Дж/моль и порядке химической реакции  $s=1,5$ :

$$1 - \alpha_{ЛО}=1,0, k=1,034 \cdot 10^{10}; 2 - \alpha_{ЛО}=1,19, k=5,85 \cdot 10^9 \text{ моль}^{-0,5} \text{М}^{1,5} \text{с}^{-1}$$

Анализ ряда эмпирических формул по задержкам воспламенения топлива, имеющих вид теоретической формулы О.М. Тодеса (36), обзор которых приведен в работе [11], показывает, что в них для дизельного топлива принято значение барического показателя, соответствующее порядку реакции  $s=1 \square n$ , в большинстве своем, лежащим в пределах от 2,0 до 3,0 (табл. 1). Поэтому необходимо определить влияние порядка реакции на тангенс угла наклона скоростной характеристики  $\tau_i(n)$ .

**Таблица 1.** Кинетические константы, принятые в эмпирических формулах

Автор (авторы) эмпирической формулы	Принятое значение энергии активации, $E$ , Дж/моль	Значение барического показателя, $n$	Соответствующий порядок реакции, $s$
Б. Книхт	38600	-0,39	1,39
Ф. Стрингер	45500	-0,76	1,76
Х. Фуджимото	42650	-1,06	2,06
Ф. Шмидт	52630	-1,08	2,08
Х. Вольфер	38660 (37900)	-1,19	2,19
Г. Хироясу, Т. Кадота и М. Араи	60530	-1,23	2,23
Р.З. Кавтарадзе	36580	-1,3	2,3
М. Туге	17100	-1,66	2,66
Л. Спадацини и Дж. Те Велде	174000	-2,0	3,0

Для энергии активации  $E=38000$  Дж/моль и суммарном порядке реакции  $s=1,5$  зависимости задержки воспламенения топлива  $\tau_i$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в ЛО аналогичны зависимостям, полученным для высокотемпературной  $E=25140$  Дж/моль и низкотемпературной  $E=76670$  Дж/моль областей (рисунки 1 и 2). Минимум  $\tau_i$  в ЛО имеет место при  $\alpha_{ЛО}=1,30$  (табл. 2). Таким образом, для любой экспериментальной точки (например, для

$n=1300 \text{ мин}^{-1}$ ), при заданной степени сжатия  $\epsilon=15,5$ , после выбора некоторого значения энергии активации, например,  $E=38000$  Дж/моль, в результате численных расчетов можно найти коэффициент избытка воздуха в ЛО, то есть  $\alpha_{ЛО}=1,30$ , соответствующий минимальной задержке воспламенения  $\tau_i$ , а затем найти численное значение предэкспонента константы скорости, то есть  $k=4,04 \cdot 10^8 \text{ моль}^{-0,5} \text{М}^{1,5} \text{с}^{-1}$  (табл. 2).

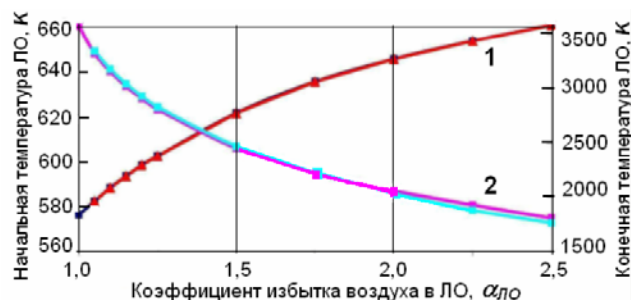
**Таблица 2.** Сравнение экспериментальных и моделируемых значений задержек воспламенения топлива в дизеле 1Ч 13/14 (УК-8)

Степень сжатия, $\varepsilon$	Частота вращения, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Задержка $\tau_i$ , Град ПКВ.		Оптимальное значение $\alpha_{ЛО}$	Значения кинетических констант		
		экспер.	расчет		$E$ , Дж/моль	$k$ , (моль, м, с)	$s$
15,5	1300	9,5	9,5	1,35	25140	$2,18 \cdot 10^8$	1,5
				1,19	76670	$5,85 \cdot 10^9$	
15,5	1700	10,9	10,91	1,40	38000	$9,39 \cdot 10^{12}$	2,5
	1500	9,4	9,96				
	1300	9,5	9,5				
	1200	9,1	9,1				
	1100	9,0	8,7				
17,5	1700	9,7	8,73	1,40	38000	$9,39 \cdot 10^{12}$	2,5
	1500	7,8	8,2				
	1300	8,2	7,39				
	1200	8,2	7,38				
	1100	7,3	7,14				

Обобщая проведенные численные исследования, отметим следующее. Полученные графики зависимостей начальной и конечной температуры смеси в ЛО от коэффициента  $\alpha_{ЛО}$  практически идентичны (рис. 3). При увеличении  $\alpha_{ЛО}$  начальная температура смеси - до самовоспламенения (кривая 1) растет, а конечная - после самовоспламенения (кривая 2) падает. В интервале изменения  $\alpha_{ЛО}$  в ЛО от 1,19 до 1,35 конечная температура смеси в ЛО (после самовоспламенения и сгорания) достаточно высока, чтобы поджечь топливно-воздушный факел (рис. 3). При построении скоростной характеристики задержки воспламенения топлива в дизеле  $\tau_i(n)$  получается, что, кроме исходной точки при  $n=1300$  мин<sup>-1</sup>, все остальные вычисленные точки не достаточно хорошо согласуются с экспериментом (для меньших значений частоты вращения оказываются ниже экспериментальных, а для больших – выше). То есть тангенс угла наклона теоретической зависимости  $\tau_i(n)$  не соответствует экспериментальному значению (табл. 1). При этом численные расчеты показывают, что варьирование величины энергии активации  $E$  в довольно широких пределах от 25140 до 76670 Дж/моль не влияет на тангенс угла наклона скоростной характеристики  $\tau_i(n)$ . В связи с этим возникает предположение, что принятое нами численное значение суммарного порядка химической реакции  $s=1,5$  не является оптимальным.

Численные расчеты при изменении порядка реакции  $s$  в сторону увеличения показывают, что тангенс угла наклона скоростной характеристики  $\tau_i(n)$  уменьшается и при значении

$s=2,5$  согласуется с экспериментальными данными табл. 2 (рис. 4). Далее путем вариации  $\alpha$  в ЛО для энергии активации  $E=38000$  Дж/моль находим минимум задержки воспламенения топлива при величине  $\alpha=1,40$  (табл. 2). Для этого значения находим новый предэкспонент константы скорости суммарной химической реакции  $k=9,39 \cdot 10^{12}$  моль<sup>-1,5</sup> м<sup>4,5</sup> с<sup>-1</sup> и убеждаемся в наличии минимума при  $\alpha=1,40$  (табл. 2). Как и ожидалось, полученные зависимости аналогичны кривым, построенным на рис. 1 и 2.



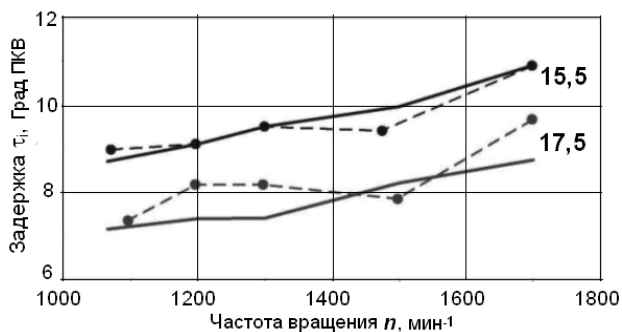
**Рис. 3.** График зависимости температуры смеси в ЛО при варьировании коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ЛО}$ , энергии активации  $E$  и порядка реакции  $s$ : 1 – начальная температура в ЛО; 2 – конечная температура в ЛО (рисунок получен наложением ряда зависимостей)

**В дизеле с системой топливоподачи повышенного давления типа CR** задержка воспламенения топлива определяется аналогичным образом, за исключением математического блока, описывающего локальный объем (ЛО). Здесь основные отличия следующие. В начале процесса впрыска топлива в этот ЛО попадает некоторое количество капель топлива

(условно одна капля) с диаметром  $\langle a_{ЛО} \rangle$ , близким к среднему диаметру капель в факеле и имеющим приблизительно обратно пропорциональную зависимость от давления впрыска топлива  $p_{ВПР}$ , например вида

$$\langle a_{ЛО} \rangle = a_0 \exp(-kp_{ВПР} / p_0) = a_0 \exp(-kx)$$

где при диаметре сопла распылителя равном 0,3 мм предэкспонент  $\langle a_0 \rangle = 36,5$  мкм, а константа при аргументе  $k = 5,005 \cdot 10^{-4}$ ;  $p_0$  - атмосферное давление.



**Рис. 4.** Зависимость задержки воспламенения в дизеле от частоты вращения коленчатого вала при  $s=2,5$ ,  $E=38000$  Дж/моль,  $k=9,39 \cdot 10^{12}$  моль $^{-1,5} \cdot M^{4,5} \cdot c^{-1}$ : 15,5 -  $\varepsilon=15,5$ ; 17,5 -  $\varepsilon=17,5$ . Пунктирные линии – эксперимент, сплошные линии – расчет. В ЛО оптимальное значение коэффициента  $\alpha_{ЛО}=1,40$

Исходная температура в ЛО после момента  $\varphi_1$  находится из уравнения баланса энтальпии для заданного  $\alpha_{ЛО}$ , с учетом процессов прогрева капли от температуры подачи топлива  $T_f$  до температуры кипения  $T_s$

$$\theta^{(1)} = T_1 - \frac{\pi \langle a_{ЛО} \rangle^3 \rho_f C_f (T_s - T_f)}{6 M_f \langle C_{рЛО}^{(1)} \rangle v_{ЛО}^{(1)}} \quad (38)$$

Массовая скорость испарения топлива в ЛО определяется уравнением

$$m_s = \frac{Nu_{ЛО} \lambda_g M_f}{2nL_s} \left( \langle a_{ЛО} \rangle^3 - \frac{6m_{sЛО}}{\pi \rho_f} \right)^{1/3} (\theta - T_s) \quad (39)$$

Ввиду сильной температурной зависимости энергии активации  $E$  углеводородов (дизельного топлива) от температуры, приводящей в частности к двухстадийности процесса самовоспламенения, и большого температурного интервала для смеси в ЛО в нашей задаче, примем аппроксимирующую формулу

$$E = E_0 \exp(-b\theta) \quad (40)$$

где  $E_0=167500$  Дж/моль,  $b=0,00095$  К $^{-1}$ .

Скорости изменения числа молей компонентов смеси в ЛО находятся по (18)-(22), но с учетом процесса испарения топлива вместо (23), то есть

$$\dot{v}_{6ЛО} = -W \cdot \frac{R\theta v_{ЛО}}{2\pi r} + \frac{\dot{m}_{sЛО}}{M_f} \quad (41)$$

Уравнение энергии смеси в ЛО изменится из-за процесса испарения капли

$$\langle C_{рЛО} \rangle \dot{\theta} = \frac{R\theta}{p} \cdot \dot{p} - \frac{1}{v_{ЛО}} \sum_{j=1}^6 \dot{v}_{jЛО} H_{jЛО} + \frac{\dot{m}_s}{M_f v_{ЛО}} [H_{6ЛО}(T_s) - L_s]$$

и может быть записано в упрощенном виде

$$2\pi \cdot \frac{\langle C_{рЛО} \rangle}{R\theta} \cdot \dot{\theta} = 2\pi \cdot \dot{p} + W \times \left[ \left( c + \frac{h}{4} - \frac{o}{2} \right) H_{1ЛО} - \frac{h}{2} H_{3ЛО} - cH_{5ЛО} + H_{6ЛО} \right] + \frac{\dot{m}_s}{m_{ЛО}} \cdot \frac{C_{pf}(T_s - \theta) - L_s}{R\theta} \quad (42)$$

В результате интегрирования системы уравнений процесса с учетом дополнений и изменений (38)-(42), связанных с применением системы топливоподачи повышенного давления типа CR, можно решать как прямую задачу (определение задержки воспламенения топлива), так и обратную задачу (определение макрокинетики топлива по известным экспериментальным данным).

**Выводы:** в данной постановке задачи определяется совмещенная задержка воспламенения топлива, одновременно объединяющая физическую задержку (испарение капель топлива в ЛО) и химическую задержку (самовоспламенение смеси в ЛО), поскольку оба процесса протекают одновременно.

Работа выполнена в порядке реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лернер, М.О. Химические регуляторы горения моторных топлив. – М.: Химия, 1979. 224 с.

2. *Вибе, И.И.* Теория двигателей внутреннего сгорания: Конспект лекций. – Челябинск: Изд-во Челябин. политех. ин-та, 1974. 252 с.
3. *Толстов, А.И.* К теории рабочего процесса быстрогоходного дизеля с воспламенением от сжатия // Двигатели с воспламенением от сжатия. Тр. ЦНИДИ-ВНИТОЭ, 1951. Вып. 18. С. 56-98.
4. *Ляханин, В.В.* Моделирование процессов в судовых поршневых двигателях и машинах / *В.В. Ляханин, О.Н. Лебедев, В.С. Семенов* и др. – Л.: Судостроение, 1967. 271 с.
5. *Семенов, В.И.* Исследование периода задержки воспламенения быстрогоходного многотопливного дизеля с камерой в поршне // Изв. вузов. Машиностроение. 1970. № 1. С. 81-85.
6. *Ховах, М.С.* Некоторые результаты экспериментального исследования процесса воспламенения топлив различного состава / *М.С. Ховах* и др. // Двигатели внутреннего сгорания. Труды МАДИ, 1974. Вып. 92. С. 15-22.
7. *Кавтарадзе, Р.З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 720 с.
8. *Воинов, А.Н.* Анализ воспламенения в дизеле с учетом влияния химико-кинетических и физических факторов / *А.Н. Воинов, В. Джанардан Четти* // Изв. вузов. Машиностроение. 1970. № 4. С. 77-81.
9. *Камфер, Г.М.* Расчет процесса воспламенения распыленного топлива // Изв. вузов. Машиностроение. 1976. № 3. С. 98-102.
10. *Камфер, Г.М.* Расчет периода задержки воспламенения в дизелях с объемно-пристеночным смесеобразованием / *Г.М. Камфер, В.П. Назаров, И.Ш. Аднан* // Рабочие процессы автотракторных двигателей и их агрегатов. Труды МАДИ, 1983. С. 20-28.
11. *Одинцов, В.И.* Метод расчета продолжительности задержки воспламенения топлива с учетом влияния конструктивных факторов // Двигателестроение. 1990. № 3. С. 17-18.
12. *Сеначин, П.К.* Некоторые вопросы моделирования процессов самовоспламенения и горения в ограниченных объемах и двигателях внутреннего сгорания // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2000. № 2. С. 52-60.
13. *Сеначин, П.К.* Анализ воспламенения в дизеле / *П.К. Сеначин, Р.Х. Абдуллин, В.С. Бабкин* // Физика горения и методы ее исследования: Межвуз. сборник.- Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1983. С. 50-53.
14. *Сеначин, П.К.* Задержка воспламенения двухкомпонентного топлива в газодизеле и в дизеле, работающем на спиртах / *П.К. Сеначин, А.Е. Свищула, Д.Д. Матиевский* // Двигатель-97: Матер. Междунар. научно-техн. конф. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. С. 116-118.
15. *Матиевский, Д.Д.* Задержка воспламенения топлива в дизеле как период индукции динамического теплового взрыва / *Д.Д. Матиевский, П.К. Сеначин* // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1995. № 4-6. С. 27-32.
16. *Сеначин, П.К.* Моделирование задержки воспламенения топлива в дизеле / *П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, А.П. Сеначин* // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2001. № 3. С. 64-68.
17. *Сеначин, П.К.* Метод расчета исходного состава газовой смеси в дизеле / *П.К. Сеначин, Д.Д. Матиевский, А.П. Сеначин* // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сборник статей / Под ред. *А.Л. Новоселова* / Академия транспорта РФ. Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2001. С. 6-10.
18. *Тодес, О.М.* Теория теплового взрыва // Журнал физической химии. 1937. Т. 13. С. 868-882.
19. *Воинов, А.Н.* Сгорание в быстрогоходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
20. *Phahl, U.* Self-Ignition of Diesel-Relevant Hydrocarbon-Air Mixtures Under Inigne Conditions / *U. Phahl, K. Fiweger, G. Adomeit* // Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, 1996. P. 781-789.

## DELAY OF FUEL IGNITION IN DIESEL ENGINE WITH HIGH PRESSURE FUEL SUPPLY SYSTEM

© 2011 P.K. Senachin, A.P. Senachin

Altay State Technical University named after I.I. Polzunov

Results of researches the global kinetics of modeling diesel fuel on the basis of cetane and 1-methylnaphthalene mixture by numerical decision the opposite problem of dynamics of spontaneous ignition of fuel-air diesel engine plume on the basis of experimental data received on laboratory one-cylinder unit are resulted. The specified mathematical model for calculation of fuel ignition delay in diesel engine with system of high pressure fuel supply of accumulative type is constructed.

Key words: *diesel engine, delay of fuel ignition, global kinetics, mathematical model, system of high pressure fuel supply*

*Pavel Senachin, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Internal Combustion Engines Department. E-mail: senachinpk@mail.ru*

*Andrey Senachin, Engineer at the the Internal Combustion Engines Department. E-mail: andrey.senachin@mytk.ru*