

ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ РАПС-МЕТИЛОВОГО ЭФИРА В ВОЗДУХЕ**Д.С. Дараков, А.Н. Золотко, А.К. Копейка, П.О. Павлюк***Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Одесса, Украина*

В работе приводятся результаты исследований процесса горения капель рапс-метилового эфира (РМЭ) и минерального дизельного топлива (ДТ) в воздухе. В рамках модели горения капли топлива в адиабатической оболочке, рассмотрено влияние величины коэффициента избытка окислителя α^ на время горения капли t_g . Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась для капель диаметром $0,8 \div 1,1$ мм, при атмосферном давлении в диапазоне значений коэффициента избытка окислителя от 1,7 до 4. Показано, что во всем исследуемом диапазоне α^* , время горения капель РМЭ оказалось меньше чем для капель ДТ на 10%, при прочих равных условиях. Полученный результат, косвенно объясняет наблюдаемый в стендовых испытаниях эффект увеличения полноты сгорания биотоплив по сравнению с ДТ, что особенно актуально при работе дизельного двигателя в режимах с повышенной нагрузкой.*

ВВЕДЕНИЕ

Как показал опыт эксплуатации двигателей внутреннего сгорания, переход с традиционных видов топлив на их аналоги биологического происхождения, кроме очевидных преимуществ, сопровождается рядом недостатков, среди которых повышенный удельный расход топлива, образование нагара, относительно низкая стабильность горючего [1].

Принимая во внимание, что полнота сгорания топлива, пребывание которого в камере сгорания ограничено, во многом зависит от времени его горения, представляет интерес исследовать влияние коэффициента избытка окислителя α^* на время сгорания РМЭ, являющимся, подобно другим биотопливом, кислородосодержащим горючим (~10% кислорода по весу).

МОДЕЛЬ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ ГОРЮЧЕГО В ВОЗДУХЕ

Рассматривается квазистационарная модель диффузионного горения аэрозвеси капель жидкого горючего в общепринятых предположениях, принимаемых при исследовании горения индивидуальной капли [2, 3]. Аэрозвесь моделируется условием, что каждая капля находится в адиабатической оболочке в окружении себе подобных. При постановке задачи не учитывалось влияние стефановского течения, массо и теплообмена аэрозвеси как целого со стенками сосуда.

Модель горения аэрозвеси как совокупности одинаковых изолированных индивидуальных капель в адиабатических оболочках может быть схематически представлена в виде, изображенном на рис.1, где: r_k, r_{32}, R - размер капли, радиус зоны горения и радиус оболочки соответственно. Газовое пространство внутри адиабатической оболочки делится зоной горения с радиусом r_{32} , на две области. В первой области, занимающей пространство между каплей и зоной горения ($r_k < r < r_{32}$), имеет место диффузия паров горючего с поверхности капли к зоне химической реакции. Во второй области ($r_{32} < r < R$) поток окислителя направлен к фронту горения. Ширина зоны химической реакции принимается бесконечно узкой, т.е. скорость реагирования лимитируется диффузией горючего и окислителя к зоне горения.



Рис.1. Модель горения капли жидкого горючего в адиабатической оболочке.

В рамках принятых приближений, уравнение, описывающее процессы теплопереноса в области 1 имеет следующий вид:

$$4\pi r^2 \lambda_2 \frac{dT}{dr} = I_2 [l + C_p^c (T - T_k)] \quad (1)$$

$$r = r_k, T = T_k; r = r_{32}, T = T_{32}$$

$$I_2 = -\frac{dm_k}{dt} \quad (2)$$

Для второй области:

$$I_2 q = -4\pi r^2 \lambda_{ок} \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

$$r = r_{32}, T = T_{32}; r = R, T = T_{g0}$$

Простая связь между потоками окислителя $I_{ок}$ и горючего I_2 следует из условия стехиометрии потоков:

$$\frac{I_2}{\mu_2 \nu_2} = -\frac{I_{ок}}{\mu_{ок} \nu_{ок}} \quad (4)$$

При решении уравнений (1-4) использовался экспериментально установленный факт, что

$$\text{отношение } \frac{r_k}{r_{32}} = const.$$

Как показал опыт эксплуатации энергосиловых установок, количество окислителя необходимое для полного сгорания горючего, должно быть всегда несколько большим рассчитанного по стехиометрии, т.е. $\alpha^* > 1$. При этом считалось, что концентрация окислителя C_{ok}^∞ на границе адиабатической оболочки менялась в процессе горения от

$$C_{ok}^\infty \Big|_{t=0} \text{ до } C_{ok}^\infty \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right) \Big|_{t=t_2}.$$

Совместное решение уравнений (1-4) позволило найти искомую зависимость времени горения капли в адиабатической оболочке (т.е. время горения аэрозвеси капель) от параметров задачи и величины начального значения коэффициента избытка окислителя в том числе:

$$t_2 = \frac{r_k \rho_k}{r_{32} \rho_g} \frac{L}{2D_{ok} m_{ok}^\infty \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right)} r_0^2 \quad (5)$$

На рис.2 и 3 сплошными линиями представлены данные расчета времени горения исследованных горючих при различных значениях коэффициента избытка окислителя. Если принять время горения одиночной капли ($\alpha^* \rightarrow \infty$) в качестве масштабной единицы, то зависимость $t_2(\alpha^*)$ удобно представить, откладывая по оси ординат отношение времен горения аэрозвеси и одиночной капли, а по оси абсцисс – начальное значение коэффициента избытка окислителя.

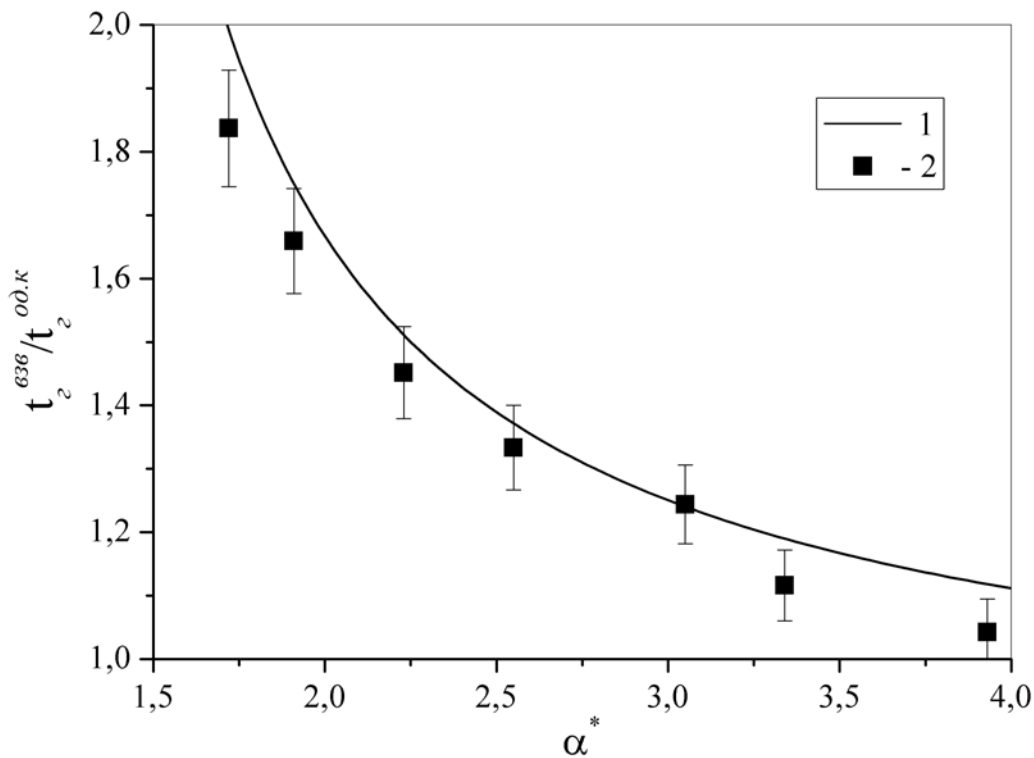


Рис.2. Зависимость величины $t_2^{636}/t_2^{од.к}$ от коэффициента избытка окислителя для РМЭ. 1 – расчет по (5), 2 – эксперимент.

Видно, что для обоих исследуемых горючих дефицит окислителя, который проявляется в большей мере при уменьшении α^* , приводит к увеличению времени горения капли.

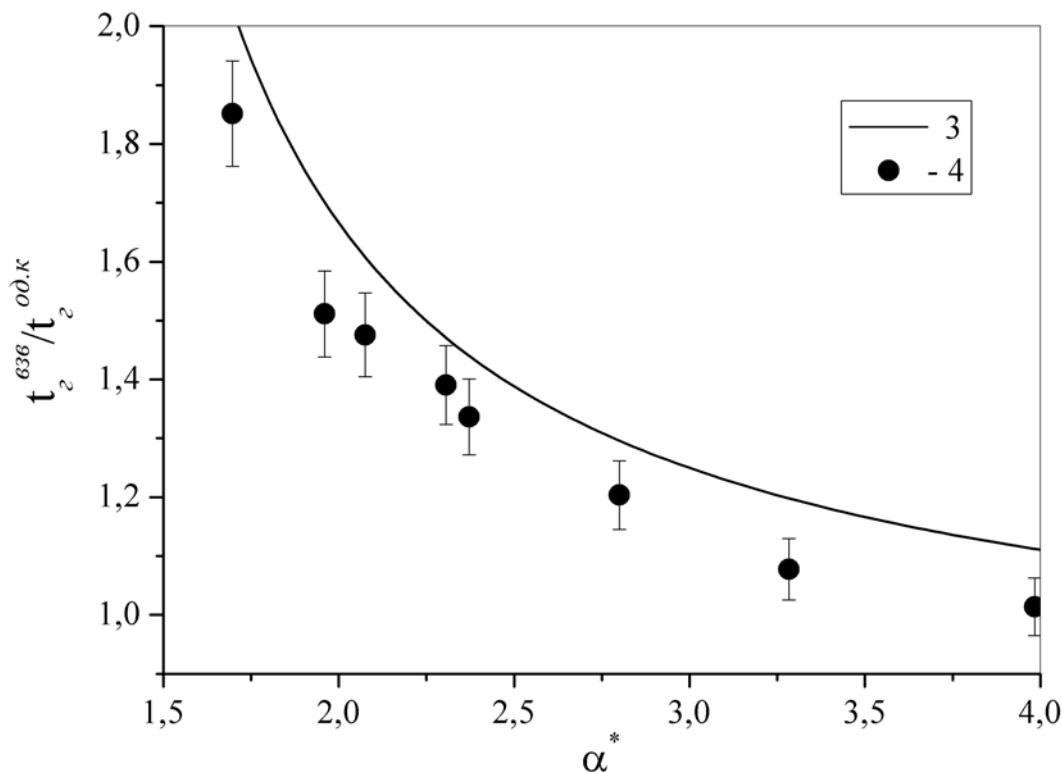


Рис.3. Зависимость величины $t_2^{636} / t_2^{od.k}$ от коэффициента избытка окислителя для ДТ. 3 – расчет по (5), 4 – эксперимент.

Используемый при расчетах t_2 диапазон значений коэффициента избытка окислителя от 1,7 до 4, соответствует основным режимам работы современных дизельных двигателей [4].

Необходимые для расчета по выражению (5) данные брались из [5-8]: $\rho_{\kappa}^{PMЭ} = 0,744 \frac{г}{см^3}$,

$$\frac{r_{32}}{r_{\kappa}} = 12, \rho_{\kappa}^{ДТ} = 0,737 \frac{г}{см^3}, \rho_g = 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{г}{см^3}, L_{PMЭ} = 3, L_{ДТ} = 3,47, m_{ок}^{\infty} = 0,23, D_{ок} = 3 \frac{см^2}{с}.$$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки адекватности рассмотренной в данной работе теоретической модели, были проведены экспериментальные исследования горения неподвижной капли горючего в воздухе с различным начальным значением α^* . Исследовалось горение капель с диаметром порядка 1мм.

Схема установки представлена на рис.4. Основным конструктивным элементом был стеклянный, герметично закрытый цилиндрический сосуд диаметром $d = 2$ см с подвижным верхним торцом в виде поршня. Капля исследуемого горючего помещалась на нихромовый, закрепленный с внутренней стороны поршня подвес. Поджиг осуществлялся накаливаемой поверхностью. Принимая во внимание малость характерных времен горения капель, можно

рассматривать данный сосуд как адиабатическую оболочку с ограниченным количеством окислителя.

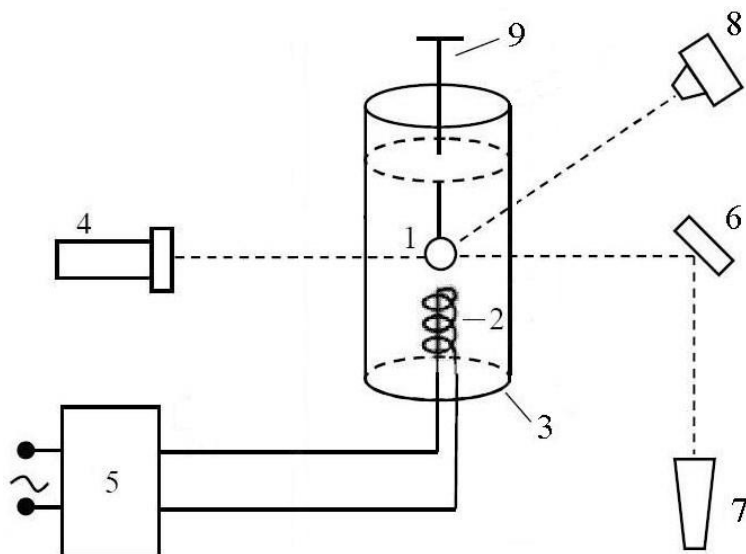


Рис.4. Схема экспериментальной установки. 1 – капля, 2 – спираль накаливания, 3 – цилиндрический стеклянный сосуд с вертикальной шкалой, 4 – источник света, 5 – импульсный блок питания, 6 – отражающий экран, 7 – зрительная трубка, 8 – скоростная камера, 9 – поршень.

Процесс горения подвешенной капли регистрировался с помощью скоростной видеокамеры. Изменение положения поршня позволяло варьировать объем цилиндра, тем самым меняя начальное значение коэффициента избытка окислителя в нем.

Полученные в ходе эксперимента результаты по зависимости величины относительного времени горения каплей от коэффициента избытка окислителя представлены на рис.2 и 3 точками. Как видно из этих данных, имеет место хорошее качественное и количественное согласование расчета относительного времени горения капли в адиабатической оболочке с результатами эксперимента. Некоторое количественное расхождение в абсолютных значениях расчетных и экспериментальных результатов может быть объяснено как принятыми в модели упрощениями, так и незначительным, но все же имеющим место сажеобразованием, т.е. неполным сгоранием капли при атмосферном давлении.

Анализ зависимостей $\frac{t_2^{э3в}}{t_2^{од.к}}(\alpha^*)$ показал, что при равных значениях коэффициента

избытка окислителя, значения времен горения для каплей РМЭ оказались меньше чем для ДТ почти на 10%. Принимая во внимание то, что проблема с обеспечением высокой полноты сгорания топлива возникает при малых значениях коэффициента избытка окислителя (богатые смеси), т.е. при работе двигателя в режиме повышенных нагрузок, эффект уменьшения времени сгорания РМЭ в этом случае играет положительную роль, уменьшая количество токсичных веществ в отработанных газах по сравнению с ДТ [1]. С другой стороны, при режимах работы двигателя с низкой нагрузкой, (значения α^* порядка 4), уменьшение времени горения РМЭ по сравнению со штатным значением может приводить к повышенному расходу топлива, что потребует дополнительной корректировки системы подачи топлива.

Обозначения

- r_k - радиус капли;
 $r_{зг}$ - радиус зоны горения;
 R - радиус внешней адиабатической оболочки;
 r_0 - начальный радиус капли;
 λ_g - коэффициент теплопроводности паров горючего;
 I_g - массовый поток горючего;
 l - удельная теплота парообразования;
 C_p^g - теплоемкость паров горючего;
 q - тепловой эффект реакции;
 $\lambda_{ок}$ - коэффициент теплопроводности окислителя;
 T_{g0} - температура на границе адиабатической оболочки;
 t_g - время горения;
 ρ_k - плотность жидкой фазы топлива при температуре кипения;
 ρ_g - плотность газа;
 L - стехиометрический коэффициент;
 $D_{ок}$ - коэффициент диффузии окислителя;
 $m_{ок}^\infty$ - массовая доля кислорода в воздухе;
 α^* - начальное значение коэффициента избытка окислителя;

Литература

1. Raslavicius L., Bazaras Z. The possibility of increasing the quantity of oxygenates in fuel blends with no diesel engine modifications. Transport. Vilnius Gediminas Technical University. March 1, 2010.
2. Варшавский Г. А. Горение капли жидкого топлива. – В кн.: Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982.
3. Хайкин Б.И. Гетерогенное горение. – В кн.: Тепломассообмен в процессах горения. – Черноголовка, 1980.
4. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. Издание четвертое, стереотипное.– М.:Высшая школа, 2008.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
6. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей, М.: Гостоптехиздат, 1964.
7. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – Харьков: Изд-во «Новое слово», 2007. – 452 с.
8. Handbook of Aviation Fuel Properties. SAE CRC technical report, No. 530; 1984.