

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ РАПС-МЕТИЛОВОГО ЭФИРА В ВОЗДУХЕ

Д.С. Дараков, А.Н. Золотко, А.К. Копейка, П.О. Павлюк

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Украина, Одесса, 65023, ул. Пастера, 42

Институт горения и передовых технологий

Украина, 65082, Одесса, ул. Дворянская, 2

e-mail: darakov@onu.edu.ua

Аннотация

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 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.

Ключевые слова: горение, эфир, метил, воздух, массо и теплообмен

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, и время его горения взаимосвязаны, представляет интерес исследовать влияние коэффициента избытка окислителя α^* на время сгорания РМЭ, являющимся, подобно другим биотопливам, кислородосодержащим горючим (~10% кислорода по весу).

Диффузионное горение капель горючего в воздухе

Рассматривается квазистационарная модель диффузионного горения аэрозвеси каплей 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 каплями 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 тепло-массопереноса в области 1, имеет следующий вид:

$$4\pi r^2 \lambda_z \frac{dT}{dr} = I_z \left[1 + C_p^z (T - T_k) \right] \quad (1)$$

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

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

где r – текущее расстояние, причем $r_k < r < r_{32}$, λ_z – коэффициент теплопроводности парообразного топлива,

I_z – массовый поток паров горючего с поверхности капли,

l – удельная теплота парообразования,

C_p^z – теплоемкость паров горючего,

T – текущая температура,

T_k – температура капли,

T_{32} – температура зоны горения,

m_k – масса капли.

Рассмотрим вторую область. Тепло, которое выделяется в зоне горения, расходуется в областях 2 и 1. В области 2 оно приводит к повышению температуры газа. Часть тепла, которая поступает в первую область, идет на испарение капли и обуславливает существова-

ние градиента температуры в границах $[r_k, T_{32}]$. Затем, вместе с диффундирующими парами топлива, эта часть тепла возвращается к зоне горения. Поэтому в зоне горения со стороны второй области справедливо равенство:

$$I_z q = -4\pi r^2 \lambda_{ок} \frac{dT}{dr}$$

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

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

(3)

$$R = r_0 \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_g} L \alpha^*}$$

где q – тепловой эффект реакции,

$\lambda_{ок}$ – коэффициент теплопроводности газа во второй области,

T_{g0} – температура на границе адиабатической оболочки,

r_0 – начальный радиус капли,

ρ_k – плотность капли,

ρ_g – плотность газа во второй области,

α^* – начальный коэффициент избытка окислителя,

L – стехиометрический коэффициент,

$$L = \frac{\mu_{ok} \nu_{ok}}{\mu_z \nu_z}.$$

По закону стехиометрии потоков, потоки горючего и окислителя входят в зону горения в стехиометрическом соотношении:

$$\frac{I_z}{\mu_z \nu_z} = - \frac{I_{ok}}{\mu_{ok} \nu_{ok}}, \quad (4)$$

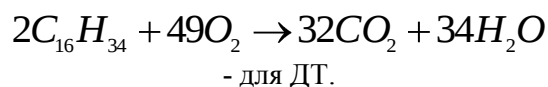
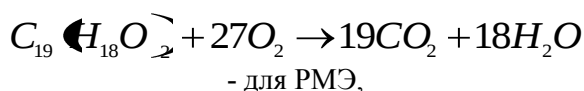
$$\text{где } I_{ok} = -4\pi r^2 D_{ok} \frac{dC_{ok}}{dr}$$

Здесь μ_z, μ_{ok} – молярные массы горючего и окислителя,

D_{ok} – коэффициент диффузии окислителя,

C_{ok} – концентрация окислителя,

ν_z, ν_{ok} – стехиометрические коэффициенты горючего и окислителя, с которыми они входят в брутто-уравнение химической реакции:



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

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

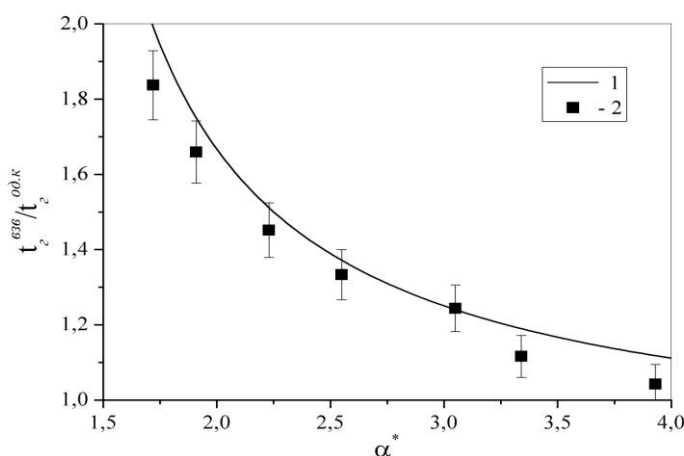
Во всех уравнениях концентрация окислителя C_{ok}^∞ меняется в процессе горения от начального значения $C_{ok}^{\infty 0} \Big|_{t=0}$ до

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

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:

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

На рис.2 и 3 сплошными линиями представлены данные расчета времени горения исследованных горючих при различных значениях коэффициента избытка окислителя.

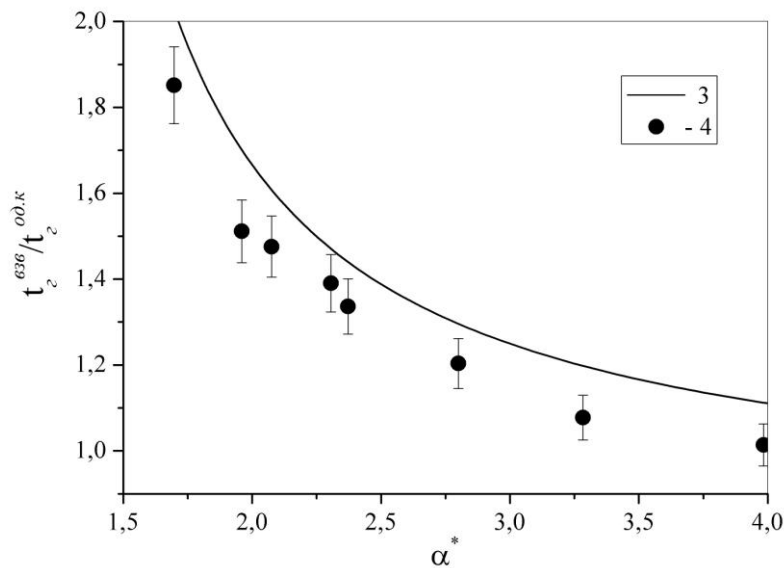


1 – расчет по (5), 2 – эксперимент

Рис.2 – Зависимость величины $t_{326}/t_z^{од.к}$ от коэффициента избытка окислителя для РМЭ

Если принять время горения одиночной капли ($\alpha^* \rightarrow \infty$) в качестве масштабной единицы, то зависимость $t_z(\alpha^*)$ удобно представить, откладывая по оси ординат отношение времен горения аэрозвеси и одиночной капли, а по оси абсцисс – начальное значение коэффициента избытка окислителя.

Видно, что для обоих исследуемых горючих дефицит окислителя, который проявляется в большей мере при уменьшении α^* , приводит к увеличению времени горения капли. К объяснению различия в расчетных значениях относительных времен горения исследуемых топлив вернемся ниже.



3 – расчет по (5), 4 – эксперимент

Рис.3 – Зависимость величины $t_z^{aэзв}/t_z^{од.к}$ от коэффициента избытка окислителя для ДТ

Используя при расчетах t_z 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]:

$$\rho_{\kappa}^{PM} = 0,744 \frac{г}{см^3},$$

$$\frac{r_{32}}{r_{\kappa}} = 12,$$

$$\rho_{\kappa}^{ДТ} = 0,737 \frac{г}{см^3},$$

$$L_{PM} = 3,$$

$$L_{ДТ} = 3,47,$$

$$m_{ок}^{\infty} = 0,23,$$

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_{g0}} \right)^{1,75},$$

$$\rho_g = \rho_{g0} \left(\frac{T_{g0}}{T} \right),$$

$$D_0 = 0,2 \frac{см^2}{с},$$

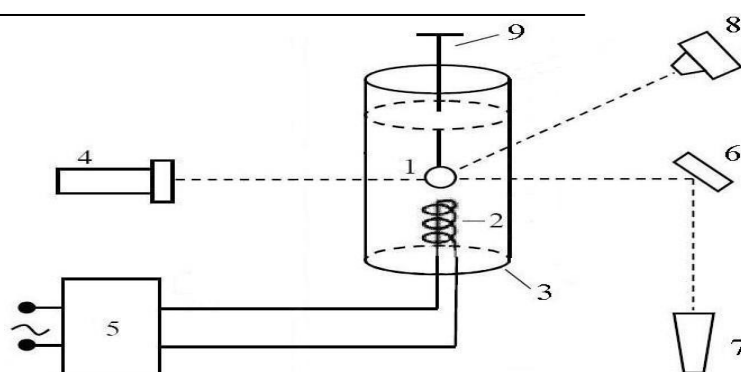
$$\rho_{g0} = 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{г}{см^3}.$$

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 1 мм.

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.



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

Рис.4 – Схема экспериментальной установки

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

Полученные в ходе эксперимента результаты по зависимости величины относительного времени горения капель 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. непол-

ным сгоранием капли при атмосферном давлении.

Анализ зависимостей $\frac{t_{с}^{взв}}{t_{с}^{од.к}} \gamma^*$ показал,

что при равных значениях коэффициента избытка окислителя, значения времен горения для капель РМЭ оказались меньше чем для ДТ почти на 10%. Наблюдаемое отличие, по мнению авторов, обусловлено содержанием кислорода в молекуле РМЭ, что фактически учтено в стехиометрическом коэффициенте L . 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.

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.

BURNING OF RAPESEED METHYL ESTER DROPLETS IN AIR

D.S. Darakov, A.N. Zolotko, A.K. Kopeika, P.O. Pavlyuk

Odessa I.I.Mechnikov national university, faculty of physics, chair of general and chemical physics
42, Pastera str., Odessa 65023, UKRAINE

Institute of combustion and advanced technologies 2, Dvoryanskaya str., Odessa 65082, UKRAINE
e-mail: darakov@onu.edu.ua

Abstract

The paper presents the research results of rapeseed methyl esters (RME) and mineral diesel fuel (DF) droplet combustion process in air. The influence of equivalence oxygen-fuel ratio α^* on droplet burning time t_b is considered within the framework of the adiabatic shell fuel droplet burning model. Experimental verification of the results was carried out at atmospheric pressure in the range of oxidant-fuel ratio of 1.7 to 4. It is shown that in the entire range of α^* , the RME droplet combustion time was lower than for diesel fuel drops by 10%, all other things being equal. This result indirectly explains the combustion efficiency increasing effect of bio-fuels compared to diesel fuel, observed in the bench test, which is especially important when using the diesel motor in high-load.

ЖАНУ ТАМШЫЛАРЫ РАПС-МЕТИЛ ЭФИР АУАДА

Д.С. Дараков, А.Н. Золотко, А.К. Копейка, П.О. Павлюк

И.И. Мечников атындағы Одесса ұлттық университеті, Украина, Одесса, 65023, Пастера к-сі, 42

Жану және озық технологиялар институты Украина, 65082, Одесса, Дворянская к-сі, 2

e-mail: darakov@onu.edu.ua

Аннотация

Бұл жұмыста рапс-метилды эфирдың (РМЭ) тамшыларының және минералды дизельды отынның ауада жану процессін зерттеу нәтижелері берілген. Адиабаталық қабықта отын тамшыларының жану моделдері шеңберінде α^* тотықтырғыш коэффициентінің молдығы тамшының жану уақытына әсері қарастырылған. Алынған нәтижелерді тәжірибелік тексеру атмосфералық қысымда тотықтырғыш коэффициентінің молдығы мәні 1,7 до 4 дейінгі диапазонда жүргізілді. РМЭ тамшыларының жану уақыты ДО тамшылардың жану уақытынан 10% аз екендігі анықталды. Алынған нәтиже ДО салыстырғанда биоотындардың жануының көбею эффектісінен жоғары жүктемемен жұмыс тәртібіндегі дизельді қозғаушы жұмысында ерекше маңызды.