

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ КАПЕЛЬ БИОТОПЛИВА В ВОЗДУХЕ

Д. С. Дараков¹, А. Н. Золотко², А. К. Копейка¹, П. О. Павлюк¹¹Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, 65082 Одесса, Украина, darakov@onu.edu.ua²Институт горения и нетрадиционных технологий Одесского национального университета им. И. И. Мечникова, 65082 Одесса, Украина

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования горения в воздухе капель рапс-метилового эфира в сравнении с минеральным дизельным топливом. Исследовались капли диаметром $0.7 \div 1.2$ мм. Проанализировано влияние коэффициента избытка окислителя в диапазоне значений $1.7 \div 4$ на продолжительность горения капель в рамках модели горения капли в адиабатической оболочке с учетом стефановского течения. Показано, что время горения капель рапс-метилового эфира меньше, чем капель дизельного топлива, при прочих равных условиях.

Ключевые слова: биотопливо, дизельное топливо, рапс-метиловый эфир, аэровзвесь капель, горение, время горения.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации двигателей внутреннего сгорания на альтернативных топливах биологического происхождения выявил ряд недостатков: повышенный удельный расход топлива, образование нагара, относительно низкая стабильность горючего [1]. Введение же небольших по объему добавок, до $5 \div 10$ %, рапс-метилового эфира (RME) в минеральное дизельное топливо (MD) позволяет улучшить экологические показатели отработанных газов. Однако влияние этих добавок на основные характеристики топливных смесей исследованы не в полной мере [2–4]. Одной из таких характеристик является полнота сгорания топливно-воздушной смеси, а основным управляющим параметром — коэффициент избытка окислителя α . Поскольку время горения топлива в камере сгорания определяет полноту его преобразования, представляет интерес исследовать влияние коэффициента избытка окислителя на время сгорания капель RME в сравнении с MD. Подобно другим биотопливам, RME является кислородосодержащим горючим — около 10 % кислорода (по массе). В данной работе представлены результаты исследования процесса горения капель RME и MD в воздухе при заданных начальных значениях коэффициента избытка окислителя, с учетом влияния стефановского потока на зависимость времени горения от величины α .

ГОРЕНИЕ КАПЛИ ГОРЮЧЕГО В АДИАБАТИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Горение аэровзвеси как совокупности одинаковых изолированных индивидуальных капель моделируется горением одиночной капли в адиабатической оболочке, что схематически представлено на рис. 1. В простейшем варианте этот процесс рассмотрен в работе [5], где получена аналитическая зависимость времени горения капли в адиабатической оболочке t_b (т. е. времени горения аэровзвеси капель) от параметров задачи и начального значения коэффици-



Рис. 1. Горение капли жидкого горючего в адиабатической оболочке

циента избытка окислителя без учета стефановских течений:

$$t_b = \frac{r_s \rho_d}{r_f \rho_g} \frac{L}{2D_2 m_2^\infty (1 - 1/\alpha^*)} r_0^2. \quad (1)$$

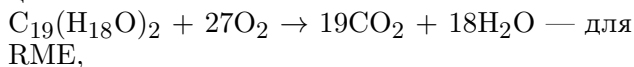
Здесь r_s — радиус капли, r_f — радиус зоны горения, r_0 — начальный радиус капли, ρ_d — плотность капли, ρ_g — плотность газа, L — стехиометрический коэффициент, D_2 — коэффициент диффузии окислителя, m_2^∞ — массовая доля окислителя на границе адиабатической оболочки.

Если выражение для полных молярных потоков компонентов системы записать в форме Стефана [6], формула (1) несколько изменится. Рассмотрим эту задачу подробнее. Соответствующие выражения для потоков имеют вид:

$$r_s < r < r_f: I_1 = -4\pi r^2 \frac{pD_1}{RT} \frac{1}{1 - \gamma_s C_1} \frac{dC_1}{dr}, \quad (2)$$

$$r_f < r < r_{ad}: I_2 = -4\pi r^2 \frac{pD_2}{RT} \frac{1}{1 - \gamma_f C_2} \frac{dC_2}{dr}. \quad (3)$$

Здесь r_{ad} — радиус адиабатической оболочки, I — полный молярный поток, R — универсальная газовая постоянная, T — температура газовой фазы, p — полное давление в газовой фазе, C — концентрация компонента в газовой фазе. Индексы 1 и 2 обозначают горючее и окислитель соответственно, $\gamma_s = 1$ — относительное изменение числа молей при испарении, $\gamma_f = (\nu_2 + \nu_3 + \nu_4)/\nu_2$ — относительное изменение числа молей газа вследствие химической реакции в пламени, $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$ — стехиометрические коэффициенты горючего, окислителя, первого и второго продуктов, с которыми они входят в брутто-уравнение химической реакции:



С учетом (2) и (3) выражение (1) принимает вид

$$t_b = \frac{r_s \nu_2}{r_f \nu_1} \rho_d \gamma_f r_0^2 / \quad (4)$$

$$\left[2M_1 \frac{pD_2}{RT} \ln \left(\left(1 - 0.21\gamma_f \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right) \right)^{-1} \right) \right],$$

где M_1 — молярная масса горючего.

Еще одной важной характеристикой процесса горения аэрозвеси капль, также не рассмотренной в работе [5], является температура в зоне горения T_f , выражение для определения которой получено в рамках данной модели:

$$T_f = T_{g0} - \frac{\nu_1 QLe}{\nu_2 \gamma_f c_{p2}} \ln \left(1 - 0.21\gamma_f \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right) \right). \quad (5)$$

Здесь T_{g0} — температура газа на границе адиабатической оболочки, Q — теплотворная способность горючего, Le — критерий Льюиса, c_{p2} — удельная теплоемкость окислителя.

Целесообразность учета влияния стефановского потока на время горения можно оценить из сравнения данных расчета времени t_b по выражениям (1) и (4) в диапазоне $\alpha^* = 1.7 \div 4$, что в целом отвечает штатным значениям α^* для дизельных двигателей [7]. Соответствующие данные для RME и MD представлены на рис. 2 в виде зависимости $\frac{t_b}{t_b^{\text{од}}}(\alpha^*)$, где

$t_b/t_b^{\text{од}}$ — отношение времен горения аэрозвеси ($\alpha^* = 1.7 \div 4$) и одиночной капли ($\alpha^* \geq 4$). В том же диапазоне значений α^* на рис. 3 приведена зависимость $T_f(\alpha^*)$ для исследованных топлив. Расчеты по выражениям (1), (4) и (5) выполняли при $\rho_d^{\text{RME}} = 744 \text{ кг/м}^3$, $r_f/r_s = 12$, $\rho_d^{\text{MD}} = 737 \text{ кг/м}^3$, $m_2^\infty = 0.23$, $D_2 = D_0(T/T_{g0})^{1.75}$, $\rho_g = \rho_{g0}(T_{g0}/T)$, $D_0 = 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $L^{\text{RME}} = 3$, $L^{\text{MD}} = 3.47$, $T_{g0} = 1000 \text{ К}$, $\nu_1^{\text{RME}} = 1$, $\nu_2^{\text{RME}} = 27$, $\nu_3^{\text{RME}} = -19$, $\nu_4^{\text{RME}} = -18$, $\nu_1^{\text{MD}} = 2$, $\nu_2^{\text{MD}} = 49$, $\nu_3^{\text{MD}} = -32$, $\nu_4^{\text{MD}} = -34$, $Le = 1$, $M_1^{\text{RME}} = 296.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $M_1^{\text{MD}} = 226.4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $p = 101300 \text{ Па}$, $c_{p2} = 0.92 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $Q^{\text{RME}} = 13.36 \cdot 10^6 \text{ Дж/моль}$, $Q^{\text{MD}} = 11.44 \cdot 10^6 \text{ Дж/моль}$. В качестве температуры в выражении (4) использовалась средняя температура в области 2: $T = (T_f + T_{g0})/2$. Отношение r_f/r_s взято из эксперимента. Значения времени горения для одиночных капль RME и MD вычисляли по формуле (4) при $\alpha^* = 4$.

Обращает на себя внимание пересечение расчетных зависимостей 1 и 2 для обоих исследованных топлив, которое можно объяснить следующим образом. При относительно небольших значениях α^* , как видно из (5) и данных рис. 3, температура в зоне горения достаточно низкая, что приводит к малому тепловому потоку из зоны горения к капле. Отсюда следует, что время горения капль в этих

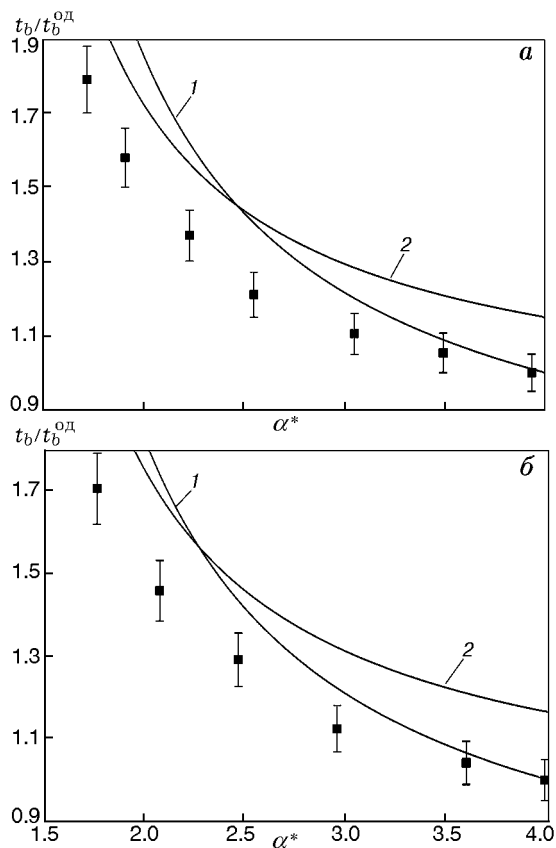


Рис. 2. Зависимость отношения $t_b/t_b^{од}$ от коэффициента избытка окислителя для RME (а) и MD (б):

1 — расчет по (4), 2 — расчет по (1), точки — эксперимент

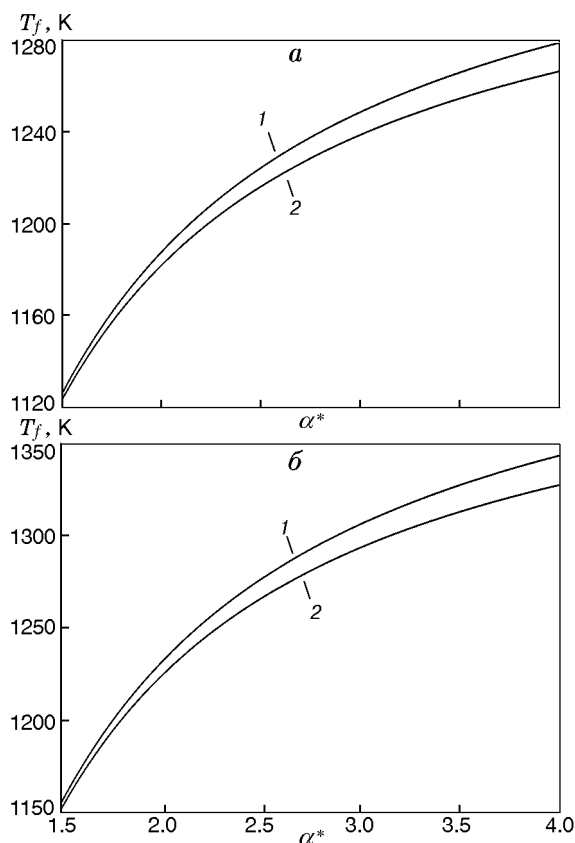


Рис. 3. Зависимость температуры в зоне горения от коэффициента избытка окислителя для RME (а) и MD (б):

1 — с учетом стефановского потока, 2 — без учета стефановского потока

условиях велико. Помимо прочего, стефановский поток уносит тепло из зоны горения в область 2 (см. рис. 1) и препятствует диффузии окислителя в зону горения. Это еще больше увеличивает время горения ($\alpha^* < 2.2 \div 2.5$).

По мере увеличения значения α^* температура зоны горения растет, тепловой поток из зоны горения к капле увеличивается, диффузия паров топлива в зону горения интенсифицируется и время горения каплей уменьшается. При $\alpha^* > 2.2 \div 2.5$ по мере дальнейшего роста температуры горения повышается прогрев области 2 (см. рис. 1), что приводит к увеличению коэффициента диффузии окислителя в зону горения и, соответственно, к уменьшению времени горения каплей (см. рис. 2, 3).

Следует отметить, что учет стефановского потока, как видно из рис. 2, целесообразен при больших значениях α^* , так как он способствует разогреву избыточного окислителя и,

как следствие, его переносу из области 2 в зону горения за счет увеличения коэффициента диффузии.

УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальное исследование горения неподвижной капли горючего в воздухе с различными начальными значениями коэффициента избытка окислителя проводили на установке, схематично изображенной на рис. 4.

Основной элемент установки — толстостенный, герметично закрытый стеклянный цилиндр с подвижным верхним основанием (поршень), с внутренней стороны которого прикреплен подвес из нихромовой проволоки. Вследствие малости времени сгорания каплей топлива диаметром $0.7 \div 1.2$ мм, описанный сосуд представляет собой адиабатическую обо-

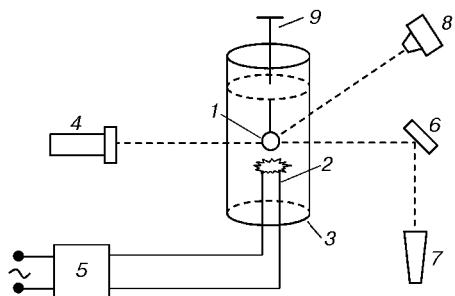


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — капля, 2 — спираль накаливания, 3 — цилиндрический стеклянный сосуд с вертикальной шкалой, 4 — источник света, 5 — импульсный блок питания, 6 — отражающий экран, 7 — зрительная труба, 8 — скоростная камера, 9 — поршень

лочку с ограниченным количеством окислителя, в которую заключена капля. Коэффициент избытка окислителя рассчитывался по выражению $\alpha^* = \rho_2 V_c / (m_d L)$, где m_d — масса капли, V_c — объем цилиндра, который варьировался в эксперименте от 1 до 5 см³.

Начальный размер капли определялся визуально с помощью зрительной трубы. Поджиг осуществлялся нитью накала, расположенной под каплей. Изменение положения поршня позволяло варьировать объем цилиндра, т. е. менять начальное значение коэффициента избытка окислителя в системе. Время горения каплей исследуемых топлив определялась из обработки данных видеосъемки и в исследованном диапазоне α^* менялось от 0.6 до 1.2 с для RME и от 0.8 до 1.4 с для MD.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2 (см. точки). Экспериментальные и расчетные данные нормированы на время горения одиночной капли ($\alpha^* = 4$). Здесь следует отметить, что операция нормировки применялась для четкого определения качественного согласования результатов расчета и эксперимента. В количественном плане экспериментальное время горения оказалось меньше расчетного в 2.5 раза, что связано, вероятно, с различием геометрии в модели и эксперименте, а также с неполным сгоранием горючего в опытах. Как видно из рисунков, имеет место хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласование нормированных расчетных значений времени горения капли в адиабатической оболочке по выражению (4) с результатами эксперимента.

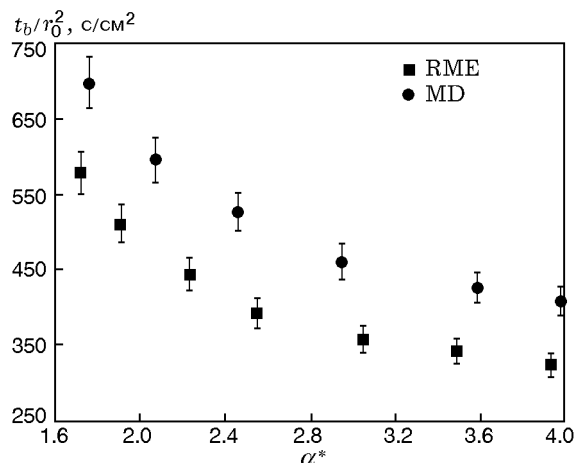


Рис. 5. Зависимость величины t_b/r_0^2 от коэффициента избытка окислителя α^* для RME и MD (эксперимент)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Принято считать, что учет стефановского потока необходим при расчете процессов горения каплей. Этот тезис получил экспериментальное и расчетное подтверждение в настоящей работе. Однако для исследованных горючих в форме каплей диаметром 0.7 ÷ 1.2 мм в диапазоне значений коэффициента избытка окислителя от 1.7 до 2.2 ÷ 2.5 количественный вклад стефановского течения невелик, вероятнее всего, из-за относительно низкой (например, по сравнению с металлами) температуры горения RME и MD.

2. Время горения каплей RME оказались меньше (рис. 5), чем каплей MD, приблизительно на 10 % при одинаковых значениях α^* , что, по-видимому, связано с наличием кислорода в молекуле RME, фактически повышающего реальное значение коэффициента избытка окислителя в смеси.

Все вышесказанное следует учитывать при нахождении оптимального соотношения добавок биотоплива к минеральному дизельному топливу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Raslavinius L., Bazaras Ž.** The possibility of increasing the quantity of oxygenates in fuel blends with no diesel engine modifications // J. Transport. — 2010. — V. 25, N 1. — P. 81–88.
2. **Марков В. А., Девянин С. Н., Семенов В. Г. и др.** Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях

- лях. — М.: ООО НИЦ «Инженер», «Онико-М», 2011.
3. **The European Biodiesel Board:** What is biodiesel? Why use biodiesel? — www.ebb-eu.org/biodiesel.php.
 4. **Moser B. R., Williams A., Haas M. J., McCormick R. L.** Exhaust emissions and fuel properties of partially hydrogenated soybean oil methyl esters blended with ultra low sulfur diesel fuel // *J. Fuel Proc. Technol.* — 2009. — V. 90. — P. 1122–1128.
 5. **Дараков Д. С., Золотко А. Н., Копейка А. К., Павлюк П. О.** Горение капель рапс-метилового эфира в воздухе // *Горение и плазموхимия.* — 2012. — Т. 10, № 4. — С. 299–304.
 6. **Хайкин Б. И.** Гетерогенное горение // *Тепло-массообмен в процессах горения.* — Черноголовка, 1980.
 7. **Колчин А. И.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей. 4-е изд., стереотипное. — М.: Высш. шк., 2008.

*Поступила в редакцию 7/X 2013 г.,
в окончательном варианте — 3/XII 2013 г.*
