

УДК 536.46

Копейка А.К.¹, Дараков Д.С.¹, Олифиренко Ю.А.¹, Раславичус Л.²

¹Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова, Одесса, Украина

²Технологический университет, Каунас, Литва, кафедра транспортной инженерии

E-mail: kopyka@onu.edu.ua

Воспламенение капель одноатомных спиртов и метиловых эфиров растительных масел

Изучается поведение одиночных капель одноатомных спиртов (этанол, бутанол) и метиловых эфиров растительных масел в нагретом воздухе в интервале температур (950÷1100К) при нормальном атмосферном давлении. В рамках квазистационарной модели инертного прогрева капли предложено выражение для расчета времени задержки воспламенения капли жидкого топлива, которое с приемлемой для анализа достоверностью, позволяет оценить степень влияния основных параметров задачи на длительность предвоспламенительного периода. Полученные прогностические оценки показали, что в условиях, которые отвечают методике проведения эксперимента по воспламенению одиночной капли топлива, время задержки воспламенения капли τ_{ign} менее летучего метилового эфира рапсового масла должно быть больше чем для капель этанола и бутанола аналогичного размера. Результаты расчета сравниваются с данными по воспламенению капель минерального дизельного топлива.

Введение. Общей тенденцией в мировой практике использования биотопливных компонентов в составе моторных топлив является все более широкое применение в этом качестве одноатомных спиртов – этанола и бутанола, а также метиловых эфиров растительных масел (МЭРМ) [1-4]. Однако конечной целью большинства посвященных этой проблематике исследований является использование указанных биотоплив в качестве однокомпонентных топлив для двигателей внутреннего сгорания. При этом, если в отношении этанола, учитывая позитивный опыт Бразилии и США, уже достигнуты определенные успехи [5], то применение бутанола и МЭРМ сопряжено с рядом сложностей различного характера [6]. Обсуждению некоторых из особенностей применения биотоплив в двигателях внутреннего сгорания посвящено большое количество работ, ссылки на которые можно найти в обзоре [7]. В настоящей работе представлены результаты теоретических исследований процесса воспламенения одиночных капель этанола (А), бутанола (В), и метилового эфира рапсового масла (RME) в неподвижной нагретой среде при атмосферном давлении. Анализируется влияние теплофизических свойств данных топлив на длительность периода задержки воспламенения, в условиях, когда роль прогрева капли и ее паров становится определяющей. Чтобы получить представление о направлении обнаруженных тенденций, полученные результаты сравниваются с данными по воспламенению одиночных капель минерального дизельного топлива (MD).

Аналитическое выражение для оценки времени задержки воспламенения τ_{ign} одиночных капель жидкого топлива в зависимости от его теплофизических

свойств и условий окружающей среды было получено ранее в рамках квазистационарной модели инертного прогрева капли в работах [8, 9]:

$$\tau_{ign} = \frac{\rho_1 c_{p1} r_0^2}{3\lambda_2} \left(\frac{T_b - T_0}{T_\infty - T_0} \right). \quad (1)$$

Здесь и далее индекс 1 относится к жидкой фазе, а индекс 2 к парам, r_0 – начальный радиус капли; ρ_1 – плотность жидкости; c_{p1} – удельная теплоемкость жидкости; λ_2 – коэффициент теплопроводности паров топлива; T_0 – температура капли в начальный момент времени; T_b – температура кипения топлива; T_∞ – температура окружающей среды.

Постановка задачи предполагала, что выгорания паров топлива до момента воспламенения не происходит, капля находится в неподвижной среде ($Nu = 2$), температура капли постоянна по радиусу в любой момент времени, а сферически симметричные поля концентрации реагентов и температуры вокруг капли подобны ($Le = 1$).

Отмечаемое там же в [9] вполне удовлетворительное совпадение, рассчитанного по выражению (1) периода задержки воспламенения капли октана ($r_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м), с данными численного решения соответствующей системы нестационарных уравнений тепломассопереноса с источниками (стоками), говорит в пользу применимости квазистационарного приближения для оценок τ_{ign} и достоверного качественного анализа кинетики процесса воспламенения капли углеводородного топлива, по крайней мере, в условиях, когда самой медленной, лимитирующей стадией является ее прогрев.

Анализ результатов. Точность оценки τ_{ign} по выражению (1) несколько повысится, если отказаться от использовавшегося в [9] разложения в ряд экспоненциальной зависимости для температуры поверхности капли в момент воспламенения. После чего, выражение для расчета времени задержки воспламенения одиночной капли переписется в следующем виде:

$$\tau_{ign} = \frac{\rho_1 c_{p1} r_0^2}{3\lambda_2} \ln \left(\frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T_b} \right), \quad (2)$$

Анализ влияния на задержку воспламенения капли таких управляющих параметров, как теплофизические свойства топлива и его температуры кипения T_b , а также коэффициента теплообмена капли с окружающей средой α , удобно провести, если при постановке вышеупомянутой задачи выбрать в качестве масштаба времени отношение r_0^2/a_1 , где a_1 – температуропроводность капли. В новом безразмерном представлении, с использованием критериев подобия Фурье ($Fo = a_1 \tau / r_0^2$) и Био ($Bi = \alpha r_0 / \lambda_1$), а также безразмерного комплекса для

температуры кипения $\Theta_b = \frac{T_b - T_0}{T_\infty - T_0}$, аналогом выражения (2) будет связь безразмерного времени задержки воспламенения капли Fo_{ign} с Bi и Θ_b :

Табл. 1 Значения исходных теплофизических параметров для расчета времени задержки воспламенения капель углеводородных топлив ($T = 293\text{K}$, $p = 1\text{атм}$).

| Параметр | A | B | RME | MD |
|---|---------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------|
| | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ | $\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$ | $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ |
| $\rho_1, \text{кг/м}^3$ | 791 | 810 | 900 | 860 |
| $c_{p1}, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ | 2,399 | 2,419 | 1,670 | 1,800 |
| $\lambda_1, 10^{-3} \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$ | 169,4 | 154,0 | 156,2 | 116,8 |
| $a, 10^{-7} \text{м}^2/\text{с}$ | 0,893 | 0,786 | 1,039 | 0,755 |
| $\lambda_2, 10^{-3} \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$ | 14,9 | 10,6 | 6,6 | 9,6 |
| T_b, K | 351,5 | 390,6 | 610 | 553 |

$$Fo_{ign} = \frac{1}{3Bi} \ln \left(\frac{1}{1 - \Theta_b} \right). \quad (3)$$

При построении отвечающих выражению (3) номограмм $Fo_{ign}(\Theta_b, Bi)$ границы диапазона изменения безразмерного комплекса Θ_b выбирались исходя из данных по температуре кипения исследуемых топлив, приведенных в табл.1, и температуры окружающей среды, для которой принималось, что $T_\infty = 1000\text{K}$. Температура капли в начальный момент времени T_0 считалась равной 293K. Вариативность критерия Bi определялась разбросом представленных в той же таблице значений теплофизических свойств топлив. Из всего ряда рассмотренных топлив, наименьшее его значение 0,04 отвечает метиловому эфиру рапсового масла (RME), а наибольшее – 0,09 имеет место для этанола (A), при прочих равных условиях.

Как видно из анализа представленной на рис.1 зависимости $Fo_{ign}(\Theta_b, Bi)$, чем ниже температура кипения топлива Θ_b и интенсивней процесс теплообмена капли с горячей средой (рост Bi), тем быстрее должна воспламениться капля.

С целью адаптации этого результата, полученного с помощью обобщенного выражения (3), к реальной ситуации, проводился сравнительный анализ расчетных данных для времени задержки воспламенения капли исследуемых топлив. Результаты расчета τ_{ign} по выражению (2) в интервале температур $T_\infty = (950 \div 1100)\text{K}$ представлены на рис.2.

В расчетах принималось, что начальные размер капли $r_0 = 1 \cdot 10^{-3}\text{м}$ и температура $T_0 = 293\text{K}$. Значения остальных, входящих в это выражение, величин, также приведены в табл. 1. Для коэффициента теплопроводности паров топлив λ_2 использовалось его среднеинтегральное по температуре значение.

Действительно, как и предсказывалось ранее, наименьшие времена задержки воспламенения получаются для капель одноатомных спиртов (низкая температура кипения и более высокие значения Bi). Напротив метиловый эфир рапсового масла, с относительно высокой температурой кипения и низким значением критерия Bi должен воспламеняться позже всех рассмотренных топлив.

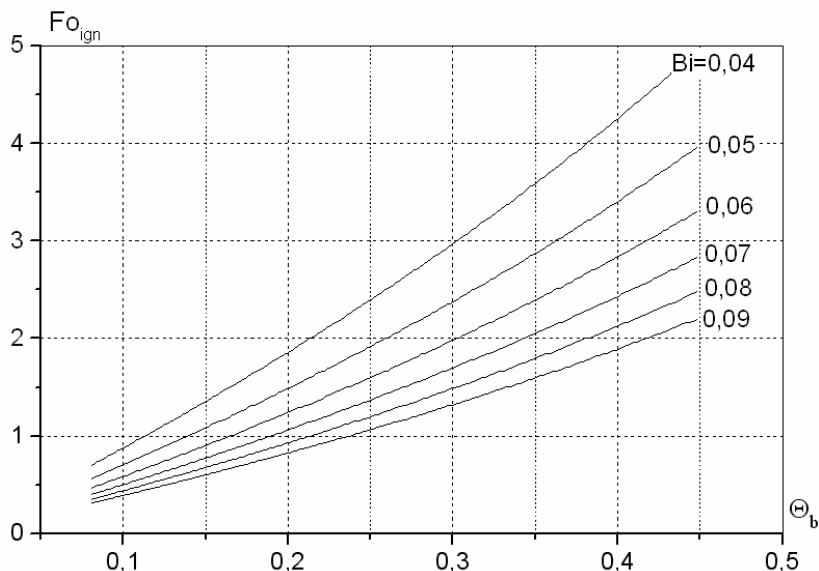


Рис.1. Графический анализ критериальной зависимости $Fo_{ign}(\Theta_b, Bi)$ для капли горючего.

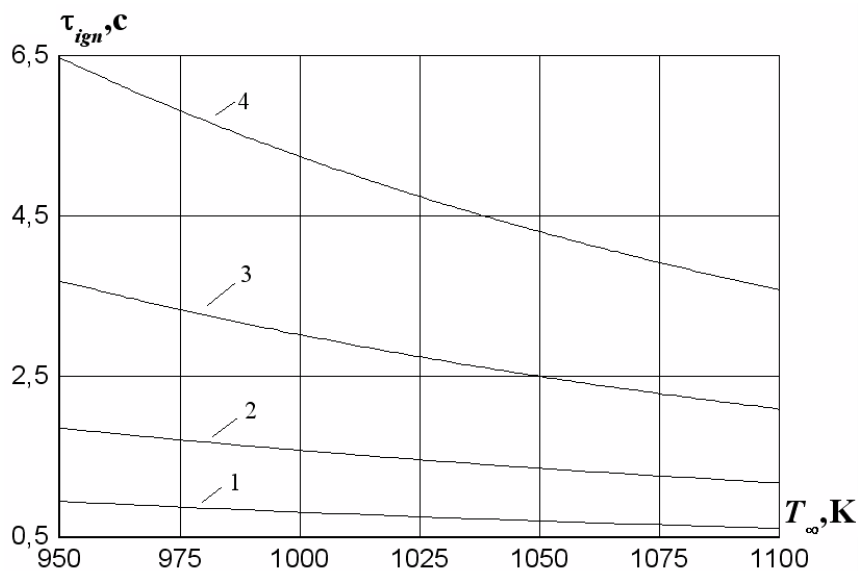


Рис.2 Зависимость времени задержки воспламенения капли топлива от температуры окружающей среды: (1) – этанол; (2) – бутанол; (3) – дизельное топливо MD; (4) – метиловый эфир рапсового масла RME.

Можно ожидать, что предсказанные для одиночных капель смесевых топлив особенности их воспламенения, в какой-то мере должны проявить себя и в условиях работы дизельного двигателя. В этой связи, очевидно, что как раннее, так и позднее воспламенение рассмотренных биотоплив по сравнению с значением τ_{ign} для традиционно используемых моторных топлив, являются одинаково неприемлемыми для их непосредственного применения в качестве однокомпонентного горючего в существующих ДВС.

Один из возможных путей решения этой проблемы заключается в подборе таких вариаций параметров Θ_b и Bi , для которых задержка воспламенения бу-

дет близкой к таковой для минерального дизельного топлива. Нужную комбинацию указанных параметров можно получить меняя состав топливной смеси. Простые оценки показывают следующую тенденцию: добавки (А) и (В) к (МД) и (RME) должны приводить к уменьшению времени задержки воспламенения капли двухкомпонентных топливных смесей, тогда как добавки (RME) к (МД) напротив, увеличивать значение τ_{ign} . Определенный практический интерес могут представлять и трехкомпонентные смеси (МД) с добавками как (RME), так и рассмотренных в работе одноатомных спиртов.

Выводы. Известное аналитическое выражение, полученное в рамках квазистационарной модели инертного прогрева капли жидкого топлива, нашло дополнительное обоснование его применимости для оценки длительности периода задержки воспламенения одиночных капель мультикомпонентных топливных композиций. Кроме того, использование критериального подхода позволило свести многопараметрическую задачу к двум параметрам (Θ_b, Bi) , вариации которых достигаются изменением состава топливной смеси. Прикладной аспект данной задачи заключается в максимальном приближении одного из основных показателей τ_{ign} для смесевых горючих к уровню реперных значений для стандартного моторного топлива. В этом случае, можно ожидать положительного эффекта от применения биотоплив: снижение топливного расхода на фоне их бесспорных экологических преимуществ по сравнению с топливом нефтяного происхождения.

Литература:

1. Black G., Curran H.J., Pichon S., Simmie J.M., Zhukov V. Bio-butanol: Combustion properties and detailed chemical kinetic model // *Combustion and Flame*. – 2010. – V.157. – P. 363-373.
2. 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 // *Fuel Processing Technology*. – 2009. – V.90. – P. 1122–1128.
3. Raslavičius L., Bazaras Ž. The possibility of increasing the quantity of oxygenates in fuel blends with no diesel engine modifications // *Transport*. – 2010. – V.25, №1. – P. 81–88.
4. Raslavičius L. et al. Biofuels, sustainability and the transport sector in Lithuania // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V.32. – P. 328–346.
5. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis / <http://www.anp.gov.br>
6. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – Х.: Новое слово, 2007.
7. Hoekman S.K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – V.16. – P. 143–169.

8. Варшавский Г.А., Федосеев Д.В., Франк-Каменецкий А.Д. // Материалы VIII Всесоюзной конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, ОГУ, 1968.
9. Варшавский Г.А., Федосеев Д.В., Франк-Каменецкий А.Д. Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива // Физика аеродисперсных систем. – 1969. – №1. – С. 101-107.

Копійка О.К., Дараков Д.С., Оліфіренко Ю.О., Раславічус Л.

Займання крапель одноатомних спиртів і метилових ефірів рослинних масел

АНОТАЦІЯ

Вивчається поведінка одиночних крапель одноатомних спиртів (етанол, бутанол) і метилових ефірів рослинних масел в нагрітому повітрі в інтервалі температур (950 ÷ 1100 К) і нормальному атмосферному тиску. В рамках квазістаціонарної моделі інертного прогрівання краплі запропонований вираз для розрахунку часу затримки займання краплі рідкого палива, яке з прийнятною для аналізу ситуації достовірністю, дозволяє оцінити ступінь впливу основних параметрів задачі на тривалість часу затримки займання. Отримані прогностичні оцінки показали, що в умовах, які відповідають методиці проведення експерименту по займанню одиночної краплі палива, час затримки займання краплі τ_{ign} менш летючого метилового ефіру рапсового масла повинен бути більшим, ніж для крапель етанолу і бутанола аналогічного розміру. Результати розрахунку порівнюються з даними по займанню крапель мінерального дизельного палива.

Kopyyka A.K., Darakov D.S., Olifirenko Y.A., Raslavicius L.

Ignition of monohydric alcohols single droplets and methyl esters of vegetable oils

SUMMARY

Evolution of monohydric alcohols (ethanol, butanol) single droplets and methyl esters of vegetable oils (RME) in a heated air within the temperature range (950 ÷ 1100K) and normal atmospheric pressure is investigated. Within the quasi-stationary approach framework, mathematical expression for droplet ignition delay time is proposed, which allows to estimate the main problem parameters influence degree on the preignition period length, with reasonable for situation analysis certainty. Obtained prognostic evaluations showed that under single droplet ignition experimental methodology conditions, ignition delay time τ_{ign} of less volatile rapeseed oil methyl ester should exceed the analogous parameter of similar size ethanol and butanol droplets. Calculation results are compared with mineral diesel fuel droplets ignition data.