

ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКИХ СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ

А. К. Копейка¹, Ю. А. Олифиренко¹, Д. С. Дараков¹, М. В. Батурина¹,
А. В. Бербега¹, Л. Раславичус²

¹Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, г. Одесса, Украина
kopiyka@onu.edu.ua

²Department of Transport Engineering, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania
laurencas.raslavicius@ktu.lt

Одним из распространенных способов ослабления негативного влияния антропогенного фактора является замена традиционных топлив на их возобновляемые аналоги, такие как биоэтанол, биобутанол и различные эфиры жирных кислот. Основной проблемой при попытке непосредственного использования данных биотоплив в двигателях, разработанных для эксплуатации на бензине или дизельном топливе, является существенное отличие в теплофизических свойствах, что, в свою очередь, влияет на характерные времена испарения.

капель, смесеобразования, воспламенения и горения топливовоздушной смеси. Поэтому, как компромиссный вариант, в настоящее время, активно обсуждается идея применения спиртов в качестве добавок к бензинам.

В настоящей работе представлены результаты исследований основных закономерностей испарения как одиночных капель биотоплив (этанол – Е, бутанол – В), так и их смесей, в том числе с бензином – G (октановое число 92). В исследуемых образцах смесевых топлив объемная доля бутанола варьировалась в интервале от 10 до 85%.

Экспериментальные исследования проводились методом подвешенной капли в нагретой воздушной среде в интервале температур 350–700 К и атмосферном давлении. Начальный размер капли составлял $d_0 \approx 2$ мм. Капля исследуемого топлива с помощью дозирующего устройства помещалась на подвижный П-образный подвес с диаметром спая 600 мкм. Время ввода капли в центр нагретой печи не превышало 0,3 с. Печь представляла собой нагревательный элемент цилиндрической формы (диаметр $5 \cdot 10^{-2}$ м, длина $24 \cdot 10^{-2}$ м), снабженный расположенными с торцов окнами из кварцевого стекла для визуальных наблюдений и видеосъемки процесса. Текущий размер капли исследуемого топлива определялся с помощью видеосъемки со скоростью 5 кад/с и авторского программного продукта для захвата и обработки изображения. Эксперименты проводились в условиях слабого тока воздуха $v = 6,6 \cdot 10^{-3}$ м/с, а величина константы испарения K' пересчитывалась из измеряемой величины K по формуле Фресслинга [1]:

$$K' = K(1 + 0,229\text{Re}^{1/2}). \quad (1)$$

Полученные экспериментальные данные для топлив и их смесей представлены на рис. 1 и 2 в виде зависимости

$$\frac{d^2}{d_0^2} = f\left(\frac{t}{d_0^2}\right).$$

Анализ этих данных показал, что в указанном температурном диапазоне процесс испарения капель для этанола, бутанола и их смеси 60%E-40%В протекал в равновесном режиме.

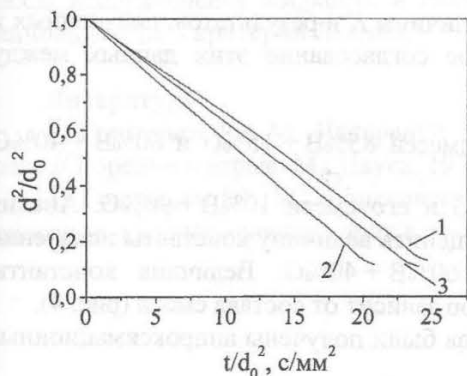


Рис. 1. Динамика испарения капель при температуре 360 К: 1 – бутанол; 2 – этанол; 3 – смесь 60%E + 40%В

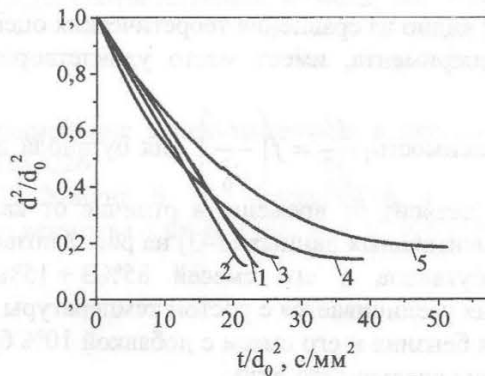


Рис. 2. Динамика испарения капель при температуре 360 К: 1 – бутанол; 2 – смесь 85%B + 15%G; 3 – смесь 60%B + 40%G; 4 – смесь 10%B + 90%G; 5 – бензин (G)

Соответствующие значения констант равновесного испарения K при различных температурах окружающей среды представлены на рис. 3. Можно видеть, что значение константы испарения увеличивается с ростом температуры, при этом для капель бутанола

величина K несколько больше чем для этанола, что особенно заметно в области более высоких температур. В то же время, найденные в опытах с каплями топливной смеси 60%Е + 40%В значения K оказались меньшими, либо близкими к значению аналогичной величины для этанола, что говорит о неаддитивном характере зависимости от состава смеси некоторых теплофизических характеристик, например таких, как теплота парообразования L .

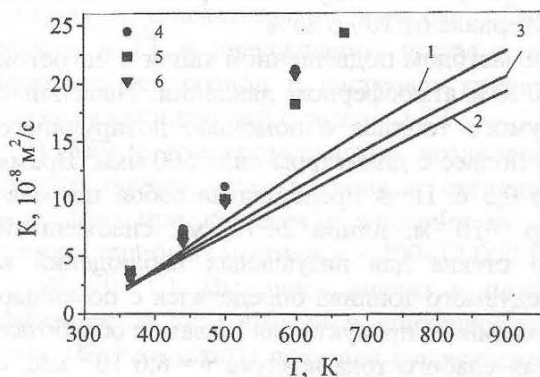


Рис. 3. Зависимость константы испарения капель исследуемых биотоплив от температуры среды. Расчет: 1 – бутанол, 2 – этанол, 3 – смесь 60%Е + 40%В. Эксперимент: 4 – бутанол, 5 – этанол, 6 – смесь 60%Е + 40%В

Здесь же для сравнения приведены также и расчетные значения величины K , вычисленные в рамках модели равновесного испарения капли инертной жидкости с учетом стефановского потока [1, 2]:

$$K = \frac{8\lambda}{\rho_k c_p} \ln \left(1 + \frac{c_p (T_\infty - T_s)}{L} \right), \quad (2)$$

где T_s – температура поверхности капли, которая определялась по уравнению

$$\left\{ 1 - \frac{\mu_{\text{газа}}}{\mu_{\text{пара}}} \left[1 - \exp \frac{L\mu_{\text{пара}}}{RT_s T_{\text{кин}}} (T_{\text{кин}} - T_s) \right] \right\}^{-1} = 1 - \left[1 + \frac{c_p}{L} (T_\infty - T_s) \right]^{-Le}.$$

Как видно из сравнения теоретических оценок величины K и результатов, полученных в ходе эксперимента, имеет место удовлетворительное согласование этих данных между собой.

Зависимость $\frac{d^2}{d_0^2} = f\left(\frac{t}{d_0^2}\right)$ для бутанола и его смесей 85%В + 15%G и 60%В + 40%G

линейно зависит от времени, в отличие от капель G и его смеси 10%В + 90%G. Анализ экспериментальных данных (1–3) на рис. 2 позволил оценить величину константы испарения капель бутанола и его смесей 85%В + 15%G и 60%В + 40%G. Величина константы испарения увеличивается с ростом температуры и слабо зависит от состава смеси (рис. 4).

Для бензина и его смеси с добавкой 10% бутанола были получены аппроксимационные выражения следующего вида:

$$\frac{d^2}{d_0^2} = A + B \exp \left(-\frac{1}{C} \frac{t}{d_0^2} \right). \quad (3)$$

Обнаружено, что во всем исследованном интервале температур величины аппроксимационных коэффициентов A и B из выражения (3) для бензина и его смеси 10%В + 90%G

примерно равны 0,1 и 1 соответственно. Кроме того, указанные коэффициенты слабо зависят от температуры и состава смеси. Напротив, на величину коэффициента C значительное влияние оказывает и температура, и состав смеси (рис. 5). Однако с ростом температуры среды влияние состава смеси на величину коэффициента C ослабевало.

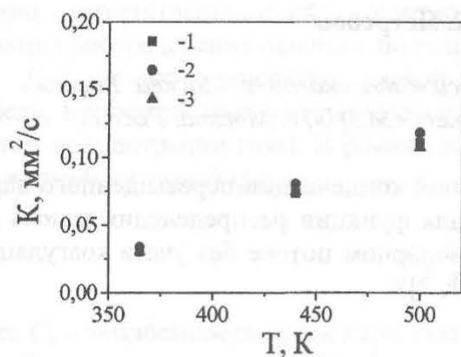


Рис. 4. Зависимость константы испарения от температуры: 1 – бутанол, 2 – смесь 85%B + 15%G; 3 – смесь 60%B + 40%G

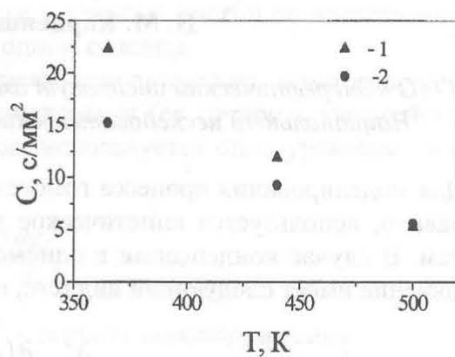


Рис. 5. Зависимость аппроксимационного коэффициента C от температуры: 1 – бензин G, 2 – смесь 10%B + 90%G

Тот факт, что значения констант испарения K капель бензина и его смеси с бутанолом оказались близкими во всем исследуемом интервале температур, а величина аппроксимационного коэффициента C одинаковая, по крайней мере, при температуре 500 К, подтверждает тезис о хорошем смешивании бутанола с бензином.

Обозначения

K – константа скорости испарения, $\text{м}^2/\text{с}$; T_∞ – температура среды, К; T_s – температура поверхности капли; K , $T_{\text{кип}}$ – температура кипения топлива, К; ρ_k – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – удельная теплоемкость паров топлива, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$; λ – коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт}/\text{м}^2$; L – удельная теплота испарения, $\text{Дж}/\text{кг}$; $\mu_{\text{газ}}$ и $\mu_{\text{пара}}$ – молярные массы испаряющейся жидкости и газовой среды соответственно, $\text{кг}/\text{моль}$; Re – критерий Рейнольдса; Le – критерий Льюиса.

Литература

1. Григорьев Ю. М. Испарение и воспламенения капель н-гептана в окислительной среде // Горение и взрыв. М.: Наука, 1972. С. 221–226.
2. Григорьев Ю. М., Гонтковская В. Т., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. К теории испарения и воспламенения капли взрывчатого вещества // ФГВ. 1968. Т. 4. С. 526–239.