

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Проведені дослідження пов'язані з переведенням дизельних двигунів на біодизельне паливо. Наведено методику та результати експериментального дослідження теплофізичних та фізико-хімічних властивостей біодизельного палива, а також сумішей біодизельного палива з нафтовим.

*Ключові слова:* біодизель, ріпакова олія, горіння, властивості

Проведенные исследования связаны с переводом дизельных двигателей на биодизельное топливо. Приведены методика и результаты экспериментального исследования теплофизических и физико-химических свойств биодизельного топлива, а также смесей биодизельного топлива с нефтяным.

*Ключевые слова:* биодизель, рапсовое масло, горение, свойства

The conducted researches are related to transfer of diesel engines to biodiesel fuel. The technique and results of an experimental research of thermo-physical and physical-and-chemical properties of biodiesel fuel as well as mixes of biodiesel fuel with the petroleum one are presented.

*Keywords:* biodiesel, rape oil, burning, properties

### Введение

Повышение стоимости нефти и нефтепродуктов, рост мощности эксплуатируемых двигателей, приводящий к увеличению вредных выбросов в атмосферу, делают актуальными разработки связанные с поиском альтернативных видов топлива и повышением эффективности его использования.

Данная работа посвящена исследованию возможности конвертации дизельного топлива (ДТ) на альтернативный вид топлива на основе растительных масел с целью экономии нефтяного топлива, снижения негативного теплового воздействия двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду и сложностям, возникающим в связи с этим.

Для Украины наиболее перспективным является применение в качестве биотоплива рапсового масла (РМ) либо смеси (ТС) рапсового масла с дизельным топливом [1, 2]. Применение биотоплива не требует внесения существенных изменений в конструкцию двигателей, что является важным фактором, способствующим переходу на альтернативное топливо.

### Постановка задачи исследования

Целью исследований являлось экспериментальное определение теплофизических и физико-химических свойств топливной смеси, влияющих на работу дизельного двигателя, в частности на подачу топлива в цилиндры, качество горючей смеси, мощность двигателя, а

также получение на основании этих данных эмпирических зависимостей, которые могли бы быть использованы при математическом моделировании работы двигателя на топливной смеси.

Известны результаты экспериментальных исследований [3] в которых свойства топливных смесей определялись по отношению к чистому дизельному топливу, чистому рапсовому маслу и их смесям с метиловыми эфирами рапсового масла. Однако специфика этих исследований позволяет определить закономерности физико-химических и теплофизических свойств только для соответствующих условий.

Таким образом, основными задачами исследований были:

- экспериментальное определение плотности, вязкости, поверхностного натяжения рапсового масла, дизельного топлива и их смесей в зависимости от температуры;
- экспериментальное определение фракционного состава рапсового масла, дизельного топлива и их смесей;
- построение эмпирических зависимостей исследованных свойств в зависимости от доли рапсового масла в топливе.

### Методика и результаты исследований

**Плотность.** Экспериментальное определение плотности рапсового масла, дизельного топлива и их смесей проводилось двумя способами.

Плотность при 20 °С определялась при помощи нефтенсиметра АНТ-2, представляющего собой стеклянную цилиндрическую емкость, в нижней части которой располагается балласт в виде свинцовой дроби. Градуировка нефтенсиметра выполнена с ценой деления 0,001 кг/м<sup>3</sup>. Диапазон допустимых значений температуры топлива и точность измерительных приборов (нефтенсиметра и термометра) приведены в [4–6].

Стеклянный цилиндр наполнялся исследуемым топливом, температура которого регулировалась при помощи электроподогревателя, подогревающего ванну с водой. Температура топлива поддерживалась равной 20 °С и контролировалась термометром. Плотность исследуемого топлива определялась по шкале нефтенсиметра.

Подогревать топливо в нефтенсиметре выше 20 °С не представляется возможным, поскольку будет происходить расплавление свинцового балласта. В связи с этим, для определения плотности топлива при температуре до 70 °С, близкой к температуре воспламенения [7], использовался пикнометр ПЖ-2а-50, представляющий собой стеклянный сосуд емкостью 50 мл с шлифованной пробкой и кольцевой меткой на горловине для точного заполнения исследуемым топливом.

Емкость предварительно взвешенного с точностью до 0,0005 г пикнометра наполнялась исследуемым топливом и помещалась в ванну с водой, температура которой контролировалась с помощью электроподогревателя. Затем для определения массы топлива пикнометр снова взвешивался. Плотность топлива (кг/м<sup>3</sup>) определяется по формуле:

$$\rho^t = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса топлива, кг;  $V$  – объем топлива в емкости пикнометра, м<sup>3</sup>.

На основании полученных экспериментальных данных определялась относительная плотность топлива

$$d_4^t = \frac{\rho^t}{\rho_4},$$

где  $t$  – температура топлива, °С;  $\rho_4$  – плотность воды при 4 °С.

Экспериментальные значения относительной плотности исследуемого топлива при температуре отличной от 20 °С сравнивались с

расчетными, которые определялись по формуле:

$$d_4^t = d_4^{20} + \beta(20 - t), \quad (1)$$

где  $d_4^{20}$  – относительная плотность исследуемого топлива при температуре 20 °С;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, 1/°С.

Так, в [8] коэффициент температурного расширения в зависимости от температуры, для сложных углеводородов, имеет практически линейную зависимость. Содержание рапсового масла в дизельном топливе незначительное, то можно предположить, что значение коэффициента температурного расширения слабо изменяется, и по результатам обработки экспериментальных данных может быть принят  $\beta \approx 0,622$  1/°С. Для относительной плотности при 20 °С была получена линейная зависимость

$$d_4^{20} = 0,838 + 0,08\gamma,$$

где  $\gamma$  – доля рапсового масла в топливе.

Результаты расчета плотности топливной смеси в зависимости от температуры и доли рапсового масла и их сравнение с экспериментальными данными показаны на рис. 1.

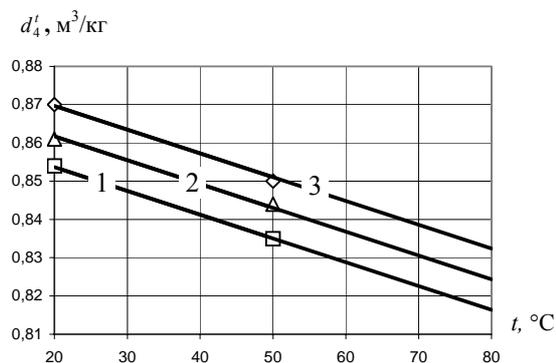


Рис. 1. Плотность топливной смеси:  
1 – 20 % PM, 80 % ДТ; 2 – 30 % PM, 70 % ДТ;  
3 – 40 % PM, 60 % ДТ

Погрешность расчета по формуле (1) не превышает 0,2 %.

**Вязкость.** Для определения вязкости топлива использовался вискозиметр типа ВУ, который состоит из резервуара с исследуемым топливом, ванны с водой для поддержания требуемой температуры топлива при помощи электроподогревателя мощностью 500 Вт, а также термометра для измерения температуры жидкости. При достижении температуры топлива 50 °С осуществлялся выпуск 200 мл исследуемого топлива. Время истечения отсчитывалось секундомером.

Условная вязкость топлива определялась по формуле:

$$BV_t = \frac{T_t}{T_{20}^{H_2O}},$$

где  $T_{20}^{H_2O}$  – время вытекания из вискозиметра 200 мл дистиллированной воды при температуре 20 °С;  $T_t$  – время вытекания из вискозиметра 200 мл исследуемого топлива при температуре 50 °С.

Кинематическая вязкость топлива (мм<sup>2</sup>/с) определялась по формуле

$$\nu = 7,41BV_t.$$

Результаты экспериментальных исследований вязкости топливной смеси в зависимости от температуры показаны на рис. 2.

Для обработки экспериментальных исследований была использована эмпирическая формула [8] для сложного углеводородного топлива

$$\lg \lg(10\nu + 1,7) = a \lg(t + 73,3) + b, \quad (2)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, мм<sup>2</sup>/с;  $a$ ,  $b$  – эмпирические постоянные, определяемые по экспериментальным значениям вязкости.

На основании полученных экспериментальных данных эмпирические коэффициенты были аппроксимированы линейными зависимостями  $a = -0,596\gamma - 0,2607$  и  $b = 1,549\gamma + 0,0451$ . Как следует из сравнения расчетных и экспериментальных данных, погрешность формулы (2) не превышает 14 %.

**Поверхностное натяжение.** Для определения коэффициента поверхностного натяжения топлива использовался стагагмометр, который включает в себя колбу с исследуемым топливом и термометр для измерения температуры исследуемого топлива.

Температуру топлива регулировалась путем подогрева электроподогревателем. Кроме того, использовалась капиллярная трубка и аналитические весы, на которые устанавливалась чаша с топливом.

Исследуемое топливо наливалось в стеклянную колбу, и после достижения заданной температуры закачивалось в капилляр. Из капилляра выдавливалось несколько капель топлива в чашу, после чего проводилось их взвешивание на аналитических весах.

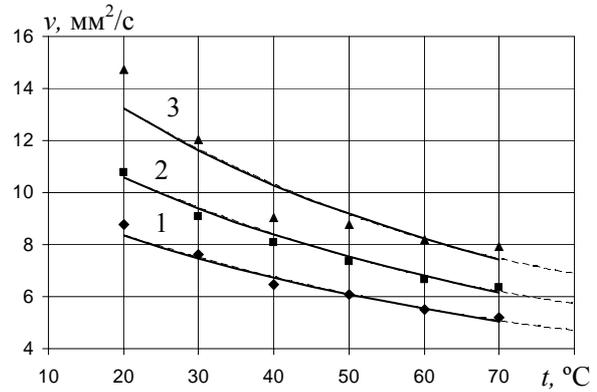


Рис. 2. Вязкость топливной смеси: 1 – 20 % РМ, 80 % ДТ; 2 – 30 % РМ, 70 % ДТ; 3 – 40 % РМ, 60 % ДТ

Радиус капилляра (м) определялся по формуле:

$$R = \frac{m_b g}{2\pi\sigma_{ст}},$$

где  $m_b$  – масса дистиллированной воды, кг;  $\sigma_{ст} = 72,75 \cdot 10^{-3}$  Н/м – коэффициент поверхностного натяжения дистиллированной воды при температуре 20 °С,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Коэффициент поверхностного натяжения исследуемого топлива, Н/м

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi R},$$

где  $m$  – масса исследуемого топлива, кг.

Результаты экспериментальных исследований коэффициента поверхностного натяжения топливной смеси в зависимости от доли рапсового масла в дизельном топливе при 20 °С, представлены на рис. 3.

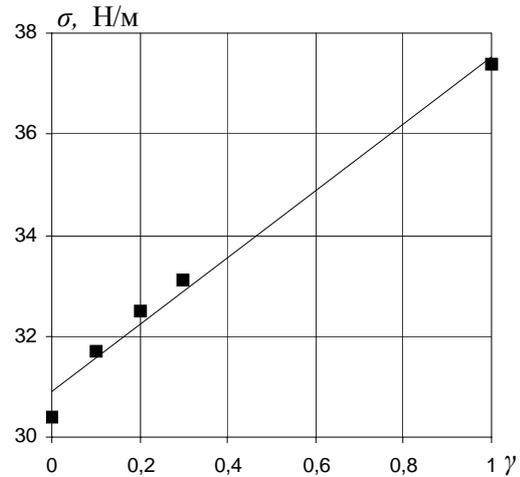


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения от доли рапсового масла в смеси

Согласно [8], коэффициент поверхностного натяжения индивидуальных углеводородов и моторных топлив зависит от относительной плотности  $d_4^{20}$  линейно. Поскольку зависимость  $d_4^{20}$  от доли  $\gamma$  также линейная, то в качестве эмпирической формулы для поверхностного натяжения может быть использована линейная зависимость

$$\sigma = A\gamma + B. \quad (3)$$

После обработки экспериментальных данных были получены значения  $A = 7,05$ ,  $B = 30,6$ . Погрешность расчетных значений по полученной формуле, как показано на рис. 3 не превышает 2,5 %.

**Фракционный состав.** Экспериментальная установка для определения фракционного состава топлива состояла из колбы для перегонки топлива, горелки, тепловая мощность которой обеспечивала перегонку топлива с заданной скоростью, охлаждающей бани для конденсации топлива, а также измерительного цилиндра, служащего для определения количества топлива, прошедшего перегонку. Температура топлива в колбе измерялась термометром. В колбу наливалось 100 мл исследуемого топлива, после чего проводился розжиг горелки.

Результаты экспериментального определения фракционного состава топливных смесей, дизельного топлива и рапсового масла, представлены на рис. 4. Температура 10 % перегонки топливных смесей изменялась в незначительных пределах. Для чистого рапсового масла в сравнении с дизельным топливом она отличается на 102 °С, что свидетельствует о малом количестве в нем низко кипящих фракций. Температура перегонки рапсового масла из-за наличия большого количества тяжелых фракций остается практически постоянной и равной 335 °С.

**Низшая теплота сгорания** топливной смеси в соответствии с формулой, предложенной в [9], определяется как

$$Q_H^p = Q_{НДТ}^p \gamma + Q_{НРМ}^p (1 - \gamma),$$

где  $Q_{НДТ}^p$ ,  $Q_{НРМ}^p$  – низшая теплота сгорания дизельного топлива и рапсового масла соответственно, кДж/кг.

Экспериментальное определение низшей теплоты сгорания проводилось в соответствии с ГОСТ 145-95 (ISO 1928-76). Результаты экспериментального определения теплоты сгорания топливной смеси в зависимости от доли

рапсового масла и их сравнение с расчетными данными, показаны на рис. 5.

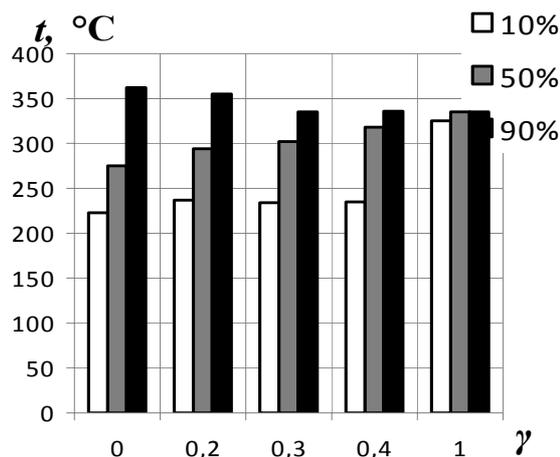


Рис. 4. Фракционный состав топливных смесей рапсового масла и дизельного топлива

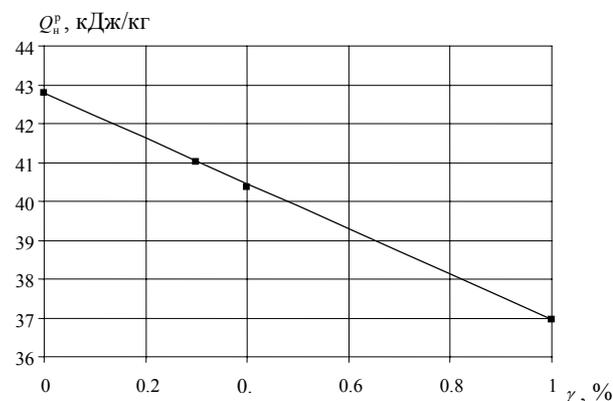


Рис. 5. Теплота сгорания топливной смеси

## Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных исследований были получены плотность, вязкость, поверхностное натяжение, фракционный состав и теплота сгорания топливных смесей, состоящих из дизельного топлива и рапсового масла, в зависимости от температуры и состава. На основании этих данных построены эмпирические зависимости, которые могут быть использованы при математическом моделировании процессов впрыска и сгорания топливных смесей в цилиндре дизеля.

2. Изменение вязкости и плотности топливных смесей в зависимости от доли рапсового масла может привести к изменению размера и формы образующегося топливного факела и размера капель топлива. Поскольку эти параметры могут существенно влиять на работу двигателя, то они требуют дополнительного изучения.

3. Увеличение доли рапсового масла в топливной смеси приводит к замедлению начала

процесса перегонки, вместе с тем температура 90 % перегонки снижается. Более узкий фракционный состав, при соответствующем выборе конструкции камеры сгорания, будет способствовать более равномерному горению топлива, однако возможно усложнение пуска двигателя.

4. Наблюдаемое снижение теплоты сгорания топливных смесей, вызванное более низкой теплотой сгорания рапсового масла, может привести к уменьшению мощности двигателя и увеличению удельного расхода топлива.

5. Из проведенного анализа теплофизических и физико-химических свойств топливных смесей следует, что конвертация дизельного двигателя на биотопливо, которое состоит из смеси дизельного топлива и рапсового масла, возможна. Однако для оптимизации работы двигателя необходимо дополнительное проведение исследований влияния этих свойств на рабочий процесс, в том числе при помощи математического моделирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Білодід, В. Д. Деякі розрахунки щодо енергетичної ефективності біопалив [Текст] / В. Д. Білодід, П. В. Тарасенко // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 34-39.
2. Оценка влияния состава топлива на экономические показатели дизеля [Текст] / В. Г. Семёнов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10 (57). – С. 136-139.
3. Семенов, В. Г. Биодизель. Физико-химические показатели и эколого-экономические характеристики работы дизельного двигателя [Текст] / В. Г. Семенов. – Х.: НТУ ХПИ, 2002. – 276 с.
4. Термометры ртутные стеклянные лабораторные. Технические условия: ГОСТ 215-73 [Текст]. – Госстандарт СССР, 1973. – 9 с.
5. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности: ГОСТ 3900-85 [Текст]. – Госстандарт СССР, 1985. – 36 с.
6. Ареометры и цилиндры стеклянные. Общие технические условия: ГОСТ 18481-81 [Текст]. – М. Стандарт форма, 2007. – 23 с.
7. Васильев, И. П. Результаты испытаний в дизельном двигателе смесей топлив растительного происхождения [Текст] / И. П. Васильев // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 2. – С. 3-11.
8. Дубовкин, Н. Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам [Текст] / Н. Ф. Дубовкин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов [Текст] / под ред. Н. В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2010.

Принята к печати 12.11.2010.