

#### 4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 664.8.022

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_3\_108

EDN: USCZSF

### Анализ работы дизельного двигателя и дизель-генератора на чистом дизельном топливе и смеси с биотопливом, получаемым в результате двухстадийного процесса

Сергей Валерьевич Мазанов<sup>1✉</sup>, Алмаз Уралович Аетов<sup>2</sup>, Иван Игоревич Монахов<sup>3</sup>,  
Алина Олеговна Соловьёва<sup>4</sup>, Руслан Рустамович Накипов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет,

Казань, Россия

<sup>1</sup> serg989@yandex.ru✉

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментального исследования работы дизельного двигателя и дизель-генератора на нефтяном дизтопливе и биотопливе, взятом в смесевом составе с дизтопливом в процентном соотношении биодизель/дизель, равном 20/80. Проведена оценка состава и физических свойств получаемого биодизельного топлива. Приведены значения таких показателей, как номинальная мощность, удельный эффективный расход топлива и дымность. При анализе работы данных энергетических агрегатов выявлено, что они имеют схожие параметры по рассматриваемым характеристикам при незначительном снижении номинальной мощности и увеличении удельного эффективного расхода топлива, вызванного его более быстрым сгоранием. Изучен процесс производства биотоплива на установке периодического действия, реализующей двухстадийный процесс, состоящий из гидролиза рафинированного рапсового масла дистиллированной водой и этерификации этиловым спиртом ненасыщенной олеиновой жирной кислоты, представляющей собой основной целевой продукт гидролиза рапсового масла, для получения соответствующего этилового эфира олеиновой кислоты, являющегося аналогом биотоплива. При анализе работы дизельных двигателей, работающих на смеси, выявлены схожие характеристики с чистым нефтяным дизтопливом при незначительном снижении номинальной мощности (до 8%) и увеличении удельного эффективного расхода топлива (до 4%). Экономия нефтяного дизельного топлива в отличие от смесевоего на 1000 кВт·ч достигает 4%. Наибольший выход олеиновой кислоты (94,9%) получен при температуре  $T = 573$  К, давлении  $P = 30$  МПа, длительности  $\tau = 30$  мин и объемном соотношении вода : рапсовое масло, равном 2 : 1. Этиловый эфир олеиновой кислоты требуемого качества получается при достаточно высоких параметрах процесса:  $T = 673$  К,  $P = 30$  МПа,  $\tau = 30$  мин, мольное соотношение спирт : олеиновая кислота = 20 : 1.

**Ключевые слова:** биодизельное топливо, дизельный двигатель, дизель-генератор, гидролиз, этерификация, плотность, кинематическая вязкость, показатель преломления

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10304, <https://rscf.ru/project/23-79-10304/>).

**Для цитирования:** Мазанов С.В., Аетов А.У., Монахов И.И., Соловьёва А.О., Накипов Р.Р. Анализ работы дизельного двигателя и дизель-генератора на чистом дизельном топливе и смеси с биотопливом, получаемым в результате двухстадийного процесса // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 3(82). С. 108–118. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_3\\_108-118](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_3_108-118).

#### 4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

### Analysis of the operation of a diesel engine and a diesel generator using pure diesel fuel and a mixture with biofuels obtained as a result of a two-stage process

Sergei V. Mazanov<sup>1✉</sup>, Almaz U. Aetov<sup>2</sup>, Ivan I. Monakhov<sup>3</sup>,  
Alina O. Solovyova<sup>4</sup>, Ruslan R. Nakipov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> serg989@yandex.ru✉

**Abstract.** The results of an experimental study of the operation of a diesel engine and a diesel generator on petroleum diesel fuel and biofuel taken in a mixture with diesel fuel in a percentage ratio of biodiesel/diesel equal to 20/80 are presented. The composition and physical properties of the resulting biodiesel fuel were evaluated. The values of such indicators as rated power, specific effective fuel consumption and smoke level are given. When analyzing the operation of the power units under study, it was revealed that they have similar parameters in terms of the characteristics under consideration, with a slight decrease in rated power and an increase in specific effective fuel consumption caused by its faster combustion. The process of biofuel production at a batch plant has been studied, which implements a two-stage process consisting of hydrolysis of refined rapeseed oil with distilled water and ethyl alcohol etherification of unsaturated oleic fatty acid, which is the main target product of rapeseed oil hydrolysis, to obtain the corresponding oleic acid ethyl ether, which is an analogue of biofuels. When analyzing the operation of diesel engines running on a mixture, similar characteristics with pure petroleum diesel fuel were revealed with a slight decrease in rated power (up to 8%) and an increase in specific effective fuel consumption (up to 4%). The saving of petroleum diesel fuel, unlike mixed fuel, reaches 4% per 1000 kWh. The highest yield of oleic acid, equal to 94.9%, was obtained at a temperature, pressure, and duration equal to 573 K, 30 MPa, and 30 min, respectively, with a volume ratio of water : rapeseed oil equal to 2 : 1. Oleic acid ethyl ether of the required quality is obtained with sufficiently high process parameters, i.e. temperature, pressure and duration equal to 673 K, 30 MPa, 30 min, with a volume ratio of molar alcohol : oleic acid equal to 20 : 1.

**Keywords:** biodiesel, diesel engine, diesel generator, hydrolysis, etherification, density, kinematic viscosity, refractive index

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-79-10304, <https://rscf.ru/project/23-79-10304/>).

**For citation:** Mazanov S.V., Aetov A.U., Monakhov I.I., Solovyova A.O., Nakipov R.R. Analysis of the operation of a diesel engine and a diesel generator using pure diesel fuel and a mixture with biofuels obtained as a result of a two-stage process. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(3):108-118. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_3\\_108-118](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_3_108-118).

## Введение

Современная мировая тенденция в области топливной энергетики направлена на переход или частичное замещение традиционного нефтяного топлива на возобновляемые источники энергии, что обусловлено прежде всего пониманием необходимости беречь окружающую среду в соответствии с принципами научного направления «Зеленая химия» (*Green Chemistry*), а также отсутствием у большинства стран на планете природных энергоресурсов. В европейских странах, Японии и США большое внимание уделяется биодизельному топливу – возобновляемому виду топлива, которое может быть получено из липидов различных возобновляемых масличных культур (подсолнечник, кукуруза, рапс (если мы имеем в виду РФ), масличная пальма, дерево ши, соя (страны экваториальной полосы) и др.), а также животных жиров и микроводорослей. Кроме того, биотопливо может стать аналогом летнего нефтяного дизельного топлива или добавкой к нефтяному дизельному топливу для улучшения смазывающих характеристик различных двигателей транспортных средств. Как правило, во многих странах в дизельных двигателях биотопливо используют в соотношении биодизель/дизель, равном 20/80. Превышение количества биотоплива в смеси нецелесообразно, так как ухудшаются пусковые свойства двигателя, работающего при низких температурах.

В настоящее время в России потребность в энергии в сельском хозяйстве на 90% восполняется ископаемыми ресурсами – природным газом, углем, нефтью. Замещение как минимум некоторого количества дизельного топлива биодизельным при работе дизельных двигателей или дизель-генераторов положительно скажется на их сроке службы, так как биотопливо имеет более высокие смазывающие характеристики, а уменьшение вредных выбросов положительно скажется на состоянии окружающей среды.

Успешное промышленное производство биодизельного топлива сдерживается определенными сложностями, обусловленными затратным процессом получения растительного масла (закупка семян масличных культур, транспортировка, хранение, извлечение масла). Для выращивания в больших масштабах масличных культур, предназначенных для производства биотоплива, необходимо выделение значительных площадей сельскохозяйственного назначения, использования пестицидов, гербицидов и удобрений, что может негативно сказаться на последующих сельскохозяйственных культурах, предназначенных для использования в пищевых целях.

Существуют и некоторые технические ограничения: вязкость биодизельного топлива выше, чем у нефтяного, поэтому при низких температурах воздуха оно становится менее пригодным. Завышенные значения вязкости обуславливаются свойствами исходного сырья (преимущественно растительного происхождения в виде масел), которое априори имеет высокую вязкость из-за наличия в его составе насыщенных жирных кислот, что приводит к тому, что получаемое топливо может иметь значения вязкости выше, чем регламентировано мировыми стандартами EN 14214 [10] и ASTM D-6751-02 [6]. Топливо с высокой вязкостью образует более крупные капли после инъекции, что может привести к ухудшению его распыления, увеличению отложений в двигателе и износу топливного насоса и элементов форсунок [7].

Для решения основных проблем предлагается проведение двухстадийного процесса получения биодизельного топлива [9], который включает в себя:

- 1) гидролиз растительного масла в среде субкритической воды с преобразованием в свободные жирные кислоты;
- 2) этерификацию свободных жирных кислот в суб- и сверхкритических флюидных условиях до эфиров жирных кислот и воды.

Данная технология позволяет получать эфиры жирных кислот при режимных параметрах, не превышающих  $T = 548\text{--}563\text{ К}$ ,  $P = 10\text{--}11\text{ МПа}$  и при мольных соотношениях спирт/масло = 10 : 1 [5, 9], что существенно ниже значений этих же параметров большинства реализаций одностадийного процесса переэтерификации масел в спиртовой среде ( $T = 543\text{--}623\text{ К}$ ,  $P = 14\text{--}40\text{ МПа}$ , мольное соотношение спирт/масло = 30 : 1 – 42 : 1) [8, 11, 12, 13].

Проведение реакций при достаточно низких параметрах состояния позволяет решить две проблемы: во-первых, при гидролизе, помимо извлечения жирных кислот, появляется возможность дополнительно отделить глицерин, являющийся побочным продуктом реакции переэтерификации; во-вторых, при этерификации не произойдет разложения эфиров ненасыщенных жирных кислот, и получаемое биодизельное топливо будет соответствовать нормам международных стандартов. Кроме того, двухстадийный процесс позволяет сокращать энергозатраты на 25% [9].

Цель данной работы заключалась в проведении анализа работы дизельного двигателя и дизель-генератора на нефтяном дизельном топливе и биотопливе, взятом в смесевом составе с дизельным топливом (в процентном соотношении биодизель (этиловый эфир олеиновой кислоты)/дизель = 20/80), на основе оценки состава и физических свойств получаемого биодизельного топлива.

#### **Условия, материалы и методы**

Определение номинальной мощности, удельного эффективного расхода топлива и дымности осуществлено при работе дизельного двигателя Д-243, устанавливаемого на тракторы МТЗ-80/82 «Беларус», а также для дизель-генератора Elitech ДЭС 8000 ЕМ с помощью разработанного авторами измерительно-регистрающего комплекса.

Используемое биодизельное топливо получено в результате двух последовательных реакций: гидролиза рапсового дезодорированного масла первого сорта и этерификации получаемой олеиновой кислоты (ч, ТУ-2634-144-44493179-11,  $n_D^{25} = 1,4602$ ,  $\rho^{25} = 910,1\text{ кг/м}^3$ ) с 96% спиртом этиловым ( $n_D^{25} = 1,36242$ ,  $\rho^{25} = 797,1\text{ кг/м}^3$ ). Состав рапсового масла был подвержен хроматографическому анализу, который показал присутствие следующих основных жирных кислот (масс): олеиновой кислоты – 67,67%, линолевой – 21,69, пальмитиновой – 6,46, стеариновой – 3,12%.

Для осуществления реакции гидролиза рапсового масла и этерификации олеиновой кислоты в суб- и сверхкритических флюидных условиях реакционной среды использована экспериментальная установка периодического действия [3]. Установка позволяет осуществлять химические реакции при температурах до 800 К и давлениях до 40 МПа.

В качестве оценочного фактора получаемого продукта гидролиза была использована хроматография. Анализ проводился двумя хроматографами: на газовом хроматографе Trace-1310 с масс-спектрометрическим детектором ISQ и на жидкостном хроматографе серии Flexag фирмы PerkinElmer.

Для измерения кинематической вязкости продукта реакции этерификации использован стандартный вискозиметр ВПЖ-2 с диаметром капилляра 0,73 мм (для диапазона получаемых значений от 6 до 30 мм<sup>2</sup>/с) и длиной 216 мм (ГОСТ 10028-81 [1]). Коэффициент кинематической вязкости образцов измерялся не менее 5 раз при температуре 313 К для сравнения с мировыми стандартами и определялся по формуле, приведенной ниже, а потом брался как среднее арифметическое:

$$\nu = K \cdot g \cdot \tau / 9,807,$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, мм<sup>2</sup>/с;

$K$  – постоянная вискозиметра ( $K = 0,03307$ );

$g$  – ускорение свободного падения в месте проведения измерений, м/с<sup>2</sup>;

$\tau$  – время истечения жидкости, с;

9,807 – ускорение свободного падения в месте калибровки прибора, м/с<sup>2</sup>.

Кинематическая вязкость по американскому стандарту ASTM D6751 составляет 1,9–6,0 мм<sup>2</sup>/с [6], а по европейскому стандарту EN 14214 – 3,5–5,0 мм<sup>2</sup>/с при  $T = 313$  К [10].

Плотность измеряли весовым методом при помощи стеклянного пикнометра ПЖ2-10 КШ 7/16 (ГОСТ 22524-77 [2]).

Взвешивание осуществляли на аналитических весах модели ВЛА-200 и электронных весах Metter PM 600. Плотность по Европейскому стандарту EN 14214 составляет 0,86–0,90 г/см<sup>3</sup> при  $T = 288$  К [10].

Для определения показателя преломления использован рефрактометр ИРФ-22.

### Результаты и их обсуждение

#### *Эксплуатационные характеристики полученного топлива*

В таблице 1 приведены значения номинальной мощности, удельного эффективного расхода топлива и дымности при работе дизельных двигателя и генератора на чистом дизельном топливе и смеси биодизель/дизель = 20/80. Анализ проведен при максимальных нагрузках работы дизельных агрегатов без изменения настроек при работе с разными видами топлив.

**Таблица 1. Номинальная мощность, удельный эффективный расход топлива и дымность дизельных агрегатов при работе на разных видах топлива**

Параметр	Двигатель Д-243		Генератор Elitech ДЭС 8000 ЕМ	
	Вид топлива			
	Дизель	Биодизель/дизель (20/80)	Дизель	Биодизель/дизель (20/80)
Номинальная мощность, кВт	59,6	55,3	5,5	5,2
Удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч	218	226	268	276
Дымность, %	83	80	80	78

Данные таблицы 1 свидетельствуют о верности следующего заключения: ввиду того, что в составе биотоплива присутствует высокое количество кислорода, имеет место его более полное и интенсивное окисление, что приводит к снижению показателя дымности, уменьшению образования сажи, а также объясняет более интенсивный удельный эффективный расход топлива. При этом следует отметить, что значения номинальной мощности дизельных агрегатов при сгорании смесового топлива несколько ниже значений при их работе на чистом нефтяном дизтопливе.

При расчете расхода топлива, например на 1000 кВт·ч, расход нефтяного дизельного топлива в отличие от смесового, исходя из данных таблицы 3, уменьшается при работе дизельного двигателя и дизель-генератора соответственно на 3,67 и 2,99%, что свидетельствует о перспективности замещения 20% дизеля на биодизель в плане экономии используемого нефтяного топлива.

Чтобы качественные характеристики смесового топлива, используемого при работе дизельного двигателя и дизель-генератора, не уступали чистому дизельному топливу, необходимо проведение двухстадийного процесса получения биотоплива, который включает в себя гидролиз растительного масла и этерификацию свободных жирных кислот. Ниже рассмотрим данные реакции подробнее.

#### *Гидролиз рапсового масла*

Экспериментальное исследование реакции гидролиза рапсового масла проведено в температурном диапазоне  $T = 573\text{--}653\text{ K}$ , при давлении  $P = 30\text{ МПа}$ , продолжительности  $\tau = 20\text{--}40\text{ мин}$ , при объемных соотношениях вода : рапсовое масло – от 1 : 1 до 2 : 1. Результаты хроматографического анализа представлены в таблице 2, в которой образцы имеют следующие буквенные обозначения.

Образец А:  $T = 653\text{ K}$ , объемное соотношение вода : рапсовое масло = 1 : 1.

Образец Б:  $T = 623\text{ K}$ , объемное соотношение вода : рапсовое масло = 2 : 1.

Образец В:  $T = 653\text{ K}$ , объемное соотношение вода : рапсовое масло = 2 : 1.

Образец Г:  $T = 623\text{ K}$ , объемное соотношение вода : рапсовое масло = 1 : 1.

Образец Д:  $T = 573\text{ K}$ , объемное соотношение вода : рапсовое масло = 2 : 1.

**Таблица 2. Результаты хроматографии продукта реакции гидролиза рапсового масла, полученные при  $P = 30\text{ МПа}$  и длительности  $\tau = 30\text{ мин}$**

Время выхода, мин	Наименование вещества	Содержание в образце, % масс.				
		Образец				
		А	Б	В	Г	Д
27,11	Этиловый эфир пальмитиновой кислоты	11,6	9,7	15,0	0,77	0,58
30,08	Этиловый эфир цис, цис-9,12-октадекадиеновой кислоты	9,3	2,4	4,3	13,14	3,02
30,94	Олеиновая кислота	49,9	52,0	48,8	62,06	49,15
31,09	Олеиновая кислота	16,4	28,3	21,4	20,5	45,75
30,99	Этиловый эфир стеариновой кислоты	6,3	5,2	3,4	1,78	0,43
35,92	Цис-13-эйкозеновая кислота	2,5	0,8	1,8	–	–
36,71	Этиловый эфир эйкозапентаеновой кислоты	1,6	0,2	1,4	–	–
38,89	Этиловый эфир стеариновой кислоты, моно-9-эпоксидная смола	0,7	0,5	–	–	–
39,92	Этиловый эфир эйкозапентаеновой кислоты	–	0,8	–	–	–
41,10	Этиловый эфир цис-13-докозеновой кислоты	0,4	–	3,2	–	–
42,12	Этиловый эфир цис-13-докозеновой кислоты	0,6	–	0,6	–	–
–	Сумма компонентов с массовым содержанием меньше 0,1%	0,1	0,1	0,1	1,75	1,07

По результатам анализа основным продуктом гидролиза рапсового масла является олеиновая кислота, присутствующая в диапазоне значений 66,3–94,9 % масс.

На основании полученных результатов (табл. 2) построены зависимости содержания олеиновой кислоты в общем количестве жирных кислот в образце от температуры проведения процесса при постоянном давлении ( $P = 30$  МПа) и продолжительности реакции ( $\tau = 30$  мин) при объемном соотношении вода : рапсовое масло, равном 1 : 1 (рис. 1) и при объемном соотношении вода : рапсовое масло, равном 2 : 1 (рис. 2).

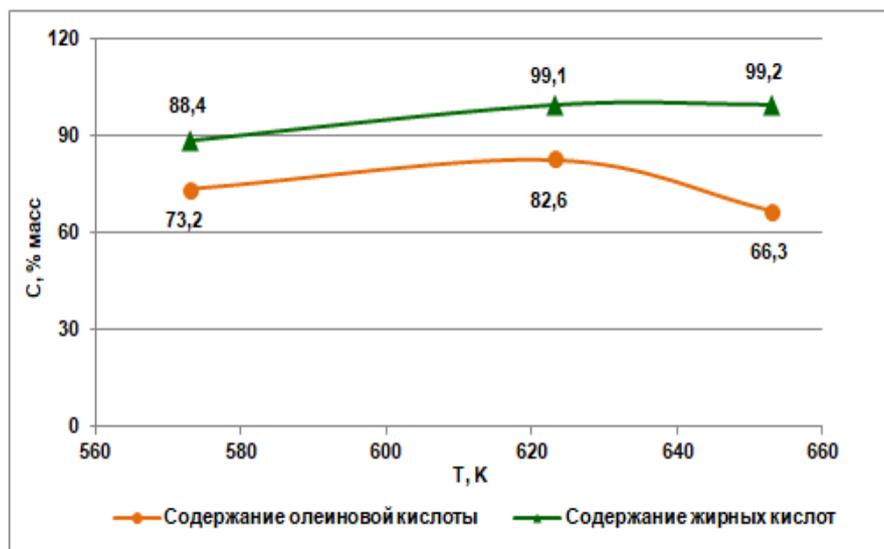


Рис. 1. Зависимость содержания олеиновой кислоты от температуры проведения процесса в образце продукта реакции гидролиза при объемном соотношении вода : рапсовое масло, равном 1 : 1

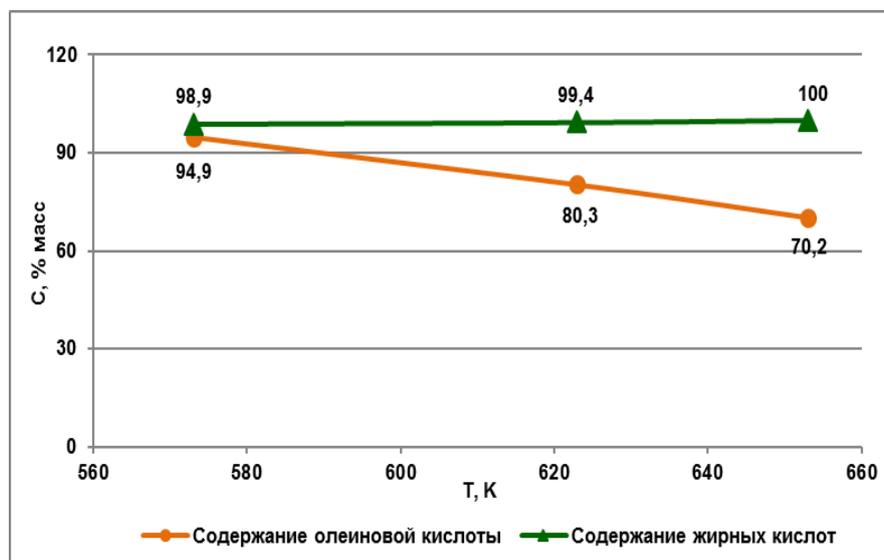


Рис. 2. Зависимость содержания олеиновой кислоты от температуры проведения процесса в образце продукта реакции при объемном соотношении вода : масло, равном 2 : 1

Из представленных графиков (рис. 1 и 2) видно, что при более высоких температурах проведения реакции наблюдается уменьшение содержания олеиновой кислоты, вызванное ее термическим разложением и образованием соединений, отвечающих диапозону  $C_6 - C_{12}$  [14].

На рисунке 3 представлена кинетика изменения содержания олеиновой кислоты в продукте реакции гидролиза при минимальной температуре проводимых экспериментов ( $T = 573$  К) для объемных соотношений, равных 1 : 1 и 2 : 1.

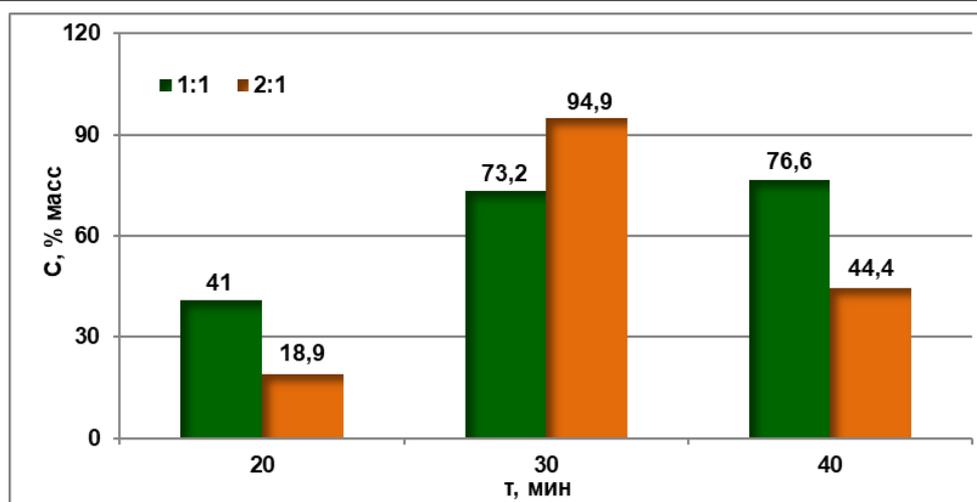


Рис. 3. Кинетика изменения содержания олеиновой кислоты в продукте реакции гидролиза, осуществленной при  $T = 573$  К и объемных соотношениях реагентов, равных 1 : 1 и 2 : 1

Как следует из данных, представленных на рисунке 3, длительность реакции свыше  $\tau = 30$  мин не приводит к увеличению концентрации целевого продукта реакции.

Зависимость концентрации олеиновой кислоты в продукте реакции гидролиза рапсового масла от температуры реакции при оптимальной длительности реакции  $\tau = 30$  мин представлена на рисунке 4.

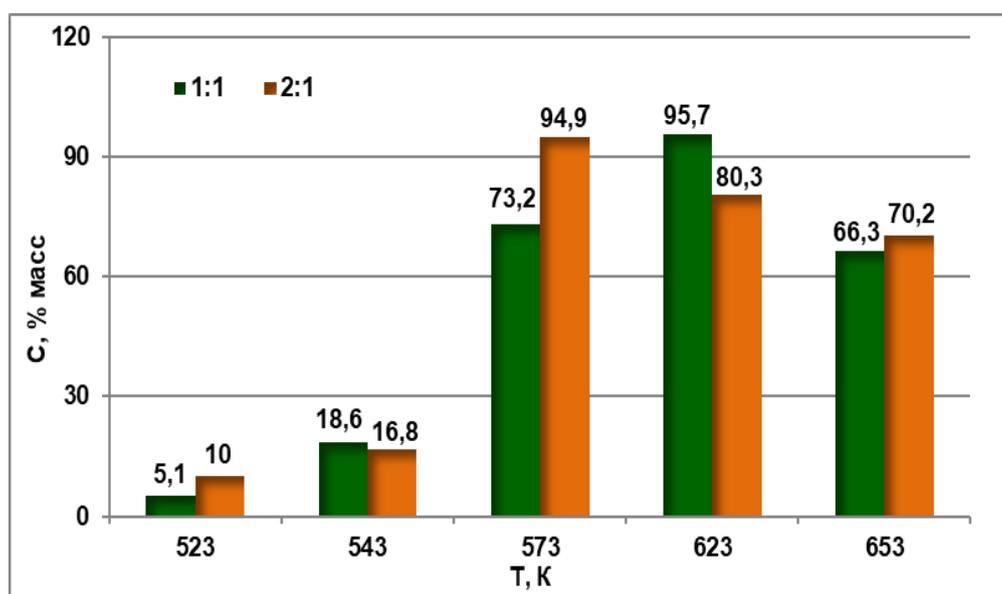


Рис. 4. Содержание олеиновой кислоты в продукте реакции гидролиза как функция температуры при объемных соотношениях реагентов, равных 1 : 1 и 2 : 1

#### *Этерификация олеиновой кислоты*

Экспериментальное исследование этерификации олеиновой кислоты этиловым спиртом проведено при мольных соотношениях этиловый спирт : олеиновая кислота, равных 20 : 1 и 30 : 1, в диапазоне температур  $T = 573\text{--}673$  К при давлении  $P = 30$  МПа и длительности реакции 10–30 мин.

Измеренные значения кинематической вязкости ( $T = 313$  К,  $P = 0,1$  МПа) продукта реакции этерификации представлены на рисунке 5.

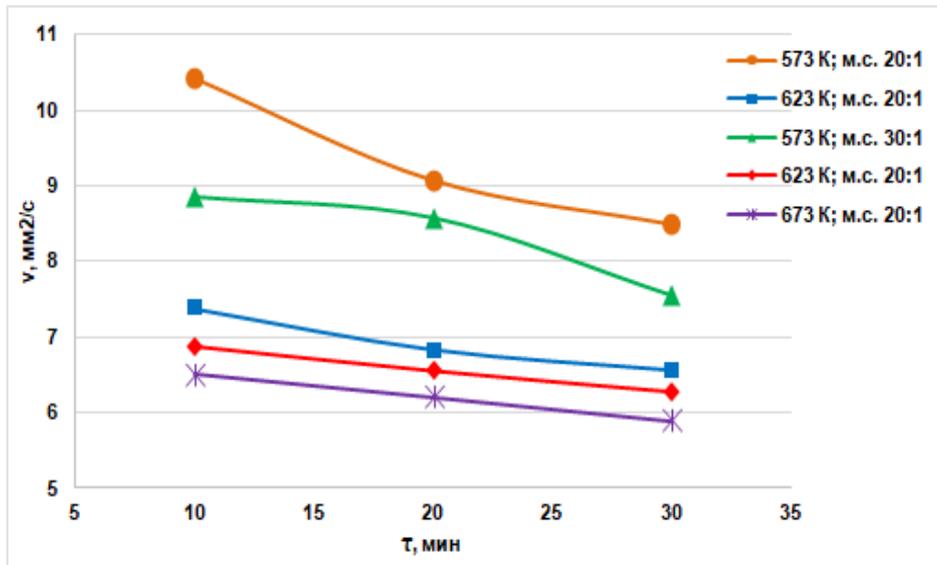


Рис. 5. Кинетика изменения кинематической вязкости образцов реакции этерификации при  $P = 30$  МПа, различных температурах и мольных соотношениях этиловый спирт : олеиновая кислота

Полученные значения (рис. 5) говорят о том, что с увеличением температуры, длительности реакции и мольного соотношения исходных компонентов кинематическая вязкость образцов падает. Только образец, полученный при  $T = 673$  К, мольном соотношении 20 : 1 и длительности  $\tau = 30$  мин, соответствует стандарту ASTM D6751 по значению кинематической вязкости [6].

Результаты измерения плотности и показателя преломления образцов реакции этерификации приведены в таблице 3, фрагмент измерений при  $T = 298\text{--}323$  К и  $P = 0,1$  МПа – на рисунке 6.

Значения плотности при  $T = 288$  К,  $P = 0,1$  МПа были аппроксимированы и экстраполированы исходя из имеющихся экспериментальных данных для сравнения со стандартом EN 14214 [10]. Также в таблице 2 приведены значения показателя преломления образцов, измеренные при  $T = 298$  К и  $P = 0,1$  МПа.

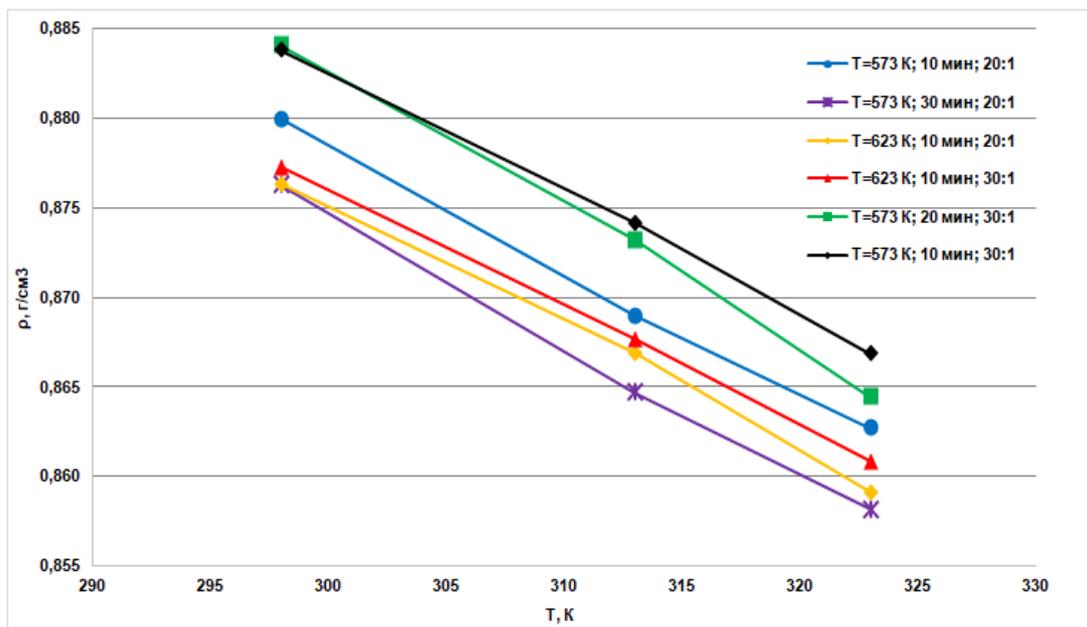


Рис. 6. Температурная зависимость изменения плотности образцов этерификации, полученных при  $T = 573\text{--}623$  К, длительности  $\tau = 10\text{--}30$  мин и мольных соотношениях 20 : 1–30 : 1

Таблица 3. Значения плотности и показателя преломления образцов реакции этерификации

№ образца	Температура опыта, К	τ, мин	Мольное соотношение спирт : кислота	T, К	ρ, г/см <sup>3</sup>	n <sub>D</sub> <sup>25</sup>
1	573	10	20 : 1	288	0,8870	1,4550
				298	0,8799	
				313	0,8690	
				323	0,8627	
2		20		288	0,8850	1,4562
				298	0,8782	
				313	0,8679	
				323	0,8607	
3		30		288	0,8840	1,4557
				298	0,8762	
				313	0,8647	
				323	0,8582	
4	623	10	20 : 1	288	0,8830	1,4544
				298	0,8763	
				313	0,8669	
				323	0,8591	
5		20		288	0,8870	1,4539
				298	0,8783	
				313	0,8650	
				323	0,8580	
6		30		288	0,8840	1,4532
				298	0,8766	
				313	0,8654	
				323	0,8583	
7	573	10	30 : 1	288	0,8740	1,4563
				298	0,8838	
				313	0,8741	
				323	0,8668	
8		20		288	0,8910	1,4557
				298	0,8840	
				313	0,8732	
				323	0,8644	
9		30		288	0,8830	1,4551
				298	0,8773	
				313	0,8688	
				323	0,8628	
10	623	10	30 : 1	288	0,8840	1,4545
				298	0,8773	
				313	0,8676	
				323	0,8608	
11		20		288	0,8830	1,4538
				298	0,8760	
				313	0,8658	
				323	0,8589	
12		30		288	0,8820	1,4532
				298	0,8751	
				313	0,8654	
				323	0,8573	

Результаты по плотности продукта реакции расположены в схожих между собой значениях в пределах погрешности измерения. Результаты экстраполяции значений плотности при  $T = 288$  К находятся в пределах  $0,874\text{--}0,891$  г/см<sup>3</sup>, что соответствует нормам Европейского стандарта EN 14214 [10].

Показатели преломления эфира олеиновой кислоты соответствуют диапазону  $1,4482\text{--}1,4570$  [4]. Все полученные значения измерений продукта реакции этерификации попадают в данный интервал.

### **Выводы**

При анализе работы дизельных двигателей, работающих на смеси, состоящей на 20% из биодизеля (этилового эфира олеиновой кислоты) и 80% дизтоплива, выявлены схожие характеристики с чистым нефтяным дизтопливом при незначительном снижении номинальной мощности (до 8%) и увеличении удельного эффективного расхода топлива (до 4%). Экономия нефтяного дизельного топлива в отличие от смесового на 1000 кВт·ч достигает 4%.

Наибольший выход олеиновой кислоты, равный 94,9%, получен при температуре  $T = 573$  К, давлении  $P = 30$  МПа, длительности  $\tau = 30$  мин и объемном соотношении вода : рапсовое масло, равном 2 : 1.

Этиловый эфир олеиновой кислоты требуемого качества получается при достаточно высоких параметрах процесса:  $T = 673$  К,  $P = 30$  МПа,  $\tau = 30$  мин, мольное соотношение спирт : олеиновая кислота = 20 : 1.

---

---

### **Список источников**

1. ГОСТ 10028-81. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2005. 21 с.
2. ГОСТ 22524-77. Пикнометры стеклянные. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1997. 21 с.
3. Мазанов С.В., Куагу Ж.-М., Ункпатэн Д.Д. и др. Переэтерификация масла дерева Ши (Карите) и пальмового масла в сверхкритическом этаноле // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2022. Т. 17, № 1. С. 76–88. DOI: 10.34984/SCFTP.2022.17.1.006.
4. Синтезы органических препаратов. Сборник 4; пер. с англ. А.Ф. Платэ. Москва: Изд-во иностранной литературы, 1953. 657 с.
5. Akkarawatkhosith N., Bangjang T., Kaewchada A. et al. Biodiesel production from rice bran oil fatty acid distillate via supercritical hydrolysis-esterification-transesterification in a microreactor // Energy Reports. 2023. Vol. 9. Pp. 5299–5305. DOI: 10.2139/ssrn.4191092.
6. ASTM D6751 Standard Specification for Biodiesel Fuel Blendstock (B100) for Middle Distillate Fuels [Электронный ресурс]. URL: <https://www.astm.org/standards/d6751> (дата обращения: 20.11.2023).
7. Boudy F., Seers P. Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50. Pp. 2905–2912. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.07.005.
8. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50. Pp. 923–927. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2008.12.023.
9. D'Ippolito S.A., Yori J.C., Iturria M.E. et al. Analysis of a two-step, noncatalytic, supercritical biodiesel production process with heat re-recovery // Energy Fuels. 2007. Vol. 21. Pp. 339–346. DOI: 10.31593/ijeat.803959.
10. EN 14214:2012 (+A2:2019). Liquid petroleum products – Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/0a2c5899-c226-479c-b277-5322cc71395d/en-14214-2012a2-2019> (дата обращения: 20.11.2023).
11. Kiss F.E., Micic R.D., Tomic M.D. et al. Supercritical transesterification: Impact of different types of alcohol on biodiesel yield and LCA results // Journal of Supercritical Fluids. 2014. Vol. 86. Pp. 23–32. DOI: 10.1016/j.supflu.2013.11.015.
12. Kusdiana D., Saka S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment // Bioresource Technology. 2004. Vol. 91. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00201-3.
13. Saka S., Kusdiana D. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol // Fuel. 2001. Vol. 80. Pp. 225–231. DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00083-1.
14. Shin H.-Y., Lim S.-M., Bae S.-Y. et al. Thermal decomposition and stability of fatty acid methyl esters in supercritical methanol // Journal of analytical and applied pyrolysis. 2011. Vol. 92. Pp. 332–338. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.07.003.

## References

1. GOST 10028-81. Glass capillary viscosimeters. Specifications. Moscow: Standartinform Publishers; 2005. 21 p. (In Russ.).
2. GOST 22524-77. Glass density bottles. Specifications. Moscow: Standartinform Publishers; 1997. 21 p. (In Russ.).
3. Mazanov S.V., Kouagou Zh.-M., Hounkpatin D.D. et al. The transesterification of Shea (Karite) and palm oils in supercritical ethanol. *Supercritical fluids: theory and practice*. 2022;17(1):76-88. DOI:10.34984/SCFTP.2022.17.1.006. (In Russ.).
4. Syntheses of organic preparations. Collection 4; translated from English by A.F. Plate. Moscow: Foreign Literature Publishing House; 1953. 649 p. (In Russ.).
5. Akkarawatkhosith N., Bangiang T., Kaewchada A. et al. Biodiesel production from rice bran oil fatty acid distillate via supercritical hydrolysis-esterification-transesterification in a microreactor. *Energy Reports*. 2023;9:5299-5305. DOI: 10.2139/ssrn.4191092.
6. ASTM D6751 Standard Specification for Biodiesel Fuel Blendstock (B100) for Middle Distillate Fuels. URL: <https://www.astm.org/standards/d6751>.
7. Boudy F., Seers P. Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system. *Energy Conversion and Management*. 2009;50:2905-2912. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.07.005.
8. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*. 2009;50:923-927. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2008.12.023.
9. D'Ippolito S.A., Yori J.C., Iturria M.E. et al. Analysis of a two-step, noncatalytic, supercritical biodiesel production process with heat re-recovery. *Energy Fuels*. 2007;21:339-346. DOI: 10.31593/ijeat.803959.
10. EN 14214:2012 (+A2:2019). Liquid petroleum products – Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/0a2c5899-c226-479c-b277-5322cc71395d/en-14214-2012a2-2019>.
11. Kiss F.E., Micic R.D., Tomic M.D. et al. Supercritical transesterification: Impact of different types of alcoholon biodiesel yield and LCA results. *Journal of Supercritical Fluids*. 2014;86:23-32. DOI: 10.1016/j.supflu.2013.11.015.
12. Kusdiana D., Saka S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*. 2004;91:289-295. DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00201-3.
13. Saka S., Kusdiana D. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*. 2001;80:225-231. DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00083-1.
14. Shin H.-Y., Lim S.-M., Bae S.-Y. et al. Thermal decomposition and stability of fatty acid methyl esters in supercritical methanol. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2011;92:332-338. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.07.003.

## Информация об авторах

С.В. Мазанов – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [serg989@yandex.ru](mailto:serg989@yandex.ru).

А.У. Аетов – заведующий лабораторией кафедры теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [aetovalmaz@mail.ru](mailto:aetovalmaz@mail.ru).

И.И. Монахов – аспирант кафедры теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [monahov64@gmail.com](mailto:monahov64@gmail.com).

А.О. Соловьёва – аспирант кафедры теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [alinasoloveva161@yandex.ru](mailto:alinasoloveva161@yandex.ru).

Р.Р. Накипов – заведующий комплексной лабораторией сверхкритических флюидных технологий ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», [nakip88@yandex.ru](mailto:nakip88@yandex.ru).

## Information about the authors

S.V. Mazanov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan National Research Technological University, [serg989@yandex.ru](mailto:serg989@yandex.ru).

A.U. Aetov, Head of the Laboratory of the Dept. of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan National Research Technological University, [aetovalmaz@mail.ru](mailto:aetovalmaz@mail.ru).

I.I. Monakhov, Postgraduate Student, the Dept. of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan National Research Technological University, [monahov64@gmail.com](mailto:monahov64@gmail.com).

A.O. Solovyova, Postgraduate Student, the Dept. of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan National Research Technological University, [alinasoloveva161@yandex.ru](mailto:alinasoloveva161@yandex.ru).

R.R. Nakipov, Head of the Integration Laboratory of the Supercritical Fluid Technologies, Kazan National Research Technological University, [nakip88@yandex.ru](mailto:nakip88@yandex.ru).

**Статья поступила в редакцию 18.01.2024; одобрена после рецензирования 20.06.2024; принята к публикации 08.07.2024.**

**The article was submitted 18.01.2024; approved after reviewing 20.06.2024; accepted for publication 08.07.2024.**

© Мазанов С.В., Аетов А.У., Монахов И.И., Соловьёва А.О., Накипов Р.Р., 2024