

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.436.2:621.4-1/-3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

Использование арахисового и пальмового масел в качестве топлива дизельных двигателей

А.В. Бижаев¹, В.Л. Чумаков^{2✉}, С.М. Гайдар³, А.М. Пикина⁴, А.В. Капустин⁵^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия⁵ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; г. Великий Новгород, Россия¹ a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>² valery.chumakov@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>³ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>⁵ kav8kapustin@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>

Аннотация. Повышение экологических требований к тракторным дизелям и рост цен нефтяных топлив вызывают необходимость поиска альтернативных топлив, способных частично или полностью заменить традиционные, – например, растительных масел. Арахисовое и пальмовое масла являются наиболее конкурентоспособными и доступными. Исследования проведены с целью оценки возможности использования арахисового и пальмового масел в качестве добавок к дизельному топливу тракторных двигателей. Экспериментальные исследования проводились на тракторном двигателе воздушного охлаждения Д-120 на смесевых топливах, по составу приближенных по физико-химическим свойствам к базовому дизельному топливу. В первой серии опытов смесевое топливо содержало по объему 40% арахисового масла, 30% дизельного топлива и 30% керосина. Во второй серии опытов дизельное топливо смешивалось с 10 и 20% пальмового масла. Анализировали влияние масел на расход топлива, удельный эффективный расход топлива и концентрацию токсичных компонентов отработавших газов. В качестве эталона использовали чистое дизельное топливо. Экспериментально установлено, что добавка 40% арахисового масла приводит к увеличению расхода топлива на 8...10% и концентрации продуктов неполного сгорания (углеводородов – на 25...32%, СО – в 1,55 раза). Концентрация оксидов азота и сажи снижается на 10...25% в зависимости от режима. При добавлении 10% пальмового масла расход топлива увеличивается на 0,1...0,2 кг/ч, при 20% – на 0,2...0,3 кг/ч. На низких и средних нагрузках 20%-ная добавка масла привела к снижению содержания углеводородов на 42% и увеличению СО на 37...49%. При высоких нагрузках снизилось содержание углеводородов на 17% и оксидов азота на 21% (4550 ppm), концентрация СО увеличилась в 6-8 раз (до 65 ppm). Содержание сажи в отработавших газах при 10%-ной добавке снижается на 20...30%, при 20%-ной – на 35...45%. В исследованиях доказано, что добавки к топливу – арахисовое и пальмовое масла – можно применять на дизельном двигателе, но необходима корректировка вязкости и периода задержки воспламенения топлива.

Ключевые слова: арахисовое масло, пальмовое масло, дизельное топливо, смесевое топливо, возобновляемые источники энергии, добавки к топливу, расход топлива

Для цитирования: Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Гайдар С.М., Пикина А.М., Капустин А.В. Использование арахисового и пальмового масел в качестве топлива дизельных двигателей // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 54-62. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

ORIGINAL ARTICLE

Prospects of adding peanut and palm oils to diesel fuel for tractor engines

A.V. Bizhaev¹, V.L. Chumakov²✉, S.M. Gaydar³, A.M. Pikina⁴, A.V. Kapustin⁵^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia⁵ Yaroslavl the Wise Novgorod State University; Veliky Novgorod, Russia¹ a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>² valery.chumakov@gmail.com ✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>³ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>⁵ kav8kapustin@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>

Abstract. Increased environmental requirements for tractor diesel engines and rising prices for petroleum fuels urge the search for alternative fuels to replace traditional ones, partially or completely. Peanut and palm oils are the most competitive and affordable solutions. The authors conducted the study to assess the possibility of using peanut and palm oils as additives to diesel fuel in tractor engines. Experimental studies were conducted on a D-120 air-cooled tractor engine using mixed fuels with a composition, the physicochemical properties of which were similar to the base diesel fuel. In the first series of experiments, the mixed fuel contained 40% peanut oil, 30% diesel fuel, and 30% kerosene by volume. In the second series of experiments, diesel fuel was mixed with 10 and 20% palm oil. The authors analyzed the effect of oils on fuel consumption, specific effective fuel consumption, and the concentration of toxic components in exhaust gases using pure diesel fuel as a standard. It has been experimentally established that the addition of 40% peanut oil leads to an increase in fuel consumption of 8 to 10% and the concentration of incomplete combustion products (hydrocarbons increases by 25 to 32%, CO – in 1.55 times). The concentration of nitrogen oxides and soot decreases by 10 to 25% depending on the mode. With the addition of 10% palm oil, fuel consumption increases by 0.1 to 0.2 kg/h, with 20% – by 0.2 to 0.3 kg/h. At low and medium loads, a 20% oil addition led to a decrease in the hydrocarbon content of 42% and an increase in CO of 37 to 49%. At high loads, the content of hydrocarbons decreased by 17% and nitrogen oxides by 21% (4550 ppm), the concentration of CO increased in 6-8 times (up to 65 ppm). The soot content in exhaust gases with a 10% additive is reduced by 20 to 30%, with 20% – by 35 to 45%. The study proved that fuel additives – peanut and palm oils – can be used in a diesel engine, but it is necessary to adjust the viscosity and ignition delay period of the fuel.

Keywords: peanut oil, palm oil, diesel fuel, mixed fuel, renewable energy sources, fuel additives, fuel consumption

For citation: Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Gaydar S.M., Pikina A.M., Kapustin A.V. Prospects of adding peanut and palm oils to diesel fuel for tractor engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):54-62 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

Введение

Современные экологические требования, предъявляемые к автотракторной технике в АПК, требуют снижения токсичности отработавших газов автотракторных двигателей, так как этот фактор негативно влияет на сельскохозяйственную продукцию и во многих странах ограничивается на законодательном уровне [1]. Рост стоимости дизельного топлива и ограничение нефтяных запасов также являются важными факторами для поиска решений этих проблем.

Существует большое количество способов снижения количества токсичных выбросов отработавших газов тракторного двигателя [2]. Одним из таких методов является использование альтернативных видов топлива и присадок к стандартному дизельному топливу, который применялся в ряде

исследований¹ [3]. В качестве альтернативных видов топлива, относящихся к классу возобновляемых источников энергии, могут использоваться масла, эфиры, спирт [4] и газообразные виды топлива, способные снизить токсичность отработавших газов [5]. Применение альтернативных топлив растительного происхождения обеспечивает необходимые требования к протеканию процессов смесеобразования и сгорания, а также удовлетворительную работу двигателя.

Анализ объемов производства масел растительного происхождения показал наибольшие темпы производства пальмового и соевого масел [6], что дает возможность их использования в качестве топлива для дизелей.

¹ Шкаликова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: Монография. М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. 64 с.

Для работы дизельного двигателя можно использовать масло не только в чистом виде, но и в виде добавок к дизельному топливу в определенных пропорциях. Использование масел в чистом виде является рациональным в регионах возделывания масличных культур. В Китае, Индии, Нигерии и других странах Африки можно использовать арахисовое масло [7], в Малайзии и Индонезии – пальмовое. Арахисовое масло в отличие от пальмового менее распространено в качестве альтернативного вида топлива, однако при сравнительно низкой цене в странах-производителях актуальность его использования оправдана.

Арахисовое и пальмовое масла в отличие от дизельного топлива в своем составе содержат больше атомов кислорода, что повышает полноту их сгорания даже при худшем смесеобразовании.

Повышенная вязкость растительных масел ухудшает качество смесеобразования в топливной струе, а низкое цетановое число смеси приводит к задержке воспламенения смеси и ухудшению тепловыделения, что сопровождается ухудшением эффективных показателей, повышением содержания продуктов неполного сгорания и снижением концентрации сажи и оксидов азота [8, 9]. Арахисовое масло способно вызвать смолистые отложения на распылителе

форсунок, но при его использовании в качестве добавки к дизельному топливу и керосину этот эффект снижается [10]. Для коррекции вязкости или периода задержки воспламенения можно добавлять в состав растительных масел керосин² и перекись водорода [11]. Введение добавок позволяет избежать дополнительных регулировок топливной аппаратуры.

Использование пальмового масла в качестве топлива в регионах с умеренным климатом является проблематичным в связи с переходом его в твердое агрегатное состояние при пониженных температурах. Подогрев топлива до его подачи в топливную аппаратуру, предварительная его очистка или использование специальных присадок позволяют изменить вязкость топлива [12].

Цель исследований: оценка возможности использования арахисового и пальмового масел в качестве добавок к дизельному топливу тракторных двигателей.

Материалы и методы

Растительные масла, используемые в качестве топлива, имеют схожую тенденцию изменения характеристик работы дизелей [13, 14]. Проведенный анализ справочных и исследовательских данных по свойствам и параметрам арахисового масла (табл. 1)

Таблица 1

Основные характеристики некоторых видов топлива

Table 1

Main characteristics of some fuels

Физико-химические свойства <i>Physical and chemical properties</i>	Тип топлива / Fuel type				
	Дизельное топливо (ДТ) <i>Diesel fuel (DF)</i>	Арахисовое масло (АМ) <i>Peanut oil (PO)</i>	АМ+ДТ 50/50 <i>PO+DT 50/50</i>	Осветительный керосин (ОК) <i>Illuminating kerosene (IK)</i>	АМ+ДТ+ОК (40/30/30) <i>PO+DF+IK (40/30/30)</i>
Плотность при 15°C, кг/м ³ / <i>Density at 15°C, kg/m³</i>	832,4	917,3	877,7	810,5	859,8
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре <i>Kinematic viscosity, mm²/s, at temperature:</i>					
20°C	8,10	78,0	–9,27	1,82	7,90
40°C	5,75	12,3	4,87	1,34	5,61
100°C	2,20	9,36		0,71	2,13
Массовое содержание, % / <i>Mass content, %</i>					
С	86,6	78,0	82,1	85,8	82,9
Н	13,4	12,3	12,8	14,2	13,2
О	0,4	9,36	4,98	0,2	3,75
Теплота сгорания, кДж/кг / <i>Heat of combustion, kJ/kg</i>					
низшая / <i>lowest</i>	42967	37023	39829	42900	40569,3
высшая / <i>highest</i>	45776	39638	42558	43100	42518
Цетановое число / <i>Cetane number</i>	48-51	36,6	–	38	–
Температура помутнения, °C / <i>Cloud point, °C</i>	–22	3,3	–	–15	–
Розничная цена в РФ, руб/л / <i>Retail price in Russia, rub/l</i>	62	700*	380	110	330

*По международному биржевому курсу на ноябрь 2023 г. цена на арахисовое масло составила 140 руб/л.

² Савельев Г.С. Технологии и технические средства адаптации автотракторной техники к работе на альтернативных видах топлива: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ГНУ ВИМ, 2010. 315 с. EDN: QFLPBV.

выявил его схожесть с другими растительными маслами и возможность использования в качестве моторного топлива².

При подаче арахисового масла в цилиндры ДВС необходимо учитывать влияние вязкости на процесс топливоподачи и режим работы двигателя. Поэтому для коррекции вязкости арахисового масла использовали в качестве добавки бытовой осветительный керосин (ОК) марки КО-25 (ТУ 38.401-58-10-01). Его вязкость ниже арахисового масла в 2,25 раза при температуре 20°C и в 1,55 раза – при 100°C.

Вязкость пальмового масла меньше арахисового, однако температура его помутнения (20°C) значительно ниже, чем у ДТ, и на 16,7°C выше, чем у арахисового масла [15] (табл. 2).

Экспериментальные исследования проводились на тракторном двигателе воздушного охлаждения Д-120 на смесевых топливах, по составу приближенных по физико-химическим свойствам к базовому дизельному топливу.

В первой серии опытов смесевое топливо содержало по объему 40% арахисового масла (АМ), 30% дизельного топлива (ДТ) и 30% осветительного керосина (ОК) в качестве стабилизатора вязкости. Плотность такого состава практически не отличается от плотности дизельного топлива и составляет порядка 850 кг/м³ при температуре 15°C, низшая теплота сгорания соответствует 40569,3 кДж/кг.

Во второй серии экспериментов смесевое топливо содержало ДТ и пальмовое масло в количестве 10 и 20%.

Эксперименты с добавками арахисового (АМ) и пальмового масел (ПМ) проводились в разные дни

при различных условиях. Для объективной оценки результатов получены также характеристики на чистом дизельном топливе (ДТ).

Результаты и их обсуждение

В двух сериях опытов проведена оценка токсических и экономических показателей двигателя Д-120. Нагрузочные характеристики двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1800 мин⁻¹ представлены на рисунках 1-6.

В ходе первого эксперимента на смесевом топливе (ДТ 30% + АМ 40% + ОК 30%) получены значения содержания продуктов неполного сгорания в отработавших газах – углеводородов (СН) и монооксида углерода (СО). Установлено, что практически во всем диапазоне изменения нагрузки добавка 40% АМ вызывает рост продуктов неполного сгорания на 20...30% (рис. 1). Отмечено некоторое снижение концентрации углеводородов в отработавших газах до 38 ppm при нагрузке 14 кВт, что сопоставимо с их содержанием при работе на чистом ДТ.

При работе на смесевом топливе с 40%-ной долей арахисового масла концентрация твердых частиц (С) в отработавших газах – практически как у чистого дизельного топлива во всем диапазоне нагрузки и имеет монотонный рост в пределах 0,7...2,5 ед. бош. Содержание оксидов азота (NO_x) снижается на 15...25% в зависимости от нагрузки (рис. 2).

Опыты проводились без корректировки регулировок топливной аппаратуры. Несмотря на введение добавки 30% керосина (для доведения вязкости смесевое топлива до уровня дизельного), часовой расход топлива увеличился на 10...15% (рис. 3).

Таблица 2

Сравнение параметров пальмового масла и дизельного топлива

Table 2

Comparison of palm oil and diesel fuel parameters

Параметр Parameter	Пальмовое масло (ПМ) Palm oil	Дизельное топливо (ДТ) Diesel fuel
Плотность при 20°C, кг/м ³ / Density at 20°C, kg/m ³	918	830
Вязкость при 100°C, мм ² /с / Viscosity at 100°C, mm ² /sec	8,6	2,2
Теплотворная способность, МДж/кг / Calorific value, MJ/kg	37,1	42,5
Содержание кислорода, % / Oxygen content, %	11,4	0,4
Температура помутнения, °C / Turbidity temperature, °C	20	-22
Цетановое число / Cetane number	51	48-51
Розничная цена в РФ, руб/л / Retail price in Russia, rubles/liter	500*	62

*По международному биржевому курсу на ноябрь 2023 г. цена на пальмовое масло составила 70 руб/л.

³ О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение: Пер. с англ. 2-го изд. В.Д. Широкова и др. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.

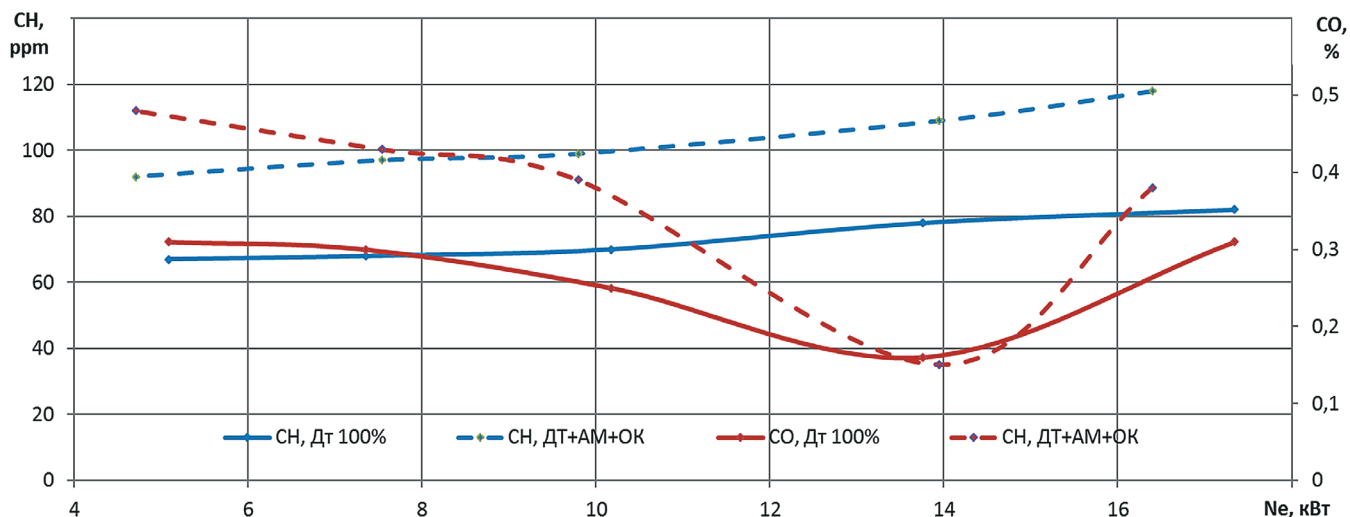


Рис. 1. Концентрация CH и CO при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой арахисового масла

Fig. 1. Concentration of CH and CO when using pure diesel fuel and a blend with peanut oil addition

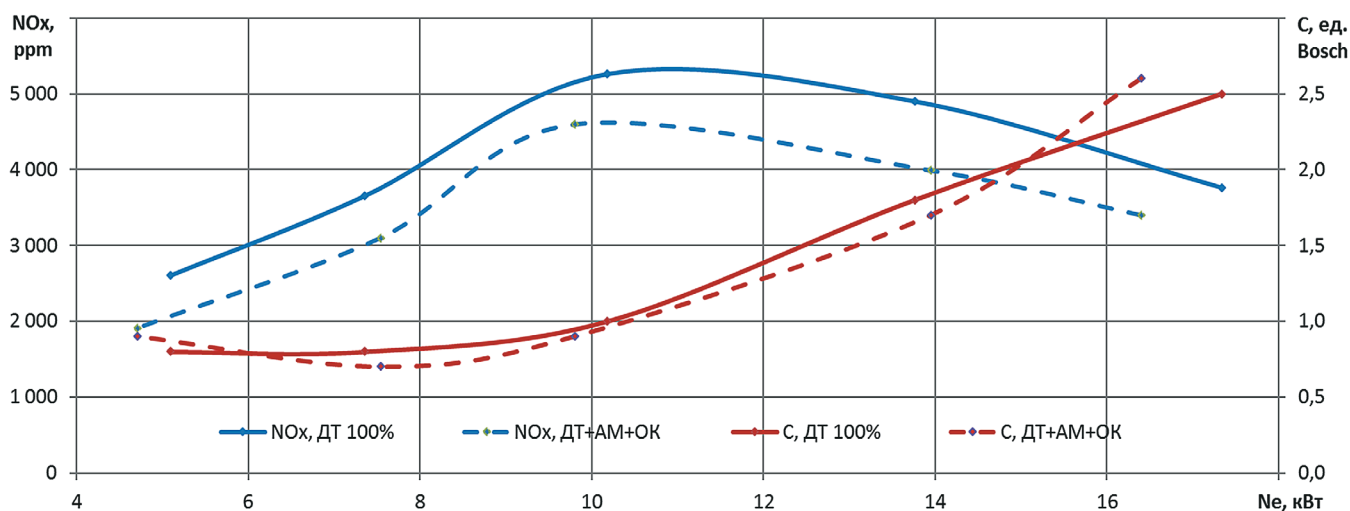


Рис. 2. Концентрация NOx и C при работе на дизельном топливе и с добавкой арахисового масла

Fig. 2. Concentration of NOx and C when running on diesel fuel and a blend with peanut oil addition

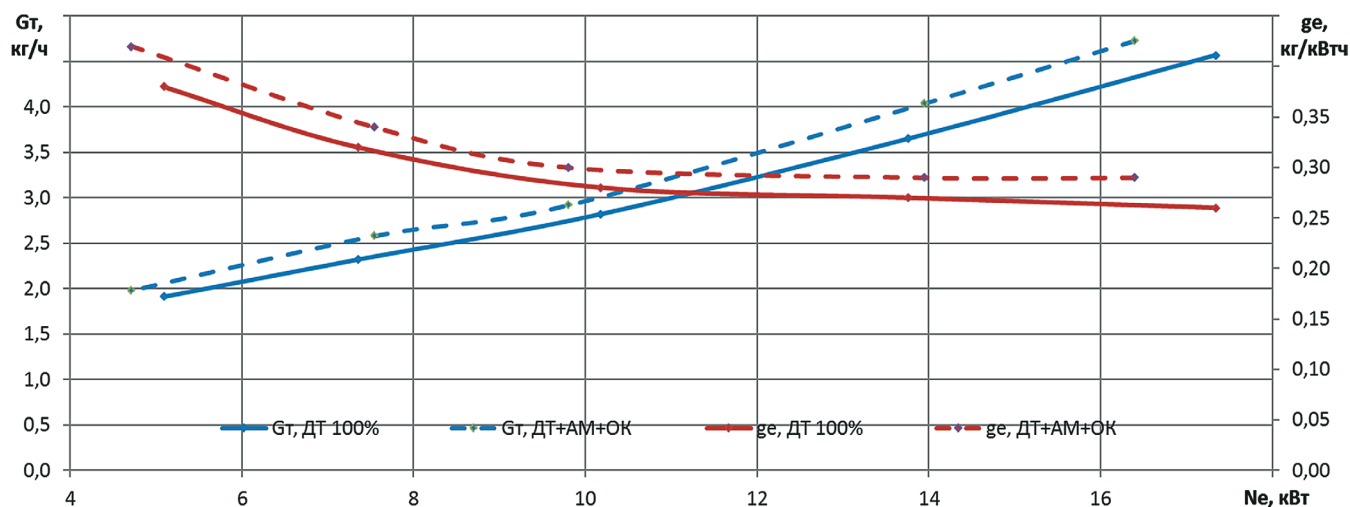


Рис. 3. Удельный эффективный расход топлива (ge) и часовой расход топлива (Gt) при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой арахисового масла

Fig. 3. Specific effective fuel consumption (ge) and hourly fuel consumption (Gt) when using pure diesel fuel and a blend with peanut oil addition

Удельный расход топлива приблизительно в такой же пропорции, как и часовой расход топлива, вырос на всем диапазоне нагрузочной характеристики.

Вторая серия опытов с добавкой пальмового масла (ПМ) показала, что увеличение содержания добавки пальмового масла с 10 до 20% увеличивает концентрацию монооксида углерода в отработавших газах. При добавлении 20% ПМ содержание СО увеличилось в 1,25...2,15 раза по сравнению с базовым дизелем. Наибольшее содержание СО наблюдалось при максимальных нагрузках (рис. 4).

При добавлении 20% пальмового масла содержание углеводородов (СН) снизилось на 60%

при низких нагрузках и на 20% при 16 кВт. Данная тенденция отличается от топлива с добавкой арахисового масла.

Концентрация оксидов азота (NO_x) в отработавших газах остается неизменной на малых и средних нагрузках, а с увеличением нагрузки снижается на 20% (рис. 5). Это объясняется ухудшением смесеобразования при высоких цикловых топливоподачах и снижением пиковой температуры сгорания в цилиндрах двигателя. Подобный эффект наблюдается и при добавках арахисового масла.

При добавлении 20% пальмового масла выброс сажи снижается на 20...30% (пропорционально его доле в ДТ) по сравнению с чистым ДТ.

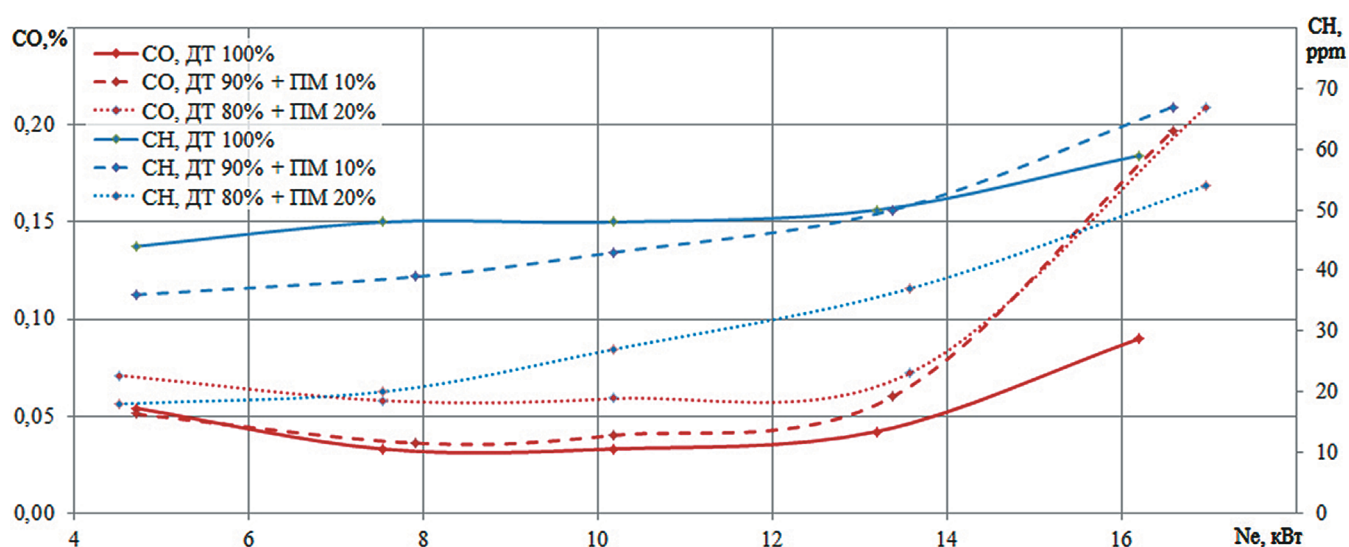


Рис. 4. Концентрация СН и СО при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 4. Concentration of CH and CO when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

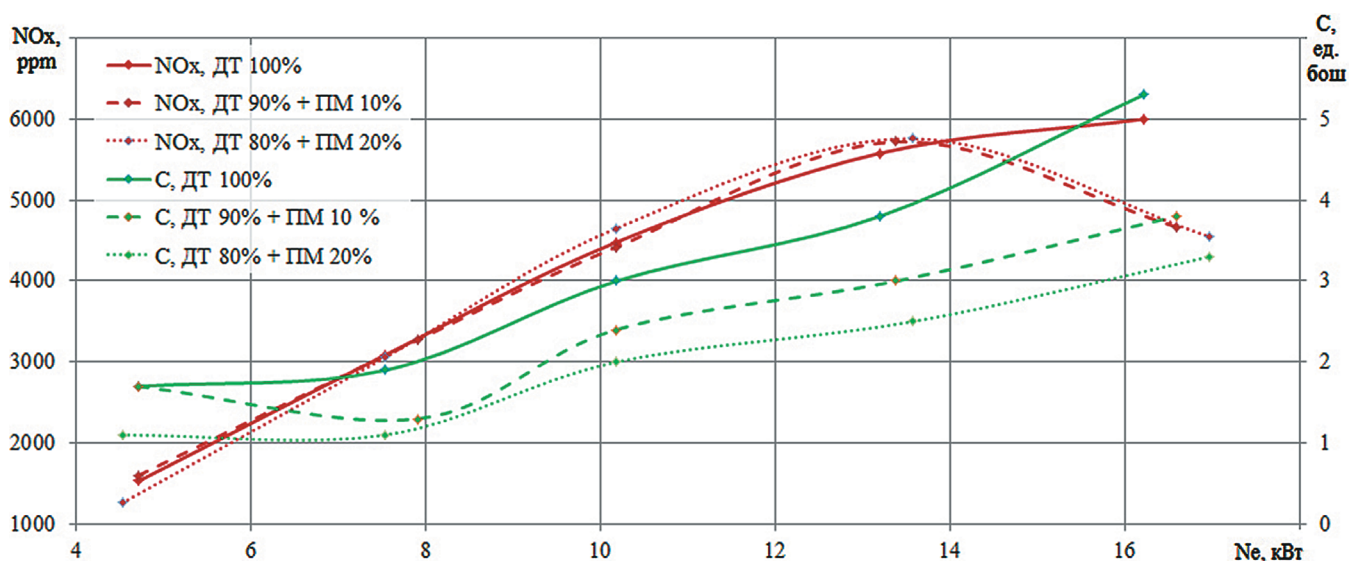


Рис. 5. Концентрация NO_x и С при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 5. NO_x and C concentration when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

Добавка 20% пальмового масла привела к росту часового расхода топлива от 0 до 10% (рис. 6), что вызвано работой механического регулятора топливного насоса высокого давления. С целью оценки естественной работы топливной системы двигателя настройки регулятора не производились.

Вследствие роста часового расхода топлива увеличился удельный эффективный расход топлива, отличия на высокой нагрузке достигают 12%. Коэффициент избытка воздуха при этом снизился приблизительно на 10%.

Результатами эксперимента показано, что добавки АМ и ПМ незначительно изменяют эффективные

показатели работы двигателя (на 10...12%), что связано с отсутствием настройки топливной системы под добавки различных масел, однако сильнее влияют на содержание токсичных выбросов (20...30%, а в некоторых случаях – до 60%).

Несмотря на ухудшение некоторых показателей, работа на дизельном двигателе может обеспечиваться добавками рассматриваемых масел без серьезных нарушений. В дальнейших исследованиях планируется провести анализ условий образования токсичных продуктов двигателя с целью развития стратегии использования растительных масел в качестве альтернативы существующему дизельному топливу.

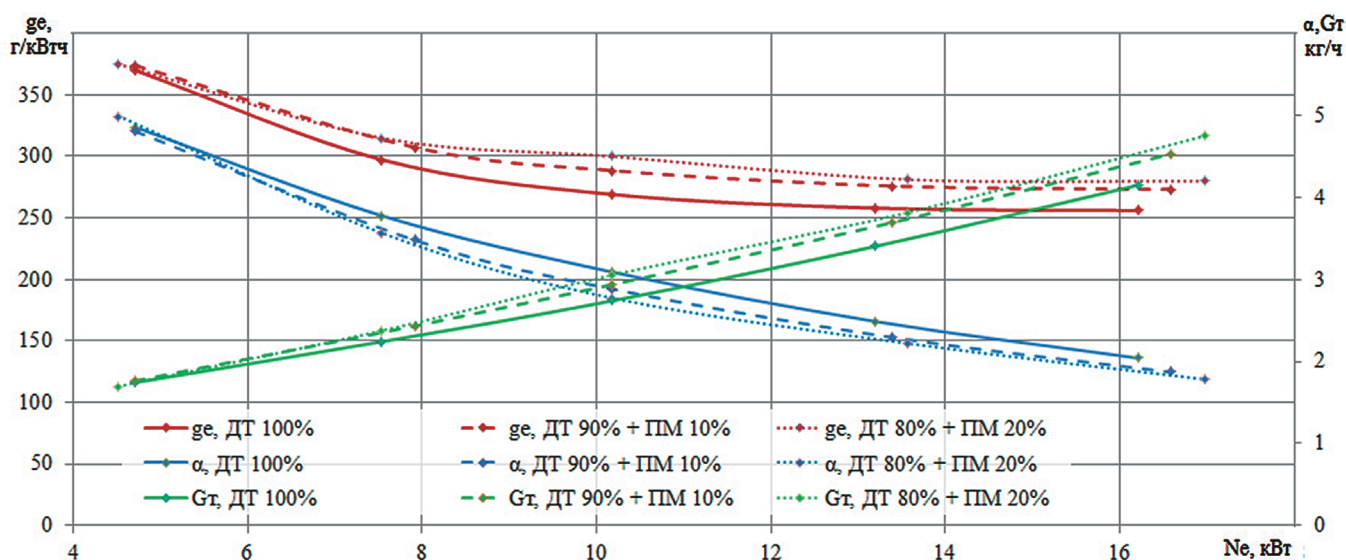


Рис. 6. Удельный эффективный расход топлива (g_e), часовой расход топлива (G_t) и коэффициент избытка воздуха (α) при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 6. Specific effective fuel consumption (g_e), hourly fuel consumption (G_t) and excess air ratio (α) when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

Выводы

1. Добавление арахисового масла в объеме 40% к топливу для тракторного дизеля Д-120 приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива на 8...10%, изменению характера сгорания и качества смесеобразования, увеличению концентрации продуктов неполного сгорания. Доля содержания углеводородов увеличивается на 25...32%, монооксидов углерода – в 1,55 раза. Концентрация оксидов азота и сажи снижается на 10...25% в зависимости от режима.

2. Увеличение добавки пальмового масла в дизельное топливо с 10 до 20% привело к росту удельного расхода топлива на 6,2 и 8,6% соответственно. Добавка 20% пальмового масла привела к снижению содержания СН в отработавших газах на 42% на низких и средних, на 17% – на высоких нагрузках. Уровень СО возрос на 37...49% на низких и средних нагрузках, на высоких нагрузках показатель увеличился

в 6...8 раз и составил около 65 ppm. Концентрация NO_x снижается на 21% (до 4550 ppm) только при высоких нагрузках. Содержание сажи снижается по мере увеличения доли содержания пальмового масла в топливной смеси: на 20...30% при 10% ПМ, на 35...45% – при 20% ПМ.

3. Использование арахисового и пальмового масел в качестве добавки к топливу тракторных дизелей является аналогичным результатам исследований применения растительных масел на дизельных двигателях и не противоречит общепринятым научным концепциям. Принимая во внимание полученные данные и относительно низкую стоимость арахисового и пальмового масел в регионах их возделывания, а также растущий спрос на возобновляемые источники энергии, можно говорить о том, что в ближайшем будущем такая технология может стать актуальным вариантом для автотракторной техники.

Список источников

1. Бижаев А.В., Девянин С.Н. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания // АвтоГАЗОзаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2019. Т. 18, № 12. С. 586-588. EDN: QIUPAC
2. Анфилатов А.А. Применение альтернативного топлива в автотракторном дизеле для снижения вредных веществ в отработавших газах // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2018. № 20. С. 493-497. EDN: YLBHTV
3. Чибанда Э.К., Славущий В.М., Курапин А.В. и др. Анализ возможностей использования пальмового масла как возобновляемого энергоресурса в качестве топлива для дизелей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 5 (17). С. 51-56. EDN: WYRABZ
4. Патрахальцев Н.Н., Петруня И.А., Никишин И.А. Применение альтернативных топлив для регулирования рабочего процесса дизеля изменением физико-химических и моторных свойств топлива // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2013. № 2 (71). С. 8-13. EDN: RFYDWX
5. Чумаков В.Л., Бижаев А.В., Путан А.А. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения): Сборник статей семинара. М.: ООО «Мегаполис», 2019. С. 118-122. EDN: ZCFNTR
6. Barsic N.J., Humke A.L. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. SAE Technical Paper Series. 1981;810262. <https://doi.org/10.4271/810262>
7. Бижаев А.В., Девянин С.Н., Соо С. и др. Использование арахисового масла в качестве присадки к дизельному топливу // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 6. С. 45-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-45-50>
8. Бижаев А.В., Симеон А.А. Применение пальмового масла в качестве присадки к топливу тракторных дизельных двигателей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 6. С. 41-46. EDN: YLSVMV
9. Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ – моторное топливо XXI века // Двигателестроение. 2010. № 1 (239). С. 26-33. EDN: MRMKIF
10. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности дизелей на скоростных режимах, работающих на различных альтернативных топливах // Строительные и дорожные машины. 2019. № 5. С. 47-50. EDN: CWTDET
11. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A. et al. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013;27:664-682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.059>
12. Rashid M.M., Kalam M.A., Masjuki H. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. Industrial Crops and Products. 2016;79:70-76. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.046>
13. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H. et al. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. Energy Conversion and Management. 2015;105:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.020>
14. Ощепков П.П., Заев И.А., Смирнов С.В., Бижаев А.В. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 48-53. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53>
15. Шумков А.П., Чиркова Ю.Н., Земский Д.Н. Присадки к дизельному топливу // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 7 (24). С. 238-241. EDN: YOSKGT

References

1. Bizhaev A.V., Devyanin S.N. Diesel exhaust gas toxicity reduction by supplying fuel with water to the combustion chamber. *Autogas Filling Complex+Alternative Fuel*. 2019;18(12):586-588. (In Russ.)
2. Anfilatov A.A. Application of alternative fuel in auto-tractor diesel engine to reduce harmful substances in exhaust gases. *Aktualnye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii selskogo khozyaystva*. 2018;20:493-497. (In Russ.)
3. Tshibanda E.K., Slavutsky V.M., Kurapin A.V. et al. Analysis of the possibility of using palm oil as a renewable energy resource as a fuel for diesel engines. *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016;5(17):51-56. (In Russ.)
4. Patrakhaltsev N.N., Petrunya I.A., Nikishin I.A. Application of alternative fuels for regulation of diesel working processes by variation of physical – chemical and motor qualities of fuel. *Autogas Filling Complex+Alternative Fuel*. 2013;2(71):8-13. (In Russ.)
5. Chumakov V.L., Bizhaev A.V., Putan A.A. Reducing emission of nitrogen oxides from gasodiesel exhaust gas. Proceedings of “Chteniya akademika V.N. Boltinskogo (115 let so dnya rozhdeniya)”. Moscow, Megapolis, 2019:118-122. (In Russ.)
6. Barsic N.J., Humke A.L. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. *SAE Technical Paper Series*. 1981;810262. <https://doi.org/10.4271/810262>
7. Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Soo S., Fomin V.M., Ibrahim A., Khodyakov A.A. Using peanut oil as a fuel additive in tractor diesel engines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(6):45-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-45-50>
8. Bizhaev A.V., Simeon A.A. Palm oil use as additive to fuel for tractor diesels. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(6):41-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-41-46>
9. Kirillov N.G., Lazarev A.N. Alternative fuels: liquefied natural gas – motor fuel of xxi century. *Engines Construction*. 2010;1:26-33. (In Russ.)
10. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Study on the toxicity of high-speed modes of diesel engines operating on different alternative fuels. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny*. 2019;5:47-50. (In Russ.)
11. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A. et al. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;27:664-682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.059>
12. Rashid M.M., Kalam M.A., Masjuki H. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. *Industrial Crops and Products*. 2016;79:70-76. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.046>
13. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H. et al. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. *Energy Conversion and Management*. 2015;105:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.020>
14. Oshchepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. Study of biodiesel fuel with palm oil and hydrogen peroxide additives. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(3):48-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53>
15. Shumkov A.P., Chirkova Yu.N., Zemskij D.N. Additives to diesel fuel. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki*. 2018;7:238-241. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Бизаев Антон Владиславович**, канд. техн. наук, доцент;
a.bizhaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>;
SPIN-код: 9728-8666, AuthorID: 853239
- ² **Чумаков Валерий Леонидович**,
канд. техн. наук, профессор; valery.chumakov@gmail.com[✉];
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>; SPIN-код:
8443-2880, AuthorID: 850305.
- ³ **Гайдар Сергей Михайлович**,
д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; SPIN-код:
6714-3698, AuthorID: 574130
- ⁴ **Пикина Анна Михайловна**, канд. техн. наук, доцент;
pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>;
SPIN-код: 3187-8973, AuthorID: 1093671
- ⁵ **Капустин Александр Васильевич**,
канд. техн. наук, доцент; kav8kapustin@yandex.ru;
<https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>; SPIN-код:
4981-5158, AuthorID: 1118834
- ^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ⁵ Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация,
Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская,
д. 41

Вклад авторов

А.В. Бизаев – методология, проведение исследований, руководство исследованиями;
В.Л. Чумаков – верификация данных; создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.М. Гайдар – концептуализация, ресурсы;
А.М. Пикина – формальный анализ;
А.В. Капустин – обработка результатов, формальный анализ, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; поступила после рецензирования и доработки 26.02.2025; принята к публикации 27.02.2025

Author Information

- Anton V. Bizhaev**¹, CSc (Eng), Associate Professor,
a.bizhaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>
- Valery L. Chumakov**², CSc (Eng), Professor,
valery.chumakov@gmail.com[✉];
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>
- Sergey M. Gaydar**³, DSc (Eng), professor,
techmash@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>
- Anna M. Pikina**⁴, CSc (Eng), Associate Professor,
pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>
- Alexander V. Kapustin**⁵, CSc (Eng), Associate Professor,
kav8kapustin@yandex.ru,
<https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>
- ^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy;
127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya st., 49
- ⁵ Yaroslav the Wise Novgorod State University; 173003, Russia,
Veliky Novgorod, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya Str., 41

Author Contribution

A.V. Bizhaev – methodology, investigation, supervision;
V.L. Chumakov – data verification; writing – review and editing;
S.M. Gaidar – conceptualization, resources;
A.M. Pikina – formal analysis;
A.V. Kapustin – data curation, formal analysis, visualization

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 01.10.2024; Revised 26.02.2025; Accepted 27.02.2025