

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В.А. Марков, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
Са Бовэнь, асп., В.А. Неверов, асп.,
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*В.Г. Камалтдинов, д.т.н., профессор кафедры
Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)*

Разработана методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизеля. Она включает определение факторов, оказывающих влияние на цетановое число растительных масел, и определение наиболее значимых из этих факторов. Показано, что цетановое число растительных масел зависит от температуры их воспламенения в закрытом тигле, от содержания в маслах олеиновой кислоты и предельных жирных кислот. Проведен корреляционный анализ этих зависимостей. Установлено, что наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость цетанового числа растительных масел от температуры их воспламенения в закрытом тигле.

Введение

В связи с истощением мировых запасов минеральных полезных ископаемых, ростом цен на нефть и нефтепродукты, возрастающим спросом на моторные топлива проводятся интенсивные поиски альтернативных моторных топлив [1, 2]. Среди альтернативных топлив наиболее привлекательны биотоплива, поскольку сырьевые ресурсы для их получения являются практически неисчерпаемыми [3, 4]. Биотоплива весьма разнообразны — это растительные масла, их производные, различные спирты, синтетические топлива, получаемые из биомассы, биогаз и др. Ожидается, что к 2030 г. доля биотоплив в общем объеме потребления моторного топлива достигнет 4–6 % [5].

Актуальным остается применение в качестве топлива для дизелей растительных масел и их производных. Многочисленные публикации, отражающие исследования зарубежных [6–9] и отечественных [10–13] исследователей, подтверждают возможность использования в качестве топлива для дизелей чистых растительных масел, а также их смесей с нефтяными и альтернативными

топливами. Применение растительных масел в чистом виде целесообразно для решения локальных энергетических проблем. Примером такого их использования являются агропромышленные комплексы, в которых растительные масла являются побочным продуктом при производстве кормов для крупного рогатого скота — жмыхов и шротов, получаемых из масличных культур (подсолнечника, сои и др.). В этом случае растительные масла имеют сравнительно невысокую стоимость, поскольку являются продуктом комплексной переработки сельскохозяйственного сырья. Кроме того, отсутствуют транспортные расходы и расходы на закупку и реализацию (продажу) растительных масел.

Одной из проблем использования растительных масел в качестве топлива для дизелей является их худшая самовоспламеняемость в камере сгорания (КС). Если температура самовоспламенения нефтяного дизельного топлива (ДТ) по ГОСТ 305–2013 составляет 250–280 °С, то аналогичная температура для растительных масел обычно колеблется в пределах от 310 до 340 °С. Цетановое число указанного нефтяного ДТ должно быть не ниже 45 единиц, а у растительных масел оно обычно составляет 33–36 единиц [5, 14, 15]. Худшая самовоспламеняемость растительных масел в условиях КС дизеля приводит к увеличению периода задержки воспламенения, ухудшению качества процесса сгорания топлива, ухудшению эксплуатационных показателей работы дизеля.

Известны исследования воспламеняемости биотоплив в цилиндрах дизеля [16–21]. Вместе с тем, необходимо дальнейшее исследование воспламеняемости различных растительных масел в условиях КС дизеля, определение факторов, оказывающих влияние на цетановое число растительных масел, определение наиболее значимых из этих факторов. Целью настоящего исследования является разработка методики сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизеля.

Методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизеля

Для оценки воспламеняемости моторных топлив в условиях КС дизеля и динамики последующего процесса их сгорания применяются различные показатели. Среди названных показателей важнейшим является цетановое число топлива. Чем выше цетановое число, тем меньше период задержки воспламенения и тем более плавно горит рабочая смесь.

Цетановое число определяется в виде объемной доли цетана (нормального гексадекана $C_{16}H_{34}$, цетановое число которого принимается за 100 единиц) в смеси с α -метилнафталином (цетановое число которого равно 0). При смешивании этих двух компонентов в различных пропорциях необходимо получить смесь, которая имеет тот же период задержки воспламенения, что и испытываемое топливо в тех же условиях. Процентное содержание в ней цетана и соответствует ЦЧ испытываемого топлива. Именно эта процедура определения ЦЧ моторного топлива была принята в первой версии американского стандарта ASTM D613 выпуска 1941 г. В новых версиях стандарта ASTM D613 (начиная с 1962 г.) для смешения используется не α -метилнафталин, а 2,2,4,4,6,8,8-гептаметилнонан, иногда называемый ГМН (англ. HMN) или изоцетан, которому присвоено цетановое число, равное 15. ГОСТ 3122–67 — «Топлива дизельные. Метод определения цетанового числа» предусматривал использование смесь n -гексадекана и α -метилнафталина. Для

исключения α -метилнафталина из стандарта ASTM D613 было несколько причин: во-первых, он легко образует пероксиды, которые меняют ЦЧ основанных на нем смесей. Кроме того, α -метилнафталин имеет неприятный запах, обладает канцерогенным действием, его сложно получить в чистом виде.

Растительные масла состоят главным образом (на 95–97 %) из триацилглицеридов — органических соединений, сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот, а также моно- и диацилглицеридов. Ацилглицериды, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных (карбоновых) кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$ [5]. При этом жирнокислотный состав растительных масел включает как ненасыщенные жирные кислоты (линолевая, олеиновая, линоленовая кислоты), так и насыщенные кислоты (пальмитиновая, стеариновая, арахидовая, миристиновая кислоты). В табл. 1 представлен жирнокислотный состав растительных масел, исследованных в работах [22, 23], а в табл. 2 — физико-химические свойства этих растительных масел.

Проведенный предварительный анализ данных табл. 1 и 2 показал, что цетановое число (по стандарту ASTM D613, cetane number) исследованных растительных масел зависит от их жирнокислотного состава, в первую очередь — от содержания в них предельных жирных кислот и непредельной олеиновой кислоты. Еще одним фактором, влияющим на ЦЧ растительных масел, является температура их воспламенения, определяемая в

Таблица 1

Жирнокислотный состав исследуемых растительных масел [22, 23]

Жирная кислота, формула состава, условная формула состава	Растительные масла										
	PM (№ 1)	ПМ (№ 2)	СоМ (№ 3)	СаМ1 (№ 4)	СаМ2 (№ 5)	КукМ (№ 6)	КунМ (№ 7)	АМ (№ 8)	ЛМ (№ 9)	ХМ (№ 10)	КрМ (№ 11)
Предельные жирные кислоты											
Миристиновая, $C_{14}H_{28}O_2$, С 14:0	0	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0	0
Пальмитиновая, $C_{16}H_{32}O_2$, С 16:0	3,49	6,08	11,75	8,60	5,46	11,67	13,10	11,38	4,92	28,33	2,07
Стеариновая, $C_{18}H_{36}O_2$, С 18:0	0,85	3,26	3,15	1,93	1,75	1,85	3,92	2,39	2,41	0,89	0,70
Арахидовая, $C_{20}H_{40}O_2$, С 20:0	0	0	0	0	0,23	0,24	0	1,32	0	0	2,09
Бегеновая, $C_{22}H_{44}O_2$, С 22:0	0	0	0	0	0	0	0	2,52	0	0	0,80
Лигноцериновая, $C_{24}H_{48}O_2$, С 24:0	0	0	0	0	0	0	0	1,23	0	0	1,12
Всего	4,34	9,34	14,90	10,53	7,78	13,76	17,02	18,84	7,33	29,22	6,78
Непредельные жирные кислоты											
Олеиновая, $C_{18}H_{34}O_2$, С 18:1	64,40	16,93	23,26	11,58	79,36	25,16	52,84	48,28	19,70	13,27	18,86
Линолевая, $C_{18}H_{32}O_2$, С 18:2	22,30	73,73	55,53	77,89	12,86	60,60	30,14	31,95	18,03	57,51	9,00
Линоленовая, $C_{18}H_{30}O_2$, С 18:3	8,23	0	6,31	0	0	0,48	0	0,93	54,94	0	6,85
Эруковая, $C_{22}H_{42}O_2$, С 22:1	0,73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58,51
Всего	95,66	90,66	85,10	89,47	92,22	86,24	82,98	81,16	92,67	70,78	93,22
ЦЧ	37,6	37,1	37,9	41,3	49,1	37,6	40,2	41,8	34,6	41,8	44,6

Примечание: растительные масла: РМ — рапсовое; ПМ — подсолнечное; СоМ — соевое; СаМ1 — сафлоровое № 1; СаМ2 — сафлоровое № 2 (высокоолеиновое); КукМ — кукурузное; КунМ — кунжутное; АМ — арахисовое; ЛМ — льняное масло; ХМ — хлопковое; КрМ — масло растения крамбе (абиссинская горчица)

Таблица 2

**Физико-химические свойства
исследуемых растительных масел**

Растительные масла	Свойства			
	Плотность при 38 °С, кг/м ³	Вязкость при 38 °С, мм ² /с	Цетановое число	Температура воспламенения, °С
РМ (№ 1)	911,5	37,0	37,6	246
ПМ (№ 2)	916,1	33,9	37,1	274
СоМ (№ 3)	913,8	32,6	37,9	254
СаМ1 (№ 4)	914,4	31,3	41,3	260
СаМ2 (№ 5)	902,1	41,2	49,1	293
КукМ (№ 6)	909,5	34,9	37,6	277
КунМ (№ 7)	913,3	35,5	40,2	260
АМ (№ 8)	902,6	39,6	41,8	271
ЛМ (№ 9)	923,6	27,2	34,6	241
ХМ (№ 10)	914,8	33,5	41,8	234
КрМ (№ 11)	904,4	53,6	44,6	274

соответствии со стандартом ASTM D93 (температура воспламенения — flash point). Методика этого стандарта предполагает определение температуры вспышки нефтепродуктов в закрытом тигле в диапазоне температур от 40 до 360 °С с использованием ручного или автоматического прибора Пенски–Мартенса. Возможно и определение температуры вспышки биотоплива. Определяемая по этой методике температура вспышки топлива характеризует пожарную опасность при обращении с этим топливом.

Одним из факторов, влияющих на цетановое число растительных масел, является содержание в них предельных жирных кислот. Это обусловлено тем, что эти жирные кислоты обладают сравнительно невысокой температурой самовоспламенения. Так температуры самовоспламенения двух наиболее значимых (см. табл. 1) предельных жирных кислот растительных масел — пальмитиновой и стеариновой, определяемые по ГОСТ 12.1.044–89 (Пожаровзрывоопасность веществ и материалов), составляет соответственно 210 и 320 °С, а аналогичная температура для непредельных жирных кислот — линоленовой и эруковой — соответственно 470 и 454 °С.

Для оценки взаимосвязи ЦЧ и содержания в растительных маслах предельных жирных кислот $C_{ж.к.пр.}$ использованы данные табл. 1 и 2. На рис. 1, а представлены такие данные для девяти растительных масел среднего жирнокислотного состава. При этом не использованы данные по двум маслам этих таблиц с аномальным содержанием непредельных жирных кислот — по высокоолеиновому сафлоровому маслу (СаМ2, № 5), содержащему 79,36 % олеиновой кислоты, и по высокоэруковому маслу растения крамбе (КрМ, № 11), содержащему 58,51 % эрукового

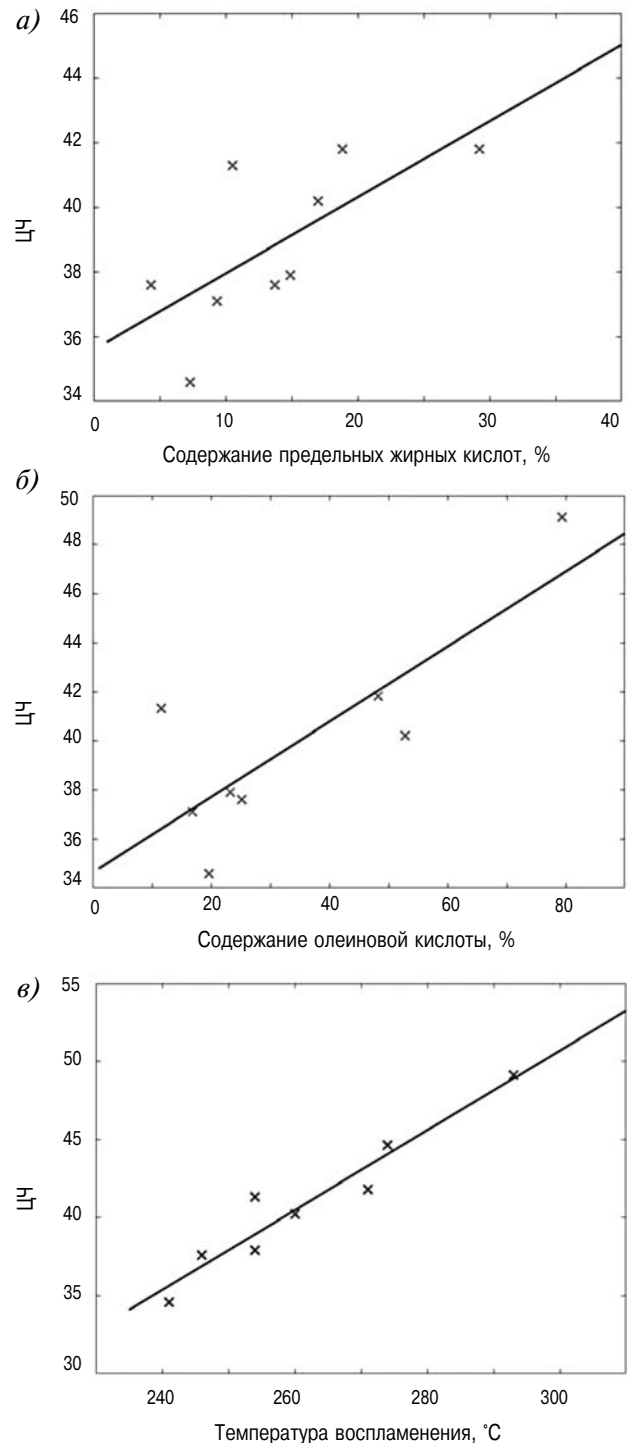


Рис. 1. Зависимость ЦЧ растительных масел от содержания в них предельных жирных кислот $C_{ж.к.пр.}$ (а), от содержания в них олеиновой кислоты $C_{ж.к.ол.}$ (б), от температуры их воспламенения $T_{восп.}$ (в) (экспериментальные данные табл. 18 и 19 показаны точками, прямые линии — аппроксимация)

масла. По данным рис. 1, а с использованием метода наименьших квадратов проведена аппроксимация зависимости $ЦЧ = f(C_{ж.к.пр.})$. Нанесенная на рис. 1, а аппроксимирующая прямая описывается формулой:

$$ECN = 23,55 \cdot C_{FA,S} + 35,6,$$

где ECN — расчетное значение ЦЧ (estimated cetane number); $C_{FA,S}$ — концентрация предельных жирных кислот.

Коэффициент корреляции между ЦЧ исследуемых масел и содержанием в них предельных жирных кислот $C_{ж.к.пр.}$ оказался равен $R = 0,69$ (коэффициент детерминации — $R^2 = 0,48$), что свидетельствует о наличии корреляции между ЦЧ и $C_{ж.к.пр.}$.

Еще одним фактором, влияющим на цетановое число ЦЧ растительных масел, является содержание в них олеиновой кислоты $C_{ж.к.ол.}$. Среди основных непредельных жирных кислот, входящих в состав растительных масел, эта кислота имеет наименьшую температуру самовоспламенения. Эта температура, определяемая по ГОСТ 12.1.044–89 (Пожаровзрывоопасность веществ и материалов), для олеиновой кислоты составляет 271 °С, а для линоленовой и эруковой кислот — соответственно 470 и 454 °С. Для оценки тесноты связи между ЦЧ растительных масел и их содержанием олеиновой кислоты $C_{ж.к.ол.}$ на рис. 1, б использованы данные по восьми растительным маслам среднего жирнокислотного состава (№ 2–9 табл. 1 и 2). При этом не использованы данные по трем маслам этих таблиц с аномальным содержанием предельных жирных кислот — по рапсовому маслу (РМ, № 1) с минимальным среди рассматриваемых масел предельных жирных кислот (4,34 %), по хлопковому маслу (ХМ, № 10) с максимальным содержанием этих кислот (29,22 %), а также по маслу растения крамбе (КрМ, № 11) с аномальным содержанием эрукового масла (58,51 %).

По данным рис. 1, б с использованием метода наименьших квадратов проведена аппроксимация зависимости ЦЧ = $f(C_{ж.к.ол.})$. Аппроксимирующая прямая этой зависимости описывается формулой:

$$ECN = 15,34 \cdot C_{C18:1} + 34,64,$$

где ECN — расчетное значение ЦЧ растительного масла; $C_{C18:1}$ — концентрация в нем олеиновой кислоты.

Проведенный корреляционный анализ зависимости ЦЧ = $f(C_{ж.к.ол.})$ подтвердил наличие достаточно тесной корреляционной зависимости между этими параметрами — коэффициент корреляции между ЦЧ исследованных масел и содержанием олеиновой кислоты в них $C_{ж.к.ол.}$ составил $R = 0,81$ (коэффициент детерминации — $R^2 = 0,66$).

В качестве третьего параметра, связанного с цетановым числом ЦЧ исследуемых масел, рассмотрена температура их воспламенения в закрытом тигле, определяемая в соответствии со стандартом ASTM D93. Для рассмотрения взаимосвязи

между ЦЧ растительных масел и их температурой воспламенения $T_{восп.}$ на рис. 1, в нанесены восемь точек, соответствующих растительным маслам среднего жирнокислотного состава (№ 1, 3–5, 7–9 и 11 табл. 1 и 2). При этом не использованы данные по трем маслам этих таблиц, имеющих аномальное содержание непредельных жирных кислот, — по подсолнечному маслу (ПМ, № 2) с содержанием линолевой кислоты, равным 73,73 %, по кукурузному маслу (КукМ, № 6) с содержанием этой кислоты, равным 60,60 %, а также по хлопковому маслу (ХМ, № 10) с минимальным содержанием непредельных жирных кислот, равным 70,78 %.

С использованием данных рис. 1, в и метода наименьших квадратов и проведена аппроксимация зависимости ЦЧ = $f(T_{восп.})$ прямой линией, аналитическое выражение для которой имеет вид:

$$ECN = 0,2552 \cdot T_{AI} - 25,88,$$

где ECN — расчетное значение ЦЧ растительного масла; T_{AI} — температура воспламенения этого масла, °С. При проведении корреляционного анализа зависимости ЦЧ = $f(T_{восп.})$ получен коэффициент корреляции этой зависимости, равный $R = 0,96$ (коэффициент детерминации — $R^2 = 0,92$). Высокое значение коэффициента корреляции свидетельствует об очень тесной зависимости ЦЧ растительных масел от температуры их воспламенения.

Как отмечено выше, анализу воспламеняемости различных топлив в КС дизелей посвящено ряд публикаций. В частности, в работе [24] исследована зависимость ЦЧ от задержки воспламенения τ_d в бомбе сгорания постоянного объема для эталонного топлива (смесей гексадекана и 2,2,4,4,6,8,8-гептаметилнонана с разной концентрацией этих компонентов). Получена зависимость ЦЧ от τ_d , определенной в этой бомбе:

$$ECN = 38,07(\tau_d - 0,35)^{-0,6484}.$$

После этого в работе [24] были измерены задержки воспламенения триглицеридов в этой бомбе и рассчитаны значения ЦЧ, приведенные в табл. 3. Для прогнозирования ЦЧ растительных масел на основе ЦЧ триглицеридов была предложена многофакторная зависимость ЦЧ растительных масел от содержания в них основных триглицеридов. С учетом вклада основных триглицеридов эта зависимость выражена следующей формулой:

$$ECN = \sum_i ECN_i \cdot C_i + ECN_0 \cdot C_0 + D \cdot C_{usa} \cdot C_{sa},$$

где C_i — концентрация основного i -го триглицерида; ECN_i — приведенное ЦЧ этого триглицерида; C_0 — концентрация группы неосновных триглицеридов (т. е. триглицеридов с жирными

Таблица 3

Расчетные значения ЦЧ триглицеридов из работы [24], приведенные значения ЦЧ триглицеридов и константы D

Условная формула триглицеридов	Задержка воспламенения, мс	Расчетное значение ЦЧ	Приведенное значение ЦЧ
TG 16:0	1,96	89	88,89
TG 18:0	1,98	85	85,02
TG 18:1	2,45	45	44,47
TG 18:2	2,94	32	34,22
TG 18:3	3,85	23	24,47
TG 21:1	—	—	48,47
Неосновные триглицериды TG 14:0, TG 20:0, TG 22:0, TG 24:0	—	—	84,03
Константа D			-43,41

кислотами C14:0, C20:0, C22:0 и C24:0); ECN_0 — приведенное ЦЧ группы неосновных триглицеридов; C_{usa} — концентрация триглицеридов с непредельными жирными кислотами; C_{sa} — концентрация триглицеридов с предельными жирными кислотами; D — константа.

С использованием метода наименьших квадратов проведена калибровка приведенных значений ЦЧ для растительных масел № 2–№ 4, № 7, № 9, № 10 (см. табл. 1 и 2, работы [22, 23]), которые состоят только из жирных кислот C16:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3. После этого с использованием полученных приведенных значений ЦЧ для основных триглицеридов (кроме TG21:1) и данных о жирнокислотном составе для всех 11 видов растительных масел табл. 1 и 2 определены приведенное значение ЦЧ для TG21:1, приведенное значение ЦЧ группы неосновных триглицеридов ECN_0 и константа D . Полученные значения этих параметров представлены в табл. 3.

На рис. 2 представлено сравнение рассчитанных по многофакторной зависимости значений ЦЧ для растительных масел табл. 1 и 2 с экспериментальными данными по ЦЧ этих растительных масел.

В табл. 4 представлены значения плотности корреляции полученных зависимостей для цетанового числа растительных масел. Наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость ЦЧ растительных масел от температур их воспламенения в закрытом тигле - зависимость $ЦЧ=f(T_{восп.})$ с коэффициентом детерминации $R^2=0,92$. Сравнительно плотной корреляцией обладает зависимость ЦЧ от содержания в растительных маслах олеиновой кислоты - зависимость $ЦЧ=f(C_{ж.к.ол.})$ с коэффициентом детерминации $R^2=0,66$. Наименьшую плотность корреляции имеет зависимость ЦЧ от содержания

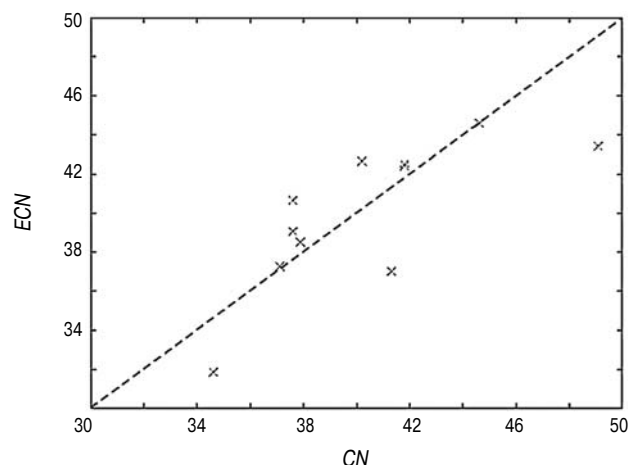


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных по ЦЧ растительных масел табл. 1 и 2 (ось абсцисс) и рассчитанных по многофакторной зависимости значений ЦЧ для этих масел (ось ординат)

Таблица 4

Плотность корреляции зависимостей ЦЧ от различных показателей

Показатель оценки	Значение ЦЧ, как функции от различных показателей			
	$f(C_{ж.к.пр.})$	$f(C_{ж.к.ол.})$	$f(T_{восп.})$	$f(C_i, C_0, C_{usa}, C_{sa})$
Коэффициент детерминации R^2	0,48	0,66	0,92	0,53
Максимальное абсолютное отклонение	3,22	4,89	2,36	5,70
Максимальное относительное отклонение $\Delta_{max}, \%$	7,88	11,84	5,71	11,61
Среднее абсолютное отклонение AAD	1,46	1,79	0,95	1,99

в растительных маслах предельных жирных кислот — зависимость $ЦЧ = f(C_{ж.к.пр.})$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,48$. Многофакторная корреляция ЦЧ с содержанием в биотопливе основных триглицеридов работы [24] характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,53$. Следует также отметить, что эта методика является более сложной по сравнению с предложенными авторами статьи методиками оценки ЦЧ растительных масел.

Разработанная методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизеля применима и для других растительных масел, имеющих жирнокислотный состав, близкий к жирнокислотному составу растительных масел, исследованных в работах [22, 23].

Заключение

1. Физико-химические свойства растительных масел значительно отличаются от аналогичных свойств нефтяных ДТ. Одним из этих отличий является их худшая воспламеняемость в камерах сгорания дизелей. В связи с этим необходимы

дальнейшие исследования работы дизелей на растительных маслах. Среди показателей, характеризующих воспламеняемость моторных топлив в камерах сгорания дизелей и динамику их последующего сгорания, важнейшим являются цетановое число моторного топлива.

2. Предложена методика сравнительного анализа критериев самовоспламеняемости растительных масел в КС дизеля. Она включает исследование воспламеняемости различных растительных масел в цилиндрах дизеля, определение факторов, оказывающих влияние на цетановое число растительных масел, определение наиболее значимых из этих факторов.

3. Проанализированы корреляционные зависимости цетанового числа растительных масел от температур их воспламенения в закрытом тигле, от содержания в маслах олеиновой кислоты и предельных жирных кислот. Также проанализирована многофакторная зависимость цетанового числа растительных масел от содержания в них различных триглицеридов, предложенная в работе [24].

4. Рассчитаны показатели, характеризующие плотность указанных зависимостей. Наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость цетанового числа от температуры воспламенения растительных масел в закрытом тигле с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$. Сравнительно плотной корреляцией обладает зависимость цетанового числа от содержания в растительных маслах олеиновой кислоты с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,66$. Наименьшую плотность корреляции имеет зависимость цетанового числа от содержания в растительных маслах предельных жирных кислот с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,48$.

Литература

1. Совершенствование рабочих процессов автотракторных дизелей и их топливных систем, работающих на альтернативных топливах / М.Г. Шатров, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков, А.Ю. Дунин. М : МАДИ, 2012. 220 с.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М. : МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
3. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск : Изд-во Восточно-украинского национального университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
4. Тепловые двигатели установок электро- и теплоснабжения, использующие биотоплива: Учебное пособие для ВУЗов / В.Ф. Каменев [и др.]. М. : МАДИ, 2014. 92 с.
5. Моторные топлива, производимые из растительных масел / В.А. Марков [и др.]. Под ред. В.А. Маркова. Рига: Изд-во Lambert Academic Publishing, 2019. 420 с.
6. Babu A.K., Devaradjane G. Vegetable Oils and their Derivatives as Fuels for CI Engines: an Overview // SAE Technical Paper Series. 2003. № 2003-01-0767. P. 1–18.
7. Che Mat S., Idroas M.Y., Hamid M.F. et al. Performance and Emissions of Straight Vegetable Oils and its Blends as a Fuel in Diesel Engine: A Review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 808–823.
8. Hazar H., Sevinc H. Investigation of the Effects of Pre-Heated Linseed Oil on Performance and Exhaust Emission at a Coated Diesel Engine // Renewable Energy. 2019. Vol. 130. P. 961–967.
9. Uyumaz A. Combustion, Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Fueled with Mustard Oil Biodiesel Fuel Blends at Different Engine Loads // Fuel. 2018. Vol. 212. P. 256–267.
10. Ощепков П.П., Бижаев А.В., Заев И.А., Смирнов С.В., Адегбенро Симеон Адедожа. Исследование дизельного топлива с добавками пальмового масла // Транспорт на альтернативном топливе. 2018. № 5. С. 56–62.
11. Карташев А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Показатели работы тракторного дизеля на рапсовом масле // Двигателестроение. 2011. № 2. С. 39–41.
12. Марков В.А., Девянин С.Н., Камалудинов В.Г., Са Бовэнь, Неверов В.А. Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел // Двигателестроение. 2020. № 4. С. 18–24.
13. Уханов А.П., Уханов Д.А., Шеменов Д.С. Дизельное смесевое топливо. Пенза : РИО Пензенской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 147 с.
14. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для ВУЗов / Д.Н. Вырубов [и др.]. Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1983. 372 с.
15. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для ВУЗов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 589 с.
16. Canoira L., Alcanta R., Susana Torcal S. et al. Nitration of Biodiesel of Waste Oil: as a Cetane Number Enhancer // Fuel. 2007. Vol. 86. P. 965–971.
17. Tat M.E. Cetane Number Effect on the Energetic and Exergetic Efficiency of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel // Fuel Processing Technology. 2011. Vol. 92. № 7. P. 1311–1321.
18. Velmurugan K., Gowtham S. Effect of Cetane Improver Additives on Emissions // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012. Vol.2, Issue 5. P. 3372–3375.
19. Вальехо Мальдонадо П.Р., Гусаков С.В., Прияндака А. Экспериментальное определение кинетических констант воспламенения растительных топлив в условиях ДВС // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2003. № 1. С. 29–31.
20. Карташев А.Н., Плотников С.А. Методы определения цетанового числа и периода задержки воспламенения топлив // Агропанорама (Минск). 2008. № 4. С. 4–7.
21. Ощепков П.П., Смирнов С.В., Заев И.А. Исследование процесса самовоспламенения биодизельного топлива // Двигателестроение. 2020. № 1. С. 47–51.
22. Goering C.E., Daugherty M.J. Energy Accounting for Eleven Vegetable Oil Fuels // Transactions of the ASAE. 1982. Vol. 25. № 5. P. 1209–1215.
23. Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J., Pryde E.H., Heakin A.J. Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils // Transactions of the ASAE. 1982. Vol. 25. № 6. P. 1472–1477, 1483.
24. Freedman B., Bagby M.O., Callahan T.J. et al. Cetane Numbers of Fatty Esters, Fatty Alcohols and Triglycerides Determined in a Constant Volume Combustion Bomb // SAE Technical Paper Series. 1990. № 900343. P. 153–161.