

УДК 621.039.542.4
DOI: 10.63430/TIA2025020017

О возможности использования жидких биотоплив с добавками растительных масел и эфиров жирных кислот*

Г.В. Кузнецов, Д.С. Романов, П.А. Стрижак

Томский политехнический университет

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dsr7@tpu.ru

В статье приводятся результаты мультикритериального анализа, полученные на базе экспериментальных данных в процессе изучения основных свойств и характеристик термической конверсии альтернативных жидких топлив. В качестве базового углеводородного компонента использовался керосин. Биодобавки представлены растительными маслами (рапсовое, талловое, рыжиковое, кулинарное отработанное) и метиловыми эфирами жирных кислот, полученными при переработке этих масел. Экспериментально определены характеристики горения топливных композиций: времена задержки зажигания, пороговые температуры инициирования горения, продолжительности выгорания, концентрации основных газовых выбросов. Выделены перспективные для использования топливные композиции с учетом основных энергетических и экологических индикаторов. Обоснованы возможности применения композиций с метиловыми эфирами жирных кислот для снижения удельных антропогенных выбросов в составе продуктов сгорания.

Ключевые слова: жидкие биотоплива, биодобавки, растительные масла, эфиры жирных кислот, характеристики горения, мультикритериальный анализ.

Введение

Интерес к жидким биотопливам в последние годы усиливается в связи с ужесточением международных требований к антропогенным выбросам при работе энергетических и двигательных установок [1–3]. Главный показатель критериев оценки эффективности — удельные выбросы CO₂ с учетом количества вырабатываемой энергии [4, 5]. Основные предпосылки возможного существенного снижения данных выбросов связывают с применением двух подходов: синтезирование биотоплив из растительного сырья и биомассы [6] и замещение определенной доли углеводородного топлива в составе композиции на биодобавки из растительного сырья и биомассы [7]. Первый подход базируется на применении определенных технологий синтеза. Основными из них принято считать [8–14]: синтез Фишера–Тропша, каталитический крекинг, гидрокрекинг, трансэтерификация,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024).

переэтерификация. В качестве сырья здесь используются [15]: биомасса (диспергированная древесина — опилки, жмых подсолнечника, рисовая шелуха и др.), уголь, торф, растительные масла, отходы сельского хозяйства, водоросли, технологические и сточные воды, иловые отложения и др. В рамках второго подхода основными биодобавками к жидким топливам выступают растительные масла и метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК), получаемые при переработке данных масел.

Вследствие использования компонентов из биомассы и уменьшения содержания углерода в составе топливной композиции концентрации углекислого газа в составе продуктов сгорания биотоплив снижаются [16, 17]. По ряду других показателей (например, энергетических, экономических, эксплуатационных) топлив и установок, работающих при их сжигании, довольно часто регистрируются как определенные диапазоны роста, так и снижения [17, 18]. По этой причине применение жидких биотоплив имеет ограничения. Наиболее перспективным представляется использование альтернативных жидких топлив из растительного сырья в качестве замены дизельному топливу [19]. В случае биокеросина известны тенденции производства SAF- и LCAF-топлив за счет применения вышеперечисленных технологий синтеза, но пока известно крайне мало результатов испытаний синтезируемых композиций на стендах с контролем совокупности их основных характеристик и свойств. Так, например, для SAF- и LCAF-топлив на базе керосина с добавками растительного происхождения такие данные пока не публиковались. Это обусловлено тем, что для перехода к испытаниям на полноразмерных стендах целесообразно получить результаты экспериментальных исследований основных характеристик горения альтернативных композиций в виде относительных величин к аналогичным параметрам для базового углеводородного топлива — керосина в условиях небольших стендов и малых объемов образцов. Необходимость решения указанной задачи мотивировала проведение настоящего исследования. На первом этапе представляется целесообразным проведение экспериментов с целью сравнения характеристик термической конверсии керосина с добавками наиболее перспективных жидких добавок в виде масел и эфиров жирных кислот.

Цель настоящей работы — определение перспективных композиций жидких топлив на примере керосина с биодобавками по результатам мультикритериального анализа характеристик их горения на малоразмерном экспериментальном стенде и с задействованием малых объемов топливных образцов.

1. Компоненты топлив

При проведении исследований использовался коммерческий керосин марки ТС-1 как наиболее широко применяемый в двигательных и энергетических установках. В качестве добавок растительного происхождения применялись рапсовое, талловое, рыжиковое и отработанные кулинарные растительные масла. На базе этой группы масел, как правило, синтезируются топливные биокомпозиции [20–23]. При синтезе SAF- и LCAF-топлив используются метиловые эфиры жирных кислот, получаемые при переработке масел [24]. По этой причине в настоящей работе в качестве альтернативных маслам добавок использованы МЭЖК. По результатам анализа современных представлений о SAF- и LCAF-топливах [25] можно сделать вывод о том, что типичные концентрации жидких биодобавок к керосинам, бензинам и дизельным топливам соответствуют диапазону от 0,5 до 15 % по объему. Значительное влияние добавки проявляется при ее концентрации в составе смеси не менее 5 % [20–23]. В рамках представленного исследования был выбран диапазон варьирования концентрации добавок от 5 до 15 %. При подготовке топлив использовалась методика гомогенизации топливных смесей за счет

применения магнитного перемешивающего механизма. Такой подход приготовления композиций принято считать наименее ресурсоемким.

2. Методики исследований основных свойств и характеристик

Мультикритериальное исследование композиционных топлив позволяет комплексно оценить свойства последних и характеристики полного жизненного цикла (приготовление, хранение, транспорт, горение, нейтрализация выбросов), условия эксплуатации установок и двигателей, их экологического воздействия на окружающую среду. Для оценки перспектив топливных смесей на первом этапе следует изучить их физико-химические характеристики, являющиеся ключевыми для запуска последующих стендовых и эксплуатационных испытаний. Основными характеристиками из этой категории являются: плотность (ρ), вязкость (ν), поверхностное натяжение (σ), давление насыщенных паров ($P_{\text{нп}}$), температура вспышки ($T_{\text{всп}}$), температура помутнения ($T_{\text{пом}}$), температура кристаллизации ($T_{\text{зам}}$), термоокислительная стабильность, концентрация фактических смол, массовая доля серы, зольность, удельная электропроводимость, содержание водорастворимых кислот и щелочей и др. Наиболее важные для производства смесевых топлив свойства компонентов с указанием ссылок на использованные методики для их определения представлены в табл. 1.

Важным эксплуатационным параметром является седиментационная устойчивость топливной композиции при хранении смесей без и в условиях теплового воздействия. Все исследованные в настоящей работе топливные смеси характеризовались высокой стабильностью и гомогенностью в течение семи суток хранения при комнатных условиях.

Таблица 1

Свойства использованных жидкостей

Параметры и источники публикации Жидкости	ν , мм ² /с [26]	ρ , кг/м ³	σ , мН/м [27]	$P_{\text{нп}}$, кПа [28]	$T_{\text{зам}}$, °C [29]	$T_{\text{пом}}$, °C [29]	$T_{\text{всп}}$, °C [30]
Керосин ТС-1	1,08±0,01	787±5	23,74±0,01	7,84±0,01	ниже –60	–50±0,5	28±0,5
Рыжиковое масло	63,01±0,01	915±5	29,46±0,01	1,41±0,01	–21±0,5	–14±0,5	225±0,5
Рапсовое масло	77,19±0,01	915±5	30,50±0,01	0,84±0,01	–20±0,5	–16±0,5	136±0,5
Кулинарное масло	78,69±0,01	910±5	32,51±0,01	0,63±0,01	–19±0,5	–15±0,5	225±0,5
Дистиллированное талловое масло	57,70±0,01	925±5	30,08±0,01	1,35±0,01	–23±0,5	–16±0,5	137±0,5
МЭЖК таллового масла	8,61±0,01	834±5	33,21±0,01	7,84±0,01	–44,2	–23±0,5	215±0,5
МЭЖК рапсового масла	7,78±0,01	821±5	28,25±0,01	6,37±0,01	–47,3	–20±0,5	125±0,5
МЭЖК рыжикового масла	6,62±0,01	817±5	29,54±0,01	16,47±0,01	–57,4	–29±0,5	65±0,5
МЭЖК кулинарного масла	12,35±0,01	814±5	31,25±0,01	12,21±0,01	–43,2	–15±0,5	85±0,5

При нагревании в условиях проведения экспериментов в модельной камере сгорания эффекты расслоения топлив зарегистрированы не были. Поэтому значения данной характеристики не отражены в табл. 1. После определения физико-химических свойств компонентов выполнялся выбор наилучших образцов с точки зрения соответствия максимальному количеству входных требований по изученным свойствам композиций. Знание физико-химических свойств необходимо при разработке плана исследований на малогабаритных экспериментальных установках с целью определения характеристик зажигания и горения образцов смесевых топлив (рис. 1а).

Для сжигания топлив на полноразмерных энергоустановках и двигателях (рис. 1б) необходимо также изучить эксплуатационные характеристики, в частности, эрозию, коррозию, окислительную стабильность, морозостойкость и др. Определение состава газовых антропогенных выбросов дает основание утверждать, что использование биодобавок оказывает значительное влияние на концентрации оксидов углерода в продуктах сгорания. Для оксидов серы и азота в проведенных экспериментах было зарегистрировано незначительное их снижение даже при использовании 15 % добавки в виде МЭЖК или масла. Зарегистрированные изменения концентраций оксидов серы составляют 200–230 ppm, а оксидов азота — 20–40 ppm. Это обусловлено разным содержанием серы и азота в составе исходных композиций.

Мультикритериальный анализ является распространенным методом определения эффективности топливных смесей при их использовании в установках различной мощности. Метод средневзвешенных сумм [31] применяется для мультикритериальной оценки эффективности использования топливных смесей. Анализ итоговой эффективности проводится в рамках трех этапов: определение параметров, по которым будет проводиться оценка; нормирование значений параметров; расчет итогового показателя эффективности по формуле

$$A_n = \sum w_i \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

где w_i — весовой коэффициент критерия, x_{ij} — нормализованное значение критерия.

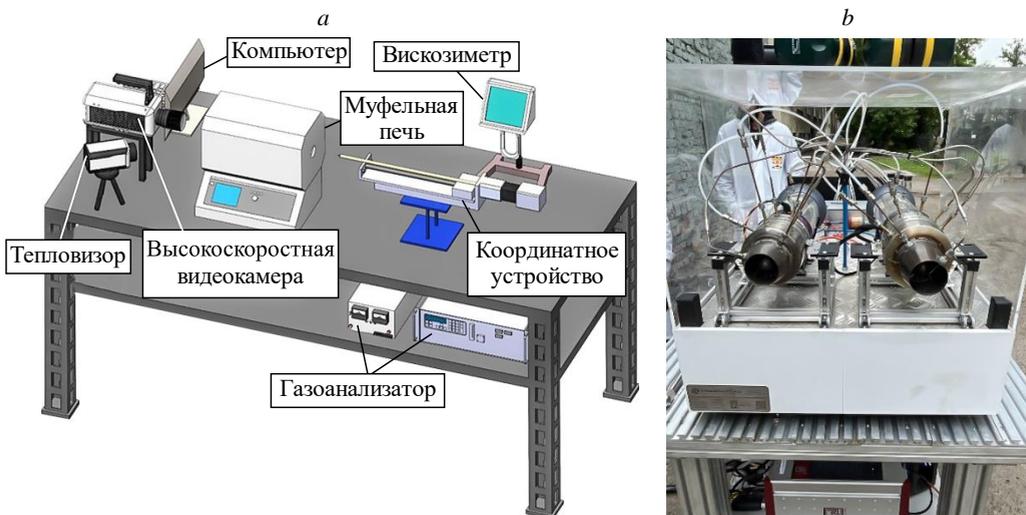


Рис. 1. Экспериментальный (а) и испытательный (б) стенды для исследований характеристик зажигания и горения смесевых топлив на основе керосина с биодобавками.

В таблице 2 приведены основные критерии, по которым проводилась оценка эффективности топливных композиций на основе керосина с добавками. Ключевыми характеристиками для энергетики являются параметры процесса горения. Все используемые в дальнейшем критерии позволяют оценить эффективность топливных смесей на различных этапах термической конверсии композиции в энергоустановках. Среди энергетических показателей выбраны времена задержки газофазного зажигания ($\tau_{д1}$), длительности горения (τ_b), пороговая температура зажигания (T_{ign}), удельная теплота сгорания (Q).

Таблица 2

Установленные значения основных характеристик отдельных этапов
полного жизненного цикла топливных компонентов и их смесей

Топливо \ Параметры	$\tau_{гр}, ^\circ\text{C}$ (при 550 $^\circ\text{C}$)	τ_b, c (при 550 $^\circ\text{C}$)	$T_{ign}, ^\circ\text{C}$	$Q,$ МДж/кг	$\text{CO}_2, \%$	CO_2/CO	CO_2/Q
Керосин	3,71±0,01	1,36±0,01	550±5	43,0±1	1,76	1,07	1
Рапсовое масло	11,77±0,01	3,69±0,01	470±5	39,7±1	1,85	1,36	1,13
Талловое масло	7,95±0,01	2,35±0,01	450±5	40,2±1	1,95	1,35	1,12
Кулинарное масло	11,87±0,01	4,26±0,01	475±5	37,5±1	2,03	1,12	1,17
Рыжиковое масло	10,96±0,01	4,12±0,01	480±5	37,1±1	0,21	0,34	1,27
95 % керосин, 5 % талловое масло	3,36±0,01	1,32±0,01	500±5	42,9±1	1,56	1,14	1,29
90 % керосин, 10 % талловое масло	3,13±0,01	1,37±0,01	500±5	42,7±1	1,55	1,12	1,21
85 % керосин, 15 % талловое масло	3,30±0,01	1,36±0,01	500±5	42,6±1	1,48	1,11	1,28
95 % керосин, 5 % рапсовое масло	3,40±0,01	1,23±0,01	500±5	42,8±1	1,37	0,98	1,19
90 % керосин, 10 % рапсовое масло	3,44±0,01	1,31±0,01	500±5	42,7±1	1,35	0,94	1,17
85 % керосин, 15 % рапсовое масло	3,49±0,01	1,31±0,01	500±5	42,5±1	1,43	0,91	1,26
95 % керосин, 5 % кулинарное масло	3,44±0,01	0,98±0,01	500±5	42,7±1	1,35	1,02	1,28
90 % керосин, 10 % кулинарное масло	3,27±0,01	1,06±0,01	500±5	42,4±1	1,44	0,95	1,29
85 % керосин, 15 % кулинарное масло	3,45±0,01	1,09±0,01	500±5	42,2±1	1,47	0,84	1,12
95% керосин, 5% рыжиковое масло	3,38±0,01	1,03±0,01	500±5	42,3±1	1,36	1,11	1,12
90 % керосин, 10 % рыжиковое масло	3,41±0,01	1,09±0,01	500±5	42,1±1	1,34	1,17	1,17
85 % керосин, 15 % рыжиковое масло	3,47±0,01	1,13±0,01	500±5	41,9±1	1,32	1,21	1,28
95 % керосин, 5 % МЭЖК таллового масла	5,86	2,94±0,01	500±5	42,8±1	1,15	1,46	1,52
90 % керосин, 10 % МЭЖК таллового масла	5,61	2,08±0,01	500±5	42,6±1	1,14	1,43	1,52
85 % керосин, 15 % МЭЖК таллового масла	5	2,39±0,01	550±5	42,4±1	0,77	1,38	2,23
95 % керосин, 5 % МЭЖК рапсового масла	4,56	3,18±0,01	500±5	42,7±1	0,47	1,44	2,28

Топливо \ Параметры	$\tau_{гр}, c$ (при 550 °C)	τ_b, c (при 550 °C)	T_{ign}, c °C	$Q,$ МДж/кг	CO ₂ , %	CO ₂ /CO	CO ₂ /Q
90 % керосин, 10 % МЭЖК рапсового масла	4,33	2,77±0,01	500±5	42,4±1	1,36	1,41	1,27
85 % керосин, 15 % МЭЖК рапсового масла	4,21	3,02±0,01	550±5	42,2±1	1,21	1,40	1,42
95 % керосин, 5 % МЭЖК кулинарного масла	5,88	2,73±0,01	500±5	42,6±1	1,02	1,53	1,70
90 % керосин, 10 % МЭЖК кулинарного масла	5,58	2,76±0,01	500±5	42,3±1	0,98	1,49	1,75
85 % керосин, 15 % МЭЖК кулинарного масла	5,32	2,52±0,01	550±5	41,9±1	0,89	1,47	1,91
95 % керосин, 5 % МЭЖК рыжикового масла	5,98	3,25±0,01	500±5	42,7±1	0,83	1,41	2,09
90 % керосин, 10 % МЭЖК рыжикового масла	5,25	2,98±0,01	500±5	42,5±1	0,94	1,38	1,84
85 % керосин, 15 % МЭЖК рыжикового масла	5,09	2,73±0,01	550±5	42,2±1	1,12	1,36	1,53

Основным экологическим показателем является соотношение концентраций диоксида к оксиду углерода (CO₂/CO), показывающее полноту выгорания топливной смеси и содержание указанных газов в составе продуктов сгорания. В то же время с точки зрения углеродной нейтральности основным индикатором принимается концентрация CO₂ в составе дымовых газов или ее относительное значение к вырабатываемому количеству энергии. Определение временных характеристик (τ_{dl} , τ_b) осуществлялось при помощи видеокамеры Phantom MIRO C110 (частота записи — не менее 400 кадров в секунду при разрешении 768×768 пикселей, минимальная возможная межкадровая задержка — около 200 мкс, систематическая погрешность видеокамеры ограничена максимально возможной частотой записи, которая составляет около 5000 кадров в секунду при разрешении 896×720). Определение характеристик зажигания осуществлялось на каплях топливных композиций радиусом около 1 мм, так как большая часть известных данных (основные процитированы в настоящей работе) получена в исследовательских центрах России, Китая, Индии, Польши, США и других стран для капель радиусами от 0,5 до 2 мм. Для регистрации концентраций основных компонентов дымовых газов применялся газоанализатор Тест-1 (диапазоны измерений и погрешности по сенсорам составляли: O₂ — 0–25 % об., абсолютная погрешность ±0,2 %; NO — 0–1000 ppm, относительная погрешность ±5 %; NO₂ — 0–500 ppm, относительная погрешность ±7 %; SO₂ — 0–1000 ppm, относительная погрешность ±5 %; H₂S — 0–500 ppm, относительная погрешность ±5 %; CO₂ — 0–30 об. %, относительная погрешность ±2 %; CH₄ — 0–30 об. %, относительная погрешность ±5 %; CO — 0–30 об. %, относительная погрешность ±5 %; H₂ — 0–30 об. %, относительная погрешность ±5 %). При проведении экспериментов образец топлива подавался с одной стороны муфеля, с противоположной стороны устанавливался зонд газоанализатора. Отверстия в трубчатой муфельной печи, в которые

подавались навеска образца и зонд газоанализатора, плотно закрывались для предотвращения попадания воздуха в камеру сгорания. Отбор пробы дымовых газов выполнялся при помощи насоса, встроенного в корпус газоанализатора, и зонда газоанализатора, расположенного в камере сгорания. Для осушения дымовых газов и задержки частиц сажи и летучей золы использовались фильтр и влагоотделитель. Поскольку минимальная масса пробы должна составлять 0,2 г, для определения состава дымовых газов рассматривалась группа капель общей массой 0,25 г. Начальная масса контролировалась с применением электронной системы дозирования и электронных весов. Для определения удельной теплоты сгорания применялся адиабатический бомбовый калориметр АБК-1В. Топливная смесь массой 0,8 г помещалась в калориметрическую бомбу, происходила закачка кислорода до образования избыточного давления около 30 бар. Далее бомба помещалась в калориметр. Запускался эксперимент. Описания методик определения данных показателей представлены в работах [32–34]. Результаты выполненных экспериментов представлены в табл. 2. Значения характеристик зажигания приведены при некоторой средней температуре в муфельной печи (около 550 °С). Абсолютные значения этих характеристик при варьировании температуры менялись существенно, но разница между ними для использованных компонентов и композиций топлив оставалась практически неизменной. Поэтому правомерно в анализе придерживаться среднего значения.

Для различных приложений более обоснованно применять удельные экологические индикаторы, а также концентрации CO_2 , чтобы понимать реальные возможные способы использования смесевых топлив в разных отраслях промышленности. В случае повышенных требований к экологическим индикаторам максимальный приоритет отдается топливным композициям с наименьшими значениями концентраций диоксида углерода (CO_2) в составе дымовых газов. Если необходима высокая полнота выгорания, то выбираются топливные композиции с наибольшими значениями соотношения CO_2/CO , показывающего полноту выгорания топливной смеси. Также нередко используются показатели, отражающие удельные антропогенные выбросы (с учетом количества вырабатываемой энергии) в виде соотношения CO_2/Q . Если для керосина величину указанного соотношения принять равной 1 (наибольшие нормированные удельные выбросы), то для смесевых топлив, используемых в исследовании, она будет меняться в диапазоне от 1 до 2,5 (табл. 2). Применение полученных данных позволяет прогнозировать условия и составы, для которых нормированное соотношение CO_2/Q может быть в несколько раз выше относительно аналогичного показателя для керосина без добавок.

3. Результаты мультикритериального анализа и их обсуждение

В таблице 3 приведены результаты использования мультикритериального анализа при оценке эффективности топливных образцов с учетом равных весовых коэффициентов по каждой из исследованных характеристик, а также дифференцированных коэффициентов, в частности, с учетом акцента на экологические аспекты, которые преследуются, в первую очередь, в случае применения биодобавок. Используемая методика позволяет варьировать весовые коэффициенты топливных композиций и учитывать различные приоритеты. Рассматривались три случая варьирования значений весовых коэффициентов. В первом приоритет всех коэффициентов был одинаков — $k = 0,142$. Во втором приоритет отдавался экологическим показателям, т.е. соотношению CO_2/CO , для которого $k = 0,5$, а для всех остальных критериев $k = 0,07$. В третьем приоритет отдавался энергетическим показателям τ_{dl} , τ_b , Q , T_{ign} . Для них принималось значение $k = 0,2$. Все остальные критерии характеризовались весовыми коэффициентами $k = 0,06$.

Таблица 3

Результаты мультикритериального анализа оценки эффективности топливных образцов

Топливо	Равные весовые коэффициенты — $k = 0,142$	Приоритет экологическим показателям $c k = 0,5$	Приоритет энергетическим показателям $c k = 0,2$
Керосин	0,89	0,88	0,88
95 % керосин, 5 % талловое масло	0,79	0,85	0,85
90 % керосин, 10 % талловое масло	0,77	0,86	0,85
85 % керосин, 15 % талловое масло	0,79	0,84	0,84
95 % керосин, 5 % рапсовое масло	0,78	0,85	0,85
90 % керосин, 10 % рапсовое масло	0,77	0,83	0,83
85 % керосин, 15 % рапсовое масло	0,76	0,83	0,83
95 % керосин, 5 % кулинарное масло	0,81	0,89	0,89
90 % керосин, 10 % кулинарное масло	0,79	0,89	0,88
85 % керосин, 15 % кулинарное масло	0,77	0,86	0,86
95 % керосин, 5 % рыжиковое масло	0,82	0,88	0,88
90 % керосин, 10 % рыжиковое масло	0,81	0,87	0,87
85 % керосин, 15 % рыжиковое масло	0,81	0,87	0,86
95 % керосин, 5 % МЭЖК таллового масла	0,69	0,86	0,71
90 % керосин, 10 % МЭЖК таллового масла	0,73	0,89	0,76
85 % керосин, 15 % МЭЖК таллового масла	0,72	0,88	0,75
95 % керосин, 5 % МЭЖК рапсового масла	0,71	0,88	0,74
90 % керосин, 10 % МЭЖК рапсового масла	0,72	0,86	0,75
85 % керосин, 15 % МЭЖК рапсового масла	0,69	0,86	0,71
95 % керосин, 5 % МЭЖК кулинарного масла	0,71	0,89	0,72
90 % керосин, 10 % МЭЖК кулинарного масла	0,70	0,88	0,72
85 % керосин, 15 % МЭЖК кулинарного масла	0,71	0,87	0,73
95 % керосин, 5 % МЭЖК рыжикового масла	0,69	0,87	0,70
90 % керосин, 10 % МЭЖК рыжикового масла	0,69	0,83	0,72
85 % керосин, 15 % МЭЖК рыжикового масла	0,67	0,81	0,69

Исследование характеристик процессов горения использованных топлив позволило определить наиболее существенные отличия физико-химических механизмов в случае наличия биодобавок. Применение топлива с добавками жидких компонентов из биомассы (МЭЖК растительных масел) позволяет снизить концентрации газовых антропогенных выбросов за счет уменьшения массовых концентраций углеводородного компонента и температуры в области горения образца, а также интенсификации физико-химических превращений с нейтрализацией CO_2 . Использование растительных масел в составе топ-

ливной смеси позволяет инициировать процесс зажигания смесевых топлив и ускорить выгорание, также оно приводит к снижению времени задержки зажигания τ_{d1} и длительностей горения образцов τ_b . Данная особенность в первую очередь обусловлена изменением теплоемкости смесевых топлив. Для керосина удельная теплоемкость составляет 1880 Дж/кг·К, а для растительных масел ее величина изменяется в диапазоне 1600–1800 Дж/кг·К. В связи с этим для инициации зажигания смесевых топлив с растительными добавками требуется меньший тепловой поток.

В случае смесевых топлив целесообразно проводить мультикритериальную оценку эффективности, поскольку наличие различных добавок в составе композиций может оказывать влияние не только на какое-то конкретное свойство топлива или характеристику физико-химического процесса, но и воздействовать на другие. Возможно проявление коллективных и синергетических эффектов. На рис. 2 представлены безразмерные значения коэффициентов эффективности смесевых топлив, изготовленных на основе керосина с добавками, с учетом совокупности контролируемых параметров. При выборе в качестве основного приоритета показателя повышенной экологичности наиболее перспективными для использования являются топливные смеси с добавками МЭЖК таллового масла с концентрацией добавки 10 и 15 %, МЭЖК рапсового масла — 5 % и МЭЖК кулинарного масла — 5 %. Применение масел в качестве дополнительных компонентов не приводит к улучшению показателей эффективности, поскольку физико-химические свойства масел, а также характеристики процессов зажигания и горения в случае их использования (соответственно, и экологические характеристики) имеют показатели хуже, чем у составов с МЭЖК и керосина без добавок. Замена нефтяного топлива экологическим компонентом приводит к незначительному изменению теплоты сгорания смеси, температуры и времени задержки зажигания. Экологический индикатор оказывает существенное воздействие на итоговый показатель эффективности (рис. 2).

При выборе равных весовых коэффициентов ($k = 0,142$) для всех критериев (рис. 2b) наблюдается значительное изменение эффективности топливных смесей. По совокупности исследуемых факторов керосин без примесей характеризуется наибольшим значением показателя эффективности — $A_n \approx 0,92$. Поскольку все приоритеты равнозначны, расчет ведется по наилучшим показателям среди всех рассмотренных критериев. Согласно табл. 2, большинство критериев являются наилучшими для керосина. Следовательно, при равных весовых коэффициентах интегральный показатель максимален для керосина без добавок. Однако если руководствоваться значениями концентраций углекислого газа в составе продуктов сгорания без и с учетом вырабатываемой энергии, то составы с жидкими биодобавками имеют приоритет перед базовым углеводородным жидким топливом.

На рис. 2c представлены результаты определения интегрального показателя эффективности топливных смесей с учетом приоритета для энергетических показателей τ_{d1} , τ_b , Q , T_{ign} . Согласно полученным результатам, использование смесевых топлив с добавками растительных масел наиболее оправдано при условии приоритета энергетических показателей. Для топливной смеси «95 % керосин, 5 % кулинарное масло» достигнуто значение $A_n \approx 0,889$, а для керосина — $A_n \approx 0,886$. В определенных условиях можно использовать топливную композицию «95 % керосин, 5 % рыжиковое масло», показатель эффективности такой смеси составляет $A_n \approx 0,885$.

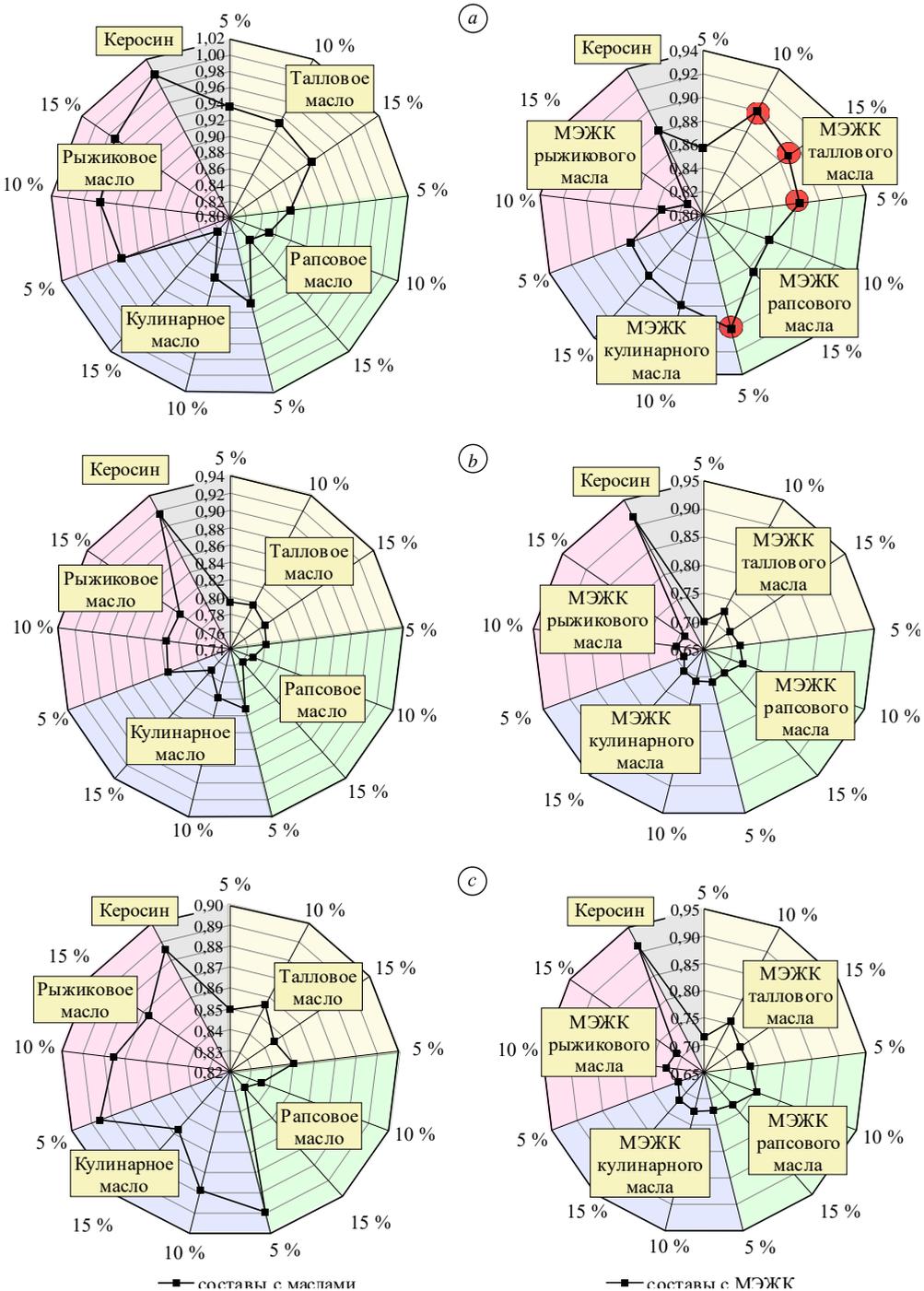


Рис. 2. Результаты мультикритериального анализа топливных смесей на основе керосина с биодобавками для случаев приоритета по экологическим показателям (а), равных весовых коэффициентов (b) и приоритета по энергетическим показателям (с).

Мультикритериальная оценка является одним из наиболее перспективных методов обоснования эффективности топливных композиций. Поскольку в расчете используется совокупность критериев, то анализ итоговой эффективности может быть полезен

для оптимизации компонентного состава смеси. Варьирование весовых коэффициентов также позволяет делать акцент на различные характеристики или свойства. На рис. 3 представлены результаты определения значений относительных показателей эффективности смесевых топлив с учетом повышенной приоритетности экологических индикаторов. Они позволяют утверждать, что использование масел без первичной переработки является малоэффективным, поскольку нормированные значения для расчета в случае смесевых топлив ниже, чем для керосина (рис. 3а). Для смесевых топлив диапазон изменения показателя эффективности $A_n = 0,85 - 0,95$, для керосина $A_n \approx 0,99$. Использование МЭЖК в составе топливных композиций позволяет снизить концентрации CO_2 в составе продуктов сгорания и тем самым увеличить итоговый показатель эффективности, рассчитанный с приоритетом на CO_2 (весовой коэффициент 0,9). Так, для смесевых топлив с добавкой МЭЖК показатель эффективности изменяется в диапазоне $A_n = 0,83 - 0,98$, для керосина он составляет $A_n \approx 0,43$.

Если рассматривать в качестве приоритета удельные выбросы на единицу энергии CO_2/Q (весовой коэффициент 0,9), то можно утверждать, что смесевые топлива являются достаточно перспективными для использования. При применении масел в составе

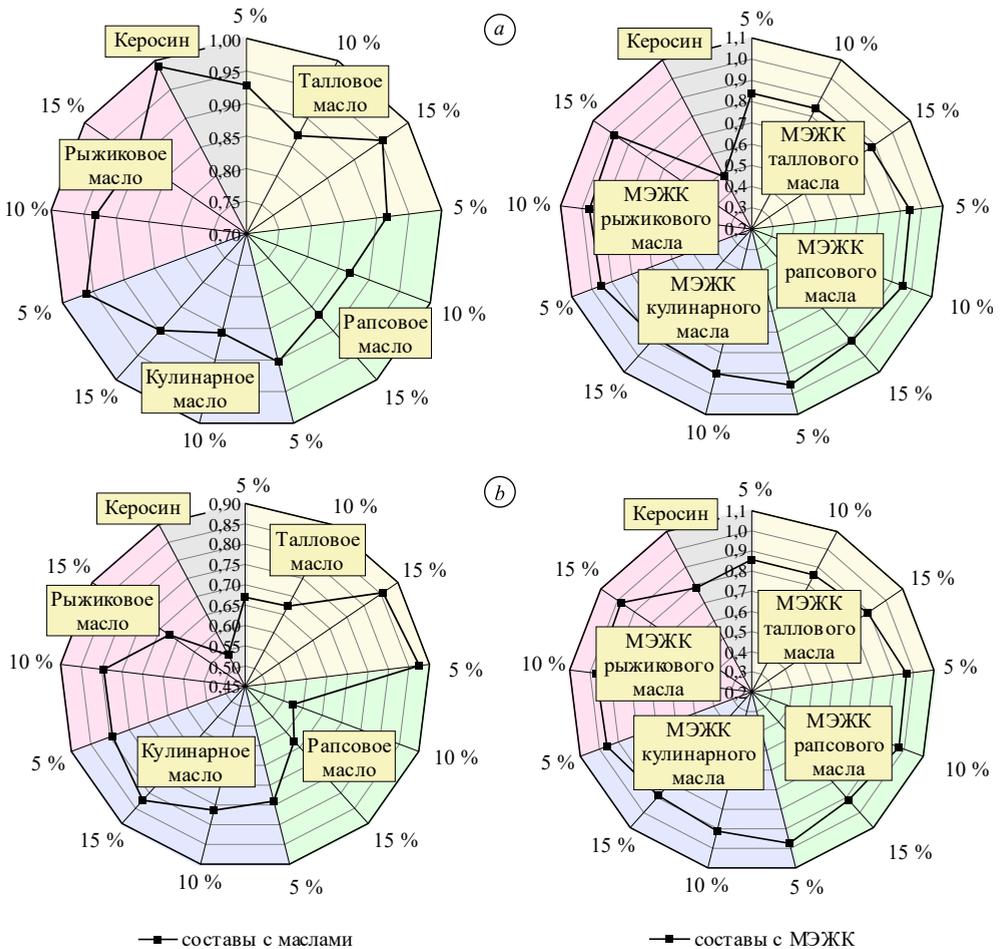


Рис. 3. Результаты мультикритериального анализа топливных смесей на основе керосина с биодобавками для случаев приоритета по индикатору CO_2 (а), приоритета по удельным выбросам на единицу энергии CO_2/Q (б).

топливных смесей итоговый показатель эффективности изменяется в диапазоне $A_n = 0,57-0,87$. Для керосина он составляет $A_n \approx 0,53$. Для топливных смесей с добавками МЭЖК коэффициент эффективности изменяется в диапазоне $A_n = 0,85-0,97$, для керосина $A_n \approx 0,78$. Полученные результаты позволяют утверждать о целесообразности использования МЭЖК в качестве дополнительного компонента в смесевых топливах, что обусловлено в первую очередь снижением экологической нагрузки на окружающую среду.

При переходе от лабораторных установок к полноразмерным газотурбинным двигателям необходимо учитывать совокупность эксплуатационных параметров. Для двигателей основными параметрами являются: расход топлива, тяга, эффективный КПД, уровень шума, уровень вибрации, концентрации ряда газовых выбросов: CO_2 , CO , NO , SO_2 , C_xH_y , NO_2 , N_2O , CH_4 . Для показателей расхода топлива, концентраций вышеперечисленных газовых выбросов, уровня шума и вибрации оптимальными являются наименьшие значения. Для тяги установки и эффективного КПД оптимальными являются наибольшие значения. Для проведения испытаний на газотурбинном двигателе (рис. 1*b*) требуется от 3 до 10 литров образца, чтобы провести полный цикл работ по определению эксплуатационных параметров. Научные группы по всему миру не могут синтезировать такой объем топлива в кратчайшие сроки, поскольку требуются специализированные катализаторы. Стоимость указанных катализаторов высока, синтезирование их в большом объеме затруднительно. Поэтому на начальном этапе целесообразно проводить мультикритериальную оценку перспектив использования смесевых топлив, которая позволит отобрать наилучшие варианты для дальнейшего перехода к синтезированию SAF-топлив. В настоящей статье приведен пример выполнения первого этапа по определению оптимальных комбинаций смесевых топлив, который продемонстрировал, что проведение мультикритериальной оценки полезно для газотурбинных двигателей и энергоустановок малой и средней мощности.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что применение биодобавок к жидким топливам приводит к ограниченным (с учетом совокупности энергетических, экономических и технологических индикаторов) и значительным (по экологическим индикаторам) эффектам. В настоящей работе рассмотрены композиции на примере керосина как наиболее чистого жидкого топлива с добавлением растительных масел и эфиров жирных кислот этих масел. За счет проведения мультикритериального анализа определены топливные композиции, которые по совокупности показателей имеют повышенные значения безразмерного коэффициента эффективности. Выделена совокупность показателей, которые для жидких топлив с биодобавками могут быть повышены относительно керосина. Представленный в настоящей работе подход можно считать определенной базой для дальнейшего поиска оптимальных соотношений компонентов и выбора сырья при синтезировании жидких биотоплив различного назначения.

Список литературы

1. Scheelhaase J., Grimme W., Maertens S. EU trilogue results for the aviation sector — key issues and expected impacts // *Transp. Res. Procedia*. 2024. Vol. 78. P. 206-1–206-14.
2. Qiu R., Xu J., Zeng Z., Chen X., Wang Y. Carbon tax policy-induced air travel carbon emission reduction and biofuel usage in China // *J. Air Transp. Manag.* 2022. Vol. 103. P. 102241-1–102241-10.

3. Millinger M., Reichenberg L., Hedenus F., Berndes G., Zeyen E., Brown T. Are biofuel mandates cost-effective? — an analysis of transport fuels and biomass usage to achieve emissions targets in the European energy system // *Appl. Energy*. 2022. Vol. 326. P. 120016-1–120016-15.
4. Moiola E., Schildhauer T. Negative CO₂ emissions from flexible biofuel synthesis: Concepts, potentials, technologies // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022. Vol. 158. P. 112120-1–112120-15.
5. Nordin I., Elofsson K., Jansson T. Cost-effective reductions in greenhouse gas emissions: Reducing fuel consumption or replacing fossil fuels with biofuels // *Energy Policy*. 2024. Vol. 190. P. 114138-1–114138-15.
6. Vickram A.S., Saravanan A., Kumar S., Thamaral P., Yasodha S., Jamuna G., Rangasmy G. An integrated approach to the sustainable development and production of biofuel from biopolymers and algal biomass derived from wastewater // *Fuel*. 2023. Vol. 349. P. 128691-1–128691-15.
7. Mohanty A., Ajmera S., Chinnam S., Kumar V., Mishra R.K., Acharya B. Pyrolysis of waste oils for biofuel production: An economic and life cycle assessment // *Fuel Commun.* 2024. Vol. 18. P. 100108-1–100108-15.
8. Guimarães H.R., Bressanin J.M., Motta I.L., Chagas M.F., Klein B.C., Bonomi A., Watanabe M.D.B. Bottlenecks and potentials for the gasification of lignocellulosic biomasses and Fischer-Tropsch synthesis: A case study on the production of advanced liquid biofuels in Brazil // *Energy Convers. Manag.* 2021. Vol. 245. P. 114629-1–114629-15.
9. Zhang Q., Han Q., Bai H., Li Y., Zhu C., Xie W. Monolithic HZSM-5/SS-fiber catalysts with high coke-resistance and selectivity for catalytic cracking of castor oil to produce biofuel // *Renew. Energy*. 2024. Vol. 229. P. 120755-1–120755-15.
10. Naji S.Z., Tye C.T., Abd A.A. State of the art of vegetable oil transformation into biofuels using catalytic cracking technology: Recent trends and future perspectives // *Process Biochem.* 2021. Vol. 109. P. 148–168.
11. Hasanudin H., Asri W.R., Zulaikha I.S., Ayu C., Rachmat A., Riyanti E. et al. Hydrocracking of crude palm oil to a biofuel using zirconium nitride and zirconium phosphide-modified bentonite // *RSC Adv.* 2022. Vol. 12. P. 21916-1–21916-25.
12. Bezergianni S., Kalogianni A. Hydrocracking of used cooking oil for biofuels production // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. P. 3927-1–3927-32.
13. Bouzouita D., Lelevic A., Lorentz C., Venderbosch R., Pedersen T.H., Geantet C. et al. Co-processing bio-liquids with vacuum gasoil through hydrocracking // *Appl. Catal. B Environ.* 2022. Vol. 304. P. 120911-1–120911-10.
14. Bertouche S., Sahraoui N., Sabba N., Ayad N. Optimization of biofuel synthesis from used food oil by transesterification // *Desalin. Water Treatment*. 2022. Vol. 279. P. 178–186.
15. Kadjo B.S., Sako M.K., Diango R.A., Perilhon C., Hauquier F., Danlos A. Production of a high-energy solid biofuel from biochar produced from cashew nut shells // *Clean. Eng. Technol.* 2024. Vol. 21. P. 100776-1–100776-12.
16. Adib A.R., Rahman M.M., Hassan T., Ahmed M., Al Rifat A. Novel biofuel blends for diesel engines: Optimizing engine performance and emissions with *C. cohnii* microalgae biodiesel and algae-derived renewable diesel blends // *Energy Conversion Management*. X. 2024. Vol. 23. P. 100688-1–100688-24.
17. Laccourreye O., Maisonneuve H. French scientific medical journals confronted by developments in medical writing and the transformation of the medical press // *Eur. Ann. Otorhinolaryngol Head Neck Dis.* 2019. Vol. 136. P. 475–480.
18. Churchill J.G.B., Borugadda V.B., Dalai A.K. A review on the production and application of tall oil with a focus on sustainable fuels // *Renew Sustainable Energy Rev.* 2024. Vol. 191. Art. 114098.
19. Viccaro M., Cozzi M., Rocchi B., Romano S. Conservation agriculture to promote inland biofuel production in Italy: An economic assessment of rapeseed straight vegetable oil as a self-supply agricultural biofuel // *J. Cleaner Prod.* 2019. Vol. 217. P. 153–161.
20. Zhu G., Zhu M., Wang E., Gong C., Wang Y., Guo W., Dawling A.W. Natural biochar catalyst: Realizing the co-valorization of waste cooking oil into high-quality biofuel and carbon nanotube precursor via catalytic pyrolysis process // *Chemical Eng. J.* 2024. Vol. 486. P. 150195-1–150195-12.
21. Banga S.M., Pathak V.V. Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts // *Energy Nexus*. 2023. Vol. 10. P. 100209-1–100209-12.
22. Watson M.J., Machado P.G., Da Silva A.V., Saltar Y., Ribeiro C.O., Nascimento C.A.O., Dowling A.W. Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review // *J. Clean. Prod.* 2024. Vol. 449. P. 141472-1–141472-12.
23. Lau J.I.C., Wang Y.S., Ang T., Seo J.C.F., Khadaroo S.N.B.A. et al. Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF) // *Biomass and Bioenergy*. 2024. Vol. 186. P. 107277-1–107277-12.
24. 33768-2015 Г. ГОСТ 33768-2015. Метод определения кинематической вязкости. 2017. С. 2–4.
25. ГОСТ Р 50097-92 (ИСО 9101-87) Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. 1998. С. 1–13.
26. ГОСТ 1756-2000 (ИСО 3007-99). Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров Petroleum products. Determination of saturated vapours pressure. 2001. С. 1–26.

27. **ГОСТ 20287-2023** (ISO 30162019). Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания. 2023. С. 1–20.
28. **ГОСТ 6356-75**. Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле Petroleum products. Method of test for flash point boy closed cup. 1989. С. 1–6.
29. **Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P., Bansal R.C.** A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // *Renew. Sustainable. Energy Rev.* 2017. Vol. 69. P. 596–609.
30. **Vershinina K.Y.U., Dorokhov V.V., Romanov D.S., Strizhak P.A.** Comparing the ignition parameters of promising coal fuels // *Process Safety and Environ. Prot. Institution of Chemical Engineers*, 2020. Vol. 139. P. 273–282.
31. **Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Y., Strizhak P.A.** Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil // *Fuel*. 2021. Vol. 302. P. 121203-1–121203-15.
32. **Romanov D.S., Dorokhov V.V., Vershinina K.Y., Strizhak P.A.** Stabilized fuel slurries based on fine coal slime: Rheology, combustion and feasibility study // *Fuel*. 2024. Vol. 356. P. 129560-1–129560-14.

*Статья поступила в редакцию 22 ноября 2024 г.,
принята к публикации 5 декабря 2024 г.*