

Использование горчичного масла в качестве экологической добавки к нефтяному дизельному топливу

В.А. Марков, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор

В.В. Неверова, доцент

Са Бовзнь, магистрант

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru

Ключевые слова:

дизельный двигатель,
нефтяное дизельное топливо, альтерна-
тивное топливо,
растительное масло,
рапсовое масло,
горчичное масло,
смесевое биотопливо.

Истощение запасов нефтяных месторождений и ухудшающаяся экологическая обстановка приводят к необходимости поиска новых альтернативных источников энергии. Актуальность статьи обусловлена необходимостью более широкого использования альтернативных видов топлива в двигателях внутреннего сгорания. В качестве перспективных альтернативных видов топлива для дизельных двигателей рассматриваются топлива, получаемые из растительных масел и животных жиров, которые вырабатываются из возобновляемого сырья и отличаются хорошими экологическими качествами. Показаны преимущества использования топлива растительного происхождения в качестве моторного. Одним из распространенных в России растительных масел является горчичное масло. Рассмотрены возможные пути использования горчичного масла в качестве топлива для дизеля. Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и горчичного масла различного состава. Подтверждена возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов при использовании этих смесей в качестве топлива для автомобильных и тракторных дизелей.

1. Введение

Альтернативные моторные топлива находят все большее применение на транспорте и в других областях экономики. Необходимость широкого использования альтернативных топлив обусловлена истощением мировых запасов нефти, нарастающим дефицитом нефтепродуктов и повышением цен на нефтяные моторные топлива. При этом альтернативные топлива отличаются большим разнообразием. Проводятся обширные исследования возможностей использования в дизельных двигателях топлива растительного происхождения, в частности, биотоплива, получаемого из растительных масел [1, 2]. Использование этих видов топлива позволит удовлетворить ужесточающиеся требования к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей [3].

Следует отметить, что в связи с поэтапным введением жестких норм на выбросы вредных веществ с ОГ дизелей транспортного и автотракторного назначения и необходимостью выполнить ограничения на токсичность их ОГ экологические показатели двигателей внутреннего сгорания становятся приоритетными. В настоящее время к нормируемым токсичным компонентам ОГ относятся оксиды азота NO_x , монооксид углерода (угарный газ) CO , легкие газообразные несгоревшие углеводороды CH_x и твердые частицы или дымность ОГ. Из нормируемых газообразных токсичных компонентов ОГ дизелей наиболее значимы оксиды азота NO_x . Их доля в суммарных токсичных выбросах дизелей составляет от 30 до 80 % по массе и от 60 до 95 % по эквивалентной токсичности [3]. Другим важнейшим токсичным

компонентом ОГ дизелей считается выброс твердых частиц (выброс сажи, или дымность ОГ). Высокая потенциальная опасность этих частиц обусловлена их способностью аккумулировать на своей поверхности многие известные канцерогены и мутагены, а также незначительными размерами частиц, позволяющими им проникать в органы дыхания человека и накапливаться в них. Два нормируемых токсичных компонента — монооксид углерода CO и легкие негоревшие углеводороды $\text{C}_\text{H}_\text{x}$ — имеют значительно меньшую токсикологическую значимость. Так, в соответствии с данными [3] токсикологическая значимость CO, NO_x , $\text{C}_\text{H}_\text{x}$, твердых частиц и оксидов серы SO_x оценивается как отношение 1:41,1:3,16:200:22. Кроме того, выброс CO и $\text{C}_\text{H}_\text{x}$ значительно снижается при использовании средств очистки ОГ (установка нейтрализаторов).

Необходимо отметить, что определение концентрации в ОГ дизелей твердых частиц является достаточно сложной и трудоемкой технической задачей. Вместе с тем, выброс твердых частиц тесно коррелирует с содержанием сажи в ОГ или их дымностью. В связи с этим в настоящей работе для оценки выброса твердых частиц в качестве косвенного критерия, характеризующего выброс твердых частиц, выбрана дымность ОГ.

2. Необходимость и преимущества использования биотоплива в двигателях внутреннего сгорания

Среди альтернативных моторных топлив наиболее привлекательными представляются топлива, получаемые из возобновляемых сырьевых ресурсов — биотоплива растительного происхождения. Переход от энергетики, базирующейся на ископаемых ресурсах, к энергетике, потребляющей возобновляемое сырье, является одним из основных направлений развития современной экономики. Биомасса и ее отходы относятся к наиболее массовым и универсальным энергетическим ресурсам на Земле. Биомасса зеленых растений суши составляет 2350 млрд т, а ежегодный ее прирост — 130 млрд т, или $4,9 \cdot 10^{21}$ Дж энергии, что в десять раз превышает ежегодный расход энергии человечества. Планируется, что в ближайшие 10 лет доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе ведущих промышленных стран составит от 10 до 30 % [4]. Так, в соответствии с данными [5] к 2019 г. объем рынка «чистых» технологий составит 325,9 млрд долл. США (рис. 1). При этом рынок биотоплива оценивается в 112,5 млрд долл. (около 30 % всех возобновляемых источников энергии).

Российский агропромышленный комплекс, имея 11 % всей площади плодородных пахотных земель,

ежегодно производит около 260 млн т сухого вещества и отходов сельскохозяйственного производства, в том числе 150 млн т в растениеводстве. Государственная программа России по развитию сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 гг. предусматривает дальнейшее развитие биотехнологий — доведение к 2020 г. удельного веса отходов сельскохозяйственного производства, переработанного методами биотехнологий, до 12 % [5, 6].

Применительно к дизелям автотракторного типа в качестве перспективных энергоносителей рассматриваются топлива, производимые из растительных масел [7, 8, 9]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. В связи с этим возможна работа дизелей на указанных биотопливах без существенных конструкционных изменений двигателей и их систем.

Привлекательность указанных биотоплив объясняется не только возобновляемостью сырьевых ресурсов для их производства, но и возможностью сократить выбросы в окружающую среду углекислого газа (диоксида углерода) CO_2 , поскольку в этом случае осуществляется кругооборот кислорода и углекислого газа в атмосфере. Эта проблема стоит очень остро — в настоящее время в атмосферу ежегодно выбрасывается более 25 млн т углекислого газа, а к 2020 г. ежегодные выбросы CO_2 в атмосферу достигнут 35 млн т [6]. Углекислый газ не оказывает токсического действия на организм человека, но при его повышенном содержании в атмосфере создается парниковый эффект, приводящий к так называемому тепловому загрязнению окружающей среды. Вследствие этого повышается температура воздуха в нижних слоях атмосферы, происходит глобальное

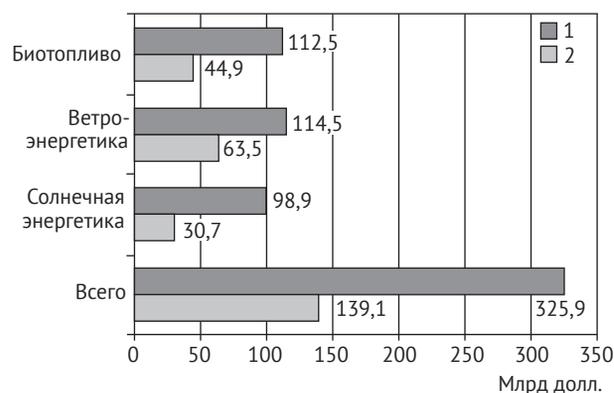


Рис. 1. Прогноз развития мирового рынка «чистых» технологий до 2019 г.: 1 — 2019 г.; 2 — 2009 г.

потепление, особенно заметное в крупных городах, наблюдаются различные климатические аномалии. Кроме того, повышение содержания в атмосфере CO_2 приводит к образованию озоновых дыр. При снижении концентрации озона в атмосфере повышается отрицательное воздействие жесткого ультрафиолетового излучения на организм человека. По экспертным оценкам, за период бурного развития промышленности (за последние 80–100 лет) произошло удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере земли (рис. 2). По прогнозам, к 2100 г. температура воздуха атмосферы повысится на 1–3,5 °С [10]. Решение этой проблемы возможно путем замены ископаемых сырьевых ресурсов топливом растительного происхождения, в частности — из растительных масел. Использование таких биотоплив позволяет решить проблему снижения выбросов в атмосферу углекислого газа, являющегося основным парниковым газом.

При использовании биотоплива, как правило, улучшаются показатели токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей ОГ, т.е. снижаются выбросы в атмосферу нормируемых токсичных компонентов — оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких несгоревших углеводородов CH_x , сажи (ее выброс характеризуется также дымностью ОГ). Сажа (углерод С) является основным компонентом нормируемых твердых частиц, содержащихся в ОГ. Кроме того, растительные масла сами по себе нетоксичны и быстро разлагаются в естественных условиях. Они не содержат серы, окисляющейся в цилиндрах дви-

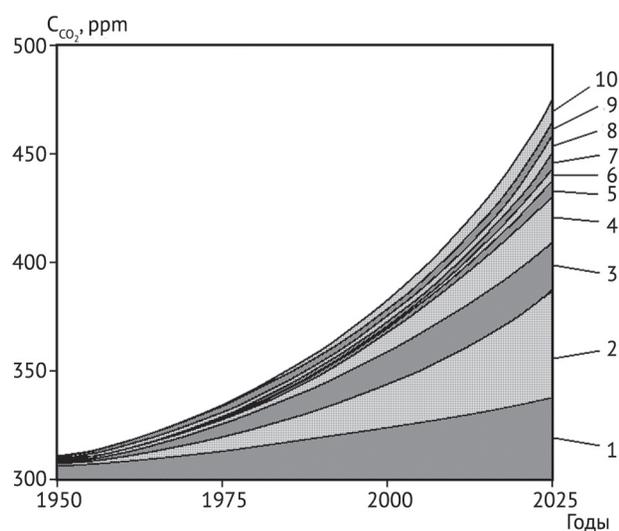


Рис. 2. Содержание CO_2 в атмосфере по регионам: 1 — США и Канада; 2 — бывший СССР и восточная Европа; 3 — Западная Европа; 4 — Китай и соседние страны; 5 — Дальний Восток; 6 — Австралия и Новая Зеландия; 7 — Ближний Восток; 8 — Центральная и Южная Америка; 9 — Африка; 10 — Южная Азия

гателя до диоксида SO_2 и триоксида SO_3 . Эти оксиды соединяются с парами воды атмосферы с образованием сернистой H_2SO_3 и серной H_2SO_4 кислот, которые являются причиной возникновения кислотных дождей. В отличие от нефтяных моторных топлив растительные масла не содержат в своем составе полициклических ароматических углеводородов (в частности, наиболее опасного из них — бенз(а)пирена $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$), которые адсорбируются на пористых частицах сажи ОГ и вызывают онкологические заболевания.

3. Применение растительных масел в качестве экологической добавки в нефтяное дизельное топливо

Источником растительных масел служат масличные культуры, в разных частях которых, главным образом в семенах или плодах, содержатся растительные жиры. К масличным относится более 150 видов растений, из которых вырабатываются растительные масла. Масличные культуры занимают значительное место в сельскохозяйственном производстве, причем вырабатываются как пищевые растительные масла, так и используемые для различных технических целей. Для непищевого использования применяются низкосортные, загрязненные и просроченные растительные масла, а также фритюрные масла, уже использованные в пищевой промышленности и системе общественного питания.

В Российской Федерации с точки зрения применения в качестве моторных топлив наиболее значимы такие виды масел, как рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, горчичное. При этом следует отметить особенность рынка растительных масел в России: если в мировом производстве масел наиболее значимы пальмовое и соевое масла, то в отечественной масложировой промышленности ведущее место занимает производство подсолнечного (86,84 % всего производства масел), соевого (7,96 %), рапсового (4,84 %), горчичного (0,11 %), кукурузного (0,04 %) и льняного (0,03 %) растительных масел [11].

Молекулы растительных масел включают атомы углерода (76–78 % по массе), водорода (10–12 %) и кислорода (10–12 %) [6, 9]. При этом структурные формулы жирных кислот растительных масел сходны со структурными формулами углеводородов дизельного топлива. В связи с этим все растительные масла горючие и могут быть использованы в качестве моторного топлива. Для этой цели могут быть использованы чистые растительные масла. Основным препятствием подобного применения растительных масел является высокая вязкость и их коксуемость в условиях КС дизеля, что приводит к отложениям

кокса на поверхностях КС, в первую очередь — на распылителях форсунок. Из растительных масел получают метиловый, этиловый или бутиловый эфиры, которые имеют существенно меньшую вязкость, и используют их в качестве либо самостоятельных топлив, либо в смесях с нефтяными топливами [6, 9]. В сельской местности, где отсутствует инфраструктура для производства указанных эфиров, наиболее привлекательным способом применения растительных масел в качестве моторного топлива представляется работа дизеля на смесях нефтяного дизельного топлива (ДТ) с растительными маслами с небольшим содержанием последних. Эти два компонента хорошо смешиваются в любых пропорциях, образуя стабильные смеси. При этом растительные масла можно рассматривать как кислородсодержащие присадки (оксигенаты), значительно улучшающие экологические характеристики нефтяных ДТ.

В настоящее время в странах Европы основной масличной культурой, используемой для выработки биотоплива, является рапс [6, 9, 12, 13]. Рапсовое масло (РМ) рассматривается в качестве основной сырьевой базы для производства моторных топлив и в России. Но поскольку горчица является четвертой по важности в России масличной культурой (после подсолнечника, рапса и сои), определенный интерес представляет использование горчичного масла (ГМ) как экологической добавки в нефтяное дизельное топливо. В связи с этим необходимо проанализировать физико-химические свойства ГМ с целью оценить возможности его использования в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ и целесообразную величину этой добавки.

4. Физико-химические свойства горчичного масла

Горчица относится к семейству крестоцветных наряду с такими известными сельскохозяйственными культурами, как капуста, редька, редис, репа, турнепс, хрен, рапс, рыжик и др. Горчичное масло

получают из семян горчицы путем прессования либо экстракции семян. Следует отметить, что физико-химические свойства горчичного масла зависят от сорта масличной культуры, условий ее выращивания и технологии переработки. В то же время свойства различных растительных масел во многом схожи между собой.

Свойства растительных масел зависят от состава и строения жиров, который в свою очередь определяется видом растения. Основу всех жиров составляют полные сложные эфиры глицерина и высших алифатических кислот [14, 15, 16]. Многие высшие алифатические кислоты впервые были выделены именно из жиров, поэтому в литературе их часто называют «жирными» кислотами. В составе сложного эфира одна молекула глицерина $C_3H_5(OH)_3$ связана с остатками трех жирных кислот (рис. 3), потому эти соединения называют триацилглицеридами (старое название триглицериды). Массовая доля триацилглицеридов в жирах составляет 93–98%. Остальные вещества, растворенные в жире и попавшие в него в процессе выработки масел, называются сопутствующими. Растительные масла содержат жирные кислоты с четным числом атомов углерода (например, C_{14} , C_{16} , C_{18} и др.). При этом в состав растительных масел входят как ненасыщенные жирные кислоты (олеиновая, линолевая, линоленовая и др.), так и насыщенные жирные кислоты (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.). Молекулы насыщенных жирных кислот не имеют двойных связей, а в ненасыщенных жирных кислотах присутствуют одна-три двойные связи. Жирнокислотный состав масла основных масличных культур России приведен в табл. 1. Сравнение жирнокислотного состава рапсового и горчичного масел дано в табл. 2 [16].

При использовании растительных масел в качестве дизельного топлива желательно, чтобы из входящих в состав масел непредельных жирных кислот преобладали олеиновая и линолевая кислоты, от-

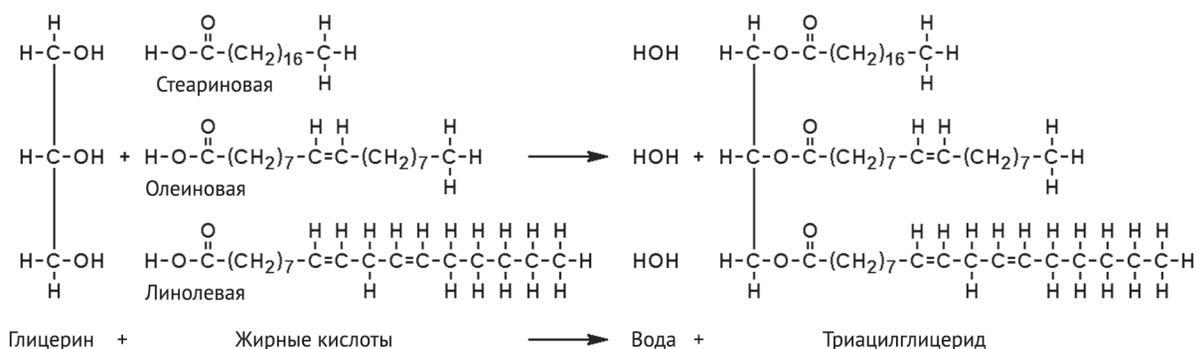


Рис. 3. Схема образования триацилглицеридов, входящих в состав растительных масел

Таблица 1

Жирнокислотный состав (содержание непредельных жирных кислот) масла основных масличных культур России

Культура	Содержание жира, %	Содержание жирных кислот в масле		
		Олеиновая	Линолевая	Линоленовая
Подсолнечник	до 57	14–40	48–74	до 0,3
Соя	до 27	17–30	48–59	4–11
Рапс	до 50	8–60	11–23	5–13
Горчица	до 45	8–23	10–24	6–18

личающиеся от линоленовой кислоты сравнительно высокой окислительной стабильностью. Сопоставление жирнокислотных составов рапсового и горчичного масел показывает, что эти составы достаточно схожи (см. табл. 1 и 2). В связи с этим ГМ может применяться как добавка к нефтяному ДТ.

Свойства растительных масел зависят от того, остатки каких высших алифатических кислот входят в состав триацилглицеридов. Чем больше доля предельных кислот, содержащих только простые одинарные связи, тем выше температура кипения и плавления такого масла, тем ближе оно по консистенции к твердым жирам (масло какао, пальмовое масло), тем ниже его реакционная способность в реакциях полимеризации и окисления. Присутствие в составе триацилглицеридов преимущественно непредельных высших кислот, содержащих одну или несколько двойных связей, снижает температуры кипения и плавления масел, но увеличивает их реакционную способность. Следует также отметить, что разные виды, а также сорта масличных культур одного вида могут давать масло различных типов, в зависимости от условий выращивания.

Жидкие растительные масла уже применяются в качестве дизельных топлив [6, 9]. Однако очень высокие йодные числа некоторых масел свидетельствуют о присутствии в их составе значительных количеств эфиров линоленовой кислоты, что способствует протеканию реакции полимеризации и может привести к изменениям в структуре масла во время

хранения. В связи с этим для использования в качестве моторного топлива более предпочтительны масла, главными непредельными кислотами которых являются олеиновая и линолевая. В табл. 3 приведены некоторые физико-химические свойства растительных масел и товарного летнего дизельного топлива (ДТ) [6, 9].

Проведенный анализ показал, что по своим физико-химическим свойствам растительные масла заметно отличаются от нефтяного ДТ. Цетановое число растительных масел, характеризующее его самовоспламеняемость в КС дизеля, несколько ниже. Кроме того, растительные масла заметно отличаются от нефтяного ДТ по фракционному составу. Температура начала кипения масел очень высокая (около 280–300 °С), при атмосферном давлении разогнать его на отдельные фракции не представляется возможным из-за термического разложения масла. На режимах с низкой нагрузкой (в том числе на режимах холостого хода) температура поршней дизеля снижается. Растительное масло, попадающее на поршень и имеющее высокую температуру кипения, в этом случае не испаряется и не воспламеняется при смешивании с воздухом или сгорает не полностью. Несгоревшее топливо поршневыми кольцами перемещается вниз по гильзе цилиндра, попадает в картер и смешивается со смазочным маслом. В результате моторное масло разбавляется попадающим в него растительным маслом, что может привести к образованию в картере резинообразной субстанции и выходу дизеля из строя. Поэтому в дизелях, работающих на чистых растительных маслах, приходится чаще менять моторное масло. Из-за указанных причин наиболее распространенные в настоящее время дизели с непосредственным впрыскиванием топлива (с неразделенной камерой сгорания — КС) нежелательно длительно эксплуатировать на чистых растительных маслах. Еще одним недостатком использования чистых растительных масел в этих двигателях являются коксовые отложения на форсунках (коксование распыливающих отверстий форсунок), поршнях и поршневых кольцах. В предкамерных

Таблица 2

Сравнение жирнокислотного состава рапсового и горчичного масел

Растительное масло	Массовая доля жирных кислот растительных масел						
	Миристиновая $C_{14}H_{28}O_2$ или $C 14:0$	Пальмитиновая $C_{16}H_{32}O_2$ или $C 16:0$	Стеариновая $C_{18}H_{36}O_2$ или $C 18:0$	Олеиновая $C_{18}H_{34}O_2$ или $C 18:1$	Линолевая $C_{18}H_{32}O_2$ или $C 18:2$	Линоленовая $C_{18}H_{30}O_2$ или $C 18:3$	Эруковая $C_{22}H_{42}O_2$ или $C 22:1$
Рапсовое	0–0,2	1,5–6,0	0,5–3,1	8,0–60,0	11,0–23,0	5,0–13,0	2,0–60,0
Горчичное	0–1,0	0,5–4,5	0,5–2,0	8,0–23,0	10,0–24,0	6,0–18,0	22,0–50,0

Примечание. После названия жирной кислоты приведены формула состава и условная формула состава, в которой первая цифра соответствует числу атомов углерода, а вторая — числу двойных связей в молекуле.



Таблица 3

Физико-химические свойства нефтяного ДТ и растительных масел

Показатель	ДТ по ГОСТ 305–82	Масла
Цетановое число	Не ниже 45	35–40
Плотность при 20 °С, кг/м ³	Не более 860 (840)	900–960
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,0–6,0 (1,8–5,0)	58–92
Фракционный состав, °С:		
температура начала кипения	Н/н, 160–170	Около 300
50 %	Не выше 280	Перегоняется с разложением
96 %	Не выше 360 (340)	
Температура застывания, °С	Не выше –10 (–35)	от –30 до –1
Температура помутнения, °С	Не выше –5 (–25)	от –15 до –22*
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Не ниже 40 (35)	Не ниже 180
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Н/н, около 43 000	37 000–40 900
Массовая доля серы, %	Не более 0,2	до 0,0008
Массовая доля меркаптановой серы, %	Не более 0,01	Отсутствует
Содержание сероводорода, %	Отсутствует	Отсутствует
Испытание на медной пластине	Выдерживает	Выдерживает
Содержание водорастворимых кислот и щёлочей	Отсутствуют	Отсутствуют
Кислотность, мг КОН/100 см ³	Не более 5	50–90
Йодное число, г йода/100 г	Не более 6	80–180 (8–15**)
Коксуемость, %	Не более 0,30	Не более 0,35
Зольность, %	Не более 0,01	Не более 0,03
Содержание механических примесей	Отсутствуют	Отсутствуют
Содержание воды, %	Отсутствует	Отсутствует

Примечание.* – для рапсового и подсолнечного масел; ** – для твёрдых масел, н/н – не нормируется; во втором столбце указаны показатели летнего ДТ (в скобках – зимнего ДТ).

и вихрекамерных дизелях длительная работа на растительных маслах возможна, так как при этом масло дополнительно подогревается в этих камерах перед его воспламенением в основной камере, что способствует лучшему смешиванию с воздухом и более полному сгоранию. По этим причинам преимущества имеют и дизели с полуразделенными КС в поршне (например, дизели с камерой типа ЦНИДИ), в которых топливо впрыскивается не в открытую камеру, а в камеру в поршне.

Одной из серьезных проблем использования растительных масел в качестве топлива для дизелей является повышенная вязкость растительных масел — она на порядок выше, чем у нефтяного ДТ. Эта характеристика определяет качество распыления топлива, смесеобразования и последующего сгорания. Вязкость растительного масла может быть понижена его нагреванием (особенно при низких температурах) или разжижением путём добавления в него менее вязкого нефтяного ДТ.

Следует также отметить, что теплотворная способность растительных масел несколько ниже, чем у нефтяного ДТ, поскольку молекулы этих масел содержат значительное количество атомов кислорода (до 12 % по массе, у нефтяного ДТ — 0,4 %). В связи

с этим удельный эффективный расход растительного масла заметно выше, чем расход нефтяного ДТ, при примерно равной эффективности процесса сгорания (и близком эффективном КПД двигателя). В табл. 4 представлены высшая и низшая теплота сгорания некоторых растительных масел [6, 9]. Теплотворная способность нефтяного и альтернативных видов топлива, характеризующаяся этими двумя параметрами, предопределяет удельный эффективный расход топлива.

Следует отметить, что указанный удельный эффективный расход топлива в значительной степени зависит от конструктивных особенностей двигателя. В современных предкамерных и вихрекамерных двигателях он особенно велик. Несколько повышен он и в дизелях с полуразделенными КС. Для снижения удельного эффективного расхода топлива двигателя

Таблица 4

Теплота сгорания нефтяного ДТ и растительных масел

Теплота сгорания, МДж/кг	Топливо				
	ДТ	подсолнечное	соевое	рапсовое	горчицное
Высшая	45,0	39,7	39,6	40,2	39,8
Низшая	42,5	37,1	37,0	37,5	37,2

специально дорабатываются для их адаптации к работе на чистых растительных маслах. В двигателях, специально сконструированных для работы на растительных маслах, обычно реализуются мероприятия, способствующие повышению температурного уровня в КС (теплоизоляция поршней, повышение степени наддува и др.) и вихревого движения воздушного заряда.

5. Экспериментальные исследования дизеля, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавлением горчичного масла

Экспериментальные исследования различных дизелей на топливах, полученных из горчичного масла, уже проведены в России [17, 18] и за рубежом [19, 20, 21]. Однако в этих работах недостаточное внимание уделено показателям токсичности ОГ исследованных дизелей. Для оценки возможности использования горчичного масла в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода. Исследовались нефтяное ДТ и его смеси с горчичным маслом, содержащие до 10 % ГМ. Некоторые свойства этих топлив представлены в табл. 5, а параметры исследуемого дизеля — в табл. 6. На рис. 4 приведена схема камеры сгорания дизеля типа Д-245.12С со схемой расположения форсунки.

Дизель исследован на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-режимного испытательного цикла Правил ECE R49 ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) $\Theta = 13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД). Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера МК-3 фирмы Hartridge с погрешностью измерения $\pm 1\%$, а концентрации в ОГ оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO, легких несгоревших углеводородов C_nH_x в ОГ — газоанализатором SAE-7532 фирмы Yanaco с погрешностью измерения указанных компонентов $\pm 1\%$.

6. Результаты экспериментальных исследований дизеля

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ с максимальной подачей топлива на чистом ДТ и на смеси 90 % ДТ и 10 % ГМ. Это смесевое биотопливо имеет физические свойства, близкие к свойствам нефтяного ДТ, но его плотность и вязкость несколько выше (см. табл. 5). Поэтому при переходе от ДТ к исследуемому смесевому биотопливу отмечено небольшое увеличение часового расхода топлива G_T и некоторое

Физико-химические свойства исследуемых видов топлива

Таблица 5

Свойство	Топливо				
	ДТ	РМ	ГМ	Смесь 95 ДТ и 5 % ГМ	Смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830,0	916,0	920,0	835	839
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	75,0	70,0	5,0	7,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	33,1	—	—
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42500	37300	37200	42100	41900
Цетановое число	45	36	35	—	—
Температура самовоспламенения, °С	250	318	320	—	—
Температура помутнения, °С	-25	-9	-8	—	—
Температура застывания, °С	-35	-20	-18	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,31	12,50	12,44	14,19	14,11
Содержание, % по массе					
С	87,0	77,0	77,1	86,5	86,0
Н	12,6	12,0	11,8	12,5	12,5
О	0,4	11,0	11,1	1,0	1,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,002	0,002	0,190	0,180

Примечание. «—» — свойства не определялись; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов.

Параметры дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)

Параметр	Значение
Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра D , мм	110
Ход поршня S , мм	125
Общий рабочий объем $iV_{р}$, л	4,32
Степень сжатия ϵ	16,0
Система турбонаддува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Тип камеры сгорания, способ смесеобразования	Камера сгорания типа ЦНИДИ, объемно-пленочное смесеобразование
Номинальная частота вращения n , мин ⁻¹	2400
Номинальная мощность N_e , кВт	80
Система питания	Разделенного типа
Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Рядный типа <i>PP4M10U1f</i> фирмы <i>Motorpal</i> со всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД $d_{пл}$, мм	10
Ход плунжеров ТНВД $h_{пл}$, мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов $L_{т}$, мм	540
Форсунки	Типа ФДМ-22 производства ОАО «Куроаппаратура» (г. Вильнюс)
Распылители форсунок	Фирмы <i>Motorpal</i> типа <i>DOP 119S534</i> с пятью сопловыми отверстиями диаметром $d_p=0,34$ мм и проходным сечением $\mu_{рf_p} = 0,250$ мм ²
Давление начала впрыскивания форсунок $p_{ф0}$, МПа	21,5

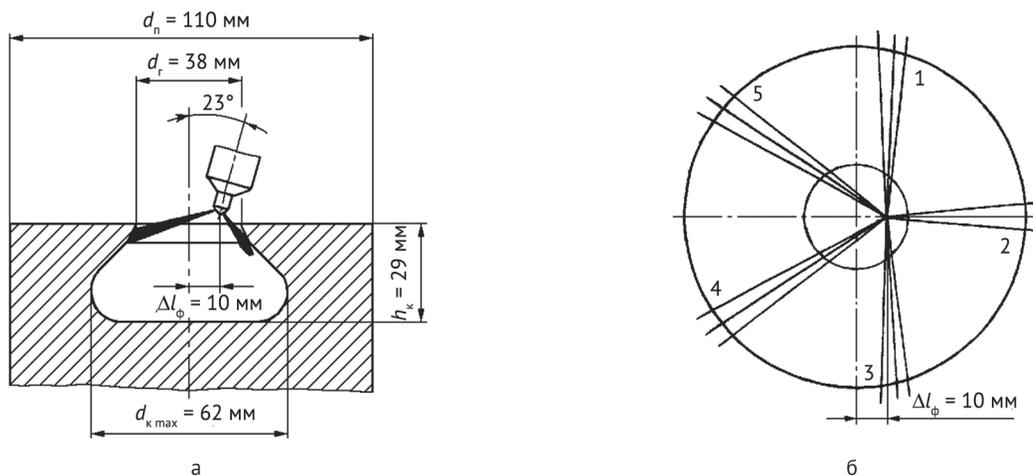


Рис. 4. Камера сгорания типа ЦНИДИ дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентации струй распыляемого топлива в КС (б): 1, 2, 3, 4, 5 – номера струй распыляемого топлива; $d_{к\max}$ и h_k – максимальный диаметр камеры в поршне и ее глубина; d_r – диаметр горловины КС; Δl_ϕ – смещение форсунки относительно оси КС

уменьшение коэффициента избытка воздуха α . Однако крутящий момент дизеля и его эффективная мощность изменились незначительно (рис. 5 и табл. 7).

Из-за наличия в молекулах ГМ атомов кислорода теплотворная способность смесового биотоплива оказалась несколько ниже теплотворной способности ДТ. Это привело к тому, что при использовании смеси 90 % ДТ и 10 % ГМ на большинстве исследуе-

мых режимов удельный эффективный расход топлива g_e оказался несколько выше, чем при работе на ДТ. В частности, при переходе с ДТ на указанное смесовое биотопливо на режиме максимальной мощности с частотой вращения коленчатого вала $n = 2400$ мин⁻¹ удельный эффективный расход топлива g_e увеличился с 248,2 до 253,4 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ — с 226,2

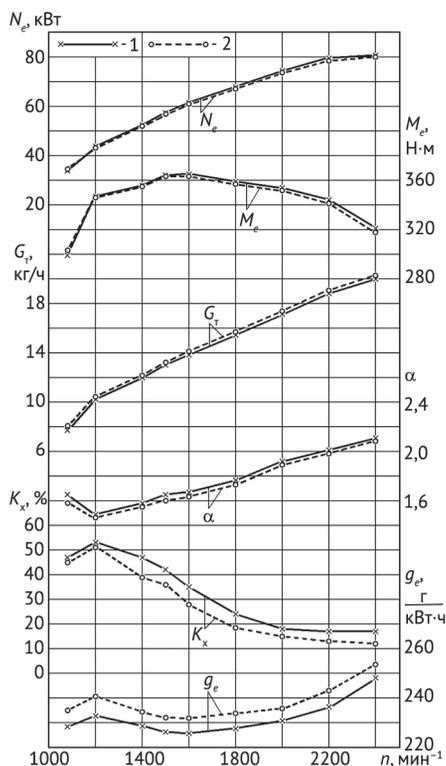


Рис. 5. Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , расхода топлива G_t , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизеля типа Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 – ДТ; 2 – смесь 90% ДТ и 10% ГМ

до 231,9 г/(кВт·ч). Но при этом эффективный КПД дизеля η_e на этих режимах изменился незначительно (см. табл. 7).

Наличие в молекулах ГМ атомов кислорода привело к заметному уменьшению дымности ОГ при работе дизеля на исследуемом смесевом биотопливе. Так, на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ переход с ДТ на смесь 90% ДТ и 10% ГМ сопровождался снижением дымности ОГ K_x от 17 до 12% по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — с 42 до 36% по шкале Хартриджа (см. рис. 5 и табл. 7).

На втором этапе дизель испытывался на режимах 13-режимного цикла норм ECE R49. Этот испытательный цикл (рис. 6) включает 13 установившихся режимов: три режима холостого хода с минимальной частотой вращения $n = 0,25-0,3 n_{\text{ном}}$ (всего 25% времени работы), пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100% нагрузки) при номинальной частоте вращения $n_{\text{ном}}$ и пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100% нагрузки) при частоте вращения $n_{\text{Мmax}} = 0,6-0,7 n_{\text{ном}}$, соответствующей максимальному крутящему моменту. Доля номинального режима составляет 10% общего времени работы, а доля режима максимального крутящего момента — 25%.

Результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С на режимах 13-режимного испытательного цикла ECE R49 представлены на

Таблица 7

Показатели дизеля типа Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и его смесях с горчичным маслом

Показатель	Топливо		
	ДТ	Смесь 95% ДТ и 5% ГМ	Смесь 90% ДТ и 10% ГМ
Часовой расход топлива G_t , кг/ч:			
– на режиме максимальной мощности	20,00	20,17	20,25
– на режиме максимального крутящего момента	13,00	13,13	13,22
Крутящий момент дизеля M_e , Н·м:			
– на режиме максимальной мощности	321	321	318
– на режиме максимального крутящего момента	364	366	363
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)			
– на режиме максимальной мощности	248,2	250,1	253,4
– на режиме максимального крутящего момента	226,2	228,9	231,9
Эффективный КПД дизеля η_e :			
– на режиме максимальной мощности	0,341	0,341	0,339
– на режиме максимального крутящего момента	0,374	0,373	0,370
Дымность ОГ K_x , % по шкале Хартриджа:			
– на режиме максимальной мощности	17	15	12
– на режиме максимального крутящего момента	42	38	36
Интегральные на режимах 13-режимного цикла эффективные показатели двигателя:			
– эффективный расход топлива $g_{e \text{ усн}}$, г/(кВт·ч)	244,63	247,17	251,08
– эффективный КПД $\eta_{e \text{ усн}}$	0,346	0,346	0,342
Интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч):			
– оксидов азота e_{NOx}	5,911	5,760	5,689
– монооксида углерода e_{CO}	2,184	2,140	2,068
– несгоревших углеводородов $e_{\text{СНх}}$	0,675	0,602	0,561



рис. 7. Как отмечено выше, использование рассматриваемого смесового биотоплива привело к незначительному увеличению часового расхода топлива G_T . Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ величина G_T возросла с 20,00 до 20,25 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — с 13,00 до 13,22 кг/ч (см. рис. 7а и табл. 7).

При использовании смесового биотоплива отмечена тенденция к снижению концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} (см. рис. 7б). Так, при переводе дизеля с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ на режиме холостого хода при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ концентрация C_{NOx} была одинаковой и равной 0,0100 %. На режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ она снизилась с 0,0640 до 0,0625 %, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ — с 0,0550 до 0,0545 %.

На большинстве исследованных режимов при использовании смесового биотоплива отмечена тенденция к снижению содержания в ОГ монооксида углерода C_{CO} (см. рис. 7в). На режиме холостого хода при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ перевод дизеля с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ сопровождался уменьшением значения C_{CO} с 0,0400 до 0,0390 %, на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — с 0,0300 до 0,0275 %, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ — с 0,0100 до 0,0091 %.

Применение исследуемого смесового биотоплива оказало положительное влияние и на концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов C_{CHx} (см. рис. 7з). На режиме холостого хода при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ отмечено снижение C_{CHx} от 0,0215 до 0,0210 %, на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — с 0,0130 до 0,0105 %, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ — с 0,0076 до 0,0050 %.

По приведенным на рис. 7 характеристикам содержания в ОГ газообразных нормируемых токсичных компонентов (NO_x , CO , CH_x) с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-режимного цикла ECE R49 (соответственно e_{NOx} , e_{CO} , e_{CHx}). При этом на каждом режиме определялась концентрация в ОГ токсичных компонентов (C_{NOx} , C_{CO} , C_{CHx} , $C_{\text{Tч}}$) и рассчитывались их часовые массовые выбросы (E_{NOx} , E_{CO} , E_{CHx} , $E_{\text{Tч}}$). Полученные значения вредных выбросов суммировались за весь цикл по каждому компоненту (с учетом весовых коэффициентов K_i) и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл $\sum(N_{ei} \cdot K_i)$ определялись удельные выбросы вредных веществ по формулам [6, 9]:

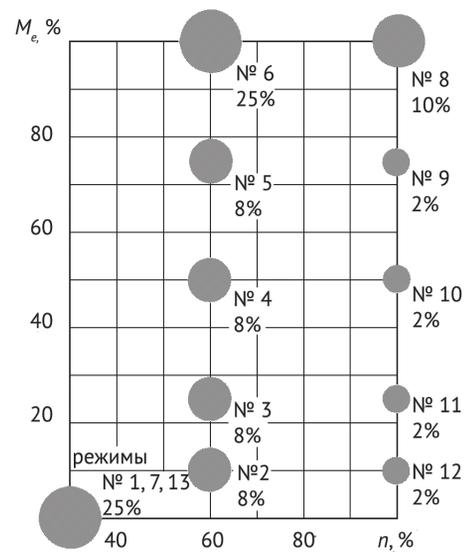


Рис. 6. Европейский 13-режимный цикл (нормы ECE R49) для оценки токсичности ОГ дизелей общей массой более 3,5 т в стендовых условиях
Примечание. Указаны номер режима и доля работы дизеля на этом режиме в процентах (далее используется эта доля в относительных единицах K_i).

$$e_{\text{NOx}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{NOxi}} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad e_{\text{CO}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{COi}} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i},$$

$$e_{\text{CHx}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CHxi}} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}.$$

Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-режимного цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива $g_{e \text{ усл}}$ и по условному эффективному КПД $\eta_{e \text{ усл}}$, которые определялись с использованием зависимостей [6, 9]:

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad \eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{e \text{ усл}}},$$

где: G_{Ti} и N_{ei} — часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на i -м режиме; K_i — весовой коэффициент режима (доля времени этого режиме); H_U — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг. Результаты расчетов указанных параметров представлены в табл. 7.

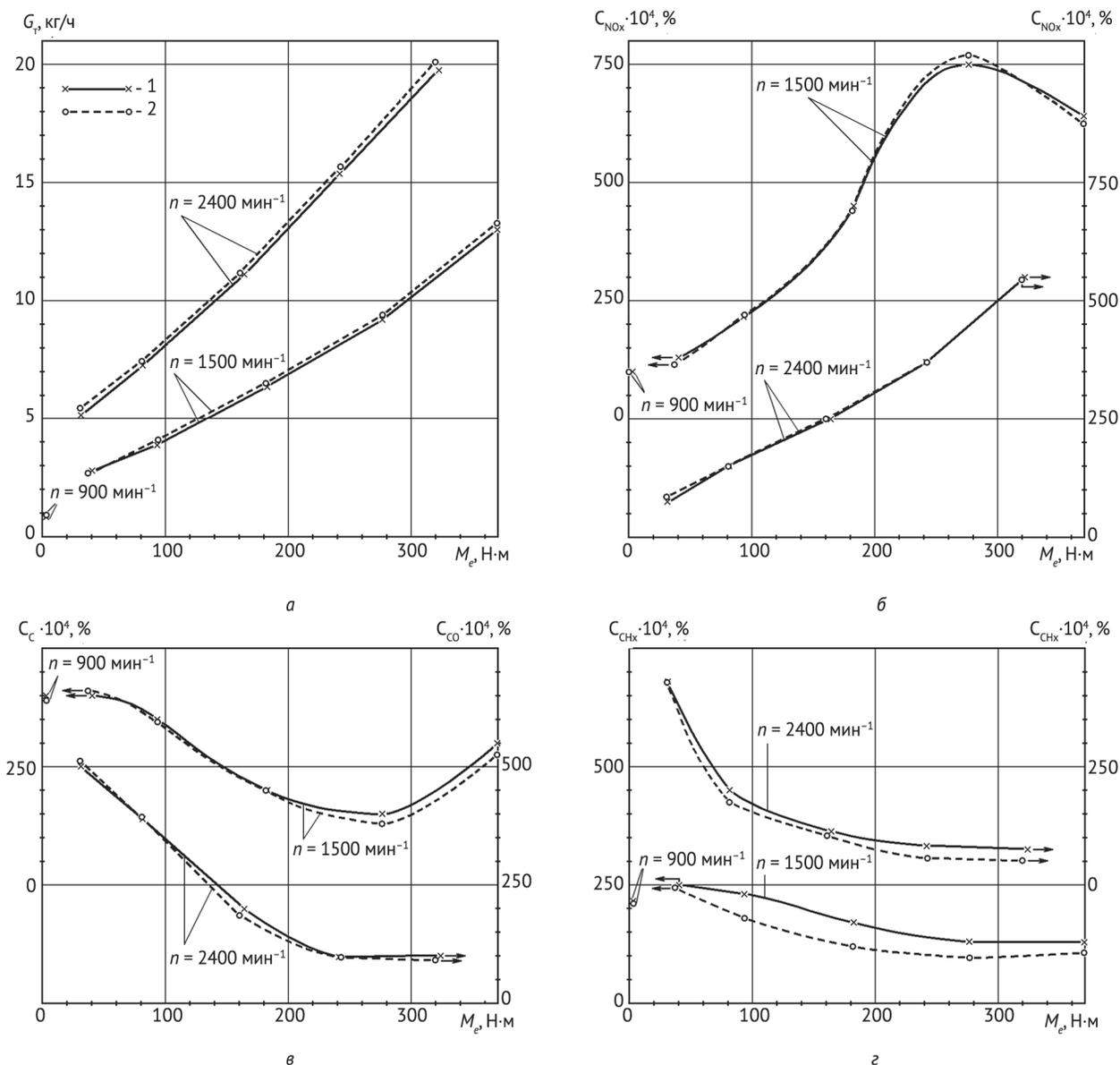


Рис. 7. Зависимость часового расхода топлива G_f (а), объемной концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и несгоревших углеводородов C_{CHx} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля типа Д-245.12С: 1 – ДТ; 2 – смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ

Представленные на рис. 5 и 7 характеристики получены при испытаниях дизеля типа Д-245.12С на ДТ и смеси 90 % ДТ и 10 % ГМ. Аналогичные характеристики определены и при испытаниях этого дизеля на смеси 95 % ДТ и 5 % ГМ. По результатам этих исследований определены интегральные на режимах 13-режимного цикла показатели топливной экономичности и удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ. Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 8 и в табл. 7.

В диапазоне изменения содержания ГМ в смесях биотопливе $C_{ГМ}$ от 0 до 10 % отмечено увеличение удельного эффективного расхода топлива g_e , составившее на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента около 5 г/кВт·ч (см. рис. 8б и табл. 7). Однако при этом эффективный КПД дизеля η_e изменялся незначительно. В рассматриваемом диапазоне изменения $C_{ГМ}$ отмечено значительное снижение дымности ОГ K_x , составившее на режимах максимальной мощности и макси-

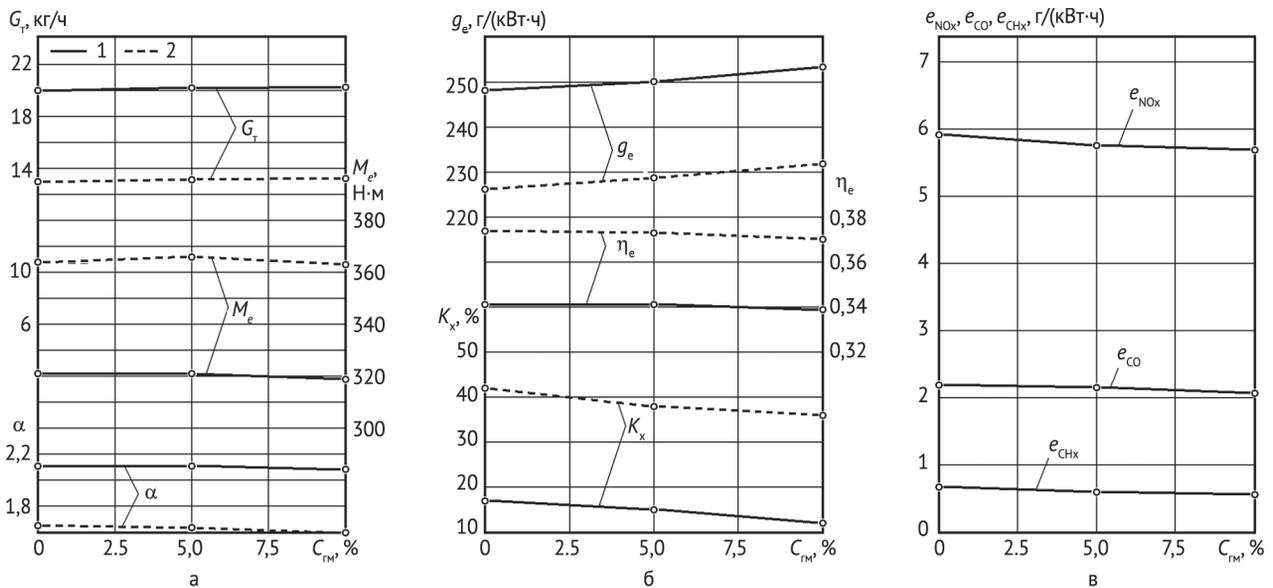


Рис. 8. Зависимость часового расхода топлива G_T , крутящего момента M_e и коэффициента избытка воздуха α на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного КПД η_e и дымности ОГ K_x на режимах ВСХ (б) и удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NOx} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CHx} с ОГ на 13-режимном цикле (в) дизеля Д-245.12С от содержания ГМ в смесевом биотопливе $C_{ГМ}$: 1 – на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 – на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

мального крутящего момента соответственно 5 и 6 % по шкале Хартриджа (см. рис. 8б и табл. 7).

Приведенные на рис. 8в и в табл. 7 данные подтверждают возможность улучшения экологических показателей дизеля типа Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ. При этом отмечено снижение интегральных на режимах 13-режимного цикла удельных массовых выбросов всех трех газообразных нормируемых токсичных компонентов ОГ. Выброс оксидов азота e_{NOx} уменьшился с 5,911 до 5,689 г/(кВт·ч), монооксида углерода e_{CO} — с 2,184 до 2,068, несгоревших углеводородов e_{CHx} — с 0,675 до 0,561 г/(кВт·ч).

Указанное улучшение экологических показателей при использовании смесей ДТ и ГМ получено без изменения конструктивных и регулировочных параметров дизеля типа Д-245.12С. Для большего снижения выбросов токсичных компонентов ОГ и улучшения показателей топливной экономичности дизеля при его адаптации к работе на биотопливе необходимо совершенствовать конструкцию проточной части распылителей форсунок, согласование струй топлива с формой КС, а также уточнить регулировочные параметры дизеля (в первую очередь — значения угла опережения впрыскивания топлива и организация его регулирования при изменении свойств топлива). Целесообразна оптимизация состава смесей ДТ и ГМ.

7. Заключение

Перспективными альтернативными топливами для дизельных двигателей являются топлива, получаемые из растительных масел. Эти топлива вырабатываются из возобновляемого сырья и отличаются хорошими экологическими качествами. Рассмотрена возможность использования в отечественном дизеле смесей нефтяного дизельного топлива с горчичным маслом. Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и горчичного масла различного состава.

Подтверждена возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов при использовании этих смесей в качестве топлива для автомобильных и тракторных дизелей. При переводе дизеля типа Д-245.12С с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ отмечено снижение интегральных на режимах 13-режимного цикла удельных массовых выбросов всех трех газообразных нормируемых токсичных компонентов ОГ. Выброс оксидов азота e_{NOx} уменьшился с 5,911 до 5,689 г/(кВт·ч), монооксида углерода e_{CO} — с 2,184 до 2,068 г/(кВт·ч), несгоревших углеводородов e_{CHx} — с 0,675 до 0,561 г/(кВт·ч). В рассматриваемом диапазоне изменения $C_{ГМ}$ отмечено значительное снижение дымности ОГ K_x , составившее на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента соответственно 5 и 6 % по шкале Хартриджа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В. Оценка экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями // Безопасность в техносфере. 2014. № 2. С. 23–32.
2. Марков В.А., Маркова В.В., Сивачев В.М., Сивачев С.М. Оптимизация состава смесового биотоплива для дизельных двигателей // Безопасность в техносфере. 2014. № 6. С. 19–30.
3. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
4. Попель О.С., Фортвов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 450 с.
5. Федоренко В.Ф., Сорокин Н.Т., Буклагин Д.С., Мишурин Н.П., Тихонравов В.С. Инновационное развитие альтернативной энергетики: Часть 1 / В.Ф. Федоренко, Н.Т. Сорокин, Д.С. Буклагин, Н.П. Мишурин, В.С. Тихонравов. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 348 с.
6. Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. 292 с.
7. Каменев В.Ф., Шатров М.Г., Теренченко А.С., Карпунин К.Е. Тепловые двигатели установок электро- и теплоснабжения, использующие биотоплива. М.: Изд-во МАДИ, 2014. 92 с.
8. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
9. Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 536 с.
10. Morgan M.G., Dowlatabadi H. Energy Technology R@D Essential to Curb Global Warming // Environmental Science & Technology. 1997. Vol. 31. № 12. P. 574A-575A.
11. Година Е.Д. Определение теплоты сгорания дизельного смесового биотоплива из соевого масла // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Том. 10. № 5 С. 25–29.
12. Ашпина О. Рапс — культура стратегическая // The Chemical Journal (Химический журнал). 2005. № 9. С. 40–44.
13. Савельев Г.С. Производство и использование биодизельного топлива из рапса. М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2007. 96 с.
14. Паронян В.Х. Технология жиров и жирозаменителей. М.: Изд-во «ДеЛи принт», 2006. 760 с.
15. Тютюнников Б.Н., Гладкий Ф.Ф., Бухитаб З.И., Мельник А.П., Бутенев В.П. Химия жиров. М.: Колос, 1992. 448 с.
16. Кодекс «Алиментарийс» (лат. «Продовольственный кодекс»). Жиры, масла и производные продукты: Пер. с англ. М.: Весь мир, 2007. 68 с.
17. Уханов А.П., Уханов Д.А., Голубев В.А. Перспективы использования биотоплива из горчицы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. — 2011. — № 1. — С. 88–92.
18. Уханов А.П., Уханов Д.А., Шемелев Д.С. Дизельное смесовое топливо. — Пенза: РИО Пензенской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. — 147 с.
19. Niemi S.A., Illikanen P.E., Laiho V.O.K. A Tractor Engine Fueled with Mustard Seed Oil: Optimization, Emissions and Practical Experiences // SAE Technical Paper Series. — 1997. — № 972724. — P. 11–25.
20. Niemi S.A., Hatonen T., Laiho V.O.K. Results from a Durability Test of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine // SAE Technical Paper Series. — 1998. — № 982528. — P. 1–15.
21. Niemi S.A., Murtonen T.T., Lauren M.J., Laiho V.O.K. Exhaust Particulate Emissions of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine // SAE Technical Paper Series. — 2002. — № 2002-01-0866. — P. 1–12.

REFERENCES

1. Markov V.A., Devyanin S.N., Markova V.V. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti silovykh ustanovok s dizel'nymi dvigatelyami [Assessment of the environmental safety of power plants with diesel engines]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2014, I. 2, pp. 23–32.
2. Markov V.A., Markova V.V., Sivachev V.M., Sivachev S.M. Optimizatsiya sostava smesovogo biotopliva dlya dizel'nykh dvigateley [Optimization of the composition of the mix of biofuel for diesel engines]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2014, I. 6, pp. 19–30.
3. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [The toxicity of the exhaust gases of diesel engines]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 376 p.
4. Popel' O.S., Fortov V.E. *Vozobnovlyаемая энергетика v sovremennom mire* [Renewable energy in the world today]. Moscow, MEI Publ., 2015. 450 p.
5. Fedorenko V.F., Sorokin N.T., Buklagin D.S., Mishurin N.P., Tikhonravov V.S. *Innovatsionnoe razvitie al'ternativnoy energetiki* [Innovative development of alternative energy]. Moscow, FGNU «Rosinformagrotekh» Publ., 2010. 348 p.
6. Markov V.A., Devyanin S.N., Zыkov S.A., Gaydar S.M. *Biopliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Biofuels for

- internal combustion engines]. Moscow, NITs «Inzhener» (Soyuz NIO) Publ., 2016. 292 p.
7. Kamenev V.F., Shatrov M.G., Terenchenko A.S., Karpukhin K.E. *Teplovye dvigateli ustanovok elektro-i teplosnabzheniya, ispol'zuyushchie biotopliva* [Thermal engines installations electricity and heat using biofuels]. Moscow, MADI Publ., 2014. 92 p.
 8. Vasil'ev I.P. *Vliyanie topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya* [Effect of plant fuels for environmental and economic performance of the diesel engine]. Lugansk, Vostochnoukrainskii universitet im. V. Dal'ya Publ., 2009. 240 p.
 9. Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh* [The use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines]. Moscow, NITs «Inzhener» Publ., «Oniko-M» Publ., 2011. 536 p.
 10. Morgan M.G., Dowlatabadi H. *Energy Technology R@D Essential to Curb Global Warming // Environmental Science & Technology*. 1997. Vol. 31. I. 12. P. 574A-575A.
 11. Godina E.D. *Opreделение teploty sgoraniya dizel'nogo smesevogo biotopliva iz soevogo masla* [Determination of heat of combustion of diesel blends with biofuel from soy bean oil]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova* [Herald of the North-Eastern Federal University. MK Ammosova]. 2013, V. 10, I. 5, pp. 25–29.
 12. Ashpina O. *Raps — kul'tura strategicheskaya* [Rape — Strategic Culture]. *Khimicheskii zhurnal* [The Chemical Journal]. 2005, I. 9, pp. 40–44.
 13. Savel'ev G.S. *Proizvodstvo i ispol'zovanie biodizel'nogo topliva iz rapsa* [Production and use of biodiesel from rapeseed]. Moscow, GNU VIM Rossel'khozakademii Publ., 2007. 96 p.
 14. Paronyan V. Kh. *Tekhnologiya zhиров i zhirozameniteley* [Technology of fats and fat substitutes]. Moscow, «DeLi print» Publ., 2006. 760 p.
 15. Tyutyunnikov B.N., Gladkiy F.F., Bukhshtab Z.I., Mel'nik A.P., Butenev V.P. *Khimiya zhиров* [Chemistry fat]. Moscow, Kolos Publ., 1992. 448 p.
 16. *Kodeks «Alimentarius» (lat. «Prodovol'stvennyy kodeks»). Zhiry, masla i proizvodnye produkty* [The Code “Codex Alimentarius” (lat. “Food Code”). Fats, oils and derivative products]. Moscow, «Ves' mir» Publ., 2007. 68 p.
 17. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Golubev V.A. *Perspektivy ispol'zovaniya biotopliva iz gorchitsy* [Prospects for the use of biofuels mustard]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]. 2011, I. 1, pp. 88–92.
 18. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Shemelev D.S. *Dizel'noe smesevoe toplivo* [Diesel mixed fuel]. Penza, RIO Penzenskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii Publ., 2012. 147 p.
 19. Niemi S.A., Illikanen P.E., Laiho V.O.K. *A Tractor Engine Fueled with Mustard Seed Oil: Optimization, Emissions and Practical Experiences // SAE Technical Paper Series*. — 1997. — I. 972724. — P. 11–25.
 20. Niemi S.A., Hatonen T., Laiho V.O.K. *Results from a Durability Test of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine // SAE Technical Paper Series*. — 1998. — № 982528. — P. 1–15.
 21. Niemi S.A., Murtonen T.T., Lauren M.J., Laiho V.O.K. *Exhaust Particulate Emissions of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine // SAE Technical Paper Series*. — 2002. — I. 2002-01-0866. — P. 1–12.

Using Mustard Oil As an Ecological Additive to Petroleum Diesel Fuel

V.A. Markov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Bauman Moscow State Technical University

V.V. Neverova, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

Sa Bowen, Magister Student, Bauman Moscow State Technical University

The depletion of oil fields and the deteriorating environmental situation leads to the need for the search of new alternative sources of energy. Actuality of the article due to the need for greater use of the alternative fuels in internal combustion engines is necessary. Fuels produced from vegetable oils and animal fats as advanced alternative fuels for diesel engines are considered. These fuels are produced from renewable raw materials and are characterized by good environmental qualities. Advantages of using fuels of vegetable origin as motor fuels are shown. Experimental research of diesel engine D-245.12S functioning on mixtures of diesel fuel and mustard oil of various percentage is given. One of the most wide spread vegetable oils in Russia is mustard oil. Possible ways of using mustard oil as fuel for a diesel engine are considered. An opportunity of improving characteristics of exhaust gases toxicity by using these mixtures as a fuel for automobile and tractor diesel engines is demonstrated.

Keywords: diesel engine, petroleum diesel fuel, alternative fuel, vegetable oil, rapeseed oil, mustard oil, biofuel mixture.