

В. А. Марков, Н. А. Иващенко,
С. Н. Девянин, С. А. Нагорнов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЯХ НЕФТЯНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Рассмотрены физико-химические свойства растительных масел, применяемых в качестве топлива для дизельных двигателей. Подтверждена возможность использования смесей нефтяного дизельного топлива и растительных масел в качестве топлива для дизелей. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245, работающего на смесях нефтяного дизельного топлива и различных растительных масел.

E-mail: markov@power.bmstu.ru; ivaschen@power.bmstu.ru;
devta@rambler.ru; snagornov@yandex.ru

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, смесевое биотопливо, растительные масла, рапсовое масло, подсолнечное масло.

В связи с продолжающимся энергетическим кризисом, прогнозами сравнительно быстрого истощения нефтяных ресурсов, проблемами, возникающими в результате загрязнения окружающей среды, целесообразно рассмотреть вопрос о замене традиционных нефтяных моторных топлив другими типами топлив, получаемых из альтернативных сырьевых ресурсов. Однако развитие топливно-энергетического комплекса России не привело к решению стоящих в настоящее время острых энергетических проблем. По-прежнему углеводороды являются главным энергетическим ресурсом, а поиск новых альтернативных способов получения энергии остается актуальным. Сегодня около 40 % всего мирового объема добываемых углеводородов (нефть и природный газ) перерабатывают в моторные топлива различных видов [1].

Ежегодно мировое потребление моторных топлив возрастает на 5...7 % и соответственно увеличивается добыча нефти, запасы которой в природе не бесконечны и сокращаются с каждым годом. За последние 30 лет мировая добыча нефти практически непрерывно возрастала на 0,3...0,4 млрд баррелей в год. В настоящее время мировой объем добычи нефти достиг уровня 30 млрд баррелей в год. Однако на ближайшую перспективу прогнозируют ежегодное снижение добычи нефти на 0,4...0,5 млрд баррелей. Такая тенденция, обусловленная кризисным падением мирового потребления нефти, постепенным истощением нефтяных месторождений и ростом мировых цен на нефть и нефтепродукты, будет наблюдаться на период до 2050 г.

При оценке перспектив использования различных сырьевых ресурсов для производства моторных топлив важное значение имеет объем сырьевой базы. Извлекаемые мировые запасы полезных ископаемых оценивают в 6 310 млрд т условного топлива, включая уголь (4 850 млрд т), нефть и газ (соответственно 1 140 и 310 млрд т) [1]. Россия обладает 4,6 % от разведанных мировых запасов нефти и 12...13 % от прогнозных. По запасам природного газа эти показатели равны соответственно 30,7 и 42,3 %, а по запасам угля — 15,9 и 23,0 %. Мировые ресурсы разведанных нефтяных месторождений составляют около 150 млрд т нефти (из них в странах бывшего СССР — примерно 10 млрд т или около 7 % от мировых запасов нефти). Россия добывает около 10 % от мирового производства нефти. Однако основными поставщиками жидких углеводородов на мировой рынок являются страны Ближнего Востока (Ирак, Саудовская Аравия, Иран), обладающие наибольшими сырьевыми ресурсами (рис. 1) [2].

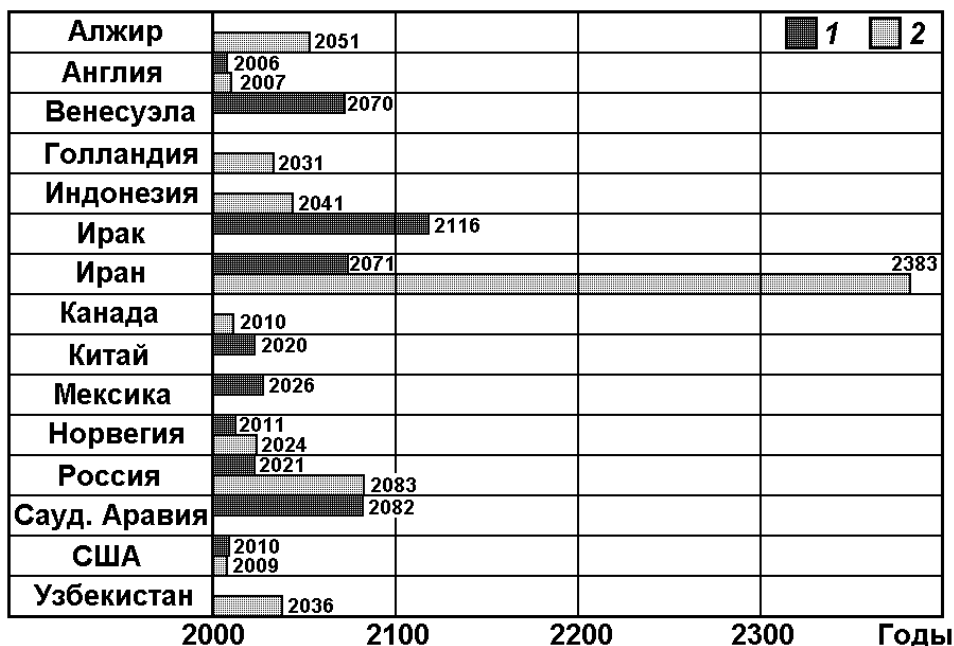


Рис. 1. Разведанные запасы полезных ископаемых в регионах мира (по данным Организации стран — экспортеров нефти ОПЕК) с указанием прогнозируемых сроков истощения месторождений нефти 1 и природного газа 2

В связи с указанными факторами современный этап развития двигателестроения и энергетики характеризуется интенсивным поиском новых источников и видов сырья, а также разработками технологий для получения альтернативных моторных топлив и многочисленными попытками их внедрения в повседневную практику. Следует отметить, что в промышленно развитых странах мира альтернатив-

ные источники энергии находят все большее применение. Лидерами в использовании альтернативных источников энергии являются США, Германия и Испания, на долю которых приходится соответственно 24,7; 11,7 и 7,8 % от мирового потребления альтернативной энергии (рис. 2) [1]. В Российской Федерации, обладающей одними из крупнейших запасов полезных ископаемых, проблеме практического использования имеющихся источников альтернативной энергии по-прежнему уделяется недостаточное внимание. Видимо, по этой причине на долю России приходится лишь 0,1 % от мирового потребления альтернативной энергии.

Доля потребления альтернативной энергии, %

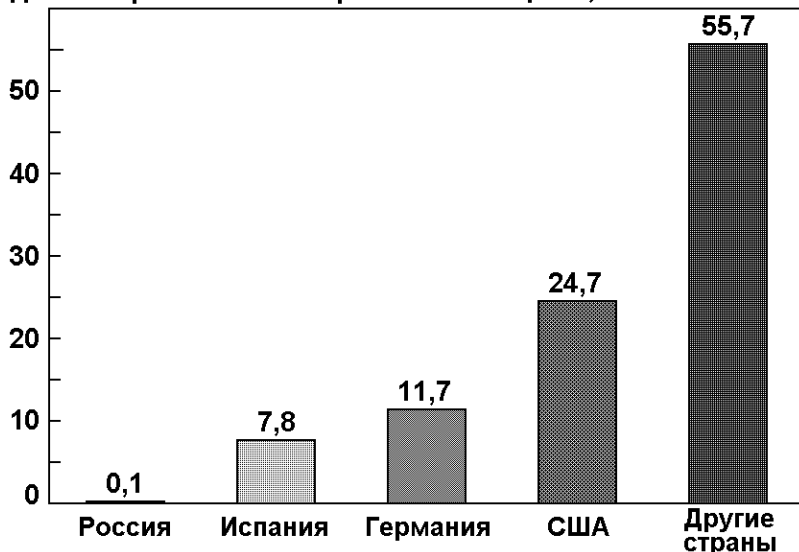


Рис. 2. Мировая структура потребления альтернативной энергии

Наиболее перспективны моторные топлива, получаемые из возобновляемых сырьевых ресурсов [3–5]. В первую очередь это топлива, которые можно получать из растительного сырья. Перспективность производства этих топлив в нашей стране обусловлена имеющимися в избытке плодородными землями и острой проблемой занятости сельского населения. В Российской Федерации, обладающей огромной территорией, значительная часть пахотных земель, использованных ранее для сельскохозяйственного производства, в настоящее время не обрабатывается и постепенно теряет свои плодородные качества. В последние десять лет Россия потеряла треть своей плодородной земли. Более 40 млн га выведено из оборота — зарастает лесом или заброшено (рис. 3). Для сравнения можно отметить, что, по оценкам журнала *Oil World*, в настоящее время в странах ЕС рапсом было засеяно около 7 млн га. Это свидетельствует об огромном потенциале России в области производства биотоплив.

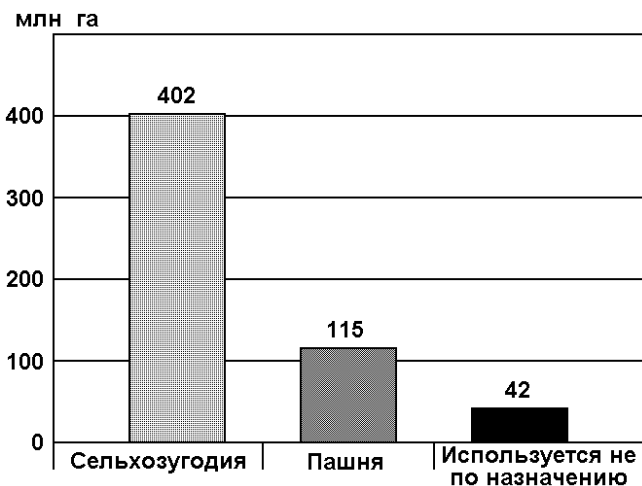


Рис. 3. Использование плодородных земель в России

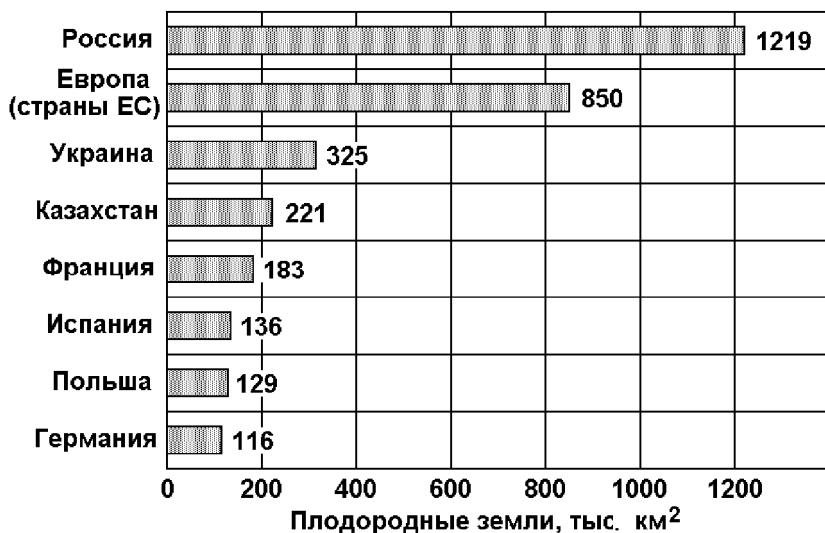


Рис. 4. Площади плодородных земель, пригодных для выращивания маслических культур в России, Украине, Казахстане, странах Западной Европы

Наличие больших площадей пахотных земель, пригодных для выращивания технических культур (рис. 4), а также динамика увеличения посевных площадей, отведенных под эти культуры, определяют потенциальную возможность России стать одним из лидирующих государств по производству биотоплива [2].

Среди топлив растительного происхождения, которые могут быть использованы в дизельных двигателях, рассматривают топлива, получаемые из растительных масел [1, 2, 6, 7]. Использование растительных масел и их производных позволяет не только обеспечить замещение нефтяных дизельных топлив (ДТ) топливами, получаемыми из альтер-

нативных возобновляемых сырьевых ресурсов, но и существенно улучшить показатели токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей, работающих на этих топливах. В первую очередь необходимо отметить возможность снижения выбросов в атмосферу основного парникового газа — диоксида углерода CO_2 . К другим факторам, позволяющим улучшить экологическую ситуацию при широком использовании этих биотоплив, относится их полная и достаточно быстрая биоразлагаемость (в течение нескольких недель) при попадании биодизельного топлива в почву и водные бассейны. Благодаря незначительному количеству серы (10...15 ppm) и отсутствию полициклических ароматических углеводородов в растительных маслах выбросы ОГ дизелей, работающих на биотопливе, практически не содержат оксидов серы и полициклических ароматических углеводородов. Оксиды серы, попадая в атмосферу, образуют кислоты, способствующие выпадению кислотных дождей. Являющиеся канцерогенами полициклические ароматические углеводороды вызывают онкологические заболевания. К другим экологическим факторам можно отнести снижение выбросов в атмосферу с ОГ дизелей их основных нормируемых токсичных компонентов — оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , несгоревших углеводородов C_nH_x и сажи (дымность ОГ) или твердых частиц.

К масличным культурам относится более 150 видов растущих по всему миру растений, из которых можно вырабатывать масла. Наибольшее промышленное значение имеют следующие виды растительных масел: бобовое (соевое), рапсовое, подсолнечное, пальмовое, кукурузное, хлопковое (рис. 5) [2].

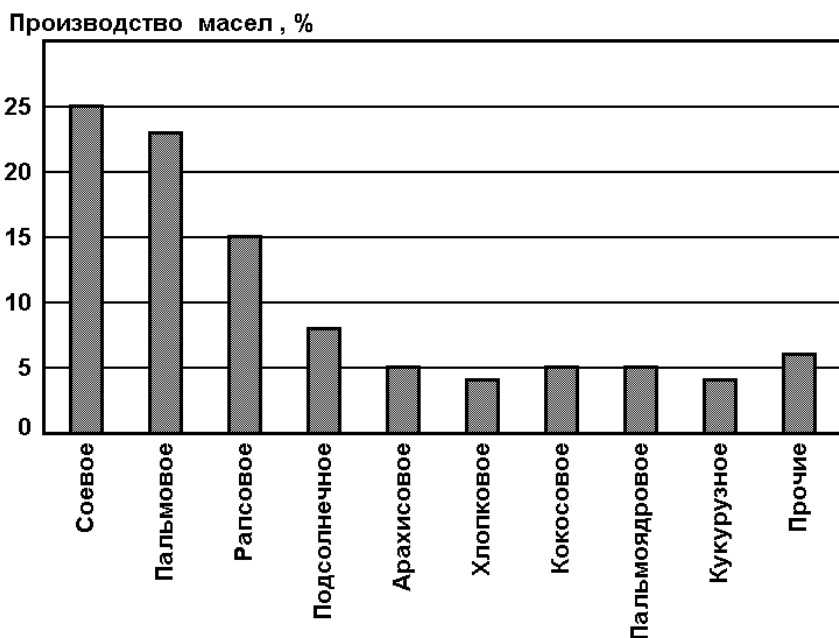


Рис. 5. Диаграмма мирового производства основных видов растительных масел и жиров

Проведенные многочисленные исследования показали, что в условиях Российской Федерации наиболее перспективными для использования в качестве топлива для дизелей является рапсовое масло (РМ) и продукты его переработки [2, 8]. Причем РМ может быть использовано как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях с нефтяным ДТ или переработано в метиловый, этиловый или бутиловый эфиры рапсового масла. Эти эфиры, в свою очередь, используются или как самостоятельное биотопливо, или как смесевое (в смеси с нефтяным ДТ).

В условиях Российской Федерации весьма привлекательным представляется также использование подсолнечного масла (ПМ) для производства биодизельного топлива [2, 9]. Если в мировом производстве растительных масел ведущее место занимают соевое и рапсовое масло, то в России наиболее распространенным растительным маслом является подсолнечное. Объем его производства превышает 80 % от общего объема растительных масел. По данным Госкомстата России в 2000 г. в РФ посевные площади под этой сельскохозяйственной культурой составляли примерно 4 600 тыс. га, а валовый сбор семян подсолнечника — около 4 000 тыс. т при средней урожайности 9,0 ц/га. Это растительное масло вызывает дополнительный интерес еще и потому, что производство биодизельного топлива может быть организовано из отработанного фритюрного подсолнечного масла, широко применяемого в пищевой промышленности и системе общественного питания.

В странах ЕС наблюдается ежегодное увеличение производства биотоплив. По оценкам журнала *Oil World* только в Германии ежегодно около 80 тыс. т РМ используется как прямой заменитель моторного топлива. И это без учета еще более значительных объемов потребления РМ отраслью для производства метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Показательны данные на рис. 6, на котором представлены направления реализации биодизельных топлив в Германии [2]. В 2006 г. сбыт биодизельного топлива (так называемый биодизель или метиловые эфиры растительных масел) в Германии составил 2,5 млн т, в том числе 1,01 млн т было использовано как примесь к нефтяному ДТ и 0,5 млн т реализовано через бензоколонки для легковых и грузовых автомобилей. Кроме того, в качестве моторного топлива был использован 1 млн т чистого РМ.

Растительные масла являются жирами семян или плодов различных растений, получаемыми прессованием или извлечением с использованием растворителей. Масличные культуры содержат следующее количество растительных масел (% на абсолютно сухое вещество): соя — 15...26, рапс — 40...50, подсолнечник — 29...57, лен масличный — 35...52, горчица — 20...45, арахис — 41...57, кунжут — 50...56 [2].

Возможность использования растительных масел и их производных в качестве топлива для дизелей определяется их физико-

химическими свойствами. Растительные масла состоят главным образом (на 95...97 %) из триацилглицеридов — сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот, а также моно- и диацилглицеридов. В состав ацилглицеридов, в свою очередь, входят молекулы различных жирных (карбоновых) кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$ [10, 11]. При этом растительные масла содержат как ненасыщенные жирные кислоты (линолевая, олеиновая, линоленовая), так и насыщенные кислоты (пальмитиновая, стеариновая, арахидовая, миристиновая).

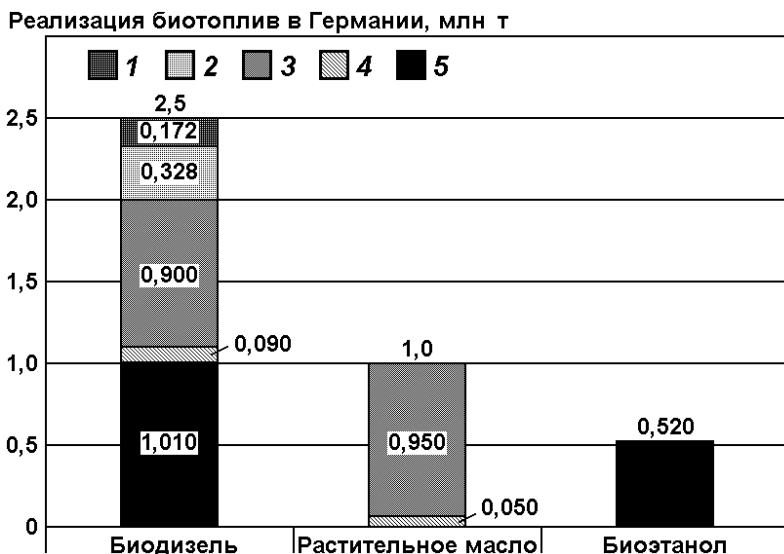


Рис. 6. Объемы и направления реализации биотоплива в Германии:

1 — через бензоколонки для легковых автомобилей; 2 — через бензоколонки для грузовых автомобилей; 3 — для транспортных компаний и грузоперевозчиков; 4 — на нужды сельского хозяйства; 5 — как добавка к традиционному нефтяному топливу

Жирнокислотный состав растительного масла зависит от сорта сельскохозяйственной культуры, места произрастания, способа извлечения масла и его очистки. При этом содержание в однотипных растительных маслах различных жирных кислот может изменяться в достаточно широком диапазоне значений (табл. 1) [2].

Важнейшими характеристиками моторных топлив и растительных масел являются кривые их фракционной разгонки, показывающие, какое объемное количество топлива или растительного масла испаряется при их нагревании до определенной температуры [1].

Таблица 1

Жирнокислотный состав рапсовых и подсолнечных масел

Наименование кислоты, условная формула состава (указывает число атомов углерода в молекуле кислоты и число двойных связей)	Массовая доля жирных кислот в маслах, %					Подсолнечное со средним содержанием олеиновой кислоты
	Рапсовое	Рапсовое низкоэруковое	Подсолнечное	Подсолнечное высокоолеиновое	0	
Лауриновая (С 12:0)	0	0	0-0,1	0	0	0
Миристиновая (С 14:0)	0-0,2	0-0,2	0-0,2	0-0,1	0-1,0	0-1,0
Пальмитиновая (С 16:0)	1,5-6,0	2,5-7,0	5,0-7,6	2,6-5,0	4,0-5,5	4,0-5,5
Пальмитолеиновая (С 16:1)	0-3,0	0-0,6	0-0,3	0-0,1	0-0,05	0-0,05
Маргариновая (С 17:0)	0-0,1	0-0,3	0-0,2	0-0,1	0-0,05	0-0,05
Маргаринолеиновая (С 17:1)	0-0,1	0-0,3	0-0,1	0-0,1	0-0,06	0-0,06
Стеариновая (С 18:0)	0,5-3,1	0,8-3,0	2,7-6,5	2,9-6,2	2,1-5,0	2,1-5,0
Олеиновая (С 18:1)	8,0-60,0	51,0-70,0	14,0-39,4	75,0-90,7	43,1-71,8	43,1-71,8
Линолевая (С 18:2)	11,0-23,0	15,0-30,0	48,3-74,0	2,1-17,0	18,7-45,3	18,7-45,3
Линоленовая (С 18:3)	5,0-13,0	5,0-14,0	0-0,3	0-0,3	0-0,5	0-0,5
Арахиновая (С 20:0)	0-3,0	0,2-1,2	0,1-0,5	0,2-0,5	0,2-0,4	0,2-0,4
Гадолеиновая (С 20:1)	3,0-15,0	0,1-4,3	0-0,3	0,1-0,5	0,2-0,3	0,2-0,3
Эйкозодиеновая (С 20:2)	0-1,0	0-0,1	0	0	0	0
Бегеновая (С 22:0)	0-2,0	0-0,6	0,3-1,5	0,5-1,6	0,6-1,1	0,6-1,1
Эруковая (С 22:1)	2,0-60,0	0-2,0	0-0,3	0-0,3	0	0
Докозодиеновая (С 22:2)	0-2,0	0-0,1	0-0,3	0	0-0,09	0-0,09
Лигноцериновая (С 24:0)	0-2,0	0-0,3	0-0,5	0-0,5	0,3-0,4	0,3-0,4
Нервоновая (С 24:1)	0-3,0	0-0,4	0	0	0	0

Кривые фракционной разгонки некоторых моторных топлив (бензина, ДТ, топлива широкого фракционного состава) представлены на рис. 7 [2]. На этом же рисунке показаны кривые разгонки смесей ДТ марки Л по ГОСТ 305–82 и рапсового масла, полученные в Московском государственном агроинженерном университете (МГАУ) им. В.П. Горячкина. Эти данные свидетельствуют о том, что РМ имеет более тяжелый фракционный состав по сравнению с нефтяным ДТ. Так, температура начала перегонки ДТ марки Л с характеристикой 3 (см. рис. 7) составляет 190 °С, а аналогичная температура для РМ с характеристикой 7 равна 280 °С.

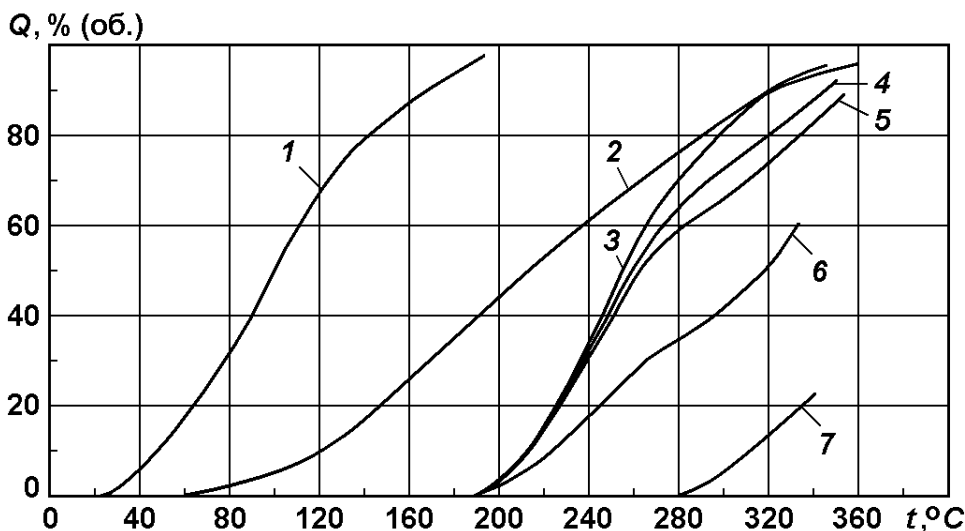


Рис. 7. Зависимость количества испарившегося топлива Q от температуры t разгонки топлив:

1 — бензин АИ-93; 2 — ДТ широкого фракционного состава ШФС-1; 3 — ДТ марки Л; 4 — смесь 90 % топлива марки Л и 10 % РМ; 5 — смесь 80 % топлива марки Л и 20 % РМ; 6 — смесь 50 % топлива марки Л и 50 % РМ; 7 — РМ

Рассмотренные особенности жирнокислотного и фракционного составов различных растительных масел определяют их физико-химические свойства. Растительные масла при нормальных условиях могут находиться в твердом состоянии, но чаще они представляют собой маслянистые жидкости с повышенными по сравнению с ДТ плотностью (обычно $\rho = 900 \dots 1000$ кг/м³) и кинематической вязкостью ($\nu = 60 \dots 100$ мм²/с при $t = 20$ °С и $\nu = 30 \dots 40$ мм²/с при $t = 40$ °С), невысокой температурой самовоспламенения (табл. 2) [12—15]. Жидкие растительные масла, в свою очередь, подразделяют на высыхающие (льняное, конопляное, тунговое), полувсыхающие (маковое, хлопковое, соевое, подсолнечное, рапсовое) и невысыхающие (касторовое).

**Физико-химические свойства дизельного топлива
и растительных масел**

Физико-химические свойства	Масла						
	ДТ	рап- совое	подсол- сол- нечное	соевое	олив- ковое	хлоп- ковое	ара- хисо- вое
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	916	923	924	914	919	917
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре:							
20 °С	3,8	75,0	72,0	–	–	–	81,5
40 °С	2,4	36,0	31,0	32,0	–	–	36,5
100 °С	1,0	8,1	8,0	7,7	8,4	7,7	8,3
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	33,0	–	–	–	–
Цетановое число	45	36	33	50	–	–	37
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	12,4	12,4	–	12,4	12,8
Теплота сгорания низшая H_u , кДж/кг	42500	37300	37000	37000	–	–	38000
Температура самовоспламенения, °С	250	318	320	318	285	316	–
Температура застывания, °С	–35	–20	–18	–12	–12	–18	–
Содержание серы, % (мас.)	0,20	0,002	0,002	–	–	–	–
Коксуемость 10%-ного остатка, % (мас.)	0,2	0,4	0,5	–	–	–	–
Содержание, % (мас.)							
С	87,0	77,0	77,6	77,5	–	77,1	78,0
Н	12,6	12,0	11,5	11,5	–	11,7	12,3
О	0,4	11,0	10,9	11,0	–	11,2	9,7
Примечание: “–” — свойства не определялись.							

Таким образом, представленный выше анализ физико-химических свойств растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом свидетельствует о возможности применения большинства из них для питания дизельных двигателей несмотря на утяжеленный фракционный состав масел и повышенные плотность, вязкость и поверхностное натяжение. Однако эти отличия свойств растительных масел и смесей на их основе от свойств нефтяного ДТ могут привести к ухудшению качества процессов распыливания топлива и смесеобразования [1, 2]. Поэтому предпочтительно использование в дизельных двигателях смесей нефтяного ДТ и растительных масел с небольшим содержанием последних.

Анализ показателей токсичности ОГ дизельного двигателя, работающего на смесях нефтяного ДТ и растительных масел, проведен с использованием результатов экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). Этот дизель Минского моторного завода (ММЗ) устанавливают на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 “Бычок”, а его модификации — на автобусы Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторы “Беларусь”. Дизель типа Д-245.12С испытан на смесях нефтяного ДТ марки Л по ГОСТ 305–82 с рапсовым маслом (объемное содержание РМ 0...60 %) и с подсолнечным маслом (объемное содержание ПМ 0...20 %). Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований приведено в работе [16].

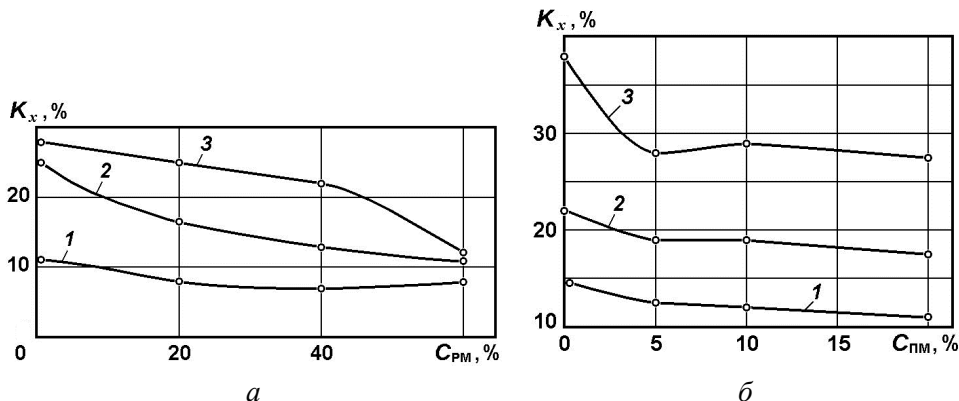


Рис. 8. Зависимость дымности ОГ K_x (проценты по шкале Хартриджа) дизеля Д-245.12С различной комплектации от объемного содержания рапсового масла C_{PM} (а) и подсолнечного масла C_{PM} (б) в смеси с нефтяным дизельным топливом на различных скоростных режимах внешней скоростной характеристики:

1 — $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; 2 — $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$

Результаты проведенных экспериментальных исследований дизеля на режимах внешней скоростной характеристики (рис. 8) свидетельствуют о том, что при использовании в качестве топлива смесей

нефтяного ДТ и растительных масел (РМ и ПМ) наибольшего эффекта достигают по снижению дымности ОГ K_x . Так, при увеличении содержания РМ в смесевом биотопливе C_{PM} в исследуемом диапазоне отмечено значительное снижение дымности ОГ K_x (см. рис. 8, а). Рост $C_{MЭPM}$ с 0 до 60 % на режиме максимальной мощности при $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ сопровождался снижением дымности K_x с 11 до 8 % по шкале Хартриджа (в 1,38 раза). На режиме максимального крутящего момента при $n = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$ дымность K_x уменьшилась с 25 до 11 % по шкале Хартриджа (в 2,27 раза).

Соответствие исследуемого дизеля требованиям, предъявляемым к токсичности ОГ современными нормативными документами, тестировали на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН [7]. Результаты определения удельных массовых выбросов в атмосферу нормируемых токсичных веществ на режимах этого испытательного цикла — оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов e_{CH_x} — представлены на рис. 9.

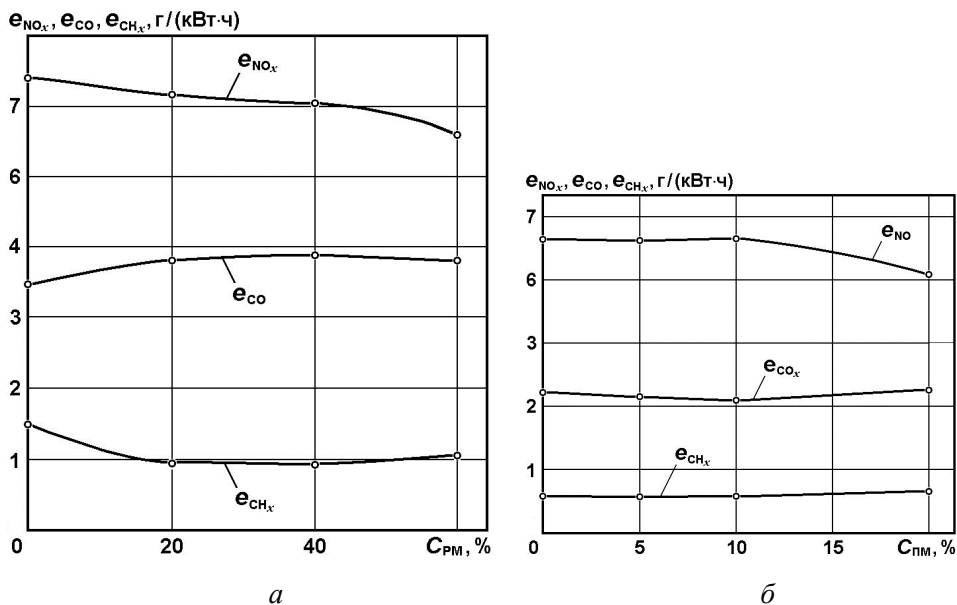


Рис. 9. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов e_{CH_x} с ОГ дизеля Д-245.12С различной комплектации от объемного содержания рапсового C_{PM} (а) и подсолнечного C_{PM} (б) масел в смеси с нефтяным дизельным топливом на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

Полученные результаты свидетельствуют о заметной зависимости выбросов этих токсичных компонентов от содержания растительных масел в смесевом биотопливе. В частности, применение

смесей ДТ и РМ позволяет снизить выбросы наиболее значимых токсичных компонентов ОГ дизелей — оксидов азота NO_x , а также несгоревших углеводородов CH_x . Увеличение содержания РМ в смеси в биотопливе C_{PM} с 0 до 60 % приводит к снижению на режимах 13-ступенчатого цикла удельных интегральных выбросов оксидов азота e_{NO_x} с 7,442 до 6,597 г/(кВт·ч), т. е. на 11,4 %, и выбросов углеводородов e_{CH_x} с 1,519 до 1,075 г/(кВт·ч), т. е. на 29,2 %. Причем минимум выбросов несгоревших углеводородов $e_{\text{CH}_x} = 0,949$ г/(кВт·ч) отмечен при содержании РМ в смеси в биотопливе $C_{\text{PM}} = 40$ %. Такое снижение выбросов оксидов азота NO_x и углеводородов CH_x обусловлено наличием в РМ около 12 % кислорода, участвующего в окислении углерода и водорода, которые входят в состав РМ. В результате уменьшается количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, и увеличивается суммарный коэффициент избытка воздуха. Это, с одной стороны, приводит к уменьшению максимальных температур сгорания и снижению выбросов оксидов азота NO_x , а с другой — к более полному сгоранию топлива и снижению эмиссии несгоревших углеводородов CH_x .

Увеличение содержания РМ в смеси в биотопливе C_{PM} с 0 до 60 % приводит к росту на режимах 13-ступенчатого цикла удельных интегральных выбросов монооксида углерода e_{CO} с 3,482 до 3,772 г/(кВт·ч), т. е. на 8,3 %. Причем максимум выбросов монооксида углерода ($e_{\text{CO}} = 3,880$ г/(кВт·ч)) отмечен при концентрации РМ в смеси в биотопливе $C_{\text{PM}} = 40$ %. Такое увеличение выбросов монооксида углерода CO объясняется снижением температур сгорания при работе на смеси в биотопливе, а также некоторым повышением часового расхода этого топлива (на 6...10 %) с соответствующим увеличением мощности дизеля.

В процессе проведенных экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С на смесях ДТ и РМ, длившихся около 100 ч, коксования форсунок не отмечено. Однако затруднен пуск двигателя при его работе на смеси 40 % дизельного топлива и 60 % рапсового масла в зимний период (температура в экспериментальном боксе была около 0 °С). Для облегчения пуска двигателя в этих условиях использован подогрев смеси в биотопливе во время пуска двигателя, при дальнейшей работе которого подогрев топлива не потребовался.

Сходные результаты получены и при использовании смесей ДТ и ПМ. При увеличении содержания ПМ в смеси в биотопливе C_{PM} с 0 до 20 % выброс наиболее значимых токсичных компонентов ОГ дизелей — оксидов азота e_{NO_x} — снизился с 6,630 до 6,078 г/(кВт·ч), т. е. на 8,3 %. При этом выброс монооксида азота e_{CO} остался прак-

тически неизменным — он возрос с 2,210 до 2,257 г/(кВт·ч), т. е. на 2,1 %. Минимум эмиссии монооксида углерода $e_{CO} = 2,091$ г/(кВт·ч) отмечен при $C_{ПМ} = 10$ %, но указанные изменения e_{CO} соизмеримы с точностью определения содержания этого токсичного компонента в ОГ.

В исследуемом диапазоне изменения значений $C_{ПМ}$ отмечен рост эмиссии несгоревших углеводородов. Их выброс e_{CH_x} возрос с 0,580 до 0,647 г/(кВт·ч), т. е. на 11,5 %. Такое увеличение эмиссии CH_x вызвано увеличением длины струй распыливаемого смесового биотоплива, обусловленным его большей плотностью, увеличением количества топлива, попадающего на стенки камеры сгорания (КС) и, следовательно, доли пленочного смесеобразования. Снижение выброса углеводородов может быть достигнуто путем совершенствования проточной части распылителей форсунок для уменьшения длины струй топлива и их согласованием с формой КС.

Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С показали возможность оптимизации состава смесового биотоплива с учетом минимизации расхода топлива, выбросов токсичных компонентов ОГ и преимущественных режимов работы дизеля. Целесообразна и реализация мероприятий, способствующих улучшению качества процессов подачи топлива, его распыливания и смесеобразования при работе дизеля на растительных маслах и топливах на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пособие / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др. М.: Легион-Автодата, 2008. 464 с.
2. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров. М.: ООО НИЦ “Инженер”, 2011. 536 с.
3. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орстик, Н.Т. Сорочкин, В.Ф. Федоренко и др.; под ред. В.Ф. Федоренко. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2008. 404 с.
4. Гусаков С.В. Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников. М.: РУДН, 2008. 318 с.
5. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во Восточноукраинского ун-та им. В. Даля, 2009. 240 с.
6. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: Изд. центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. 340 с.
7. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
8. Ашпина О. Рапс — культура стратегическая // The Chemical Journal (Химический журнал). 2005. № 9. С. 40–44.
9. Марков В.А., Девянин С.Н., Шустер А.Ю. Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей // Грузовик. 2009. № 4. С. 46–56.

10. Химия жиров / Б.Н. Тютюнников, З.И. Бухштаб, Ф.Ф. Гладкий и др. М.: Колос, 1992. 448 с.
11. Паронян В.Х. Технология жиров и жирозаменителей. М.: ДеЛи принт, 2006. 760 с.
12. Кулиев Р.Ш., Широин Ф.Р., Кулиев Ф.А. Физико-химические свойства некоторых растительных масел // Химия и технология топлив и масел. 1999. № 4. С. 36, 37.
13. Сравнение биотоплив с нефтяными топливами по физико-химическим характеристикам / К.Е. Панкин, Ю.В. Иванова, Р.И. Кузьмина и др. // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 1. С. 8–10.
14. Сравнение жидких биотоплив с нефтяными топливами по эксплуатационным характеристикам / К.Е. Панкин, Ю.В. Иванова, Р.И. Кузьмина и др. // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 2. С. 23–25.
15. Сравнение жидких биотоплив с нефтяными топливами по экологическим характеристикам / К.Е. Панкин, Ю.В. Иванова, Р.И. Кузьмина и др. // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 3. С. 3–6.
16. Марков В.А., Стремяков А.В., Девянин С.Н. Работа транспортного дизеля на смесях дизельного топлива и рапсового масла // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 1. С. 87–100.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012