

то и коэффициент теплоотдачи является функцией данных параметров. Однако влияние их должно быть меньше, чем на коэффициент трения, т.к. коэффициент теплоотдачи пропорционален корню квадратному из этих величин.

На рис. 2 показано, как изменяются относительный коэффициент теплоотдачи для  $Re^* = Re_h^* = 1000$  и различные значения  $\bar{q}'_w$  и  $\bar{\tau}'_w$ . Положительным значениям параметра теплоотдачи при  $\bar{\tau}'_w = 0$  соответствуют значения относительного коэффициента теплоотдачи меньше единицы. При отрицательных значениях  $\bar{q}'_w$  наблюдается рост числа Стантона относительно стандартного значения. Параметр трения воздействует обратным образом. В ускоренных во времени и пространстве потоках коэффициент теплоотдачи уменьшается, а в замедленных — возрастает. Различные же их сочетания, естественно, могут изменить ситуацию в ту или иную сторону, что и иллюстрирует рис. 2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. — Новосибирск: СО АН СССР, 1962. — 180 с.
2. Ф а ф у р и н А. В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое. // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов, 1979. — Казань. — Вып. 2. — С. 62—69.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 415 с.
4. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергия, 1972. — 342 с.
5. Федяевский К. К., Гиневский А. С., Колесников А. В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. — Л.: Судостроение, 1973. — 256 с.

621.436

### РАБОТА ДИЗЕЛЯ С РАЗДЕЛЕННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ НА РАПСОВОМ МАСЛЕ

*Д-р техн. наук, проф. Н.А. ИВАЦЕНКО, д-р техн. наук, проф. В.А. МАРКОВ, асп. А.А. ЕФАНОВ*

*Рассмотрены особенности работы дизеля с разделенной камерой сгорания на альтернативном топливе растительного происхождения - рапсовом масле. Проведен сравнительный анализ показателей дизеля при использовании дизельного топлива и рапсового масла. Показана возможность снижения токсичности отработавших газов дизеля при переводе его на это альтернативное топливо.*

*Operation analysis of a diesel engine with the divided combustion chamber on alternative fuel of a phytogenesis - rapeseed oil is examined. The comparative analysis of indexes of a diesel engine is led with use of diesel fuel and rapeseed oil. The opportunity of lowering toxicity of the completed gases in a diesel engine moved on this alternative fuel is displayed.*

В настоящее время в России ежегодно потребляется около 100 млн. тонн моторных топлив, производимых из нефти. При этом автомобильный транспорт является одним из основных потребителей нефтепродуктов и останется главным потребителем моторных топлив на период до 2040—2050 г.г. В ближайшей перспективе ожидается увеличение потребления нефтепродуктов (при примерно постоянных объемах их производства) и дефицит моторных топлив.

Тенденция нарастающего дефицита нефти характерна для развития мировой экономики. В настоящее время в мире ежегодно добывается около 3 млрд. т нефти. При сохра-

нении такого уровня добычи ее мировых запасов может хватить на 50 лет [1]. По данным работы [2] рентабельные запасы нефти в США иссякнут к 2010 г., а в России — к 2021 г. Причем, из-за роста спроса на нефть будет непрерывно нарастать ее дефицит, который к 2025 г. достигнет 16 млн. баррелей в день (рис. 1) [3].

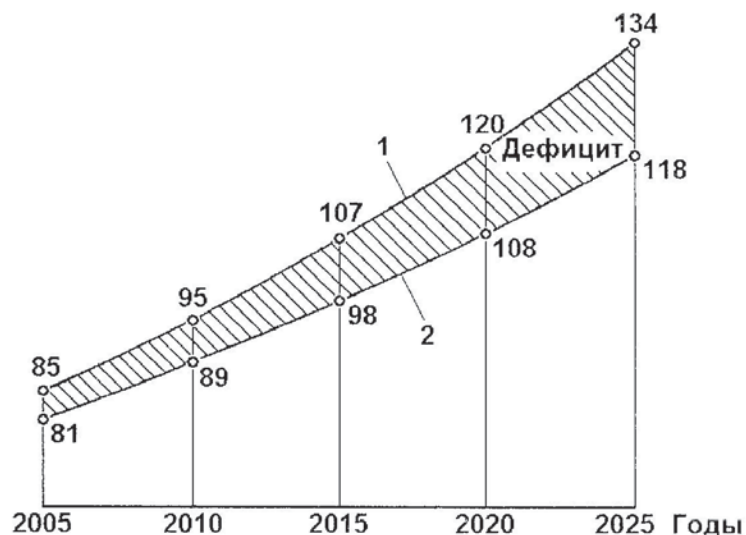


Рис. 1. Прогноз нарастания дефицита нефти в мире: 1 — спрос на нефть, млн. баррелей в день; 2 — добыча нефти, млн. баррелей в день

Наряду с уменьшением мировых запасов нефти наблюдается тенденция повсеместного повышения цен на нефть и нефтяные топлива. Начало интенсивного роста цен на нефтепродукты относится к 2002 г. и обусловлено, в первую очередь, нестабильностью ситуации на Ближнем Востоке. Заметный рост цен на нефть продолжается и в настоящее время: в начале 2005 г. мировые цены на нефть достигли 50 долларов США за баррель. Это приводит к значительному росту цен и на моторные топлива. В России в начале 2005 г. цена одного литра высокооктанового бензина составила около 17 руб., а одного литра дизельного топлива приблизилась к 14 руб. (рис. 2) [3]. Прогнозируется и дальнейшее повышение цен на бензин и дизельное топливо.

Эти факторы приводят к необходимости применения в двигателях внутреннего сгорания моторных топлив, получаемых из альтернативных сырьевых ресурсов. Перспективные альтернативные топлива — это природный и нефтяной попутный газы, водород, спирты (метанол, этанол) и эфиры (диметиловый эфир), растительные масла (рапсовое, соевое, подсолнечное), синтетические моторные топлива, получаемые из природного газа, угля, горючих сланцев, биомассы. Большинство из перечисленных альтернативных топлив имеют физико-химические свойства, отличные от свойств дизельного топлива [4,5]. К использованию этих топлив в большей степени адаптированы дизельные двигатели (двигатели с самовоспламенением топливовоздушной смеси от теплоты сжатия), менее чувствительные к изменению свойств топлива по сравнению с бензиновыми двигателями с принудительным воспламенением рабочей смеси. Тем не менее, при использовании альтернативных топлив возникают проблемы адаптации этих топлив к транспортировке, хранению и заправке на существующих АЗС, использованию в дизельных двигателях.

Работа двигателей внутреннего сгорания оценивается целым комплексом показателей, основными из которых являются мощностные показатели, топливная экономичность и токсичность отработавших газов (ОГ). На современном этапе развития двигателестроения

особое внимание уделяется показателям токсичности ОГ — выбросам в атмосферу нормируемых токсичных компонентов: оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , газообразных углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$  и твердых частиц. Лимитируется и выброс в ОГ частиц сажи (дымность ОГ) [6]. Для уменьшения выбросов указанных вредных веществ используются различные мероприятия, среди которых можно отметить совершенствование процесса смесеобразования, переход к разделенным камерам сгорания (КС), управление началом впрыскивания — углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) и ряд других. Использование в дизельных двигателях альтернативных топлив в ряде случаев также позволяет заметно снизить выбросы в атмосферу вредных веществ.

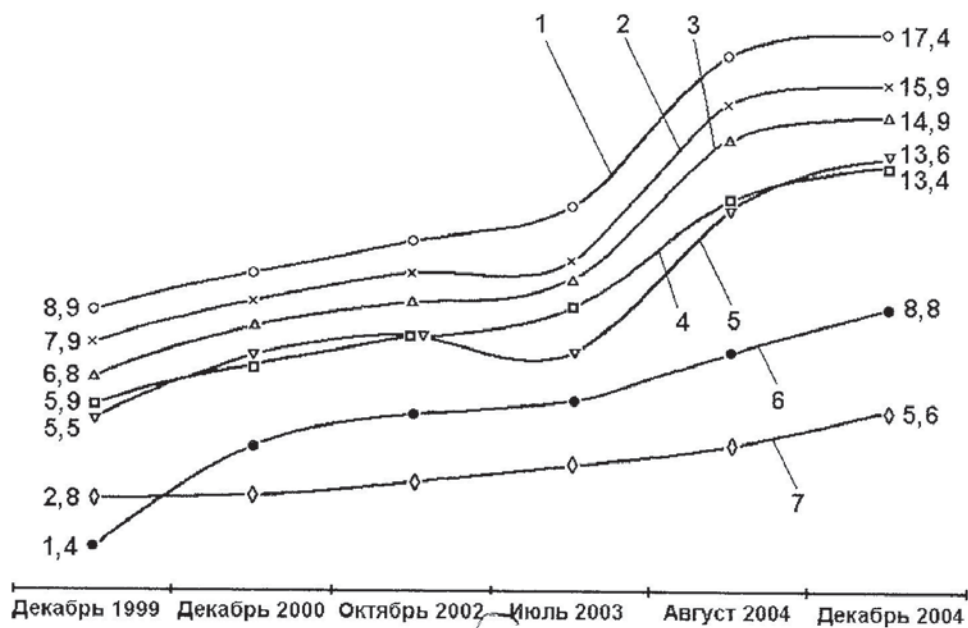


Рис. 2. Динамика роста цен (руб. за 1 л / 1 м<sup>3</sup>) на топлива в России: 1 — А-98; 2 — А-95; 3 — А-92; 4 — А-80; 5 — дизельное топливо; 6 — сжиженный нефтяной газ; 7 — компримированный природный газ

Особую значимость в настоящее время приобретает сокращение выбросов в окружающую среду углекислого газа (диоксида углерода)  $\text{CO}_2$  [6,7]. Это объясняется заметным повышением его концентрации в атмосфере, вызванным быстрым ростом промышленного производства и резким увеличением количества транспортных средств. В настоящее время в атмосферу ежегодно выбрасывается более 25 млрд. т углекислого газа, а к 2020 г. ежегодные выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу достигнут 35 млрд. т (рис. 3). 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. Вследствие этого повышается температура воздуха в нижних слоях атмосферы, происходит глобальное потепление, особенно заметное в крупных городах, наблюдаются различные климатические аномалии.

С этой точки зрения важным фактором является невозобновляемость запасов нефти, природного газа и других полезных ископаемых. Образующийся при сгорании моторных топлив из этих ресурсов углекислый газ, выбрасываемый в атмосферу, способствует возникновению парникового эффекта. С этой точки зрения более предпочтительны топлива, вырабатываемые из возобновляемого источника энергии — сырья растительного происхождения [7]. Использование топлив из этого сырья не нарушает баланс между кислородом и углекислым газом в атмосфере, поскольку при сгорании топлив растительного

происхождения выделяется такое количество  $\text{CO}_2$ , которое было потреблено из атмосферы растениями за период их жизни.

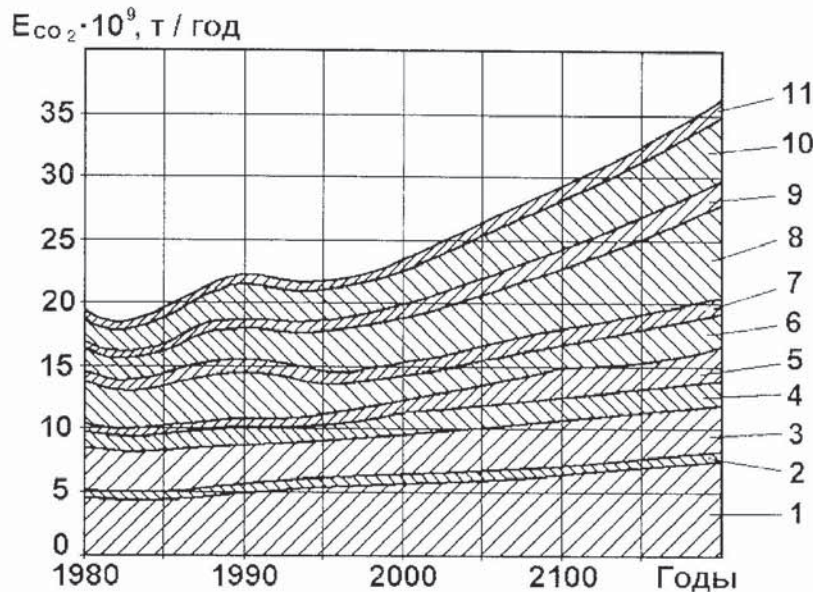


Рис. 3. Увеличение выбросов в атмосферу диоксида углерода  $E_{\text{CO}_2}$ , связанных с деятельностью человека в различных регионах мира: 1 — США; 2 — Канада; 3 — Западная Европа; 4 — Япония и страны тихоокеанского региона; 5 — Латинская Америка; 6 — страны бывшего СССР; 7 — Восточная Европа; 8 — Китай; 9 — Индия; 10 — остальная Азия; 11 — Африка

Среди моторных топлив, производимых из возобновляемых сырьевых ресурсов, перспективными являются растительные масла и топлива, получаемые на их основе [4—6]. Растительные масла можно использовать в качестве топлива для дизелей в исходном виде или после специальной химической обработки, а также в смеси с нефтяными или альтернативными топливами. В настоящее время стоимость растительных масел и топлив на их основе соизмерима со стоимостью нефтяных дизельных топлив. Поэтому применение таких топлив в ряде случаев становится экономически выгодным, особенно в тех странах, где растительные масла имеются в избытке.

Наибольшее промышленное значение имеют следующие виды масел: бобовое (соевое), рапсовое, подсолнечное, пальмовое, кукурузное (маисовое), касторовое, конопляное, кунжутное (сезамовое), льняное, маковое, хлопковое, миндальное. Объем производства растительных масел в мире к 2000 г. достиг уровня 80 млн. тонн в год [8]. Выработка только четырех из них — соевого, рапсового, подсолнечного и пальмового составила 39,6 млн. тонн в год. В зависимости от региона выращивания с 1 гектара посевных площадей получают 1000—1500 кг семян рапса, 1600—2700 кг бобов сои, 2400—3200 кг семян подсолнечника. Семена масличных культур содержат следующее количество растительных масел (в % на абсолютно сухое вещество): подсолнечник — 29—57 %, соя — 15—26 %, лен масличный — 35—52 %, горчица — 20—45 %, арахис — 41—57 %, рапс — 35—50 %, кунжут — 50—56 %.

Характерным представителем растительных масел является рапсовое масло (РМ). Рапс является одной из наиболее распространенных масличных культур в мире: в 90-е годы его посевные площади составляли 20—27 млн. гектаров или около 9—12 % от общей площади посевов масличных культур в мире. Площади посевов рапса уступают только таким важнейшим масличным культурам, как соя (29—33 % от площади посевов маслич-

ных культур) и хлопчатник (15—19 %), и превосходят посевные площади подсолнечника (9—10 %).

Основными посевными площадями рапса расположены в Индии, Китае, Канаде. Рапс выращивается и в Европе — в Австрии, Германии, Польше, Франции, Чехии. В некоторых странах Западной Европы посевные площади рапса достигают 20 % площади пахотных земель. Причем, если в Азии рапс выращивается, в основном, для пищевого использования, то в Северной Америке и, особенно, в Европе — для получения биодизельного топлива. При этом урожайность семян озимого рапса составляет 10—30 ц/га, ярового — 8—15 ц/га.

Высокими темпами развивается переработка рапса. Главные регионы мира по производству семян рапса — Азия (46,8 % мирового производства), Европа (30,3 %), Северная Америка (19,2 %). Мировое производство РМ в последние годы превысило 12 млн. тонн в год и составило более 12 % от мирового объема производства растительных масел (3-е место после производства соевого и пальмового масел). Почти четверть мирового производства рапсового масла приходится на Китай (3,0 млн. тонн в год), далее следуют Индия (1,9 млн. т), Германия (1,7 млн. т), Канада (1,5 млн. т).

В странах СНГ основные посевные площади под рапс находятся в лесостепной зоне России и на Украине. Ежегодно выращивается порядка 0,16 млн. тонн семян рапса: в России — 0,11 млн. т, на Украине и в Белоруссии — по 0,02 млн. т. Посевы рапса в России в последнее десятилетие занимали 112—276 тыс. гектаров или 0,10—0,27 % от всей посевной площади сельскохозяйственных культур (4 % от посевных площадей масличных культур). Производство семян рапса в эти годы увеличилось с 97 до 180 тыс. тонн. В то же время в 1997—1999 г.г. в Россию было импортировано от 130 до 170 тыс. тонн рапсового масла, что составляет порядка 20 % от производства растительных масел в стране. Ведущие экспортеры рапсового масла - страны ЕС и Канада.

Рапсовое масло получают из семян рапса прессованием или экстрагированием органическими растворителями. При отжиме из одной тонны семян рапса получают 300—400 кг масла и 600—700 кг рапсового шрота (жмыха), являющегося высокобелковым концентратом для кормления сельскохозяйственных животных.

Растительные масла состоят, в основном (на 95—97 %), из триглицеридов — сложных полных эфиров глицерина. Ацилглицериды, в свою очередь, имеют в своем составе молекулы различных жирных кислот, связанных с молекулой глицерина  $C_3H_5(OH)_3$ . В состав растительных масел входят также воски, фосфатиды, свободные жирные кислоты и другие вещества. Свойства рапсового масла определяются составом и содержанием жирных кислот, образующих триглицериды. Обычно это насыщенные и ненасыщенные (с одной, двумя или тремя двойными связями) одноосновные жирные кислоты с неразветвленной углеводородной цепью и четным числом атомов углерода (преимущественно  $C_{16}$  и  $C_{18}$ ). Рапсовое масло обычно содержит 3—6 % насыщенных жирных кислот (главным образом, это пальмитиновая  $C_{16}H_{32}O_2$  и стеариновая  $C_{18}H_{36}O_2$  кислоты) и 94—97 % ненасыщенных жирных кислот. Примерный состав основных ненасыщенных кислот, входящих в состав РМ, следующий: 5—44 % — олеиновая кислота  $C_{18}H_{34}O_2$ , 11—42 % — линолевая  $C_{18}H_{32}O_2$ , 1—12 % — линоленовая  $C_{18}H_{30}O_2$ , 11—56 % — эруковая  $C_{22}H_{42}O_2$ , 8—15 % — гадолеиновая  $C_{20}H_{38}O_2$ .

Поскольку основными растительных масел являются жирные кислоты, содержащие углеводородную цепь  $C_xH_y$ , соединенную с группой  $COOH$ , то они могут использоваться в качестве моторных топлив. Рапсовое масло является высокоэкологичным сырьем для производства биотоплив. Содержание в рапсовом масле 10—12 % кислорода (по массе) позволяет заметно уменьшить выбросы в атмосферу вредных веществ — углеводородов и сажи. Снижение температур сгорания при работе дизеля на этом биотопливе сопровож-

дается также уменьшением эмиссии оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Рапсовое масло практически не содержит соединений серы, что приводит к отсутствию в ОГ ее оксидов  $\text{SO}_x$  - сернистых газов и образующихся из них кислот. В рапсовом масле отсутствуют и полициклические ароматические углеводороды, обычно содержащиеся в ОГ дизелей и являющиеся канцерогенами, вызывающими раковые заболевания. Все эти факторы позволяют существенно улучшить экологические показатели транспортных дизелей при их работе на рапсовом масле [5—7].

По своим физико-химическим свойствам РМ несколько отличается от дизельного топлива (табл. 1) [8-12]. Его плотность равна  $\rho = 900\text{—}920 \text{ кг/м}^3$ , кинематическая вязкость при  $20^\circ \text{C}$  —  $\nu = 70\text{—}90 \text{ мм}^2/\text{с}$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma = 32\text{—}34 \text{ мН/м}$ . Это масло отличается значительным содержанием эруковой кислоты, что обеспечивает низшую теплоту сгорания  $H_U = 36\text{—}38 \text{ МДж/кг}$ , близкую к теплоте сгорания дизельного топлива  $H_U = 42\text{—}43 \text{ МДж/кг}$ . Цетановое число, равное 35—40 единиц, подтверждает приемлемую воспламеняемость РМ в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. Йодное число, характеризующее содержание смол в масле, равно 95—106 (количество йода, присоединяющегося к 100 мл топлива), температура застывания в зависимости состава РМ колеблется от  $-10$  до  $-20^\circ \text{C}$ . Поскольку по ряду физико-химических свойств РМ близко к дизельному топливу, для его сжигания в дизелях не требуется внесения кардинальных изменений в конструкцию двигателя и его системы топливоподачи.

Таблица

**Физико-химические свойства дизельного топлива, рапсового масла и метилового эфира рапсового масла**

Физико-химические свойства	Топливо		
	ДТ	РМ	МЭ РМ
Формула состава	$\text{C}_{16,2} \text{H}_{28,5}^*$	-	$\text{C}_{19,6} \text{H}_{36,6} \text{O}_2^*$
Плотность при $20^\circ \text{C}$ , $\text{кг/м}^3$	830	916	877
Вязкость кинематическая при $20^\circ \text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{с}$	3,8	75	8,0
Коэффициент поверхностного натяжения при $20^\circ \text{C}$ , $\text{мН/м}$	27,1	33,2	30,7
Теплота сгорания низшая, $\text{МДж/кг}$	42,5	37,3	37,8
Цетановое число	45	36	48
Температура самовоспламенения, $^\circ \text{C}$	250	318	230
Температура помутнения, $^\circ \text{C}$	-25	-9	-13
Температура застывания, $^\circ \text{C}$	-35	-20	-21
Количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,5	12,6
Содержание, % по массе			
С	87,0	77,0	77,5
Н	12,6	12,0	12,0
О	0,4	11,0	10,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	0,002	0,002
Коксуемость 10%-ного остатка, % по массе	0,2	0,4	0,3

Примечание: «-» — свойства не определялись; \* — условная формула состава; ДТ — дизельное топливо; РМ — рапсовое масло; МЭ РМ — метиловый эфир рапсового масла.

Вместе с тем отличия физико-химических свойств РМ от свойств стандартных дизельных топлив оказывают влияние на протекание рабочих процессов в дизелях. В первую очередь, это относится к процессам топливоподачи и смесеобразования. Так, высокие плотность и вязкость рапсового масла, подаваемого в КС штатной топливоподающей аппаратурой, являются причиной увеличения цикловой подачи РМ и его часового расхода по сравнению с дизельным топливом по ГОСТ 305-82. Повышенная плотность РМ приводит к увеличению дальности топливной струи, попаданию части топлива на стенки КС и уменьшению доли объемного смесеобразования. При этом уменьшается угол раскрытия топливного факела и ухудшается мелкость распыливания — увеличивается средний диаметр капель. Большое поверхностное натяжение РМ повышает неоднородность его распыливания. Из-за повышенной плотности и вязкости РМ увеличивается максимальное давление впрыскивания. Действительный момент начала подачи топлива смещается при этом в сторону увеличения угла опережения впрыскивания. Поэтому при работе дизеля на РМ в ряде случаев целесообразно корректировать процесс топливоподачи.

Исследования по адаптации дизельных двигателей к работе на РМ и топливах на его основе проведены в МГТУ им. Н.Э. Баумана и МГАУ им. В.П. Горячкина [12—14], в Российском университете дружбы народов (РУДН) [11, 15, 16], в Харьковском политехническом институте [9,10], в ряде других организаций. Интенсивные работы в данном направлении ведутся и за рубежом [17—21]. Эти исследования, проведенные, в основном, на двигателях с неразделенными и полуразделенными КС, подтвердили перспективность использования РМ в качестве топлива для дизелей. Вместе с тем отмечено наличие ряда проблем, возникающих при работе двигателей на чистом РМ. Основные из них: закоксовывание распылителей форсунок, потеря подвижности поршневых колец, ухудшение качества моторного масла. По этой причине в большинстве указанных работ даются рекомендации по использованию в качестве топлива не чистого РМ, а смесевых биотоплив — смесей дизельного топлива и рапсового масла. Эти два вида топлива хорошо смешиваются в любых пропорциях, а требуемых физико-химических свойств смесевых биотоплив можно достичь путем варьирования их состава.

Ряд проблем, возникающих при работе дизелей на этом виде альтернативного топлива, можно решить при сжигании РМ в дизелях с разделенными КС. Особенностью дизелей с разделенными КС является меньшая чувствительность к изменению свойств применяемого топлива, в частности, к несколько худшей самовоспламеняемости РМ. Как отмечено выше, работа дизелей с неразделенными КС и объемным смесеобразованием на РМ сопровождается ухудшением качества процесса смесеобразования, что обусловлено повышенными плотностью, вязкостью и поверхностным натяжением рапсового масла. В частности, из-за увеличения длины струй распыливаемого рапсового масла часть его попадает на относительно холодные стенки КС и не сгорает полностью. Следствием этого является возможная потеря подвижности поршневых колец. Попадание значительного количества РМ в моторное масло может привести к ухудшению его смазывающих свойств, образованию густого осадка, необходимости частой замены моторного масла. Эта проблема характерна для малоразмерных дизелей (с диаметром цилиндра менее 100 мм), в которых длина струй распыливаемого топлива превышает расстояние от распыливающих отверстий до стенок цилиндра. В дизелях с разделенными КС первоначальное впрыскивание РМ в предкамеру или вихревую камеру, изолированную от основной камеры сгорания, позволяет исключить попадание РМ на стенки цилиндра, улучшить условия работы деталей цилиндропоршневой группы и исключить загрязнение моторного масла.

Одной из основных проблем обеспечения работы дизелей на РМ является отложение кокса на распылителе форсунки из-за повышенной коксуемости РМ и значительного со-

держания в нем смолистых веществ (табл.). Использование в дизелях с разделенной КС штифтовых форсунок с подвижным штифтом и достаточно большой изменяемой площадью распыливающего отверстия препятствует закоксовыванию распыливающего отверстия. Таким образом, дизели с разделенными КС в большей степени приспособлены к работе на растительных маслах.

Для оценки экономических и экологических показателей дизеля с разделенной КС, работающего на рапсовом масле, проведены испытания дизеля ВАЗ-341 (4 Ч 7.6/8.4) завода «БарнаулТрансМаш», устанавливаемого на легковые автомобили ВАЗ-21045. Исследуемый дизель без наддува имел рабочий объем  $iV = 1,52$  л, степень сжатия  $\varepsilon = 23$ , мощность  $N_c = 40$  кВт при  $n = 4800$  мин<sup>-1</sup> [22]. Дизель оснащен топливной аппаратурой фирмы R. Bosch, включающей топливный насос высокого давления типа VE и штифтовые форсунки, отрегулированные на давление начала впрыскивания  $p_{фв} = 12,5$  МПа [4, 22].

В дизеле ВАЗ-341 организовано вихрекамерное смесобразование. Для этого в головке блока цилиндров установлена вихревая камера (рис. 4). Топливо, впрыскиваемое форсункой 1 в вихревую КС 2, распределяется по объему этой камеры потоком вращающегося воздуха, поступающего в вихревую камеру из цилиндра двигателя на такте сжатия. Затем полученная топливовоздушная смесь из вихревой камеры 2 через тангенциальный канал 3 поступает в основную камеру 4.

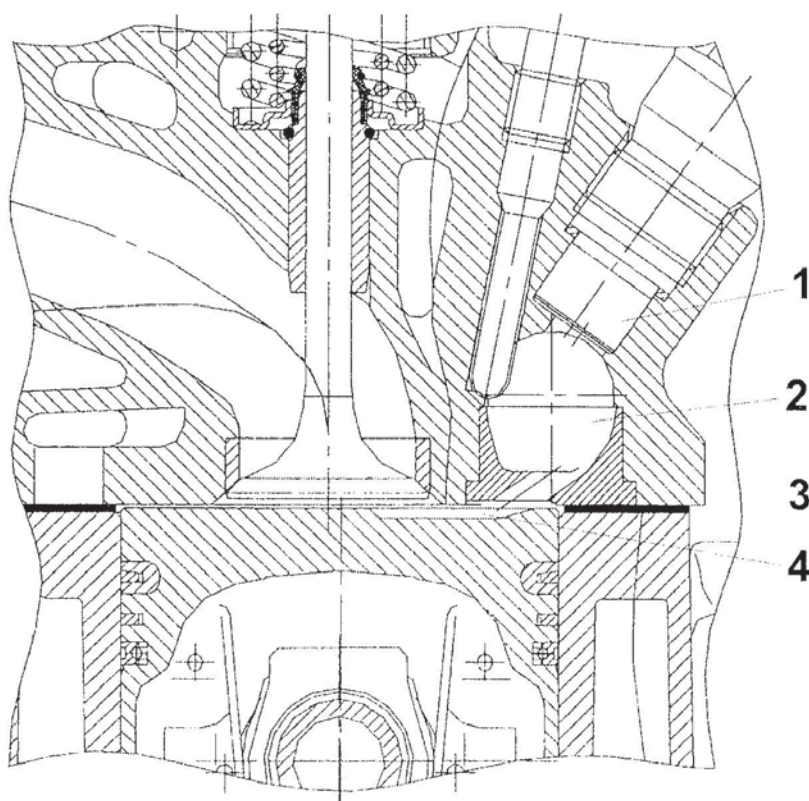


Рис. 4. Цилиндропоршневая группа и головка блока цилиндров с вихревой камерой сгорания дизеля ВАЗ-341: 1 — форсунка; 2 — вихревая камера; 3 — тангенциальный канал; 4 — основная камера сгорания

Таким образом, образование топливовоздушной смеси и ее последующее самовоспламенение в дизеле ВАЗ-341 происходит, в основном, за счет организации интенсивного движения воздушного заряда, действия горячих поверхностей и истечения горячих газов из дополнительной в основную КС, а не за счет повышения давления впрыскивания, как



это происходит в дизелях с неразделенными КС. При этом обеспечивается достаточно полное сгорание топлива при сравнительно низком коэффициенте избытка воздуха ( $\alpha=1,2-1,3$ ). Отличительной особенностью двигателя с вихревой КС является возможность обеспечения более мягкого сгорания топлива в основной камере с небольшими скоростями нарастания давления при сгорании и низким максимальном давлением сгорания. В дизеле ВАЗ-341 отмечается меньшая шумность работы и несколько худшая топливная экономичность по сравнению с дизелями с непосредственным впрыскиванием топлива, обусловленная повышенными потерями при перетекании заряда из основной КС в дополнительную и обратно, а также значительной поверхностью вихревой КС, граничащей с головкой цилиндра. Последнее обстоятельство увеличивает тепловые потери в процессе рабочего цикла дизеля ВАЗ-341.

Вместе с тем дизель ВАЗ-341 с вихрекамерным смесеобразованием отличается небольшими концентрациями в ОГ основных нормируемых токсичных компонентов по сравнению с дизелями с неразделенными КС. Меньшее содержание оксидов азота в ОГ дизеля ВАЗ-341 связано с дефицитом свободного кислорода на первой стадии сгорания при  $\alpha < 1$ , когда происходит интенсивное образование  $\text{NO}_x$ . Поэтому, несмотря на высокие температуры в дополнительной КС, процесс окисления азота воздуха ограничивается. Во второй стадии сгорание смеси в основном объеме КС происходит при избытке кислорода, но при пониженных по сравнению с дизелями с неразделенными КС температурах. Невысокие концентрации продуктов неполного сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ,  $\text{C}$ ) в ОГ дизеля ВАЗ-341 связаны с ускорением реакций окисления частичек топлива при повышенной турбулизации топливовоздушной смеси в объеме дополнительной КС, где достигается максимальная однородность факела при перетекании газов в основную КС и в объеме последней с интенсивным вихреобразованием. В целом эмиссии основных нормируемых токсичных компонентов с ОГ дизеля ВАЗ-341 в 1,5—3 раза ниже их эмиссии в дизелях с неразделенными КС практически на всех эксплуатационных режимах. Использование рапсового масла в качестве топлива для дизеля ВАЗ-341 позволяет дополнительно снизить показатели токсичности ОГ.

Указанное ухудшение топливной экономичности и улучшение показателей токсичности ОГ дизеля ВАЗ-341 по сравнению с дизелями с неразделенными КС отмечено и при его экспериментальных исследованиях, проведенных на моторном стенде кафедры ДВС Алтайского государственного технического университета (АлтГТУ) (Барнаул). При испытаниях в качестве нагрузочного устройства использовалась электрическая тормозная установка с балансирной машиной постоянного тока типа ЛРА-50 мощностью 50 кВт при  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ . Стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры, включающим в себя двухмаятниковый квадрантный динамометр марки «Rapido» (погрешность измерения крутящего момента двигателя — 0,25 %), электрический тахометр модели ТЭ-204 (погрешность измерения частоты вращения коленчатого вала — 0,2 %), набор термомпар ХА и ХК в комплекте с потенциометрами для определения температур охлаждающей жидкости и ОГ (погрешность измерения — 1 %), газовый счетчик РГ-250 для определения расхода воздуха (погрешности измерений: при расходах 10-20 % от номинального —  $\pm 2$  %, при расходах от 20 до 120 % —  $\pm 1 \dots 1,6$  %), расходомер АИР-50 для определения массового расхода топлива (погрешность измерения — 5 %). Концентрации в ОГ кислорода  $\text{O}_2$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , оксидов азота  $\text{NO}_x$  определялись газоанализатором Quintox 9106 производства Великобритании с погрешностью измерения  $\pm 5$  %.

Методика испытаний дизеля ВАЗ-341 включала в себя следующие этапы. На первом этапе были получены регулировочные характеристики по углу опережения впрыскивания топлива при частоте вращения коленчатого вала  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ , соответствующей максимальному крутящему моменту двигателя. Затем исследовалась работа дизеля на режимах внешней скоростной характеристики при неизменном положении упора максимальной

подачи топлива. На заключительном этапе была исследована работа дизеля на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ . Внешняя скоростная и нагрузочная характеристики снимались при оптимальном значении угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ), соответствующем наилучшей топливной экономичности, полученном при обработке регулировочных характеристик. Все эти характеристики вначале получены при работе на дизельном топливе, а затем — при работе на рапсовом масле.

На основании экспериментальных данных, полученных на режиме максимального крутящего момента при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ , построены регулировочные характеристики дизеля — зависимости его показателей от УОВТ (рис. 5). Как следует из рис. 5, а, где представлены показатели дизеля, работающего на РМ и ДТ, оптимальное с точки зрения топливной экономичности значение УОВТ равно  $\theta = 18,5^\circ$  п.к.в. до ВМТ. При этом УОВТ минимальные значения удельного эффективного расхода топлива оказались равными: для ДТ —  $g_e = 274,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ , для РМ —  $g_e = 331,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . Увеличенный удельный эффективный расход топлива  $g_e$  при работе на РМ обусловлен тем, что низшая теплота сгорания РМ ниже теплоты сгорания ДТ (соответственно  $H_{cv} = 37,34 \text{ МДж/кг}$  и  $H_{cv} = 42,21 \text{ МДж/кг}$ ). Поэтому для сравнения эффективности сгорания ДТ и РМ предпочтительнее использовать эффективный к.п.д. При переходе с РМ на ДТ эффективный к.п.д. дизеля повысился с  $\eta_e = 0,294$  до  $\eta_e = 0,309$ , т.е. на 5 %.

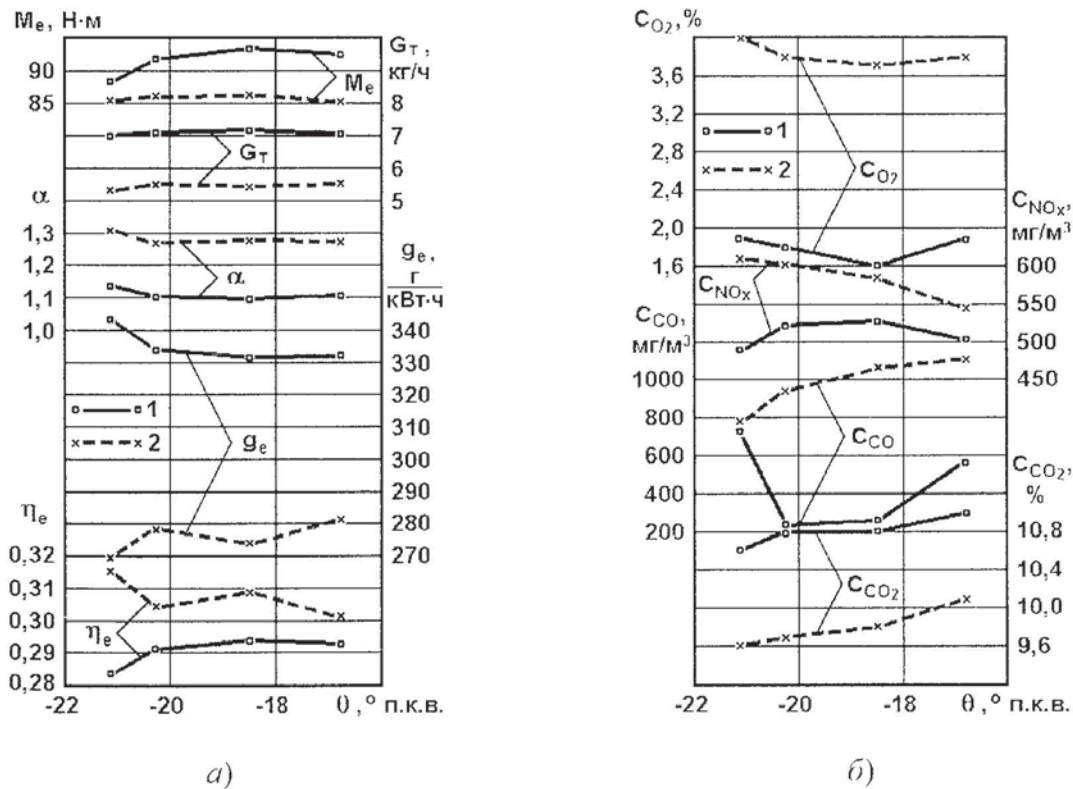


Рис. 5. Показатели работы дизеля ВЛЗ-341 (а) и показатели токсичности его ОГ (б) на режимах регулировочной характеристики при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ : 1 — РМ; 2 — ДТ

При оптимальном значении УОВТ отмечены максимальные величины крутящего момента дизеля: для ДТ —  $M_e = 86,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , для РМ —  $M_e = 93,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Большое значение крутящего момента, полученное при работе дизеля на РМ, обусловлено увеличением часового расхода топлива  $G_T$  (при неизменном положении упора максимальной подачи

топлива). При работе дизеля на ДТ и РМ на исследуемом режиме при  $\theta = 18,5^\circ$  п.к.в. до ВМТ часовой расход топлива оказался равен соответственно  $G_T = 5,44$  кг/ч и  $G_T = 7,14$  кг/ч. Такое увеличение часового расхода топлива при работе на РМ вызвано большей плотностью рапсового масла ( $\rho_{\text{РМ}} = 917,4$  кг/м<sup>3</sup>, у ДТ  $\rho_{\text{ДТ}} = 825$  кг/м<sup>3</sup>), его большей вязкостью ( $\nu_{\text{РМ}} = 76$  мм<sup>2</sup>/с против  $\nu_{\text{ДТ}} = 3,8$  мм<sup>2</sup>/с при  $t = 20^\circ\text{C}$ ), и меньшей сжимаемостью.

Представленные на рис. 5, б характеристики экологических показателей дизеля свидетельствуют о том, что на режиме с  $\theta = 18,5^\circ$  п.к.в. до ВМТ перевод дизеля с ДТ на РМ позволил снизить содержание в ОГ двух нормируемых токсичных компонентов ОГ — оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  (с 584 до 528 мг/м<sup>3</sup>) и монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  (с 1059 до 256 мг/м<sup>3</sup>). Некоторое увеличение содержания в ОГ углекислого газа  $C_{\text{CO}_2}$  (с 9,8 до 10,8 %), отчасти являющееся следствием уменьшения концентрации СО, как отмечено выше компенсируется выделением кислорода в процессе выращивания рапса. Дальнейшие испытания дизеля проводились с учетом полученного оптимального значения УОВТ.

На следующем этапе экспериментальных исследований были получены значения параметров дизеля на режимах внешней скоростной характеристики (рис. 6). Отмеченный по данным рис. 5 рост часового расхода топлива  $G_T$  при переводе дизеля на РМ характерен для всех исследованных режимов внешней скоростной характеристики. Так на режиме максимальной мощности при  $n = 3950$  мин<sup>-1</sup> часовой расход ДТ составил  $G_T = 10,60$  кг/ч, а расход РМ —  $G_T = 11,60$  кг/ч; на режиме максимального крутящего момента при  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup> соответственно —  $G_T = 5,32$  кг/ч и  $G_T = 7,27$  кг/ч, а на режиме  $n = 1150$  мин<sup>-1</sup> —  $G_T = 2,28$  кг/ч и  $G_T = 3,64$  кг/ч.

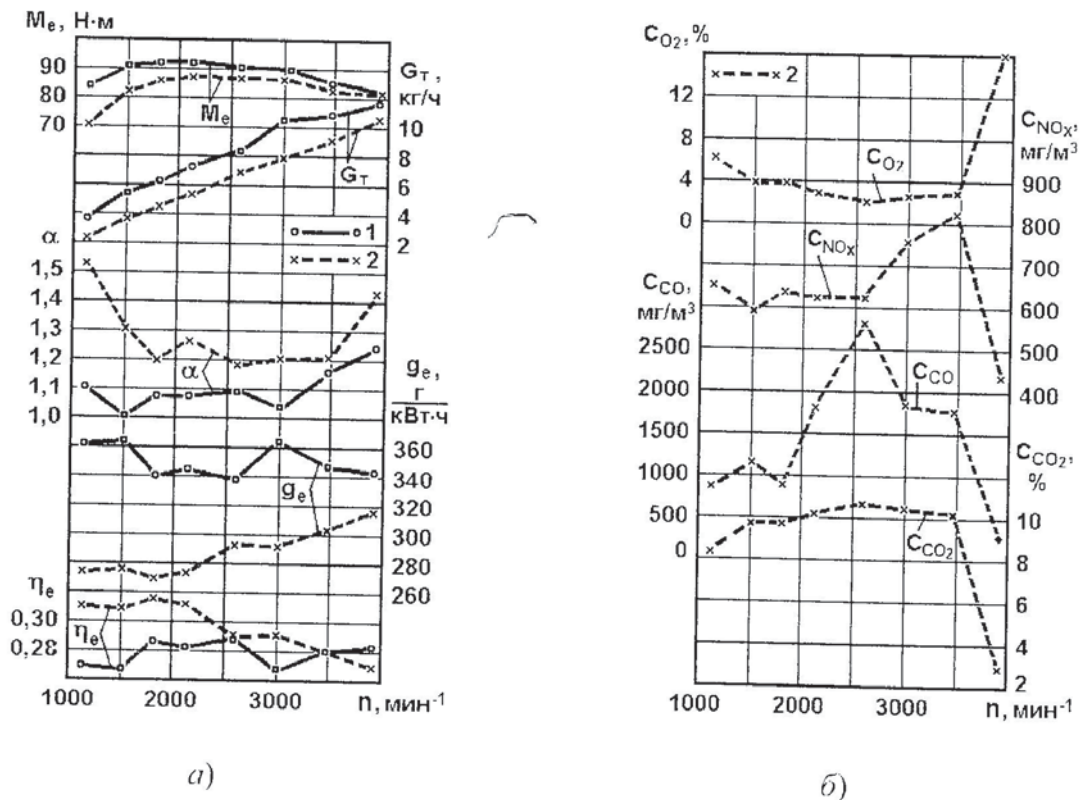


Рис. 6. Показатели работы дизеля ВАЗ-341 (а) и показатели токсичности его ОГ (б) на режимах внешней скоростной характеристики: 1 — РМ; 2 — ДТ

Вследствие увеличения часового расхода топлива при работе дизеля на РМ, повысились крутящий момент двигателя и его эффективная мощность по сравнению с работой на ДТ. Так, при частоте вращения коленчатого вала  $n=2200$  мин<sup>-1</sup> значения максимального

крутящего момента оказались равны: для ДТ -  $M_c=87,1$  Н·м, для РМ -  $M_c=91,8$  Н·м. При  $n = 1150$  мин<sup>-1</sup> величины  $M_c$  составили соответственно 70,5 и 84,0 Н·м, а при  $n = 3950$  мин<sup>-1</sup> - 81,5 и 81,8 Н·м. Из представленной на рис. 6, а зависимости крутящего момента дизеля  $M_c$  от частоты вращения коленчатого вала  $n$  следует, что с увеличением  $n$  разница в значениях  $M_c$  для РМ и ДТ уменьшается. Это объясняется тем, что при повышении  $n$  и, как следствие, уменьшении времени процесса сгорания, полного сгорания РМ, снижается более интенсивно, чем у ДТ, из-за отличий физико-химических свойств РМ и ДТ.

При работе двигателя на РМ большой расход топлива  $G_T$  приводит к некоторому снижению коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . При расчете значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  учитывалось, что рапсовое масло является кислородсодержащим топливом и для полного сгорания 1 кг рапсового масла требуется меньшее количество воздуха ( $L_{опт}=12,6$  кг воздуха на 1 кг топлива против  $L_{опт}=14,3$  кг воздуха / кг топлива). Поэтому при переходе с ДТ на РМ снижение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  менее значительно по сравнению с ростом часового расхода топлива  $G_T$ . На режимах внешней скоростной характеристики минимальные значения  $\alpha$  оказались равными (рис. 6, а): для ДТ -  $\alpha = 1,18$  (при  $n = 2600$  мин<sup>-1</sup>), для РМ -  $\alpha = 1,00$  (при  $n = 1550$  мин<sup>-1</sup>). В целом, снижение  $\alpha$  при переходе на РМ отмечено на всех режимах внешней скоростной характеристики. Меньшее значение  $\alpha$  при работе на РМ компенсируется достаточно большим содержанием кислорода в РМ, составляющим 10—12 %.

Как отмечено выше, из-за наличия кислорода в РМ теплота его сгорания ниже, чем у ДТ. Поэтому во всем диапазоне исследованных скоростных режимов удельный эффективный расход  $g_c$  рапсового масла превышает расход дизельного топлива. При работе двигателя на дизельном топливе минимум расхода топлива  $g_c = 268,7$  г/(кВт·ч) наблюдается при частоте вращения коленчатого вала  $n=1825$  мин<sup>-1</sup> (рис. 6, а). Увеличение частоты вращения коленчатого вала приводит к значительному росту удельного расхода топлива, и на режиме с максимальной частотой вращения  $n = 3950$  мин<sup>-1</sup> расход топлива достигает величины  $g_c = 315,4$  г/(кВт·ч). При работе дизеля на рапсовом масле характеристика удельного эффективного расхода топлива более благоприятна. В диапазоне частот вращения  $n$  от 1900 до 2600 мин<sup>-1</sup> удельный расход топлива является минимальным и остается примерно постоянным и равным  $g_c = 340$  г/(кВт·ч). На режиме с максимальной частотой вращения  $n = 3950$  мин<sup>-1</sup> расход топлива оказался равен  $g_c = 343,3$  г/(кВт·ч). Данные режимы являются наиболее характерными для городских условий эксплуатации автомобильного дизеля.

Характеристики эффективного к.п.д. двигателя  $\eta_c$  отражают закономерности, отмеченные по характеристикам удельного эффективного расхода топлива  $g_c$ . В частности, при минимальных значениях удельного расхода топлива  $g_c$  наблюдаются максимальные величины  $\eta_c$  (рис. 6, а): при работе на ДТ —  $\eta_c = 0,315$  (при  $n = 1825$  мин<sup>-1</sup>), а при работе на РМ —  $\eta_c = 0,282 \dots 0,287$  (при частотах вращения  $n = 1900 \dots 2600$  мин<sup>-1</sup>). Для режима с частотой вращения  $n=1150$  мин<sup>-1</sup> эффективный к.п.д. равен  $\eta_c = 0,310$  для ДТ и  $\eta_c = 0,269$  для РМ, для режима с  $n = 3950$  мин<sup>-1</sup> — соответственно  $\eta_c = 0,269$  и  $\eta_c = 0,283$ .

При исследовании режимов внешней скоростной характеристики показатели токсичности ОГ определялись только при работе на дизельном топливе (рис. 6, б). Полученные характеристики свидетельствуют о значительной зависимости этих показателей от скоростного режима работы дизеля.

На завершающем этапе исследований были проведены испытания дизеля на режимах нагрузочной характеристики при частоте вращения коленчатого вала  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>. Результаты экспериментальных исследований, полученные на этих режимах, представлены на рис. 7.

Характер увеличения часового расхода топлива  $G_T$  с ростом нагрузки (среднего эффективного давления  $p_e$ ) для испытуемых топлив одинаков, однако разница между значениями  $G_T$  для ДТ и РМ при этом увеличивается (рис. 7, а). Это связано с тем, что с повышением

нагрузки увеличиваются давление впрыскивания и утечки топлива. Причем утечки ДТ превышают утечки РМ, что и приводит к более интенсивному росту цикловой подачи РМ. Разница значений часового расхода топлива для РМ и ДТ составляет: на нагрузочном режиме, соответствующем среднему эффективному давлению  $p_e = 0,11$  МПа —  $\Delta G_T = 0,32$  кг/ч, при  $p_e = 0,45$  МПа —  $\Delta G_T = 0,44$  кг/ч, при  $p_e = 0,71$  МПа —  $\Delta G_T = 0,48$  кг/ч.

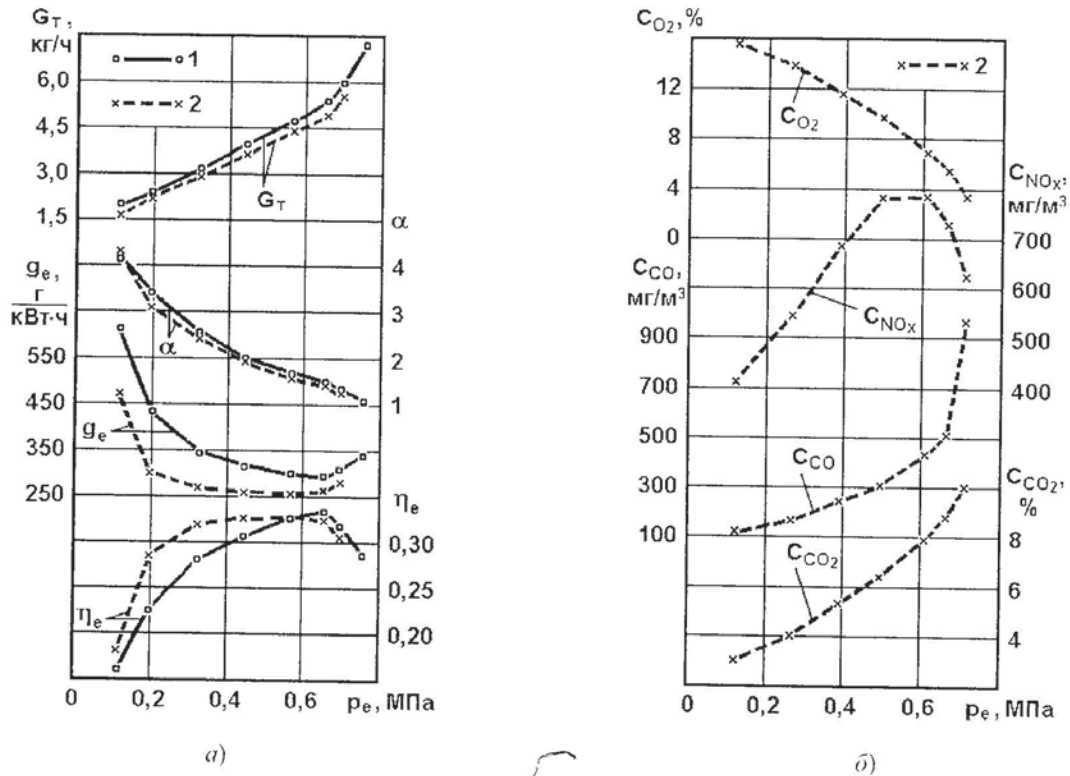


Рис. 7. Показатели работы дизеля ВА3-341 (а) и показатели токсичности его ОГ (б) на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup>: 1 — РМ; 2 — ДТ

С ростом нагрузки (давления  $p_e$ ) коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  уменьшается в соответствии с изменением часового расхода топлива  $G_T$  (рис. 7, а). На режимах исследуемой нагрузочной характеристики величина коэффициента избытка воздуха изменяется от  $\alpha = 4,2—4,3$  при минимальной нагрузке (при  $p_e = 0,11—0,12$  МПа) до  $\alpha = 1,07—1,24$  — при максимальной нагрузке (при  $p_e = 0,71—0,75$  МПа). Разница значений  $\alpha$  при работе дизеля на ДТ и РМ составляет  $\Delta\alpha = 0,06—0,40$ .

При исследовании нагрузочной характеристики минимальные значения удельного эффективного расхода топлива отмечены на следующих режимах: при работе на ДТ на режиме с нагрузкой  $p_e = 0,86 p_{e\text{ ном}}$  —  $g_{e\text{ мин}} = 257,5$  г/(кВт·ч), при работе на РМ на режиме с нагрузкой  $p_e = 0,87 p_{e\text{ ном}}$  —  $g_{e\text{ мин}} = 291,4$  г/(кВт·ч). На этих режимах отмечены максимумы эффективного КПД, которые составляют для ДТ —  $\eta_e = 0,329$ , для РМ —  $\eta_e = 0,334$  (рис. 7, а).

На режимах нагрузочной характеристики при  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup> показатели токсичности ОГ определялись только при работе на ДТ (рис. 7, б). Характеристики, представленные на рис. 6, б и 7, б, свидетельствуют о сравнительно небольших концентрациях в ОГ нормируемых токсичных компонентов, по сравнению с дизелями с неразделенными КС.

В целом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования рапсового масла в качестве топлива для дизелей с разделенной КС. Показана

возможность получения показателей топливной экономичности такого дизеля и токсичности его ОГ, лучших, чем при работе этого двигателя на традиционном дизельном топливе.

В заключение необходимо отметить, что в странах Евросоюза рапсовое масло используется для производства метилового эфира, имеющего физико-химические свойства, близкие к свойствам стандартного дизельного топлива (табл.). Метилловый эфир рапсового масла используется для централизованного снабжения автотранспорта этим моторным топливом. В странах Западной Европы в 1992 г. на рынок поступило около 1 млн. т. топлива, являющегося продуктом переработки растительного масла. В Германии в 1998 г. было произведено 100000 т. биодизельного топлива (метилового эфира рапсового масла), а в 2000 г. его производство составило уже около 200000 т [22]. Однако для решения локальных энергетических проблем, например для снабжения биотопливом средних и крупных фермерских хозяйств, более предпочтительно использование рапсового масла, производимого непосредственно в этих хозяйствах, имеющего меньшую стоимость и отличающегося высокими экологическими качествами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков В. А., Козлов С. И. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 296 с.
2. Пронин Е. Н. В поисках ответов // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. — 2003. — № 6. — С. 5—11.
3. Будзляк Б. В. Перспективы использования природного газа в качестве моторного топлива // Газовая промышленность. — 2005. — № 4. — С. 17—19.
4. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. — 344 с.
5. Шкаlikова В. Н., Патрахальцев Н. Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях. — М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. — 64 с.
6. Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И. Токсичность отработавших газов дизелей. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 376 с.
7. Фукс И. Г., Евдокимов А. Ю., Джамалов А. А. Экологические аспекты использования топлив и смазочных материалов растительного и животного происхождения // Химия и технология топлив и масел. — 1992. — № 6. — С. 36—40.
8. Кулиев Р. Ш., Ширинов Ф. Р., Кулиев Ф. А. Физико-химические свойства некоторых растительных масел // Химия и технология топлив и масел. — 1999. — № 4. — С. 36—37.
9. Семенов В. Г., Зинченко А. А. Альтернативные топлива растительного происхождения. Определение фракционного и химического составов // Химия и технология топлив и масел. — 2005. — № 1. — С. 29—34.
10. Семенов В. Г., Семенова Д. У., Слипущенко В. П. Расчет высшей теплоты сгорания биотоплив // Химия и технология топлив и масел. — 2006. — № 2. — С. 46—49.
11. Вальехо П., Гусаков С. В., Прияндака А. Экспериментальное определение кинетических констант воспламенения растительных топлив в условиях ДВС // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования. — 2003. — № 1. — С. 29—31.
12. Девянин С. Н., Марков В. А., Коршунов Д. А. Использование смесевых биотоплив в дизелях // Сборник научных трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — С. 63—68.
13. Девянин С. Н., Марков В. А., Коршунов Д. А. Улучшение экологических показателей транспортных дизелей при использовании смесевых биотоплив // Безопасность жизнедеятельности. — 2005. — № 12. — С. 27—33.
14. Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизеля / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, С. Н. Девянин и др. // Автомобильная промышленность, 2006. — № 2. — С. 1—3.
15. Исследования рабочего процесса тракторного дизеля при работе на смеси дизельного топлива и рапсового масла / Л. Н. Басистый, Луай Ахмед, И. Ю. Олесов и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Тепловые двигатели. — 1996. — № 1. — С. 30—36.
16. Патрахальцев Н. Н., Пономарев В. Е., Пономарев Е. Г. Биотопливо для быстроходных дизелей на основе рапсового масла // Совершенствование мощностных и экологических показателей ДВС. — Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 1997. — С. 97—98.
17. Лютко В., Лукавин В. Н., Хачиян А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. — М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. — 311 с.
18. Hashimoto M., Dan T., Asano I. et al. Combustion of the Rape-Seed Oil in a Diesel Engine // SAE Technical Paper Series. — 2002. — № 2002-01-0867. — P. 1—12.

19. Yoshimoto Y., Onodera M. Performance of a Diesel Engine Fueled by Rapeseed Oil Blended with Oxygenated Organic Compounds // SAE Technical Paper Series. — 2002. — № 2002-01-2854. — P. 1—9.
20. Krahl J., Vellguth G., Munaek A. et al. Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors // SAE Technical Paper Series. — 1996. — № 961847. — P. 1—14.
21. Hemmerlein N., Korte V., Richter H. et al. Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil // SAE Technical Paper Series. — 1991. — № 910848. — P. 1—16.
22. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1990. — 352 с.
22. Кирilloв Н. Г. Альтернативные моторные топлива XXI века // Автогазозаправочный комплекс — альтернативное топливо. — 2003. — № 3. — С. 58—63.

629.115

## ЗАВИСИМОСТЬ МАНЕВРЕННЫХ СВОЙСТВ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ

*Д-р техн. наук, проф. Г.И. ГЛАДОВ, инж. Л.А. ПРЕСНЯКОВ*

*Изложен метод оценки влияния параметров и режимов работы системы управления поворотом с гидромеханическим приводом на маневренные свойства большегрузных автопоездов. Приведена расчетная схема автопоезда. Указаны зависимости углов поворота колес и углов складывания звеньев автопоезда для различных участков траектории его движения с целью получения минимальных отклонений траекторий звеньев от заданной и уменьшения габаритной полосы движения автопоезда.*

*Estimation method of working parameters and modes of behavior in a steering control system with a hydro mechanical drive gear on maneuverable properties of super size articulated trucks is observed. The design model of articulated truck is shown. Dependences of wheel turning angles and jack-knifing corners on various sites of its motion path with the purpose of obtaining minimum off-path jogging from set and overall lane reduction are specified.*

Маневренные свойства большегрузных автопоездов (БАП) обеспечиваются специальными системами управления поворотом колес прицепных звеньев. Оценка и выбор способов совершенствования маневренных свойств путем анализа влияния параметров и режимов работы этих систем на характер криволинейного движения автопоездов осложняются отсутствием соответствующих расчетных методов.

Нами предлагается метод оценки влияния параметров и режимов работы систем управления поворотом с гидромеханическим типом привода на маневренные свойства БАП. Расчетная схема движения автопоезда на повороте, представленная на рис. 1, составлена с принятием следующих допущений: рассматривается плоская «велосипедная» модель автопоезда; скорость движения тягача принимается постоянной; боковой увод шин не учитывается. В качестве оценочного параметра маневренности БАП выбраны величины смещений траекторий опорных точек звеньев относительно друг друга, обозначаемые в дальнейшем  $\Delta C_i$ . Для тягача опорная точка расположена в геометрическом центре задней — неуправляемой — колесной тележки, а для прицепных звеньев — в общих геометрических центрах колесных ходов.

При выводе основных зависимостей были приняты следующие обозначения:  $\mu_i$  — угол поворота приведенного управляемого колеса тягача;  $d_i$  — курсовой угол тягача;  $L_i$  — база тягача;  $\alpha_i$  — курсовой угол  $i$ -го прицепного звена;  $\gamma_i$  — угол складывания  $i$ -го прицепного звена;  $\dot{\alpha}_i$ ,  $\dot{\gamma}_i$  — скорость изменения курсового угла и угла складывания  $i$ -го