

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.436

DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-39-52

Спиртовые топлива для дизельных двигателей

В.А. Марков¹, П.Р. Вальехо Мальдонадо², В.В. Бирюков¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ», 107023, Москва, Российская Федерация, Б. Семеновская ул., д. 38

Alcohol Fuels for Diesel Engines

V.A. Markov¹, P.R. Vallejo Maldonado², V.V. Biryukov¹¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), 107023, Moscow, Russian Federation, B. Semenovskaya St., 38

e-mail: markov@power.bmstu.ru



Актуальность статьи обусловлена необходимостью замещения традиционных нефтяных моторных топлив альтернативными топливами, получаемыми из ненефтяного сырья. К наиболее перспективным относятся различные спиртовые топлива. Их широкое применение позволит не только заместить нефтяные топлива, но и значительно снизить выбросы в атмосферу вредных компонентов отработавших газов. В статье проведен анализ физико-химических свойств спиртов, которые можно применять в качестве моторных топлив. Рассмотрены способы организации рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания, в частности в дизельных двигателях при использовании спиртовых топлив. Описана экспериментальная установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования различных альтернативных топлив для дизелей. Представлены результаты экспериментальных исследований дизелей, работающих на смесях нефтяного дизельного топлива и этанола, а также растительных масел. Показана возможность значительного снижения дымности отработавших газов при работе дизеля на указанных смесях. Подтверждена эффективность использования абсолютного (безводного) этанола в качестве экологической добавки к нефтяному дизельному топливу.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, дизельное топливо, спирт, этиловый спирт, рапсовое масло, смесевое биотопливо.



The relevance of the article is determined by the need to replace traditional petroleum motor fuels with alternative fuels derived from non-petroleum raw materials. The most promising alternatives include various alcohol fuels. Their widespread use will not only allow replacing petroleum fuels but will also significantly reduce emission of harmful components of exhaust fumes. The analysis of physico-chemical properties of the alcohols that can be used as motor fuels is presented in the article. Methods of working process management in internal combustion engines are considered, particularly those in diesel engines working on alcohol fuels. An experimental facility for investigating various alternative diesel fuels is described. The results of experimental investigations of diesel engines working on blends of petroleum diesel fuel and ethanol, as well as vegetable oils are presented in the article. It is

shown that smoke opacity of the exhaust fumes can be considerably reduced when a diesel engine works on these blends.

Keywords: internal combustion engine, diesel engine, diesel fuel, alcohol, ethanol, rapeseed oil, biofuel mixture.

Характерными особенностями современного этапа развития топливно-энергетического комплекса являются дефицит нефтяного сырья, нестабильность мировых цен на нефть и нефтепродукты, а также все более широкое использование моторных топлив, производимых из альтернативных сырьевых ресурсов. Пристальное внимание к альтернативным топливам обусловлено быстрым ростом мирового автопарка и необходимостью его бесперебойного обеспечения моторными топливами. Лидером по развитию альтернативной энергетики являются США. При этом необходимо отметить, что в США потребление спиртовых топлив значительно превышает потребление других альтернативных топлив — пропан-бутановых смесей (сжиженного углеводородного газа (СУГ), сжатого природного газа (КПГ) и сжиженного природного газа (СПГ)) (рис. 1) [1].

Привлекательность спиртовых топлив заключается в том, что их можно получить из любого углеводородного сырья, как минерального (природный газ, уголь, горючие сланцы), так и органического (картофель, свекла, другие сельскохозяйственные культуры, растительные отходы, водоросли и др.) [1–3]. Среди преимуществ спиртовых топлив необходимо также отметить наличие в их молекулах атомов кислорода, что позволяет заметно улучшить показатели токсичности отработавших

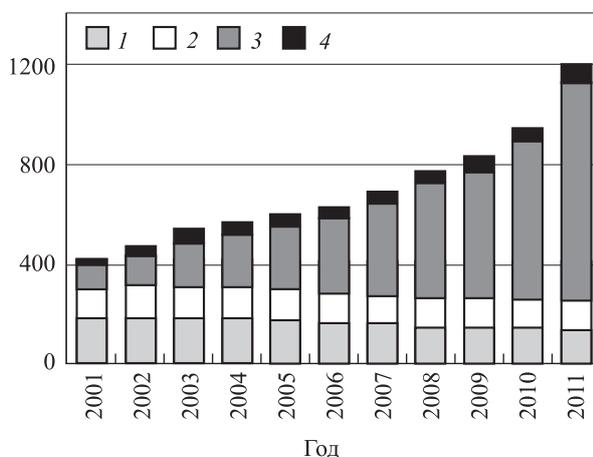


Рис. 1. Динамика роста количества транспортных средств на альтернативных топливах в США: 1 — СУГ; 2 — КПГ; 3 — E-85 (смесь 85 % этанола и 15 % бензина); 4 — СПГ

газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Спирты являются соединениями органического происхождения и характеризуются присутствием в их молекуле одной или нескольких гидроксильных групп ОН (рис. 2) [2]. В зависимости от числа этих групп спирты подразделяют на одно-, двух- и многоатомные. В группе одноатомных спиртов выделяют *нормальные спирты*, в которых соединенные между собой атомы углерода образуют неразветвленную цепочку углеводородных групп CH_3 и CH_2 , а гидроксильная группа ОН соединена с последней группой CH_2 в этой цепи (нормальный пропанол, нормальный бутанол на рис. 2, в, д и др.), и *изомеры этих спиртов*. Среди одноатомных спиртов в зависимости от положения гидроксильной группы различают первичные RCH_2OH (например, нормальный бутанол), вторичные RCHON (*втор-бутанол*) и третичные спирты RCOH (*трет-бутанол*), где R — радикал.

Простейший из спиртов — *метиловый спирт* (метанол, древесный спирт) CH_3OH легко смешивается с водой в любых соотношениях, смешивается со спиртами, бензолом, ацетоном

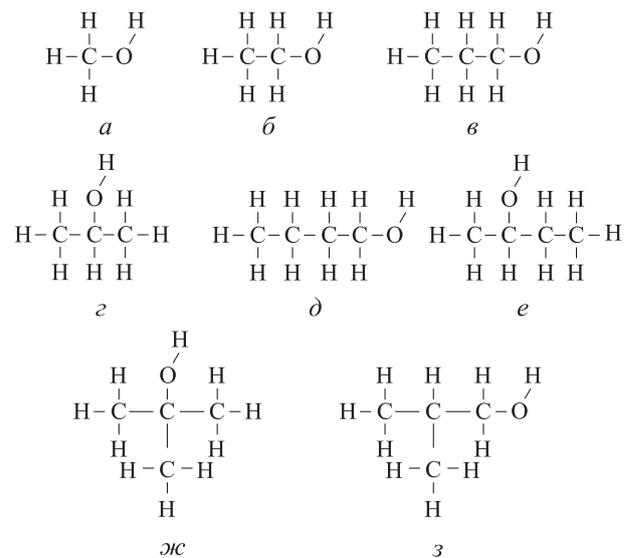


Рис. 2. Молекулярные структуры простейших спиртов:

a — метанол; б — этанол; в — нормальный пропанол; з — изопропанол; д — нормальный бутанол; е — втор-бутанол; ж — трет-бутанол; з — изобутанол

Таблица 1

Физико-химические свойства простейших спиртов

Показатель	Метанол	Этанол	<i>n</i> -пропанол	Изопропанол	<i>n</i> -бутанол	Втор-бутанол	Трет-бутанол	Изобутанол
Формула состава	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH			
Молекулярная масса	32,04	46,07	60,10	60,10	74,12	74,12	74,12	74,12
Плотность при 20 °С, кг/м ³	791,7	789,0	803,5	785,1	809,8	806,0	788,7	802,1
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	0,75	1,00	2,81	3,09	3,60	5,22	4,20	4,50
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	22,1	22,0	23,8	21,7	24,2	23,0	—	22,1
Цетановое число	5	8	—	—	18	—	15	—
Октановое число по моторному методу	98	99	—	90	87	—	95	94
Октановое число по исследовательскому методу	112	111	—	110	—	112	—	113
Температура плавления, °С	-97,8	-114,6	-126,2	-89,5	-89,8	-114,7	25,5	-108,0
Температура кипения, °С	64,7	78,4	97,2	82,4	117,5	99,5	82,9	108,4
Критическая температура, °С	249,4	243,7	263,7	235,6	288,6	264,0	235,0	271,0
Критическое давление, МПа	8,02	6,38	5,10	5,38	4,68	4,53	4,96	4,58
Температура вспышки, °С	10,0	12,2	23,0	13,0	34,0	24,0	10,0	28,0
Температура самовоспламенения, °С	464	426	371	—	345	—	480	390
Концентрационные пределы воспламенения, %	6,7–36,5	3,2–19,0	2,1–13,5	2,2–13,0	1,8–12,0	1,9–7,9	—	1,8–7,3
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	19 670	26 800	30 700	32 800	33 100	—	—	32 980
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	6,49	9,01	10,36	10,36	11,20	11,20	11,20	11,20
Теплота испарения, кДж/кг	1115	870	749	670	591,2	562,4	535,4	578,4
Давление насыщенных паров при 0,1 МПа и 20 °С, кПа	24,6	12,2	2,0	5,2	0,8	2,4	5,6	1,2
Теплоемкость C_p при 0,1 МПа и 20 °С, кДж/(кг·град)	2,51	2,47	2,45	2,68	2,43	2,73	—	2,38
Массовая доля, %								
С	37,5	52,2	60,0	60,0	64,8	64,8	64,8	64,8
Н	12,6	13,1	13,4	13,4	13,6	13,6	13,6	13,6
О	49,9	34,7	26,6	26,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Растворимость в воде при 20 °С, г/100 г воды	Не ограничена		Хорошая	Хорошая	10,0	12,5	Не ограничена	11,1
Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	5	1000	10	980	10	150	300	150

и другими органическими растворителями, не смешивается с алифатическими углеводородами. Обладает высоким октановым числом (ОЧ), поэтому его добавляют в автомобильные бензины. Метанол является ядовитым веществом. Другой характерный представитель спиртов — *этиловый спирт* (этанол, винный спирт) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (или $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) смешивается с водой в любых пропорциях. Кроме этих двух простейших спиртов в качестве моторного топлива можно использовать и другие спирты — нормальный пропанол (*n*-пропанол), изопропанол, нормальный бутанол (*n*-бутанол), *втор*-бутанол, *трет*-бутанол, изобутанол, а также более тяжелые спирты. Некоторые свойства этих спиртов приведены в табл. 1 [3]. В качестве моторных топлив используют также смеси этих спиртов с нефтепродуктами и различными альтернативными топливами [3–5]. Так, в ряде стран широкое применение в качестве топлива для ДВС получил *газохол* — смесь бензина с этанолом в соотношении 9:1 [3]. Он представляет собой жидкость плотностью $\rho = 730 \dots 760 \text{ кг/м}^3$, пределами выкипания от 25 до 210 °С, низшей теплотой сгорания $H_U = 41 \text{ 900 кДж/кг}$, теплотой испарения $Q_{\text{исп}} = 465 \text{ кДж/кг}$.

Среди рассмотренных спиртов наиболее привлекательным для использования в ДВС является *этанол*. Это обусловлено хорошими экологическими качествами этанола (его предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны — наивысшая среди рассматриваемых спиртов, см. табл. 1) и возможностью его получения из различных сырьевых ресурсов.

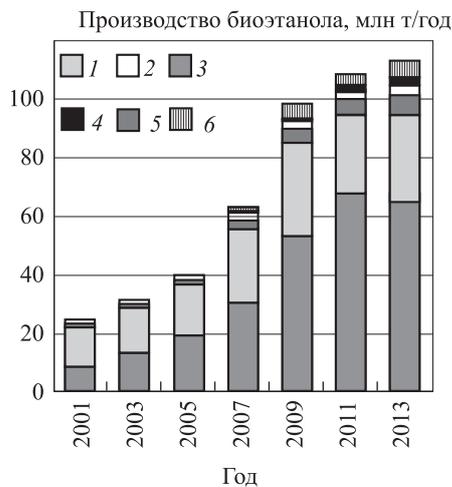


Рис. 3. Динамика мирового производства биоэтанола:

1 — США; 2 — Бразилия; 3 — страны ЕС; 4 — Китай; 5 — Канада; 6 — остальные страны

В качестве сырья для получения этанола (биоэтанола) используют сахарную свеклу, сахарный тростник, кукурузу, пшеницу, картофель, сладкое сорго, топинамбур и другие сельскохозяйственные культуры [6, 7]. На сегодняшний день основная часть биоэтанола производится в Северной и Южной Америке, а лидерами в его производстве являются США и Бразилия (рис. 3) [1], причем больше половины мирового производства этанола приходится на США.

Этанол получают с помощью различных технологий. Около 7 % этанола вырабатывается химическим синтезом (преимущественно из природного газа), 93 % этанола производится с использованием процесса брожения биомассы. При этом 60 % спирта получают из сахара и 40 % — из зерна. Современное мировое производство этанола составляет 32 млн т в год, из них 4 млн т приходится на пищевой этанол, 8 млн т — на этанол для химической промышленности и 20 млн т — на топливный этанол. В то же время мировая потенциальная потребность в этом спирте достигает 2 млрд т в год. Топливный этанол используют различным образом: около 26 % его смешивают с бензином, около 3 % применяют в качестве топлива для дизелей [6]. В США для бензиновых двигателей используют в основном топливо E-85, содержащее 85 % этанола в смеси с автомобильным бензином. Цены на бензин и смесевое топливо E-85 в 2014 г. приведены на рис. 4 [1]. Следует отметить, что в странах ЕС на автозаправочных станциях (АЗС) отпускается смесевое топливо E-90 (смесь 90 % этанола и 10 % бензина). Данные по количеству АЗС, реализующих топливо E-90 в ряде европейских стран, приведены на рис. 5 [1].

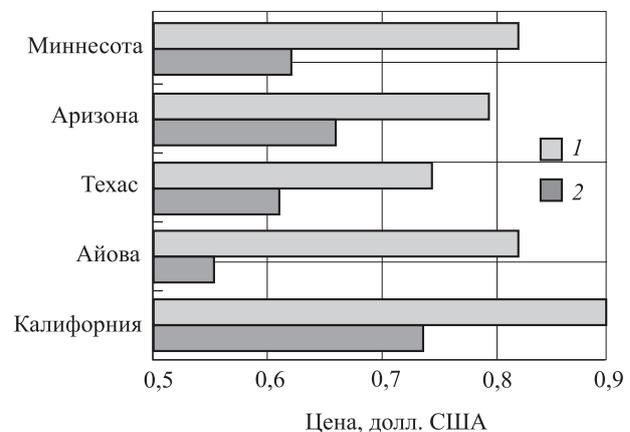


Рис. 4. Сравнительная стоимость бензина (1) и смесевого топлива E-85 (2) в США в 2014 г.

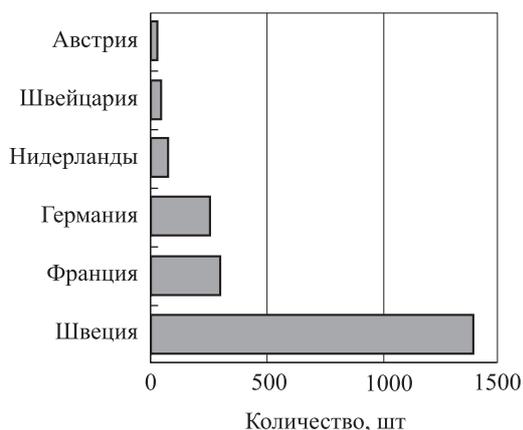


Рис. 5. Количество АЗС, реализующих топливо E-90 в странах ЕС

В некоторых странах уже действуют стандарты на биоэтанол. В соответствии с этими стандартами требования к выпускаемому этанолу в разных странах различаются, но эти отличия незначительны (табл. 2) [8]. Только в США допустимым является содержание этанола 92,1 % в смеси с водой и денатурирующими веществами. По сути, допускается применение

азеотропной смеси, с регулированием содержания воды при помощи денатурирующих присадок. В других странах этанол для автотранспорта должен быть безводным, т. е. абсолютным спиртом.

Следует отметить, что этанол широко применяют в двигателях с принудительным воспламенением. Сжигание спиртовых топлив в дизелях более экономично [2, 3], однако использование этанола в качестве топлива для дизелей может вызвать серьезные проблемы, что связано с отличиями его физико-химических свойств от свойств нефтяных моторных топлив. В табл. 3 представлен химический состав, низшая теплотворная способность и стехиометрическое соотношение (соотношение воздух/топливо) этилового спирта (ЭС), дизельного топлива (ДТ) и рапсового масла (РМ) [2]. Эти проблемы обусловлены низкой плотностью и вязкостью этанола (соответственно 790 кг/м³ и 1,0 мм²/с), а также низким цетановым числом, которое не превышает 10, что вызывает проблему с самовоспламенением спирта в камере сгорания (КС) дизеля.

Таблица 2

Требования к составу этанола в различных странах

Параметр	Бразилия	Канада	США	Германия	Украина	Польша
Объемная концентрация этанола, %, не менее	99,3	98,7	92,1	99,8	99,3	99,6
Содержание воды, %, не более	—	0,1 (масс.)	7,9 (об.)	—	0,02 (об.)	0,4 (об.)
Концентрация альдегидов, в расчете на ацетальдегид, г/л безводного этанола, не более	—	—	-	0,004	—	0,20
Объемная концентрация метанола, %, не более	—	—	0,50	—	—	—
Концентрация кислот в пересчете на уксусную кислоту, г/л безводного этанола, не более	0,03	0,03	0,07 (об.)	—	—	0,03
Концентрация эфиров в пересчете на этилацетат, г/л безводного этанола, не более	—	—	—	0,002	—	0,20
Сухой остаток, г/л безводного этанола, не более	—	—	0,05	—	—	0,02
Содержание меди, мг/кг, не более	0,07	0,10	0,10	—	—	0,10
Содержание хлоридов, мг/кг, не более	—	10,0	5,0	—	—	40,0
Объемная доля денатурирующих веществ, %	3,0	1 л бензина на 100 л этанола	1,96–4,76	—	—	—

Таблица 3

Химический состав и свойства исследуемых топлив

Топливо	Массовые доли				Низшая теплота сгорания H_u , кДж/кг	Стехиометрическое соотношение I_o , кг/кг	Плотность ρ_t , кг/м ³
	C	H	O	S			
ДТ	0,87	0,126	0,004	0,005	42 500	14,3	840
РМ	0,77	0,12	0,11	0	37 300	12,5	921
ЭС	0,521	0,132	0,347	0	27 500	9,0	790

В связи с этим применяют различные способы организации работы дизелей на спиртовых топливах. Спирт может впрыскиваться в чистом виде или в смеси с ДТ непосредственно в цилиндры дизеля, подаваться во впускной трубопровод в жидкой фазе или в виде пара [2, 3]. Непосредственное впрыскивание спирта в КС может осуществляться с помощью штатного топливного насоса высокого давления (ТНВД) дизеля. Используют также непосредственную подачу спирта в КС в виде эмульсии с ДТ. Эффективными являются системы с разделением

впрыскиванием спирта и запальной дозы ДТ в цилиндры дизеля. Ряд указанных проблем решается путем применения в дизелях смесевых топлив [2, 9, 10]. К ним относятся и смеси нефтяного ДТ с этанолом. Возможна добавка в эти смеси растительного (рапсового) масла. Исследование процесса сгорания таких смесевых топлив проведено на установке ИДТ-69, созданной в Российском университете дружбы народов и предназначенной для оценки воспламеняемости моторных топлив методом совпадения вспышек. Установка оснащена устрой-

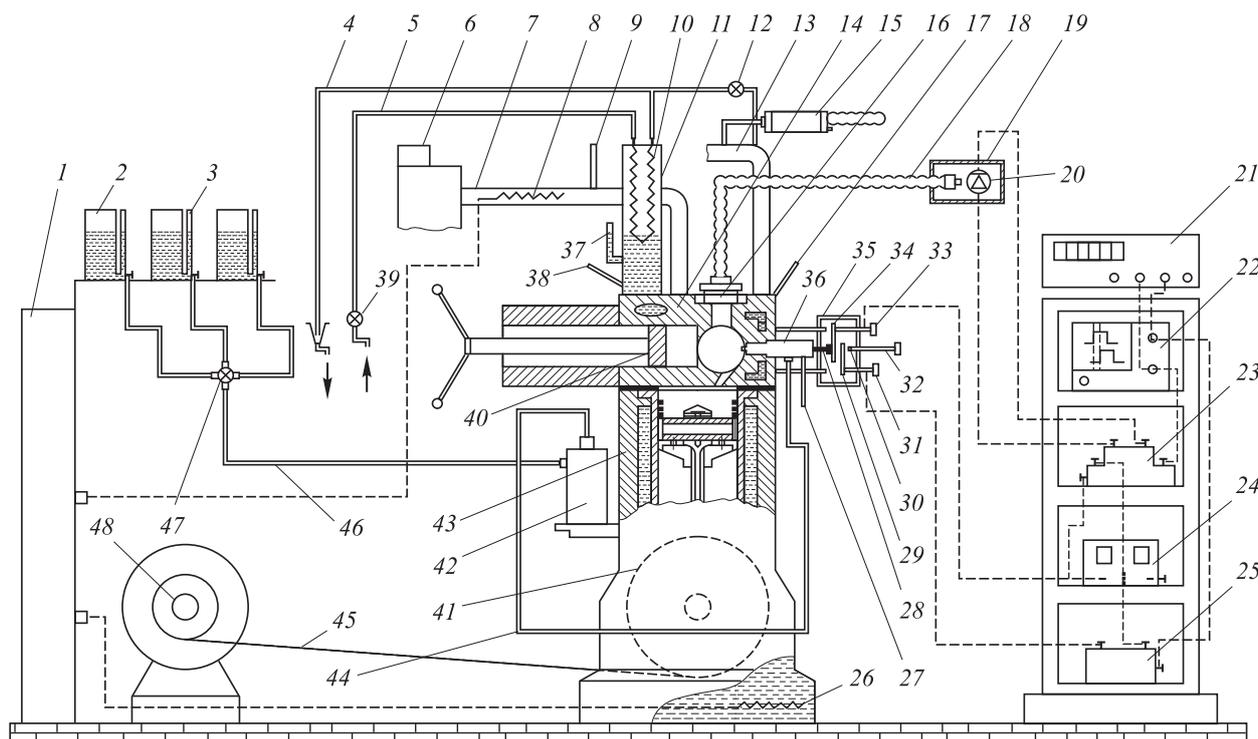


Рис. 6. Схема установки ИДТ-69:

1 — пульт управления; 2 — емкость исследуемых топлив; 3 — мензурка; 4 и 5 — слив и подвод охлаждающей воды; 6 — расходомер воздуха; 7 — впускной коллектор; 8 — подогреватель воздуха на впуске; 9, 17, 38 — термометры; 10 — теплообменник; 11 — расширительный бак; 12, 39 — краны воды; 13 — выхлопная труба; 14 — головка отсека; 15 — отборник ОГ; 16 — оптический приемник; 18 — световод; 19 — фотодатчик; 20 — фотодиод; 21 — частотомер; 22 — осциллограф; 23 — усилитель; 24 — блок питания; 25 — электрический фильтр; 26 — подогреватель масла; 27 — слив топлива форсунки; 28 — изолятор; 29, 34 — контакты движения иглы форсунки; 30 и 31–33 — клемма и винт регулировки зазора между контактами; 35 — датчик хода иглы форсунки; 36 — штифтовая форсунка; 37 — мензурка системы охлаждения отсека; 40 — регулировочный поршень; 41 — маховик отсека; 42 — ТНВД; 43 — одноцилиндровый отсек; 44, 46 — топливопроводы высокого и низкого давления; 45 — ременная передача; 47 — кран переключения исследуемых топлив; 48 — электродвигатель привода отсека

ствами, необходимыми для стабилизации внешних условий. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

Основные характеристики установки ИДТ-69

Частота вращения вала, мин ⁻¹	900±10
Диаметр цилиндра, м.....	0,085
Ход поршня, м.....	0,115
Степень сжатия.....	7–23
Расход топлива, кг/ч.....	0–1,3
Угол опережения впрыскивания топлива, град, поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки.....	0...30
Давление впрыскивания топлива, МПа.....	10,6±0,4
Температура всасываемого воздуха, °С.....	69±1
Температура жидкости, охлаждающей цилиндр, °С.....	100±1
Температура жидкости, охлаждающей форсунку, °С.....	30±1
Температура масла в картере, °С.....	60±1
Давление масла в магистрали, МПа.....	0,19±0,02
Зазор между штоками и коромыслами клапанов на холодном двигателе, мм:	
впускной клапан.....	0,20
выпускной клапан.....	0,25

Установка представляет собой стенд с однокорпусным вихрекамерным дизельным отсеком 43 (см. рис. 6), приводимым электродвигателем 48 с постоянной частотой вращения. Для поддержания требуемой температуры воздуха на впуске в коллекторе 7 установлен подогреватель 8 входящего в цилиндр воздуха, расход которого контролируется расходомером 6. Температура масла в картере стабилизируется подогревателем 26, а температура воды в системе охлаждения — с помощью теплообменника 10, установленного в расширительном баке 11 с проточной водой. Степень сжатия изменяется перемещением с помощью винтовой пары регулировочного поршня 40, размещенного в головке 14 отсека. В результате изменяется объем вихревой КС цилиндрической формы, имеющей соединительный канал, расположенный тангенциально в вихревой камере и соединяющий ее с полостью над поршнем. В вихревой КС на оси ее цилиндрической части установлена форсунка 36 со штифтовым распылителем и контактным датчиком 35 контроля движения иглы распылителя. Выхлопная система 13 имеет отвод, к которому через штуцер присоединен отборник

ОГ 15, предназначенный для проведения анализа ОГ по дымности выхлопа.

Для измерения содержания сажи в ОГ использовали дымомер фирмы Bosch типа EFAW-65. Зонд для отбора ОГ в дымомерное устройство 15 (см. рис. 6) представляет собой Г-образную трубку из нержавеющей стали. Входное отверстие зонда расположено по оси впускной трубы и направлено навстречу потоку ОГ. Измерительная аппаратура включала фотоэлектрический преобразователь и вторичный показывающий прибор, снабженный потенциометром нулевого выравнивания и микроамперметром. Дымность определялась по уровню отраженного от использованного бумажного фильтра потока света, регистрируемого цифровым прибором непосредственно в единицах Bosch.

На установке ИДТ-69 использована КС разделенного типа. В процессе сжатия поршень 7 (рис. 7) вытесняет воздух из надпоршневого пространства через соединительный канал 6 в вихревую камеру 3. Тангенциальное расположение канала 6 в вихревой камере 3 обеспечивает закручивание воздушного заряда в этой камере при его втекании. Топливо через штифтовой распылитель 4 форсунки 5 подается в вихревой воздушный заряд камеры 3. Объем вихревой камеры 3 можно изменять регулировочным поршнем 1, что приводит к изменению степени сжатия.

На описанной установке были исследованы различные топлива: ДТ, РМ, смесь (эмульсия) 90 % РМ и 10 % этилового спирта (ЭС), смесь (эмульсия) 70 % РМ и 30 % ЭС (табл. 4). Исследование топлив, содержащих РМ и ЭС, потре-

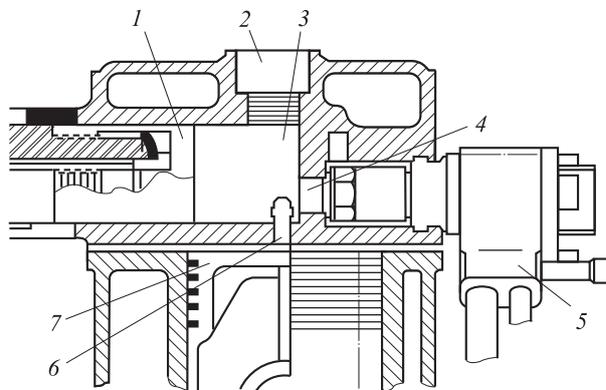


Рис. 7. Схема КС установки ИДТ-69:
 1 — регулировочный поршень; 2 — датчик воспламенения; 3 — вихревая камера; 4 — штифтовой распылитель; 5 — форсунка; 6 — тангенциальный канал; 7 — поршень

Таблица 4

**Основные физико-химические свойства
исследованных топлив**

Топливо	Плотность ρ_t , кг/м ³	Низшая теплота сгорания H_U , кДж/кг	Количество воз- духа, необходи- мое для сгора- ния 1 кг топлива l_0 , кг/кг
ДТ	840	42 500	14,3
РМ	921	37 300	12,5
90 % РМ + 10 % ЭС	902	36 360	11,8
70 % РМ + 30 % ЭС	890	34 397	11,3

Примечание. Для смеси РМ и ЭС указана объемная доля компонентов.

бовало создания специального смесителя для получения устойчивых смесей. Использование смесителя позволяло в процессе эксперимента получать смеси (эмульсии) РМ и спирта без добавления эмульгатора.

Количество топлива, подаваемого в КС установки ИДТ-69, определяли для каждого топлива индивидуально из условия сохранения постоянства состава смеси (коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне $\alpha \approx 2,25$). Для обеспечения этого условия цикловую подачу (мм³/цикл) топлива рассчитывали по формуле

$$V_{ц} = \frac{G_b}{3 \cdot 10^{-8} \cdot \alpha l_0 \rho_t n},$$

где G_b — часовой расход воздуха, кг/ч; α — требуемый коэффициент избытка воздуха; l_0 — стехиометрический коэффициент для исследуемого топлива, кг/кг; ρ_t — плотность топлива, кг/м³; n — частота вращения вала установки, мин⁻¹.

Таблица 5

Характеристики исследуемых топливовоздушных смесей

№ п/п	Топливо	Расход воздуха G_b , кг/ч	Количество воз-духа, необходимое для сгорания 1 кг топлива l_0 , кг/кг	Цикловая подача топлива $V_{ц}$, мм ³ /цикл	Коэффициент избытка воздуха α	Количество теплоты, подаваемой в цилиндр с топливовоздушной смесью за цикл $Q_{ц}$, Дж
1	ДТ	15,84	14,3	22,5	2,17	799,6
2	РМ		12,5	23,2	2,19	797,5
3	90 % РМ + 10 % ЭС		11,8	24,2	2,28	790,7
4	70 % РМ + 30 % ЭС		11,3	25,9	2,25	790,8

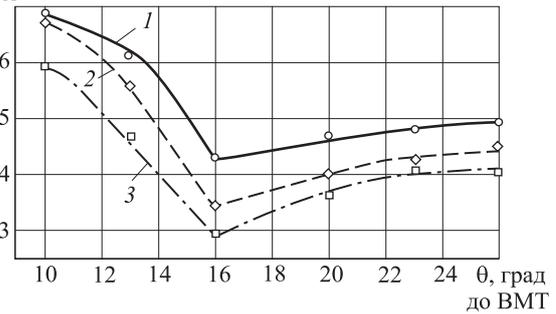
К_х, ед. Bosch

Рис. 8. Зависимости дымности ОГ K_x от УОВТ θ при степени сжатия $\epsilon = 18$ для различных топлив: 1 — ДТ; 2 — РМ; 3 — 90 % РМ + 10 % ЭС

Характеристики топливовоздушных смесей для исследованных топлив приведены в табл. 5. Там же представлены значения количества теплоты $Q_{ц}$, подаваемой в цилиндр установки с топливовоздушной смесью за цикл.

Испытания проводили в два этапа. На первом этапе исследовали топлива № 1, 2 и 3 (см. табл. 5) при степени сжатия $\epsilon = 18$ и различных углах опережения впрыска топлива (УОВТ) θ , на втором — топлива № 1, 2, 3 и 4 при $\theta = 13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (ПКВ до ВМТ) и различных степенях сжатия ϵ . Результаты первого этапа испытаний, представленные на рис. 8, свидетельствуют о том, что использование рапсового масла или его смеси с 10 % этанола приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ. Причем во всем исследованном диапазоне изменения УОВТ ($\theta = 10 \dots 26^\circ$ ПКВ до ВМТ) переход с ДТ на РМ приводит к снижению дымности на 0,2...0,8 по шкале Bosch (на 3...19 %), а добавка к РМ 10 % этанола дополнительно снижает дымность еще на 0,3...0,7 по шкале Bosch (на 7...18 %). Максимальное снижение дымности ОГ достигнуто при работе с $\theta = 13^\circ$ ПКВ до ВМТ на рапсовом масле с 10 % этанола и составило 1,6 по шкале Bosch, или 24 %.

Увеличение дымности ОГ при уменьшении УОВТ менее 16° ПКВ до ВМТ связано с уменьшением количества топлива, поданного за период задержки воспламенения, и увеличением доли топлива, сгорающего в диффузионной фазе горения, когда неиспарившееся топливо выбрасывается из вихревой камеры в основную и при плохом смесеобразовании превращается в сажу. Следует отметить излом представленных на рис. 8 характеристик дымности ОГ при УОВТ $\theta = 16^\circ$ ПКВ до ВМТ. Увеличение дымности при УОВТ более 16° ПКВ до ВМТ объясняется затягиванием периода задержки воспламенения при раннем впрыскивании, удлинением струй топлива за этот период и увеличением количества топлива, попадающего на относительно холодные стенки КС. Результат этих процессов — плохое перемешивание топлива с воздухом, затягивание его догорания и увеличение дымности ОГ. По мере роста УОВТ более 16° ПКВ до ВМТ (при еще более раннем впрыскивании) количество топлива, попадающего на стенки КС, возрастает, что и вызывает увеличение дымности ОГ.

Результаты второго этапа испытаний, представленные на рис. 9, свидетельствуют о том, что использование РМ или его смеси с 10 и 30 % этанола снижает дымность ОГ по сравнению дымностью при работе на ДТ. Причем во всем исследованном диапазоне изменения степени сжатия ($\epsilon = 18 \dots 22$) работа на РМ приводит к снижению дымности на 0,6...1,3 по шкале Bosch, добавка к РМ 10 % этанола дополнительно снижает дымность на 0,5...0,7, а добавка 30 % этанола — еще на 0,7...1,1 по шкале Bosch.

По данным рис. 9 следует также отметить, что увеличение степени сжатия ϵ более 18 приводит к улучшению качества смесеобразования как за счет роста температуры воздушного заряда, так и за счет увеличения турбулизации втекающего в КС и вытекающего из нее потока рабочей смеси. Кроме того, увеличение степени сжатия приводит к увеличению плотности воздушного заряда в процессе впрыскивания, что снижает дальнобойность топливной струи и вероятность попадания топлива на стенки КС. Таким образом, для наибольшего снижения дымности ОГ рассматриваемые смесевые биотоплива целесообразно использовать в сочетании с увеличением степени сжатия ϵ .

Одной из серьезных проблем, возникающих при использовании этанола в качестве моторного топлива, является его плохая смешиваемость

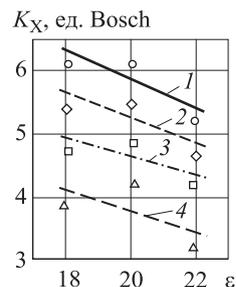


Рис. 9. Зависимость дымности ОГ K_x от степени сжатия ϵ при УОВТ $\theta = 13^\circ$ ПКВ до ВМТ для различных топлив:
1 — ДТ; 2 — РМ; 3 — 90 % РМ + 10 % ЭС;
4 — 70 % РМ + 30 % ЭС

с нефтяным ДТ и рядом альтернативных топлив. Создание стойких смесей этанола с нефтяным ДТ представляет сложную техническую задачу. Основная причина этого — наличие в этаноле, полученном путем брожения биомассы, значительного количества воды, которая очень плохо смешивается с нефтепродуктами. Как указано ранее (см. табл. 2) в топливном этаноле, выпускаемом в США, допустимым является содержание 7,9 % (по объему) воды и денатурирующих веществ. Смешивание такого этанола с нефтяным ДТ возможно только путем создания этанола-топливных эмульсий с добавлением эмульгаторов. В частности, в работе [11] отечественный дизель типа 4 Ч 11,0/12,5 испытан на эмульсии, содержащей нефтяное ДТ (67,5 %), этанол (25 %), воду (7 %) и эмульгатор (0,5 %). В работе [12] исследован шестицилиндровый четырехтактный дизель фирмы Cummins (США), работающий на эмульсии нефтяного ДТ (88,7 %), этанола (10 %) и эмульгаторов (1,3 %). Аналогичные исследования дизелей, работающих на этанола-топливных эмульсиях, проведены за рубежом и в России [2, 13].

Вместе с тем абсолютный спирт, практически не содержащий воды, хорошо смешивается с нефтяным ДТ. При этом образуются стойкие смеси, что подтвердили исследования авторов статьи. Использован абсолютный спирт, произведенный ФГУП «Алексинский химический комбинат» (г. Алексин Тульской обл.) с соответствия с ТУ 2421-064-07506004-2003. Этот спирт смешивался с нефтяным ДТ. Исследовали нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-82 и смесевое биотопливо — смесь, содержащую 96 % ДТ и 4 % ЭС (по объему). Некоторые свойства этих топлив и этанола приведены в табл. 6.

Таблица 6

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Показатель	Топлива		
	ДТ	ЭС	96 % ДТ + 4 % ЭС
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830,0	789,3	828,4
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,8	1,0	3,5
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	22,4	—
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	42 500	26 800	41 800
Теплота испарения, кДж/кг	1115	870	—
Цетановое число	45	8	—
Температура самовоспламенения, °С	250	363	—
Температура застывания, °С	-35	-114,3	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,31	9,01	14,09
Массовая доля, %:			
С	87,0	52,2	85,6
Н	12,6	13,1	12,6
О	0,4	34,7	1,8
S	0,200	—	0,192

Примечание. Прочерк означает, что свойства не определялись; для смеси ДТ и ЭС указана объемная доля компонентов.

Чтобы подтвердить возможности использования полученной смеси в качестве моторного топлива, проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода.

**Некоторые параметры дизеля
типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)**

Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Общий рабочий объем, л	4,32
Степень сжатия	16,0
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2400
Номинальная мощность, кВт	80
Диаметр плунжеров ТНВД, мм	10
Ход плунжеров ТНВД, мм	10
Длина нагнетательных топливopоводов, мм	540
Давление начала впрыскивания форсунок, МПа	21,5

Тип распылителей форсунок данного дизеля — DOP 119S534 (фирмы Motorpal) с пятью сопловыми отверстиями диаметром 0,34 мм и проходным сечением 0,25 мм².

Дизель исследован на моторном стенде на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН, описанного в работах [2, 9, 14], с установочным УОВТ $\theta = 13^\circ$

ПКВ до ВМТ и неизменным положением упора рейки ТНВД. Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измеряли с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения $\pm 1\%$. Концентрации оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов (NO_x, CO, CH_x) в ОГ определяли газоанализатором SAE-7532 японской фирмы Yanaco с погрешностями измерения указанных компонентов $\pm 1\%$.

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля типа Д-245.12С на чистом ДТ и на смеси 96 % ДТ и 4 % ЭС на режимах ВСХ (рис. 10). Исследуемая смесь имела физические свойства, приближающиеся к свойствам ДТ, но ее плотность и вязкость оказались несколько меньше, чем у ДТ (см. табл. 6). Поэтому при переходе от ДТ к смеси 96 % ДТ и 4 % ЭС отмечено небольшое уменьшение часового расхода топлива G_r и некоторый рост коэффициента избытка воздуха α , вызванный также наличием атомов кислорода в молекулах этанола. Следствием снижения расхода топлива и меньшей теплотворной способности (низшей теплоты сгорания) исследуемой смеси явилось заметное уменьшение крутящего момента двигателя M_e и его эффективной мощности N_e (см. рис. 10 и табл. 7).

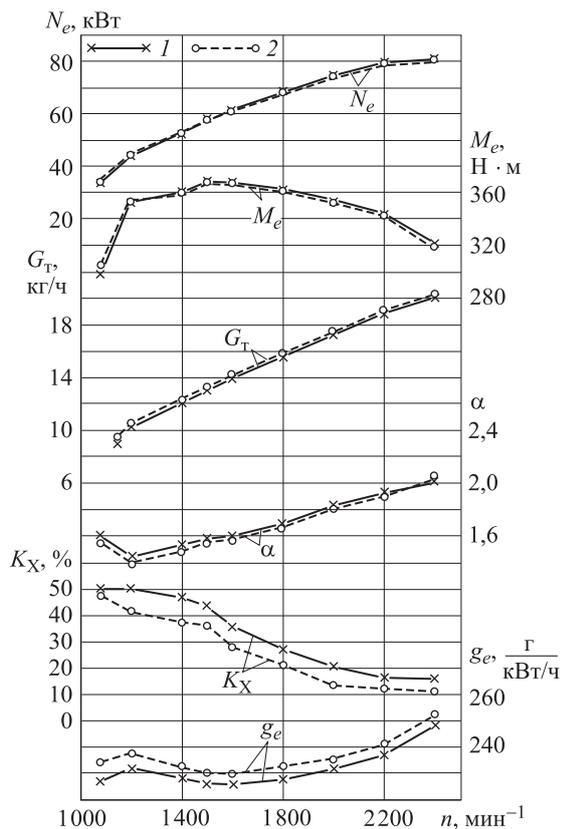


Рис. 10. Зависимости эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , часового расхода топлива G_T , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_X и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизеля типа Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 — ДТ; 2 — смесь 96 % ДТ и 4 % ЭС

В результате снижения теплотворной способности смесового биотоплива на всех исследованных режимах ВСХ при использовании смеси 96 % ДТ и 4 % ЭС удельный эффективный расход топлива g_e оказался несколько выше, чем при работе на ДТ. В частности, при переходе с ДТ на смесовое биотопливо на режиме максимальной мощности с частотой вращения коленчатого вала $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ удельный эффективный расход топлива g_e увеличился от 248,4 до 250,0 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — от 226,2 до 229,0 г/(кВт·ч). Однако эффективный КПД дизеля η_e на этих режимах повысился на 0,5...0,8 % (см. табл. 7).

Вместе с тем наличие в молекулах этанола атомов кислорода привело к заметному уменьшению дымности ОГ при работе исследуемого дизеля на смесовом биотоптиве. Так, на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ переход с ДТ на смесь 96 % ДТ и 4 % ЭС сопровождался снижением дымности ОГ K_X от 16,0 до 12,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ — от 43,0 до 36,5 % по шкале Хартриджа.

Результаты экспериментальных исследований Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН представлены в табл. 7. При экспериментальных исследованиях получены характеристики часо-

Таблица 7

Показатели дизеля типа Д-245.12С, работающего на различных топливах

Показатель	ДТ	96 % ДТ + 4 % ЭС
<i>Режимы ВСХ</i>		
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	20,10/13,10	20,00/12,76
Крутящий момент дизеля M_e , Н·м	322/368	318/355
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	248,4/226,2	250,0/229,0
Эффективный КПД η_e дизеля	0,341/0,374	0,344/0,376
Дымность ОГ K_X , %	16,0/43,0	12,0/36,5
<i>Режимы 13-ступенчатого цикла</i>		
Условный эффективный расход топлива $g_{e, \text{усл}}$, г/(кВт·ч)	247,97	254,73
Условный эффективный КПД $\eta_{e, \text{усл}}$	0,341	0,338
Интегральные удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч):		
оксидов азота e_{NOx}	7,018	5,798
монооксида углерода e_{CO}	1,723	1,879
несгоревших углеводородов $e_{\text{СНх}}$	0,788	0,856
<i>Примечание.</i> В числителе указаны значения показателей на режиме максимальной мощности, в знаменателе — на режиме максимального крутящего момента.		

вого расхода топлива и содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (NO_x , CO , CH_x). С использованием этих данных и общепринятых методик расчета [2, 9, 14] определены их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-ступенчатого цикла (соответственно e_{NO_x} , e_{CO} , e_{CH_x}). Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-ступенчатого цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива, который определялся с использованием зависимости [2]

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{\text{ти}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i},$$

где $G_{\text{ти}}$ и N_{ei} — часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на i -м режиме; K_i — доля времени этого режима в 13-ступенчатом цикле.

Поскольку смесевые биотоплива имеют меньшую теплотворную способность, топливную экономичность дизеля при его работе на этих топливах целесообразно оценивать не только удельным эффективным расходом топлива g_e , но и эффективным КПД дизеля η_e . Причем для интегральной оценки работы дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла использован условный эффективный КПД, определяемый из соотношения

$$\eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e \text{ усл}}},$$

где H_U — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Результаты расчетов (см. табл. 7) подтверждают возможность улучшения экологических показателей дизеля типа Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 96 % ДТ и 4 % ЭС. Так, при подаче в КС дизеля исследуемого смесового биотоплива на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента дымность ОГ снизилась на 15...25 % по сравнению с дымностью при использовании нефтяного ДТ. Удельный массовый выброс наиболее значимого токсичного компонента ОГ — оксидов азота e_{NO_x} на режимах 13-ступенчатого цикла снизился с 7,018 до 5,798 г/(кВт·ч), т. е. на 17,4 %. Удельный массовый выброс монооксида углерода e_{CO} возрос с 1,723 до 1,879 г/(кВт·ч), т. е. на 9,0 %. Удельный массовый выброс несгоревших углеводородов e_{CH_x} увеличился с 0,788 до 0,856 г/(кВт·ч), т. е. на 8,6 %. Сле-

дует отметить, что выбросы CO и CH_x эффективно снижаются установкой в выпускной системе двигателя каталитических нейтрализаторов. Условный эффективный КПД дизеля $\eta_{e \text{ усл}}$ незначительно снизился (с 0,341 до 0,338, т. е. на 0,8 %), однако это снижение соизмеримо с точностью его определения. В целом проведенные исследования подтвердили эффективность использования абсолютного этанола как экологической добавки к нефтяному ДТ.

В заключение следует отметить, что применение биоэтанола позволяет не только обеспечить частичное замещение нефтяных моторных топлив альтернативными топливами, производимыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но и значительно улучшить показатели токсичности ОГ, в первую очередь — снизить дымность ОГ.

Выводы

1. Проведенные на установке ИДТ-69 испытания показали, что использование смесевых биотоплив — смесей этанола в количестве 10 и 30 % с РМ приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ. При добавлении в РМ 30 % спирта удалось достичь снижения дымности ОГ примерно в 2 раза большего, чем при добавлении 10 % ЭС.

2. При использовании рассматриваемых смесевых биотоплив эффект по снижению дымности сохраняется при изменении УОВТ в диапазоне 10...26° ПКВ до ВМТ и изменении степени сжатия в диапазоне 18...22.

3. При степени сжатия $\epsilon = 18$ и УОВТ $\theta = 13^\circ$ ПКВ до ВМТ максимальный эффект снижения дымности ОГ достигнут при работе на РМ с 10 % ЭС и составил 1,6 по шкале Bosch (или 24 %) по сравнению с работой на ДТ.

4. При степени сжатия $\epsilon = 22$ и УОВТ $\theta = 13^\circ$ ПКВ до ВМТ максимальный эффект снижения дымности ОГ достигнут при работе на смеси РМ с 30 % ЭС и составил 2,0 единицы по шкале Bosch (или 38 %) по сравнению с работой на ДТ.

5. Подтверждена эффективность использования смеси 96 % ДТ и 4 % абсолютного этанола в качестве дизельного моторного топлива. При смешении этих компонентов образуются стойкие однородные смеси, обладающие хорошими экологическими качествами из-за наличия в их составе значительного количества кислорода. Смесь 96 % ДТ и 4 % ЭС содержит 1,8 % кислорода (по массе), а нефтяное ДТ — только 0,4 %.

6. При переходе от нефтяного ДТ к смеси 96 % ДТ и 4 % абсолютного этанола интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный массовый выброс наиболее значимого токсичного компонента ОГ — оксида азота — снизился на 17,4 %, выброс монооксида углерода

возрос на 9,0 %, а несгоревших углеводородов — на 8,6 %. Однако выбросы CO и CH_x эффективно снижаются установкой в выпускной системе двигателя каталитических нейтрализаторов. При этом дымность ОГ на режимах ВСХ снизилась на 15...25 %.

Литература

- [1] Ершов В.Е., Трифонова Е.В., Хабибуллин И.Ф., Емельянов В.Е. Опыт и перспективы применения биоэтанольных топлив. *Нефтепереработка и нефтехимия*, 2014, № 12, с. 33–37.
- [2] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. *Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
- [3] Александров А.А., Марков В.А., ред. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.
- [4] Макаров В.В., ред. *Этиловый спирт в моторном топливе*. Москва, ООО «РАУ-Университет», 2005. 184 с.
- [5] Feijo E.A.V., Fujisawa R. Emission Control Evolution of the 2.0 L Gasohol/Ethanol Engines in Brasil. *SAE Technical Paper Series*, 1992, № 921493, pp. 1–17.
- [6] Гусаков С.В. *Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников*. Москва, РУДН, 2008. 318 с.
- [7] Reynolds M.A., Checkel M.D., Fraser R.A. A Case Study for Life Cycle Assessment (LCA) as an Energy Decision Making Tool: The Production on Fuel Ethanol from Various Feedstocks. *SAE Technical Paper Series*, 1998, № 982205, pp. 1–17.
- [8] Александров А.А., Архаров И.А. *Моторные топлива. Современные аспекты безопасного хранения и реализации в городах-мегаполисах*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 352 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*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 536 с.
- [10] Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В., Каськов С.И. *Использование в дизеле смесевых биотоплив с добавками растительных масел. Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2014, № 10, с. 11–19.
- [11] Лиханов В.А., Лопатин О.П. Улучшение экологических показателей дизеля путем применения этанола-топливной эмульсии. *Тракторы и сельхозмашины*, 2013, № 2, с. 6–7.
- [12] Mendoza M.C., Woon P.V. E-diesel Effects on Engine Component Temperature and Heat Balance in a Cummins C8.3 Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2002, № 2002-01-2847, pp. 1–7.
- [13] Лиханов В.А., Лопатин О.П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов, метанола- и этанола-топливных эмульсий. *Тракторы и сельхозмашины*, 2015, № 3, с. 3–6.
- [14] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 376 с.

References

- [1] Emel'ianov V.E., Ershov M.A., Trifonova E.V., Khabibullin I.F. Opyt i perspektivy primeneniia bioetanol'nykh topliv [Experience and the Prospect of Applying the Bio-Ethanol Fuels]. *Neftepererabotka i neftekhimiia* [Refining and petrochemicals]. 2014, no. 12, pp. 33–37.
- [2] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiiian A.S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelekh vnutrennego sgoraniia* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADi(STU) publ., 2000. 311 p.
- [3] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V., Gaivoronskii A.I., Grekhov L.V., Devianin S.N., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Al'ternativnye topliva dlia dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, ООО NITs Inzhener publ., ООО Oniko-M publ., 2012. 791 p.

- [4] *Etilovyi spirt v motornom toplive* [Ethanol in motor fuel]. Ed. Makarov V.V. Moscow, RAU-Universitet publ., 2005. 184 p.
- [5] Feijo E.A.V., Fujisawa R. Emission Control Evolution of the 2.0 L Gasohol/Ethanol Engines in Brasil. *SAE Technical Paper Series*, 1992, № 921493, pp. 1–17.
- [6] Gusakov S.B. *Perspektivy primeneniia v dizeliakh al'ternativnykh topliv iz vozobnovliaemykh istochnikov* [Prospects for use in diesel engines of alternative fuels from renewable sources]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia publ., 2008. 318 p.
- [7] Reynolds M.A., Checkel M.D., Fraser R.A. A Case Study for Life Cycle Assessment (LCA) as an Energy Decision Making Tool: The Production on Fuel Ethanol from Various Feedstocks. *SAE Technical Paper Series*, 1998, № 982205, pp. 1–17.
- [8] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A. *Motornye topliva. Sovremennye aspekty bezopasnogo khraneniia i realizatsii v gorodakh-megapolisakh* [Motor fuel. Modern aspects of safe storage and sale in megacities]. Moscow, Bauman Press, 2011. 352 p.
- [9] Markov V.A., Devianin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigateliakh* [The use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines]. Moscow, OOO NITs Inzhener publ., OOO Oniko-M publ., 2011. 536 p.
- [10] Markov V.A., Devianin S.N., Markova V.V., Kas'kov S.I. *Ispol'zovanie v dizele smesevykh biotopliv s dobavkami rastitel'nykh masel* [Use in a diesel engine of mixed biofuels with additives vegetable oils]. *Avto-gazozapravochnyi kompleks + al'ternativnoe toplivo* [Gas filling complex + alternative fuel]. 2014, no. 10, pp. 11–19.
- [11] Likhanov V.A., Lopatin O.P. Uluchshenie ekologicheskikh pokazatelei dizelia putem primeneniia etanolo-toplivnoi emul'sii [Improving the ecological characteristics of diesel by means of ethanol and fuel emulsion use]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery]. 2013, no. 2, pp. 6–7.
- [12] Mendoza M.C., Woon P.V. E-diesel Effects on Engine Component Temperature and Heat Balance in a Cummins C8.3 Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2002, no. 2002-01-2847, pp. 1–7.
- [13] Likhanov V.A., Lopatin O.P. Uluchshenie ekologicheskikh pokazatelei traktornogo dizelia putem primeneniia komprimirovannogo prirodnogo gaza i retsirkuliatsii otrabotavshikh gazov, metanolo- i etanolo-toplivnykh emul'sii [Improvement of environmental performance of tractor diesel by the use of compressed natural gas and exhaust gas recirculation, methanol and ethanol fuel emulsions]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery]. 2015, no. 3, pp. 3–6.
- [14] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelei* [Exhaust emissions of diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.

Статья поступила в редакцию 07.09.2015

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

ВАЛЬЕХО МАЛЬДОНАДО Пабло Рамон (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные и тракторные двигатели». Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ» (107023, Москва, Российская Федерация, Б. Семеновская ул., д. 38).

БИРЮКОВ Владимир Владимирович (Москва) — аспирант кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

VALLEJO MALDONADO Pablo Ramon (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Automobile and Tractor Engines. Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI) (107023, Moscow, Russian Federation, B. Semenovskaya St., 38).

BIRYUKOV Vladimir Vladimirovich (Moscow) — Post-graduate, Department of Thermophysics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).