



# ТРАНСПОРТ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ



№ 5 (53) 2016



**Новые АГНКС сети «Газпром»**

**Перспективы развития мобильных заправщиков**

**Балтийские СПГ-коридоры**

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору  
в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны  
культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-30114

Включен в Перечень ВАК

#### Учредитель и издатель

НП «Национальная газомоторная ассоциация» (НГА),  
аффилирована с Международным газовым союзом

#### Периодичность

6 номеров в год

#### Главный редактор

**П.Г. Цыбульский**

зам. генерального директора ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

#### Члены редакционной коллегии

**А. Беранек**

генеральный директор ООО «ВИТКОВИЦЕ Рус» (Чехия)

**Б.В. Будзуляк**

председатель Комиссии по использованию  
природного и сжиженного нефтяного газа  
в качестве моторного топлива, д.т.н.

**С.П. Горбачев**

профессор, главный научный сотрудник  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.

**В.И. Ерохов**

профессор «МАМИ», д.т.н.

**Р.З. Кавтарадзе**

профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**Т.В. Климова**

заместитель главного редактора

**С.И. Козлов**

д.т.н.

**С.В. Люгай**

директор Центра использования газа  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н., исполнительный директор НГА

**В.А. Марков**

профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**А.В. Николаенко**

ректор «МАМИ», профессор, д.э.н.

**Ю.В. Панов**

профессор МАДИ, к.т.н.

**Н.Н. Патрахальцев**

профессор Российского университета дружбы народов, д.т.н.

**Е.Н. Пронин**

член совета НГА

**В.Л. Стативко**

ветеран газовой отрасли, к.т.н.

**В.Н. Фатеев**

зам. директора НИЦ «Курчатовский институт», д.х.н.

#### Редактор

**О.А. Ершова**

E-mail: transport.1@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 76

#### Отдел подписки и рекламы

E-mail: transport.2@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 77

#### Перевод

**А.И. Хлыстова**

#### Компьютерная верстка

**И.В. Шерстюк**

#### Адрес редакции:

142717, Московская обл., Ленинский р-н, п. Развилка, а/я 253

www.ngvrus.ru

Отпечатано с представленного электронного оригинал-макета

в ООО «Типография «ПАРТНЕР-ПРИНТ»

109202, Москва, Басовская ул., 16, стр. 1

Номер заказа

Сдано на верстку 15.08.2016 г.

Подписано в печать 15.09.2016 г.

Формат 60x90 1/8. Тираж 3000 экз. Бумага мелованная.

Печать офсетная, печ. л. 10,5

При перепечатке материалов ссылка на журнал

«Транспорт на альтернативном топливе» обязательна.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации,

опубликованной в рекламных материалах

## В НОМЕРЕ

В текущем году «Газпром»  
построит 35 новых АГНКС ..... 3

**Семенищев С.П., Килин П.Г.**

Достижения и перспективы развития в создании  
мобильных заправщиков природным газом ..... 6

Новая компания Группы Газпром ..... 9

Западные санкции не оказали существенного  
влияния на деятельность «Газпрома» ..... 10

**Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А.**

Оптимизация состава биотоплива  
с добавками метиловых эфиров  
рапсового и подсолнечного масел ..... 12

**Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О.,**

**Голосов А.С., Шибанов А.В.**  
Влияние формы полуразделенной  
камеры сгорания на образование  
оксидов азота в газовом двигателе ..... 31

**Ковальчук Л.И., Мишачков И.В.**

Сравнительная оценка выбросов оксида углерода  
с ОГ двигателем с принудительным зажиганием  
при работе на бензине и топливном газе ..... 40

«Газпром» и Mitsui подписали меморандум  
по сотрудничеству в области СПГ-бункеровки ..... 45

**Козлов С.И., Фатеев В.Н.**

Энергоустановки на основе топливных элементов  
с твердым полимерным электролитом ..... 46

**Патрахальцев Н.Н.,**

**Бехджуйан Хоссейн, Савастенко А.А.**  
Возможности повышения эксплуатационной  
топливной экономичности многотопливного  
дизеля изменением его активного рабочего объема... 55

Новый формат выставки GasSuf ..... 64

**Пронин Е.Н.**

Как человек приручал природный газ ..... 66

Балтийские СПГ-коридоры ..... 68

Новая техника на СПГ ..... 69

Американцы берут пример с России ..... 71

Новый газовый паром ..... 73

Тягач Nikola One на водороде ..... 74

Прогнозы по СПГ для бункеровки ..... 76

Abstracts of articles ..... 77

Авторы статей в журнале № 5 (53) 2016 г. .... 79

На снимке: АГНКС «Газпрома» в Уфе

Registered with the Federal Service for Supervision in Mass  
Communications and Cultural Heritage Protection  
Printed Matter Registration Certificate No. FS77-30114

#### Founder and Publisher

Non-Commercial Partnership National Gas-Vehicle  
Association (NGVRUS), is affiliated with IGU

#### Published

6 issues a year

#### Editor-in-Chief

**Tsybulsky, P.G.**

*Deputy General Director of Gazprom VNIIGAZ, PhD*

#### Editorial board members

##### **Beranek Antonin**

*Director General  
of VÍTKOVICE Rus (Czech Republic)*

##### **Budzulyak, B.V.**

*Chairman of the Commission for Use of Natural  
and Liquefied Petroleum Gas as Gas-Motor Fuel,  
Doctor of Engineering*

##### **Erokhov, V.I.**

*MAMI Professor, Doctor of Engineering*

##### **Gorbachev, S.P.**

*Professor, Gazprom VNIIGAZ, Doctor of Engineering*

##### **Kavtaradze, R.Z.**

*Professor of N.E. Bauman's MGTU, Doctor of Engineering*

##### **Klimova, T.V.**

*acting Head of Public and Mass Media Relations Service  
of Gazprom VNIIGAZ, deputy chief editor*

##### **Kozlov, S.I.**

*Doctor of Engineering*

##### **Lyugai, S.V.**

*PhD, Director of the Centre «Gas Use»,  
JSC «Gazprom VNIIGAZ»,  
executive director, NGVRUS*

##### **Markov, V.A.**

*Professor of N.E. Bauman's MGTU,  
Doctor of Engineering*

##### **Nikolaenko, A.V.**

*Rector of the Moscow State Technical University (MAMI), Professor,  
Doctor of Science*

##### **Panov, Yu.V.**

*Professor of MADI (GTU), PhD*

##### **Patrakhaltsev, N.N.**

*Professor of People's Friendship University of Russia,  
Doctor of Engineering*

##### **Pronin, E.N.**

*member of the Council, NGVRUS*

##### **Stativko, V.L.**

*The vet of gas industry, Candidate of Science*

##### **Fateev, V.N.**

*Deputy Director of RNC Kurchatovsky Institute,  
Doctor of Chemistry*

#### Editor

##### **Ershova, O.A.**

E-mail: transport.1@ngvrus.ru  
Phone.: +7 (498) 657 29 76

#### Subscription and Distribution Department

E-mail: transport.2@ngvrus.ru  
Phone.: +7 (498) 657 29 77

#### Translation by

##### **Khlystova A.I.**

#### Computer imposition

##### **Sherstyuk, I.V.**

#### Editorial office address:

PO Box 253, p. Razvilka, Leninsky r-n,  
Moskovskaya obl, 142717  
www.ngvrus.ru

Order number

Passed for press on 15.08.2016

Endorsed to be printed on 15.09.2016

Format 60x90 1/8 Circulation 3,000 copies Enamel paper

Offset printing, 10,5 conditional printed sheets

When copying materials, a reference «Alternative Fuel Transport» International  
Scientific and Technical Magazine is obligatory.

The editors are not responsible for accuracy of the information contained  
in advertising matter.

## CONTENTS

35 new CNG filling stations of Gazprom are to come this year .....	3
<b>Sergey Semenischev, Petr Kilin</b> Achievements and perspectives on mobile natural gas filling stations development .....	6
New member of Gazprom Group .....	9
EU and US sanctions did not affect Gazprom performance .....	10
<b>Vladimir Markov, Sergey Devyanin, Sergey Zykov</b> Optimization of Biofuel Mixtures with Rapeseed Oil Methyl Ester and Sunflower Oil Methyl Ester Additives .....	12
<b>Revaz Kavtaradze, Dmitry Onishchenko, Andrey Golosov, Anton Shibanov</b> Influence of the semidetached combustion chamber structure on formation of nitrogen oxides in the gas engine .....	31
<b>Leonid Kovalchuk, Ilya Mishachkov</b> Comparative evaluation of carbon oxide emissions with exhaust gas on forced ignition engine while operation on petrol and fuel gas .....	40
Cooperation memorandum on LNG bunkering signed by Gazprom and Mitsui .....	45
<b>Sergei Kozlov, Vladimir Fateev</b> Power plants based on fuel cells with solid polymer electrolyte .....	46
<b>Nikolay Patrakhaltsev, Behdjouyan Hosseyn (Iran), Andrey Savastenko</b> Opportunities on gaining an exploitation fuel performance of multifuel diesel engine by variation of its active displaceme .....	55
New format of the GasSuf exhibition .....	64
<b>Eugene Pronin</b> As man has mastered the gas .....	66
Baltic LNG corridors .....	68
New machines on LNG .....	69
Americans take Russia for a model .....	71
New gas-operated ferry .....	73
Nikola One tow truck on hydrogen .....	74
Abstracts of articles .....	77
Contributors to journal issue № 5 (53) 2016 .....	79

## В текущем году «Газпром» построит 35 новых АГНКС

В начале августа в центральном офисе ПАО «Газпром» председатель совета директоров Виктор Зубков провел расширенное совещание, посвященное вопросам развития рынка газомоторного топлива в России. В совещании приняли участие представители профильных подразделений «Газпрома» и руководители его дочерних обществ, работники Министерства энергетики РФ, администраций российских регионов.



Во время совещания в ПАО «Газпром»

Было отмечено, что объем продаж газомоторного топлива в России имеет ежегодный устойчивый рост. Так, в 2015 г. Группой «Газпром» продано 436 млн м<sup>3</sup> газомоторного топлива, что на 7,3 % больше, чем в 2014 г. В текущем году «Газпром» реализует инвестиционную программу по строительству 35 автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС), семь из которых уже введено в эксплуатацию. Также будет проведена реконструкция четырех действующих АГНКС.

По расчетам «Газпрома», для устойчивого развития рынка газомоторного топлива в России необходим ежегодный прирост парка газомоторного транспорта на уровне 15-20 тыс. единиц.

В ходе обсуждения участники совещания отметили, что для развития рынка газомоторного топлива на первоначальном этапе (3-5 лет) необходима реализация мер государственной поддержки, направленных на стимулирование потребителей к приобретению газомоторной техники, в том числе посредством уравнивания ее стоимости с аналогами, работающими на традиционных видах топлива.

Одной из принципиально важных мер господдержки, по мнению «Газпрома», будет продление программы субсидирования закупки газомоторной техники на период 2017-2020 гг. в объеме не менее 3 млрд руб. ежегодно.

По результатам совещания решено



АГНКС «Газпрома»

рекомендовать руководителям субъектов Российской Федерации разработать региональные и муниципальные программы, направленные на развитие региональных рынков газомоторного топлива. Администрациями регионов совместно с федеральными органами исполнительной власти будут проработаны предложения по формированию программы поддержки малого и среднего предпринимательства, направленной на субсидирование затрат на приобретение оборудования и сервисное обслуживание техники, работающей на природном газе.

«Газпром» планирует до конца 2018 г. довести число объектов федеральной сети газозаправочных станций до 488 единиц. «Реализация такой масштабной программы по строительству газомоторной инфраструктуры требует активной поддержки со стороны не только профильных федеральных министерств, но и региональных органов власти. Для комплексного развития рынка газомоторного топлива необходима синхронизация деятельности всех участников, направленная

на создание условий для перехода потребителей на природный газ», – сказал Виктор Зубков.

Дальнейшее развитие эта тема получила 24 августа на совещании в Твери, которое также провел председатель совета директоров ПАО «Газпром» Виктор Зубков. В мероприятии приняли участие временно исполняющий обязанности губернатора Тверской области Игорь Руденя и генеральный директор ООО «Газпром газомоторное топливо» Михаил Лихачев. После совещания Игорь Руденя и Михаил Лихачев подписали Соглашение о расширении использования природного газа в качестве моторного топлива.

В соответствии с документом правительство Тверской области, в частности, будет отвечать за создание парка техники, работающей на природном газе (пассажирский и специальный транспорт, сельскохозяйственная и коммунальная техника), и разработку программ по стимулированию использования газа в качестве моторного топлива, а также оказывать содействие в выделении земельных участков под строительство АГНКС.

В свою очередь «Газпром газомоторное топливо» обеспечит строительство объектов газомоторной инфраструктуры и заправку техники в местах ее компактного размещения. Кроме того, компания окажет консультационную и методическую помощь предприятиям, эксплуатирующим газомоторную технику.

Для реализации Соглашения стороны в ближайшее время сформируют рабочую группу.

В настоящее время на территории Тверской области действует всего одна АГНКС (в Твери), она принадлежит Группе «Газпром».

26 августа в г. Черняховске состоялась рабочая встреча председателя правления ПАО «Газпром» Алексея Миллера и временно исполняющего обязанности губернатора Калининградской области Евгения Зиничева, в ходе которой были обсуждены вопросы развития сотрудничества.

Было отмечено, что в настоящее время продолжается расширение Калининградского ПХГ. В следующем году здесь планируется ввести в эксплуатацию два новых подземных резервуара, за счет чего увеличится объем оперативного резерва газа и максимальная потенциальная суточная производительность хранилища. В 2017 г. в Калининградской области также планируется завершить создание морского терминала для регазификации сжиженного природного газа, который будет доставляться морским транспортом. Строительство терминала и расширение ПХГ обеспечат 100%-е резервирование существующей системы обеспечения газом региона и значительно повысят энергетическую безопасность Калининградской области.

Развитие мощностей по газоснабжению даст возможность через газификацию региона последовательно расширять рынок газомоторного

топлива в Калининградской области. Алексей Миллер и Евгений Зиничев обсудили ход сотрудничества и в этой области. В настоящее время в регионе действует малотоннажный комплекс по сжижению природного газа и одна АГНКС «Газпрома». До конца 2018 г. в области планируется ввести в эксплуатацию семь АГНКС, а в перспективе построить еще семь станций. В свою очередь правительством региона принята программа, предусматривающая перевод на газомоторное топливо части муниципального парка автобусов и жилищно-коммунальной техники, а также обеспечение льготного налогообложения для юридических лиц, использующих газ на собственном транспорте.

#### *Справка*

Производство и реализация природного газа в качестве моторного топлива – одно из приоритетных направлений деятельности ПАО «Газпром». Для системной работы по развитию рынка газомоторного топлива создана специализированная компания «Газпром газомоторное топливо». Компания консолидирует профильные активы Группы «Газпром» и обеспечивает строительство новой производственно-сбытовой инфраструктуры для реализации природного газа в качестве моторного топлива.

Сегодня природный газ является наиболее экономичным, экологичным и безопасным топливом. Стоимость одного кубометра газомоторного топлива в среднем по России составляет 13 руб. При этом двигатель такого транспортного средства соответствует стандартам Евро-5 и Евро-6. Согласно классификации МЧС, природный газ относится к самому безопасному классу горючих веществ.

По материалам

Управления информации ПАО «Газпром»

# Достижения и перспективы развития в создании мобильных заправщиков природным газом

**С.П. Семенищев**, генеральный директор ООО «НПП ГазСервисКомпозит», к.т.н.,  
**П.Г. Килин**, ведущий конструктор ПАГЗ ООО «НПП ГазСервисКомпозит»

Проведен технико-экономический анализ применения баллонов различных типов для создания передвижных газовых заправщиков транспортных средств компримированным природным газом. Приведены примеры создания ПАГЗ на базе металлокомпозитных баллонов.

Материал статьи представляет интерес как для создателей ПАГЗ, так и для организаций и специалистов, их эксплуатирующих.

### Ключевые слова:

передвижной автомобильный газовый заправщик, баллоны типов 1-4 для КПП.

**З**а последние два года правительство РФ и ПАО «Газпром» проводят довольно решительную политику в области перевода автотранспорта, в частности, муниципального, на компримированный природный газ (КПГ).

Коллектив нашего предприятия обладает почти двадцатилетним опытом в области проектирования и производства мобильных передвижных автомобильных газовых заправщиков (ПАГЗ) собственной разработки, а также опытом сертификационных испытаний импортных ПАГЗ таких фирм, как, например, Линкольн (США), с использованием композитных баллонов 4-го типа [1-6].

Рассмотрим достоинства и недостатки вариантов создания ПАГЗ с использованием баллонов разного типа.

Баллоны 4-го типа на первый взгляд

обладают преимуществом по сравнению с баллонами других типов по массе. Однако при детальном рассмотрении характеристик чисто пластиковых баллонов видны их серьезные недостатки и ограничения при их использовании для ПАГЗ.

Так, чисто композитный баллон с полиэтиленовым лейнером не выдерживает рабочих температур ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ , что резко ограничивает климатическую зону их применения в России, поскольку в нашей стране температуры ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  могут быть даже в Москве, не говоря о зонах холодного климата, занимающих свыше 2/3 территории России. Причем полиэтиленовый лейнер подвергается деструкции при сочетании низких температур и рабочего давления внутри баллона. Кроме того, баллон весьма чувствителен к величине остаточного давления, которое должно быть не менее  $7...20 \text{ кгс/см}^2$ .

В условиях резких перепадов температур окружающего воздуха необходимо следить за минимальным давлением внутри баллона.

Баллоны 1-го и 2-го типов отличаются большой массой, что делает их использование в мобильных средствах

возникают трудности в обеспечении герметичности лейнера в месте соединения металлической горловины и его газонепроницаемости в процессе эксплуатации. Так, на одном из предприятий, выпускающем транспортные средства на КПП, при первой же заправке метаном

### Сравнение массы и стоимости баллонов разного типа при переводе ТС на метан

Вид ТС	Число баллонов	Суммарная вместимость, л	Масса баллонов, кг			Цена, руб.		
			КПП-3	КПП-4	Разница	КПП-3 260 руб./л	КПП-4 560 руб./л	Разница
Легковой	1	64	45	25	20	16 600	35 840	19 240
Грузовой	13	1040	741	333	408	270 400	582 400	312 000
Автобус	8	984	668	314	354	255 840	551 040	295 200
ПАГЗ	100	18 500	12 600	8 000	4 600	5 365 000	9 102 000	3 737 000

#### Примечание:

1. Цены приведены при курсе рубля к доллару 2013 г.
2. Справочно: цена баллона КПП-3 – 260 руб./л, цена баллона КПП-4 – 560 руб./л.

газоснабжения ненадежным из-за высокой нагрузки на оси полуприцепа. Габариты ПАГЗ в связи с этим неоправданно велики, так же как и цена контейнера с полуприцепом.

Сравним массы и цены баллонов 3-го и 4-го типов (таблица).

Стоимость композитных баллонов весьма высока из-за использования дорогостоящего углеровинга. Несмотря на то, что полиэтилен лейнера значительно дешевле алюминия баллонов 3-го типа, технология изготовления лейнера требует больших финансовых затрат на термопластавтомат и на изготовление пресс-форм для каждого типоразмера баллонов. При изготовлении композитных баллонов

потекли несколько композитных баллонов 4-го типа.

Оптимальными технико-экономическими характеристиками для ПАГЗ по параметрам «масса – вместимость – надежность – цена» обладают металлокомпозитные баллоны с бесшовным алюминиевым лейнером 3-го типа (ГОСТ) [7, 8]. Использование ровинга для намотки силового композитного слоя из базальта или стекла позволяет значительно снизить цену баллона, а лейнер из алюминиевого сплава допускает эксплуатацию баллона при низких температурах до –60 °С.

На нашем предприятии был спроектирован баллон для установки в контейнер ПАГЗа.

#### Основные технические характеристики баллона БВД 210.24.5-2

Вместимость, л.....	210
Рабочее давление, МПа.....	24,5
Диаметр, мм.....	405
Длина, мм.....	2300



## Газобаллонное оборудование

В 30-футовом контейнере Тор (с увеличенной высотой для низкопольных прицепов) размещены коммерческого учета отпуска газа 80 таких баллонов. С заднего торца (см. фото).

### Технические характеристики ПАГЗ-5000-24,5

Суммарная вместимость баллонов, л.....	16 800
Количество возимого газа, м <sup>3</sup> .....	5000
Габариты контейнера ПАГЗ, мм.....	7500×2500×2585
Общая масса ПАГЗ, заправленного газом, объемом 5000 м <sup>3</sup> , включая полуприцеп, кг.....	24 740
Время заправки ПАГЗ до давления 24,5 МПа на АГНКС, ч.....	≈3-4
Максимальное время заправки ТС объемом газа 60 м <sup>3</sup> , мин.....	Не более 10



На фото: ПАГЗ-5000-24,5 на заправке

Таким образом можно сделать следующие выводы.

- По техническим характеристикам, условиям эксплуатации, надежности, массогабаритным характеристикам и цене преимуществами перед другими конструкциями обладает конструкция ПАГЗ с использованием металлокомпозитных баллонов с бесшовным алюминиевым лейнером и вертикальным расположением баллонов в контейнере ПАГЗ.

- Создание и серийное производство ПАГЗ вместимостью от менее 2500 м<sup>3</sup>

и до 10 тыс. м<sup>3</sup> не представляет технических трудностей. Основные технические решения, используемые в конструкции ПАГЗ и баллона типа БВД, запатентованы.

- Альтернативные конструкции ПАГЗ характеризуются очень большими массой, габаритами и соответственно ценой. Использование ПАГЗ с чисто композитными баллонами 4-го типа по ГОСТ 51753 и ГОСТ ИСО 11439 ограничено по климатическим условиям эксплуатации и надежности, а также характеризуется высокой ценой.

## Литература

1. Семенищев С.П. Металлокомпозитные баллоны и создание изделий на их базе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3 (3) – С. 36-37.
2. Мовчан Е.П., Леонов В.Н., Семенищев С.П. Новая концепция создания многотопливных АЗС с пунктом заправки транспортных средств КПП // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 4 (4). – С. 54-56.
3. Семенищев С.П. Где нет газовой трубы, там работают мобильные заправки // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5 (11). – С. 48-49.
4. Семенищев С.П., Глухов В.П. Передвижные средства снабжения КПП // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 4 (28). – С. 66-69.
5. Семенищев С.П., Килин П.Г. Передвижной автогазозаправщик ПАГЗ 4300-24,5 // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 6 (30). – С. 30-31.
6. Семенищев С.П., Глухов В.П., Килина О.В., Попов В.К. Перспективы применения передвижных газозаправщиков для автономного газоснабжения и заправки транспортных средств // Gasworld Россия и СНГ. – 2014. – № 35 май/июнь. – С. 36-37.
7. Семенищев С.П., Глухов В.П., Мерзляков П.П., Килина О.В., Попов В.К. Изготовление металлокомпозитных баллонов (первый этап) // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 3 (33). – С. 19-21.
8. Семенищев С.П., Глухов В.П., Мерзляков П.П., Килина О.В., Попов В.К. Изготовление металлокомпозитных баллонов (второй этап) // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 4 (34). – С. 52-54.

## Новая компания Группы Газпром

Группа Газпром объявила о создании новой компании Gazprom NGV Europe с центральным офисом в Берлине. Управляющим директором назначен Уве Йоханн (Uwe Johann) из компании Gazprom Marketing and Trading. Компания Gazprom NGV Europe является 100%-й дочерней структурой газпромовской «внучки» – Gazprom Germania. Выделение газомоторного бизнеса в отдельную структуру вызвано требованиями Акта об энергетике Германии, предусматривающего разделение функций поставщика и продавца газа. В новое общество перейдут все 50 действующих, а также 10 вновь построенных АГНКС и КриоАЗС компании Gazprom Germania в ФРГ, Чехии и Польше.

Источник: <http://www.gnvmagazine.com/>

## Западные санкции не оказали существенного влияния на деятельность «Газпрома»

На состоявшемся в конце августа заседании совета директоров ПАО «Газпром» было обсуждено влияние западных санкций на Группу «Газпром» в 2015-2016 гг. и мерах реагирования. Было отмечено, что «Газпром» своевременно и оперативно оценил воздействие тех рисков, которые связаны с вводом санкционных ограничений, и принял ряд мер по минимизации возможных негативных последствий. В результате западные санкции не оказали существенного влияния на работу «Газпрома», в том числе в части исполнения, пролонгации действующих и заключения новых контрактов с иностранными контрагентами на поставку газа, и не имеют критического значения для текущей деятельности компании.

Одной из наиболее эффективных мер является продолжение комплексной работы «Газпрома» по обеспечению технологической независимости и импортозамещению. Она направлена на увеличение доли используемой российской продукции в производственной деятельности организаций Группы и разработку отечественных аналогов импортного оборудования.

В настоящее время в общем объеме закупок Группы «Газпром» доля оборудования иностранных производителей составляет около 5 % (по трубной продукции – менее 0,1 %). Компания строго ограничивает приобретение оборудования, работ и услуг за рубежом, ведет работу по диверсификации закупок импортной продукции за счет привлечения поставщиков из стран-участников Таможенного союза, СНГ, стран Азиатско-Тихоокеанского региона, БРИКС и других.

Активно развивается сотрудничество с российскими поставщиками. Так, в прошлом году «Газпром» начал использовать новую схему взаимодействия с производителями – долгосрочные договоры на серийное производство, поставку, техническое, сервисное и ремонтное обслуживание импортозамещающей продукции под гарантированные объемы поставок будущих лет. Такие договоры заключены с ПАО «Трубная металлургическая компания» (ТМК)

и АО «Объединенная металлургическая компания» (ОМК). ТМК будет поставлять «Газпрому» бесшовные обсадные и насосно-компрессорные трубы из коррозионностойких сплавов, ОМК – шаровые краны специального назначения для высокотемпературных процессов и агрессивных сред. Кроме того, создано совместное предприятие с Томским электромеханическим заводом им. В.В. Вахрушева для реализации проекта по выпуску высоконадежных антипомпажных и регулирующих клапанов.

Продолжается работа по стимулированию отечественного промышленного и научного потенциала. С 20 субъектами Российской Федерации реализуются Дорожные карты проектов по расширению использования высокотехнологичной продукции, в том числе импортозамещающей, в интересах компании. Благодаря этому сотрудничеству разработано и освоено несколько видов современной продукции, в частности устьевое оборудование, фонтанная и запорно-регулирующая арматура, насосно-компрессорное и энергетическое оборудование, системы телемеханики, адсорбирующие материалы.

«Газпром» создает условия для локализации на территории России производства наукоемкого оборудования. В частности, между «Газпромом» и компаниями Linde, «Силовые машины» и «Салаватнефтемаш» заключено Соглашение о намерениях, в соответствии с которым стороны рассмотрят возможность взаимодействия в организации производства оборудования для сжижения и переработки газа.

Кроме того, «Газпром» проводит эффективную финансовую политику, благодаря которой сохраняет финансовую устойчивость. Компания имеет свободный доступ к международным рынкам капитала и способна привлекать средства на приемлемых условиях, расширяет перечень используемых финансовых инструментов, диверсифицирует источники заимствований, в том числе за счет расширения сотрудничества с азиатскими кредитными организациями.

Управление информации ПАО «Газпром»

**Преимущества:**

- Расширенный температурный диапазон
- Минимальные потери газа
- Безопасность

Характеристика	Значение
Количество постов заправки, шт.	1 или 2
Количество линий давления, шт.	1, 2 или 3
Производительность заправки, кг/мин	1...50 (для автотранспорта) 1...70 (для ПАГЗ)
Рабочее давление, МПа	25
Давление заправки, МПа	19,6 (для автотранспорта) 24.5 (для ПАГЗ)
Рабочая температура воздуха, °С	от - 40 до + 40
Межповерочный интервал, лет	2
Погрешность измерения заправленного количества газа, не более, %	1
Габаритные размеры, мм	1065 x 595 x 2190
Интерфейс связи с системой учета	RS-485



**КОМПРЕССОРНЫЕ МОДУЛИ СЕРИИ CLEVER – БЛОКИ АГНКС В ЗАВОДСКОЙ ГОТОВНОСТИ НА БАЗЕ ПОРШНЕВЫХ W-ОБРАЗНЫХ КОМПРЕССОРОВ**



**Преимущества:**

- Сокращение протяженности энергетических коммуникаций
- Уменьшение затрат на строительство и эксплуатацию
- Удобство технического обслуживания и ремонта

Модель	Краткое описание	Входное давление / Производительность	Применение
Clever-M	Компрессор и блок осушки в одном контейнере	1-6 бар: до 2000 Н.м <sup>3</sup> 6-12 бар: до 2500 Н.м <sup>3</sup>	Ключевой блок АГНКС любой производительности
Clever-L	АГНКС в одном блоке	1-6 бар: до 1000 Н.м <sup>3</sup> 6-12 бар: до 1300 Н.м <sup>3</sup>	АТП и МАЗС средней загрузки, коммерческие АГНКС
Clever-S	Мини-АГНКС в одном блоке	1-5 бар: до 150 Н.м <sup>3</sup>	Малые АТП, МАЗС низкой загрузки
Clever-D	Дочерняя АГНКС	5-220 бар: до 3500 Н.м <sup>3</sup>	Разгрузка пассивных ПАГЗ

## Оптимизация состава биотоплив с добавками метиловых эфиров рапсового и подсолнечного масел

**В.А. Марков**, профессор, заведующий кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**С.Н. Девянин**, профессор, заведующий кафедрой Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, д.т.н.,  
**С.А. Зыков**, доцент Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, к.т.н.

Рассмотрена возможность использования смесей нефтяного дизельного топлива с метиловыми эфирами рапсового и подсолнечного масел в качестве топлива для дизелей. Проведен анализ физико-химических свойств исследуемых смесевых биотоплив. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С, работающего на дизельном топливе и смесевых биотопливах. Предложена методика оптимизации состава смесевых биотоплив. Проведены оптимизационные расчеты.

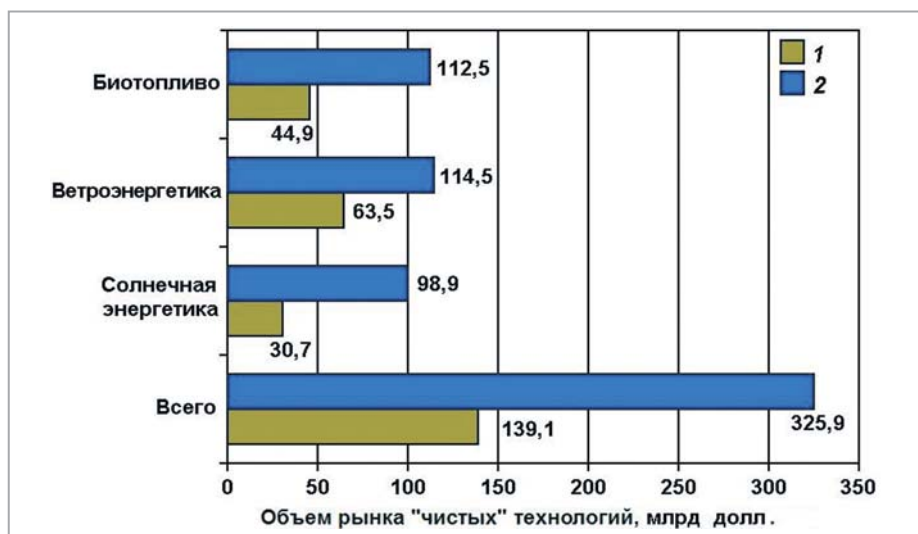
**Ключевые слова:**

дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, альтернативное топливо, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир подсолнечного масла, смесевое биотопливо, оптимизация.

**С**овременный этап развития энергетики характеризуется неизбежным истощением мировых запасов полезных ископаемых при одновременном увеличении энергопотребления. По прогнозам к 2020 г. потребление энергоресурсов составит 18...20 млрд т в год в нефтяном эквиваленте [1, 2]. Ожидается, что к середине нынешнего столетия рост потребления первичных ресурсов по сравнению с 2010 г. удвоится и составит около 28 млрд т в нефтяном эквиваленте. При этом возрастет роль возобновляемых энергетических ресурсов. Планируется, что через ближайшие 10 лет доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе ведущих промышленных стран составит от 10 до 30 % [1, 2]. Так, в соответствии с данными работы [3] к 2019 г. объем рынка «чистых» технологий составит 325,9 млрд долл. США (рис. 1). При этом рынок биотоплив оценивается в 112,5 млрд долл. (около 30 % всех возобновляемых источников энергии).

В связи с указанной тенденцией в сравнительно недалекой перспективе сырьевая база для производства энергоносителей для мобильных и стационарных энергетических установок существенно расширится. Их будут производить не только из полезных ископаемых, но и из возобновляемых источников энергии (биомасса, растительные масла, спирты и др.).

Еще одним фактором, способствующим более широкому внедрению возобновляемых энергоносителей, является необходимость удовлетворения все более жестких требований к показателям токсичности отработавших газов (ОГ) энергетических

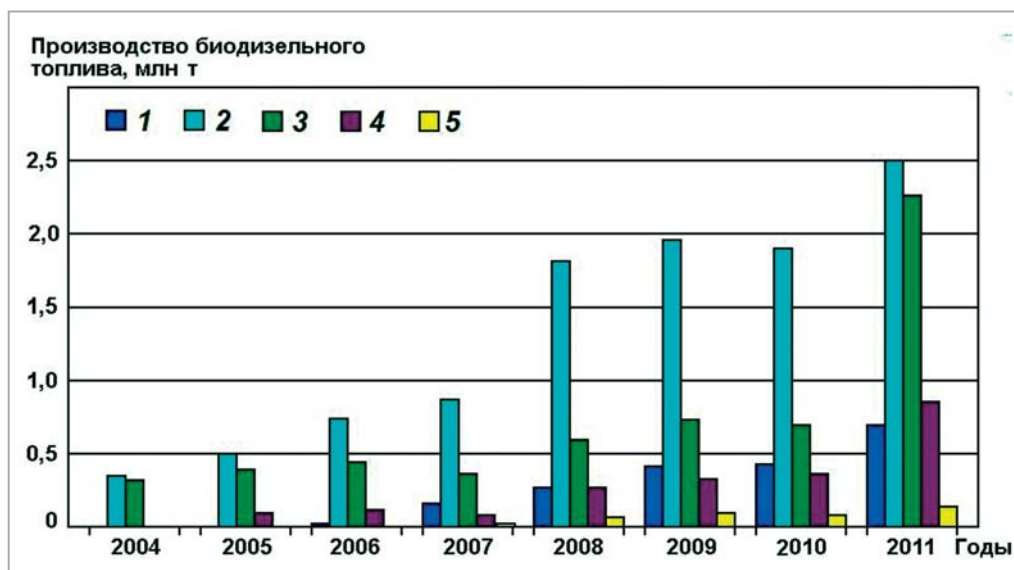


**Рис. 1.** Прогноз развития мирового рынка «чистых» технологий до 2019 г.:  
1 – 2009 г.; 2 – 2019 г.

установок. В связи с непрерывным ужесточением норм на выбросы токсичных компонентов ОГ транспортных двигателей проводятся интенсивные поиски альтернативных энергоносителей для транспорта. В ряде стран для автомобильной техники уже достаточно широко применяются биотоплива – растительные масла, их производные (биодизельное топливо или «биодизель» – сложные эфиры растительных масел), биогаз, биоэтанол, животные жиры [4-6]. Привлекательность этих биотоплив заключается в практически неисчерпаемой возобновляемой сырьевой базе для производства этих энергоресурсов и возможности сокращения выбросов в атмосферу основного парникового газа – диоксида углерода (углекислый газ). В связи с этим такие моторные биотоплива находят все более широкое применение на транспорте, а также в сельском хозяйстве и стационарных энергетических установках. При этом для легковых автомобилей, оснащенных двигателями с искровым зажиганием, наибольшее использование в качестве топлива получил биоэтанол, а для транспортных средств с дизелями – топлива, получаемые из растительных масел и животных жиров.

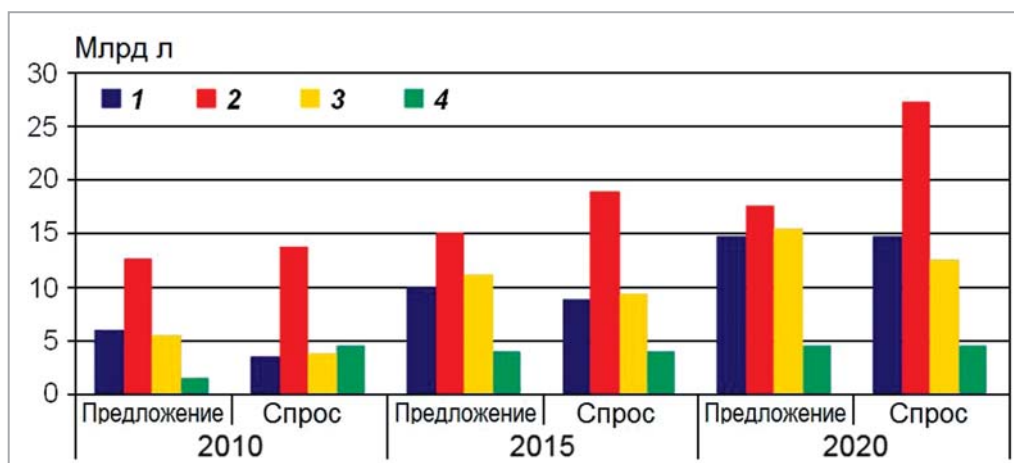
Среди топлив растительного происхождения наибольшее практическое применение для автомобильных дизелей нашло биодизельное топливо – эфиры растительных масел [1, 7-9]. С химической точки зрения биодизельное топливо представляет собой смесь метиловых (также этиловых, бутиловых) эфиров насыщенных и ненасыщенных жирных кислот растительных и животных жиров. При этом основой сырьевой базы для его производства остаются следующие виды масел – рапсовое, подсолнечное, соевое и пальмовое. Динамика роста мирового производства и потребления биодизельного топлива представлена на рис. 2 и 3 [7].

Основой производства сложных эфиров растительных масел являются реакции переэтерификации (алкоголиз), представляющие собой реакции взаимодействия жирных кислот растительных масел со спиртами. Выход биодизельного топлива (сложные эфиры растительных масел) из исходного сырья, продолжительность технологического процесса его производства, состав и физико-химические свойства, а также цена в значительной степени определяются выбранной технологией его получения. Разработаны различные технологии производства биодизельного топлива из растительных масел [7].



**Рис. 2.** Динамика роста производства биодизельного топлива (эфирь растительных масел и животных жиров) в европейских странах:

1 – Бельгия; 2 – Франция; 3 – Италия; 4 – Польша; 5 – Литва



**Рис. 3.** Рост производства и потребления биодизельного топлива в 2010-2020 гг. по регионам:

1 – Азиатско-Тихоокеанский регион; 2 – Европейский союз; 3 – Латинская Америка; 4 – Северная Америка

Одной из наиболее перспективных технологий производства биодизельного топлива является переработка рапсового масла. Получение сложного метилового эфира из рапсового масла осуществляется путем его переэтерификации с добавкой метанола при температуре 80...90 °С в присутствии катализатора – едкого калия КОН (аналогично получают и метиловый эфир подсолнечного масла). Из семян рапса с 1 га посевов (в среднем 3 т) извлекают около 1 т масла. Затем масло подвергается переэтерификации, в результате чего получается около 1000 кг метилового эфира рапсового масла (МЭРМ).

Необходимо отметить, что эфиры растительных масел отличаются от самих масел меньшими плотностью и вязкостью, более высоким цетановым числом (ЦЧ), меньшей температурой воспламенения. В связи с этим при использовании чистых

эфиров растительных масел возможно заметное изменение характера рабочих процессов дизелей, что требует дополнительной регулировки двигателя. Поэтому более целесообразным представляется использование смесей нефтяного дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел.

Для оценки показателей отечественного дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) при его работе на смесях нефтяного дизельного топлива с метиловым эфиром рапсового масла проведен цикл экспериментальных исследований специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана и МГАУ им. В.П. Горячкина [10, 11]. Этот дизель, производства Минского моторного завода (ММЗ), установлен на малотоннажных грузовых автомобилях ЗиЛ-5301 «Бычок», а его модификации – на автобусах Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторах «Беларусь» Минского тракторного завода (МТЗ). Некоторые параметры этого дизеля приведены в табл. 1.

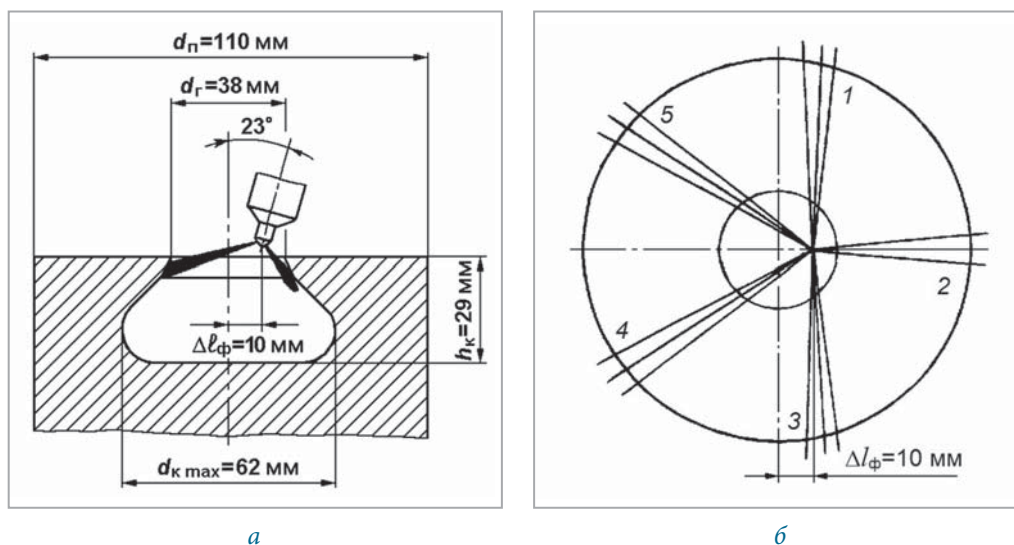
Таблица 1

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

Параметры	Значение
Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Общий рабочий объем, л	4,32
Степень сжатия	16,0
Система турбонадува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	2400
Номинальная мощность, кВт	80
Механизм газораспределения	Клапанного типа с верхним расположением клапанов
Система питания	Разделенного типа
Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Рядный типа РР4М10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД, мм	10
Ход плунжеров ТНВД, мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов, мм	540
Форсунки	Типа ФДМ-22 производства ОАО «Куроаппаратура» (г. Вильнюс)
Распылители форсунок	Фирмы Motorpal типа DOP 119S534 с пятью сопловыми отверстиями диаметром $d_p=0,34$ мм и проходным сечением $\mu_p f_p=0,250$ мм <sup>2</sup>
Давление начала впрыскивания форсунок, МПа	21,5

В дизеле Д-245.12С использована камера сгорания (КС) типа ЦНИДИ (Центральный научно-исследовательский дизельный институт) и организовано объемно-плёночное (пристеночное) смесеобразование с частичным попаданием топливных струй на горячие боковые стенки КС, прилегающие к горловине (рис. 4). Это позволяет обеспечить стабильное воспламенение биотоплив (био-дизельное топливо и его смеси с нефтяным дизельным топливом), отличающихся от нефтяного дизельного топлива несколько худшей воспламеняемостью (пониженное цетановое число).





**Рис. 4.** Камера сгорания дизеля типа Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентация струй распыливаемого топлива в КС (б):  
1-5 – номера струй распыливаемого топлива  $\Delta l_{\phi}=10$  мм

На указанном дизеле исследовались смесевые биотоплива с содержанием МЭРМ в дизельном топливе (ДТ) марки «Л» по ГОСТ 305–82 от 0 до 60 % (объемное содержание компонентов). Свойства исследуемых топлив приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ и МЭРМ**

Свойства	Топлива						
	ДТ	МЭРМ	95% ДТ + 5% МЭРМ	90% ДТ + 10% МЭРМ	80% ДТ + 20% МЭРМ	60% ДТ + 40% МЭРМ	40% ДТ + 60% МЭРМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	877	832	835	839	848	858
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	8,0	3,94	4,09	4,41	5,2	6,0
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	30,7	–	–	–	–	–
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,8	42,2	41,9	41,5	40,5	39,6
Цетановое число	45	48	–	–	–	–	–
Температура самовоспламенения, °С	250	230	–	–	–	–	–
Температура помутнения, °С	–25	–13	–	–	–	–	–
Температура застывания, °С	–35	–21	–	–	–	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,3	12,6	14,2	14,1	14,0	13,6	13,3
Содержание, % по массе							
С	87,0	77,6	86,5	86,1	85,1	83,2	81,4
Н	12,6	12,2	12,6	12,5	12,5	12,4	12,3
О	0,4	10,2	0,9	1,4	2,4	4,4	6,3

**Примечание:** для смесевых топлив указано объемное процентное содержание в них ДТ и МЭРМ.

На первом этапе дизель Д-245.12С испытывался на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) при его работе на ДТ и смеси 80 % ДТ и 20 % МЭРМ. Результаты этих исследований приведены на рис. 5 и в табл. 3, а также в работах [10, 11].

Таблица 3

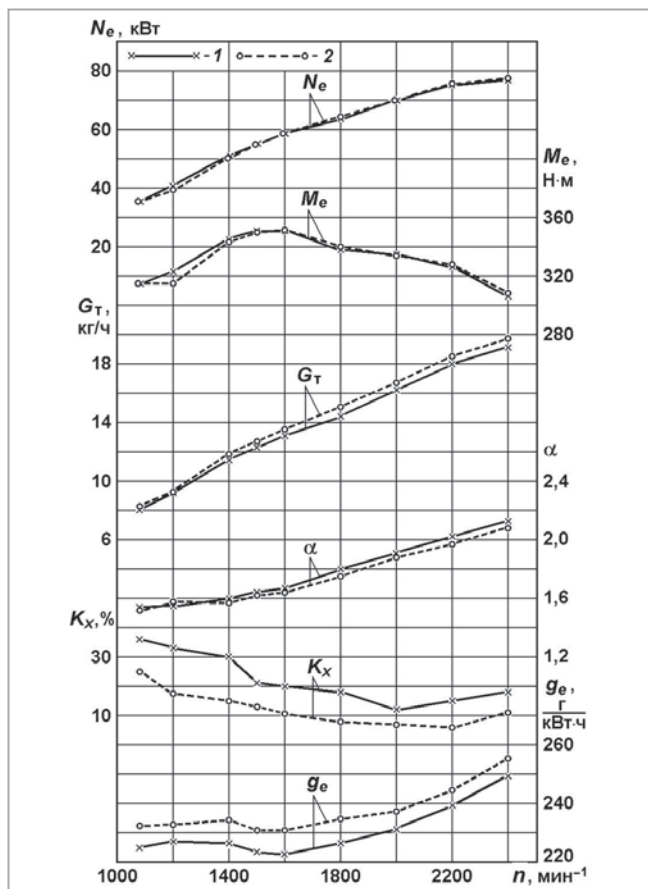
**Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смесях нефтяного ДТ и МЭРМ**

Показатели дизеля	Объемная концентрация МЭРМ в смесевом биотопливе, %					
	0	5	10	20	40	60
Часовой расход топлива $G_p$ , кг/ч						
на режиме максимальной мощности	19,13	19,45	19,76	19,76	20,02	20,43
на режиме максимального крутящего момента	12,30	12,50	12,54	12,68	12,98	13,16
Крутящий момент $M_p$ , Н·м						
на режиме максимальной мощности	306	306	310	308	308	309
на режиме максимального крутящего момента	351	356	350	349	351	355
Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа						
на режиме максимальной мощности	18,0	18,0	13,5	11,0	10,0	7,0
на режиме максимального крутящего момента	21,0	17,0	16,0	13,0	7,5	8,5
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)						
на режиме максимальной мощности	249,2	252,9	253,8	255,3	258,5	262,2
на режиме максимального крутящего момента	223,2	223,7	228,0	230,6	234,7	236,0
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$						
на режиме максимальной мощности	0,340	0,337	0,337	0,339	0,343	0,346
на режиме максимального крутящего момента	0,379	0,381	0,376	0,376	0,378	0,384
Условные (средние) показатели топливной экономичности дизеля на режимах 13-режимного цикла						
эффективный расход топлива $g_{e_{усл}}$ , г/(кВт·ч)	245,76	249,20	253,62	256,54	261,28	265,00
эффективный КПД $\eta_{e_{усл}}$	0,345	0,342	0,338	0,338	0,339	0,342
Интегральные удельные выбросы токсичных компонентов на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч)						
оксиды азота $e_{NO_x}$	7,286	6,894	6,718	6,542	7,441	7,759
монооксид углерода $e_{CO}$	2,834	2,234	2,199	2,096	2,021	1,932
несгоревшие углеводороды $e_{CH}$	0,713	0,626	0,658	0,727	0,692	0,681

На втором этапе испытаний дизель Д-245.12С исследован на режимах 13-режимного испытательного цикла ECE R49. Режимы этого цикла показаны на рис. 6, а результаты исследований дизеля на этих режимах представлены на рис. 7 и в табл. 3.

По приведенным на рис. 7б,в,г характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксиды азота  $NO_x$ , монооксид углерода  $CO$ , несгоревшие углеводороды  $CH$ ) с использованием общепринятых методик рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-режимного цикла (соответственно  $e_{NO_x}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH}$ ). При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на каждом режиме такого цикла определялись концентрации в ОГ токсичных компонентов ( $C_{NO_x}$ ,  $C_{CO}$ ,  $C_{CH}$ ,  $C_{Tч}$ ) и рассчитывались их часовые массовые выбросы ( $E_{NO_x}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CH}$ ,  $E_{Tч}$ ). Полученные значения вредных выбросов суммировались за весь цикл по каждому компоненту (с учетом весовых коэффициентов  $K_p$ , отражающих долю времени каждого режима) и затем делением на условную среднюю мощность дизеля за испытательный цикл  $\sum(N_{ei} \cdot K_i)$  определялись удельные массовые выбросы вредных веществ по формулам [7, 12]:

$$e_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{NO_{xi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{COi} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad e_{CH} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{CHi} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad e_{Tч} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{Tчи} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}. \quad (1)$$



**Рис. 5.** Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ:

1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

С использованием представленных на рис. 7а характеристик часового расхода топлива  $G_T$  определены значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  и эффективного КПД  $\eta_e$  по зависимостям [7, 12]:

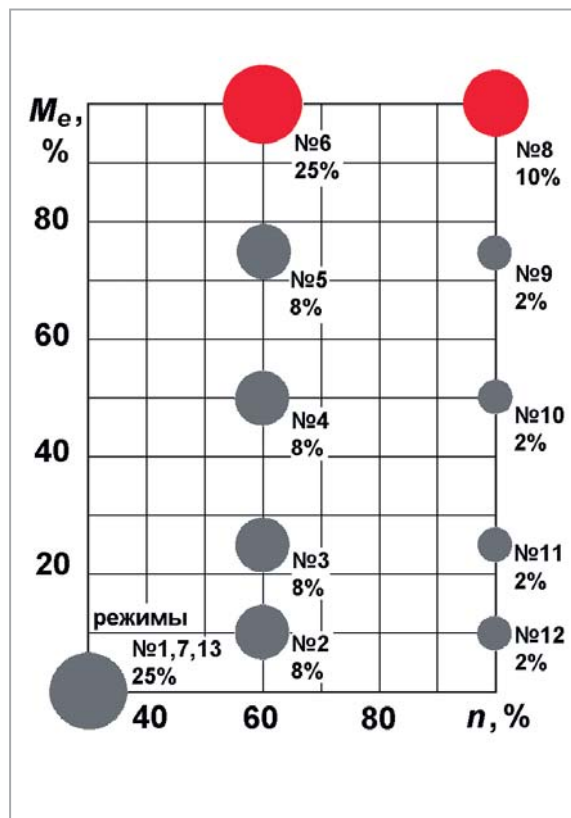
$$g_e = \frac{1000 G_T}{N_e}; \quad \eta_e = \frac{3600}{H_U g_e}, \quad (2)$$

где  $H_U$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

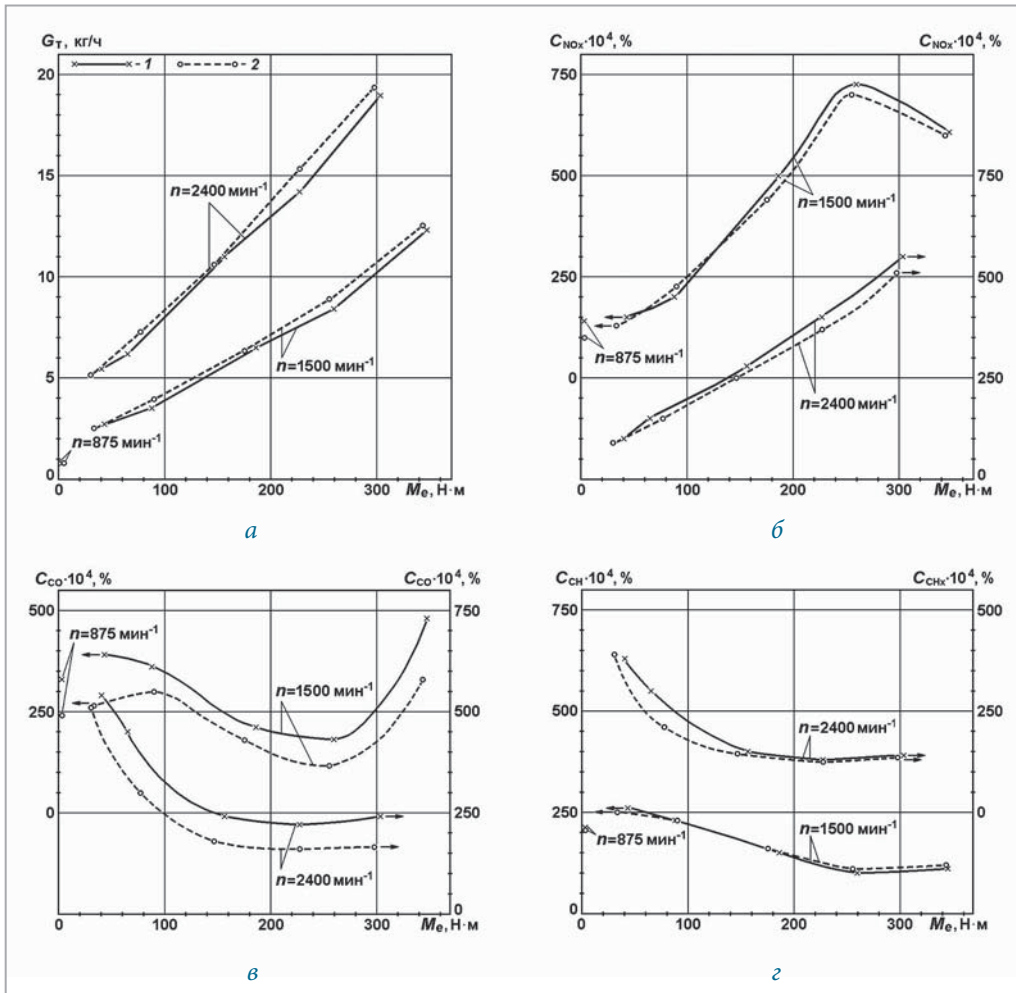
Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-режимного цикла проведена по среднему (условный) удельному эффективному расходу топлива, который определялся с использованием зависимости [7, 12]:

$$g_{e\text{ усн}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}, \quad (3)$$

где  $G_{Ti}$  – часовой расход топлива на  $i$ -м режиме.



**Рис. 6.** Испытательный 13-режимный цикл ECE R49 для оценки токсичности ОГ дизелей в стендовых условиях. Около точки каждого режима указаны номер режима и доля этого режима в общем объеме времени работы; красным цветом выделены режимы максимальной мощности (№ 8) и максимального крутящего момента (№ 6)



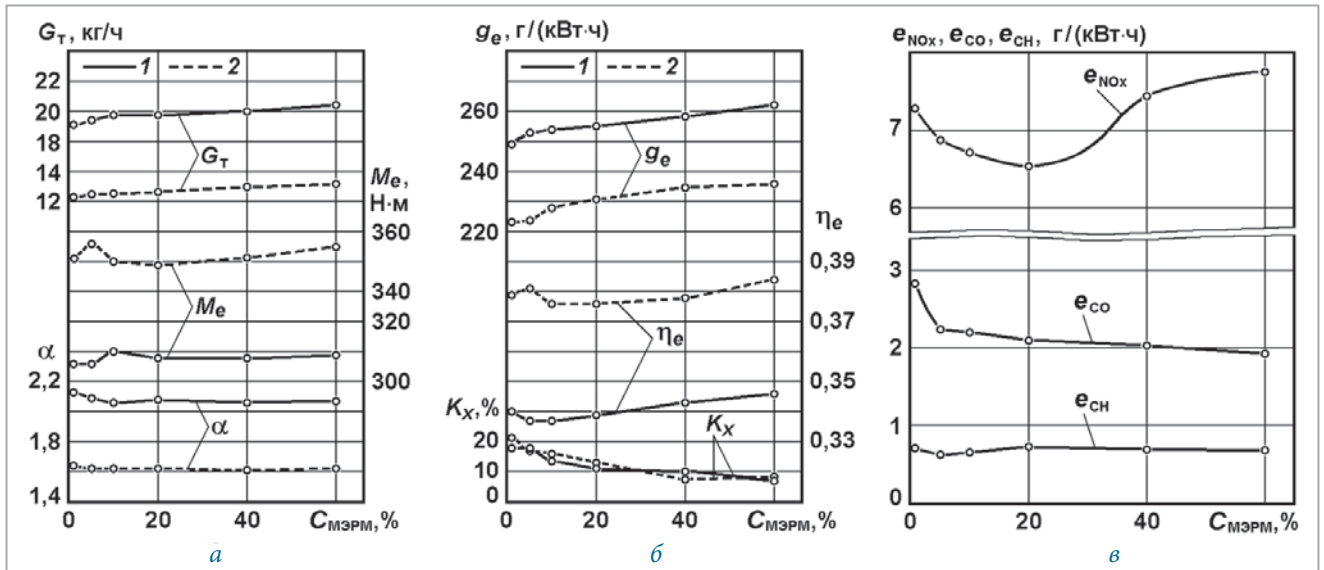
**Рис. 7.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в) и несгоревших углеводородов  $C_{CH}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С:

1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ

Для оценки топливной экономичности дизеля, работающего на смесевых биотопливах, желательно использовать эффективный КПД дизеля  $\eta_e$ . Причем для интегральной оценки работы дизеля на 13-режимном цикле использован условный эффективный КПД, определяемый из соотношения [7, 12]:

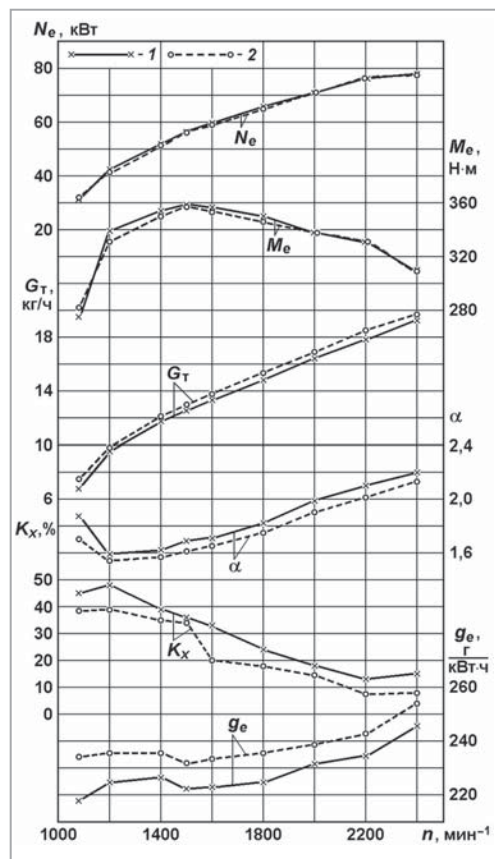
$$\eta_{e\text{ усл}} = \frac{3600}{H_U g_{e\text{ усл}}}. \quad (4)$$

Результаты расчетов, проведенных по изложенной методике, представлены в табл. 3. Приведенные в ней данные подтверждают возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля типа Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 80 % ДТ и 20 % МЭРМ. Вместе с тем определенный интерес представляет вопрос о влиянии состава смесевых биотоплив на характеристики дизеля. С этой целью проведены исследования дизеля на чистом ДТ и смесевом биотопливе, содержащем от 0 до 60 % МЭРМ. Физико-химические свойства указанных смесей даны в табл. 2. Результаты этих исследований приведены на рис. 8 и в табл. 3.



**Рис. 8.** Зависимость часового расхода топлива  $G_t$ , крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  на режимах ВСХ (б), удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{NOx}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  с ОГ на режимах 13-режимного цикла (в) дизеля Д-245.12С от содержания МЭРМ в смешанном биотопливе  $C_{MЭРМ}$ :

1 – на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$



**Рис. 9.** Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , часового расхода топлива  $G_t$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭПМ

Проведенные испытания дизеля Д-245.12С продемонстрировали возможность значительного улучшения его показателей при работе на смесях ДТ и МЭРМ. Даже незначительная добавка МЭРМ в ДТ (5 или 10 %) позволяет заметно улучшить показатели токсичности ОГ дизелей практически без внесения в их конструкцию каких-либо изменений.

Как отмечено выше, в качестве топлива для дизелей используются сложные эфиры различных растительных масел. При этом в условиях европейской части России

привлекательным представляется производство и использование в качестве моторного топлива метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ). Для подтверждения возможности использования этих смесей в качестве моторного топлива проведены экспериментальные исследования упомянутого выше дизеля Д-245.12С [13, 14]. При испытаниях использовано дизельное топливо марки «Л» по ГОСТ 305–82 и его смеси с МЭПМ, содержание которого изменялось в диапазоне от 0 до 40 %. Свойства исследуемых топлив приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ и МЭПМ

Свойства	Топлива						
	ДТ	МЭПМ	95% ДТ + 5% МЭПМ	90% ДТ + 10% МЭПМ	85% ДТ + 15% МЭПМ	80% ДТ + 20% МЭПМ	60% ДТ + 40% МЭПМ
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	886	832,8	835,6	838,4	841,2	852,4
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	7,0	4,0	4,2	4,3	4,4	5,0
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	42 500	37 200	42 200	41 900	41 700	41 400	40 400
Цетановое число	45	47	–	–	–	–	–
Температура помутнения, °С	–25	–13	–	–	–	–	–
Температура застывания, °С	–35	–17	–	–	–	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,30	12,53	14,23	14,11	14,03	13,96	13,59
Содержание, % по массе							
С	87,0	76,7	86,5	86,0	85,5	85,0	82,9
Н	12,6	12,2	12,6	12,5	12,5	12,5	12,4
О	0,4	11,1	0,9	1,5	2,0	2,5	4,7

**Примечание:** «–» – свойства не определялись; для смесей указано объемное процентное содержание компонентов.

На первом этапе исследований проведены испытания дизеля Д-245.12С на чистом ДТ и на смеси 80 % ДТ и 20 % МЭПМ на режимах ВСХ. Результаты этих исследований представлены на рис. 9 и в табл. 5. На втором этапе дизель испытывался на этих топливах на 13-режимном испытательном цикле ECE R49. Результаты исследований дизеля на этих режимах представлены на рис. 10 и в табл. 5.

Представленные выше результаты испытаний дизеля Д-245.12С получены при его работе на смесевом биотопливе, содержащем 80 % ДТ и 20 % МЭПМ. Для оценки влияния состава смесевых биотоплив на характеристики дизеля проведены его аналогичные испытания и на смесях ДТ и МЭПМ другого состава (с объемным содержанием МЭПМ в смеси от 0 до 40 %). Результаты этих исследований приведены на рис. 11 и в табл. 5.

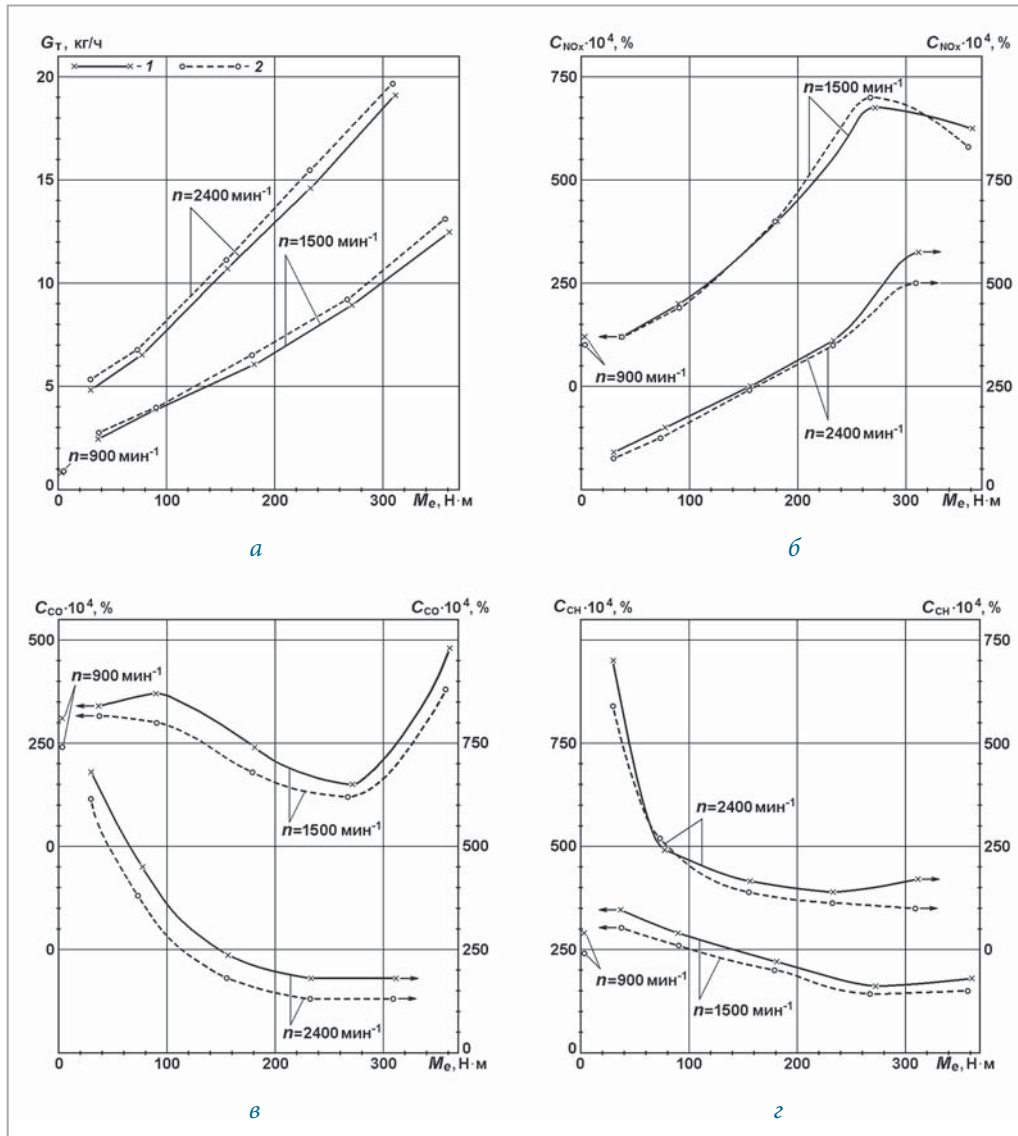
Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на смесях нефтяного ДТ с метиловыми эфирами рапсового и подсолнечного масел подтвердили возможность значительного улучшения экологических показателей дизеля, а также целесообразность оптимизации состава указанных смесевых биотоплив. Проведенный анализ показал, что задача выбора оптимального состава смесевых биотоплив достаточно сложна и не имеет однозначного решения.

**Показатели дизеля Д-245.12С,  
работающего на смесях нефтяного ДТ и МЭПМ**

Показатели дизеля	Вид топлива					
	ДТ	95% ДТ + 5% МЭПМ	90% ДТ + 10% МЭПМ	85% ДТ + 15% МЭПМ	80% ДТ + 20% МЭПМ	60% ДТ + 40% МЭПМ
Часовой расход топлива $G_r$ , кг/ч на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	19,23 12,51	19,20 12,54	19,49 12,81	19,47 12,85	19,71 12,98	20,07 13,14
Крутящий момент дизеля $M_e$ , Н·м на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	310 359	306 356	313 355	307 353	309 357	311 357
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч) на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	246,6 222,1	249,8 224,4	247,8 229,7	252,6 231,8	254,0 231,8	257,0 234,5
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$ на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	0,343 0,381	0,342 0,380	0,347 0,374	0,342 0,372	0,342 0,375	0,347 0,380
Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	15,0 36,0	13,0 37,0	10,0 36,0	10,0 35,0	8,0 34,0	6,0 25,0
Интегральные на режимах 13-режимного цикла эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч) эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	241,32 0,351	250,40 0,341	251,31 0,342	252,75 0,342	255,07 0,341	258,49 0,345
Интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы, г/(кВт·ч) оксиды азота $e_{\text{NO}_x}$ монооксид углерода $e_{\text{CO}}$ несгоревшие углеводороды $e_{\text{CH}}$	5,948 2,782 1,006	5,905 2,767 0,924	5,894 2,428 0,829	5,724 2,288 0,821	5,718 2,171 0,813	5,742 1,949 0,784

Это обусловлено тем, что работа дизеля характеризуется целым комплексом показателей (критерии) топливной экономичности и токсичности ОГ. Требования к выбору оптимального по данным критериям состава топлива часто противоречат друг другу. В результате задача выбора оптимального состава смесового биотоплива становится многокритериальной оптимизационной задачей [7, 12, 15].

Известны различные методики решения многокритериальных задач оптимизации, которые классифицируются в зависимости от числа оптимизируемых параметров и критериев оптимальности, особенностей их задания и определения степени их значимости. Наиболее известными методиками являются оптимизация иерархической последовательности частных критериев, определение решения, основанное на том или ином виде компромисса, определение множества неуплучшаемых точек [7, 15]. Разработаны и методики многокритериальной оптимизации различных параметров ДВС. Применительно к задаче оптимизации состава смесовых топлив можно использовать методики, приведенные в работах [16-18]. Они основаны на одном из наиболее эффективных методов оптимизации – методе свертки, при котором обобщенный критерий оптимальности формируется в виде суммы частных критериев.



**Рис. 10.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  (б), монооксида углерода  $C_{CO}$  (в) и несгоревших углеводородов  $C_{CH}$  (г) от частоты вращения  $n$  и крутящего момента  $M_e$  дизеля Д-245.12С:

1 – ДТ; 2 – смесь 80 % ДТ и 20 % МЭПМ

В частности, в работе [16] предложена методика оптимизации состава смешанного биотоплива (смеси нефтяного дизельного топлива с рапсовым маслом), построенная на составлении обобщенного аддитивного критерия оптимальности (целевая функция) в виде суммы

$$J_o = a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH} J_{CH}, \quad (5)$$

где  $J_{\eta_e}$ ,  $J_{NO_x}$ ,  $J_{CO}$ ,  $J_{CH}$  – частные критерии оптимальности соответственно по топливной экономичности (эффективный КПД  $\eta_e$ ), выбросам  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH$ ;  $a_{\eta_e}$ ,  $a_{NO_x}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CH}$  – весовые коэффициенты частных критериев оптимальности.

Частные критерии оптимальности, входящие в выражение (5), предлагается определять на каждом  $i$ -м режиме из следующих соотношений:

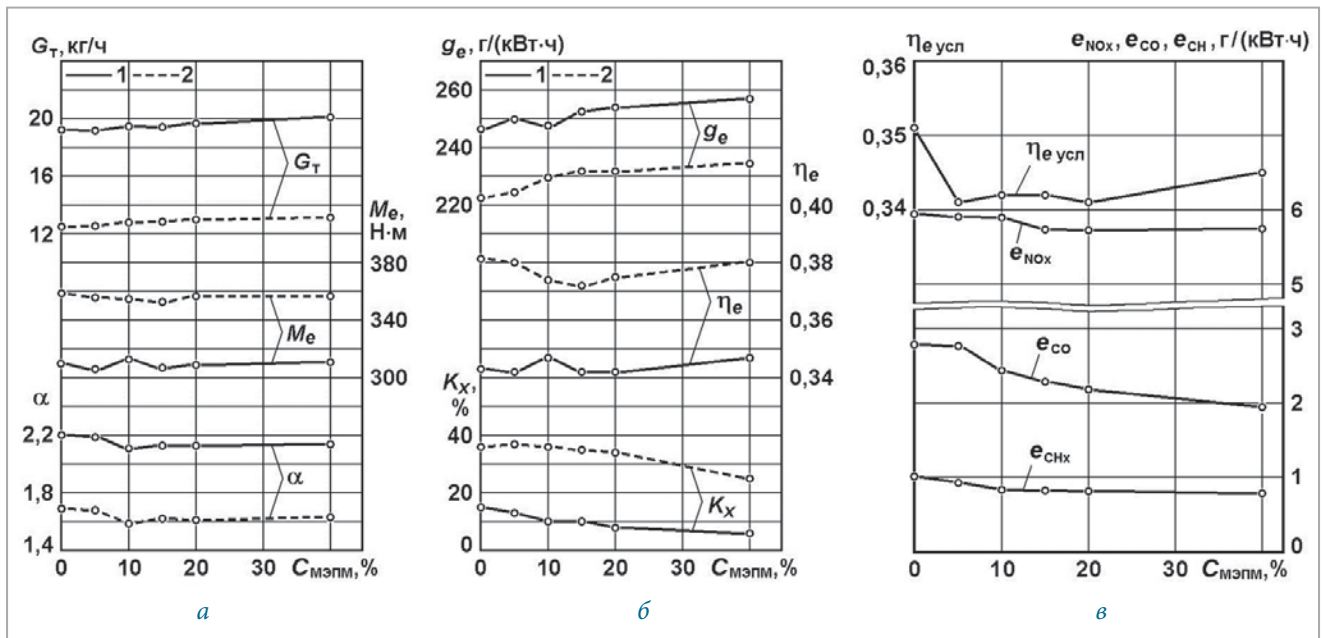


$$J_{\eta_e} = \eta_{e_{DT}} / \eta_{e_i}; J_{NO_x} = e_{NO_x i} / e_{NO_x DT}; J_{CO} = e_{CO i} / e_{CO DT}; J_{CH} = e_{CH i} / e_{CH DT}, \quad (6)$$

где  $\eta_{e_i}, e_{NO_x i}, e_{CO i}, e_{CH i}$  – параметры дизеля, работающего на  $i$ -м топливе;  $\eta_{e_{DT}}, e_{NO_x DT}, e_{CO DT}, e_{CH DT}$  – параметры дизеля, работающего на нефтяном ДТ.

При решении оптимизационной задачи с использованием формулы (5) обобщенный критерий оптимальности  $J_o$  минимизируется. При этом удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ  $e_{NO_x}, e_{CO}, e_{CH}$  (числители выражений для частных критериев  $J_{NO_x}, J_{CO}, J_{CH}$ ) минимизируются, а эффективный КПД  $\eta_{e_i}$  (знаменатель выражения для частного критерия  $J_{\eta_e}$ ) – максимизируется.

Наиболее сложной проблемой использования этой методики является выбор значений весовых коэффициентов частных критериев оптимальности, который не имеет однозначного решения. Еще один недостаток данной методики заключается в том, что не учитывается такой важный показатель работы дизеля, как дымность ОГ. Следует также отметить и трудоемкость использования этой методики, обусловленную необходимостью расчетов сразу четырех частных критериев и их суммы – обобщенного критерия. Причем, каждый из частных критериев формулы (5) вычисляется как результат суммирования данных по соответствующим показателям на тринадцати режимах (в публикации [16] рассматривается работа дизеля на режимах 13-режимного цикла норм ЕСЕ R49). При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на режимах такого цикла проводится достаточно трудоемкий расчет удельных массовых выбросов вредных веществ по формулам (1).



**Рис. 11.** Зависимость часового расхода топлива  $G_T$ , крутящего момента  $M_e$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на режимах ВСХ (а), удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_X$  на режимах ВСХ (б), условного эффективного КПД  $\eta_{e усл}$  и удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{NO_x}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  с ОГ на 13-режимном цикле (в) дизеля Д-245.12С от содержания МЭПМ в смесевом биотопливе  $C_{MЭПМ}$ :

1 – на режиме максимальной мощности при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$

С целью устранения указанных недостатков рассмотренной методики для оптимизации состава смесевых биотоплив предлагается использовать следующую методику. Во-первых, желательнее сократить число частных критериев оптимальности выражения (5). При этом выше отмечена сравнительно слабая зависимость эффективного КПД  $\eta_e$  исследуемого дизеля типа Д-245.12С от состава смесей нефтяного ДТ с МЭРМ (см. рис. 8б) и МЭПМ (см. рис. 11б). Следует также отметить, что в связи с поэтапным введением все более жестких норм на выбросы вредных веществ с ОГ дизелей транспортного и автотракторного назначения и необходимостью выполнения этих ограничений экологические показатели ДВС становятся приоритетными. Поэтому реализация мероприятий по снижению токсичных выбросов зачастую сопровождается ухудшением показателей топливной экономичности.

При оптимизации состава смесевых биотоплив указанные факторы позволяют не учитывать частный критерий, характеризующий топливную экономичность исследуемого дизеля. Во-вторых, известно, что из газообразных нормируемых токсичных компонентов ОГ дизелей наиболее значимыми являются оксиды азота  $\text{NO}_x$ . Их доля в суммарных токсичных выбросах дизелей составляет от 30 до 80 % по массе и от 60 до 95 % по эквивалентной токсичности [12]. Другим важнейшим токсичным компонентом ОГ дизелей считаются твердые частицы (выброс сажи или дымность ОГ). Высокая потенциальная опасность этих частиц обусловлена их способностью аккумулировать на своей поверхности многие известные канцерогены и мутагены, а также незначительными размерами частиц, способствующими их проникновению в органы дыхания человека и накоплению в них. Еще два нормируемых токсичных компонента – монооксид углерода  $\text{CO}$  и легкие несгоревшие углеводороды  $\text{CH}$  – имеют значительно меньшую токсикологическую значимость. Так, в соответствии с данными работ [12] токсикологическая значимость  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}$ , твердых частиц и оксидов серы  $\text{SO}_x$  оценивается как отношение 1 : 41,1 : 3,16 : 200 : 22. Кроме того, выброс  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  значительно снижается при использовании средств очистки ОГ (установка нейтрализаторов).

При формировании обобщенного критерия оптимальности указанные факторы позволяют использовать всего два основных частных критерия – эмиссию оксидов азота и твердых частиц (дымность ОГ).

Необходимо отметить, что определение концентрации в ОГ дизелей твердых частиц  $C_{\text{ТЧ}}$  является достаточно сложной и трудоемкой технической задачей. При этом используется дорогостоящее оборудование (тоннель), которое имеется лишь в нескольких исследовательских центрах России. Значительно проще и доступнее определение дымности ОГ с использованием недорогих и распространенных дымомеров. При этом известно, что на режимах работы дизеля с низкими коэффициентами избытка воздуха ( $\alpha < 1,2 \dots 1,3$ ) сажа составляет большую часть массы твердых частиц (до 95...98 %).

В целом фракционный состав твердых частиц выглядит следующим образом: углеродная фракция (среднее содержание – 75 %, диапазон значений – 33...90 %), органическая фракция (19 %, 7...49 %), сульфаты, нитраты (1 %, 1...4 %), металлы и другие элементы (2 %, 1...5 %), прочее (3 %, 1...10 %) [19]. Это позволяет использовать зависимости, практически однозначно (с высоким коэффициентом корреляции) связывающие эмиссию твердых частиц и дымность ОГ. В связи с этим в предлагаемой методике оптимизации состава смесевых биотоплив в качестве двух основных частных критериев оптимизации приняты концентрации в ОГ оксидов азота и сажи (дымность ОГ).

При оценке токсичности ОГ дизелей используются испытательные циклы, в той или иной мере отражающие реальные распределения режимов работы двигателей. В Европе дизели грузовых автомобилей грузоподъемностью более 3,5 т (для автобусов с числом посадочных мест свыше 9) до 2000 г. испытывались в стендовых условиях на установившихся режимах, соответствующих режимам 13-режимного цикла ECE R49 (см. рис. 6). Этот испытательный цикл включает 13 установившихся режимов: три режима холостого хода с минимальной частотой вращения  $n=0,25...0,3 n_{ном}$  (всего 25 % времени работы), пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100 % нагрузки) при номинальной частоте вращения  $n_{ном}$  и пять нагрузочных режимов (10, 25, 50, 75, 100 % нагрузки) при частоте вращения  $n_{Mmax}=0,6...0,7 n_{ном}$ , соответствующей максимальному крутящему моменту двигателя. Доля режима максимальной мощности (номинальный режим № 8 на рис. 6) составляет 10 % от общего времени работы двигателя, а доля режима максимального крутящего момента (режим № 6 на рис. 6) – 25 %.

В соответствии с ГОСТ 17.2.2.01–84 «Дымность отработавших газов дизелей» и Правилами ЕЭК R 24-02 ООН дымность ОГ определяется только на режимах внешней скоростной характеристики. При этом наиболее важными являются режимы максимальной мощности и максимального крутящего момента. В испытательном цикле (см. рис. 9) режим холостого хода при минимальной частоте вращения (режимы № 1, 7, 13) имеет существенную значимость (доля этого режима составляет 25 % от общего времени работы). Но поскольку выброс ОГ на этом режиме значительно меньше, чем на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента, то и массовый выброс токсичных компонентов ОГ сравнительно невелик. Кроме того, дымность ОГ на этом режиме незначительна и не нормируется стандартами на токсичность ОГ.

С учетом изложенных факторов для решения задачи оптимизации состава смесового биотоплива для дизеля Д-245.12С предложено использовать метод свертки, при котором частные критерии оптимальности сводятся к обобщенному критерию  $J_o$ , определяемому в виде суммы основных частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота  $J_{NO_x}$  и дымность ОГ по шкале Хартриджа  $J_{K_x}$ , в соответствии с формулой

$$J_o = J_{NO_x} + J_{K_x} \cdot \quad (7)$$

Проведенный выше анализ показал, что при оптимизации состава смесового топлива в первую очередь целесообразно учитывать принятые основные показатели токсичности ОГ на двух основных режимах – максимальной мощности  $N_{max}$  и максимального крутящего момента  $M_{max}$ . Тогда выражение (7) принимает вид

$$J_o = J_{NO_x N_{max}} + J_{NO_x M_{max}} + J_{K_x N_{max}} + J_{K_x M_{max}}, \quad (8)$$

где  $J_{NO_x N_{max}}$ ,  $J_{NO_x M_{max}}$ ,  $J_{K_x N_{max}}$ ,  $J_{K_x M_{max}}$  – частные критерии оптимальности (концентрация в ОГ оксидов азота и дымность ОГ по шкале Хартриджа) на указанных режимах.

Поскольку в предлагаемой методике в качестве частных критериев оптимальности выражения (8) использованы концентрация в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$  и дымность ОГ по шкале Хартриджа  $K_x$ , имеющие различную размерность, целесообразно их использование в относительных величинах в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 J_{NO_x N_{max}} &= C_{NO_x N_{max} i} / C_{NO_x N_{max} ДТ}; \\
 J_{NO_x M_{max}} &= C_{NO_x M_{max} i} / C_{NO_x M_{max} ДТ}; \\
 J_{K_x N_{max}} &= K_{x N_{max} i} / K_{x N_{max} ДТ}; \\
 J_{K_x M_{max}} &= K_{x M_{max} i} / K_{x M_{max} ДТ},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где параметры с индексом «ДТ» соответствуют работе на нефтяном дизельном топливе, а параметры с индексом « $i$ » – работе на смесевом биотопливе  $i$ -го состава.

Обобщенный критерий оптимальности (8) также удобно использовать в относительном виде:

$$\bar{J}_o = J_{oi} / J_{oДТ} . \tag{10}$$

Предложенная методика оптимизации смесевое биотоплива предполагает формирование обобщенного аддитивного критерия оптимальности в виде (8) или (10). Минимум этого обобщенного критерия соответствует оптимальному составу смесевое биотоплива. При этом частные критерии оптимизации, характеризующие концентрацию в ОГ оксидов азота  $J_{NO_x}$  и дымность ОГ по шкале Хартриджа  $J_{K_x}$  на двух основных режимах – максимальной мощности  $N_{max}$  и максимального крутящего момента  $M_{max}$ , определяются по выражениям (9). Эта методика не предполагает ранжирования (определение значимости) этих частных критериев оптимальности путем задания соответствующих весовых коэффициентов, как это принято в выражении (5). Кроме того, эта методика отличается от методики (5) существенно меньшим объемом вычислений.

Таким образом, для решения задачи оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с МЭРМ и МЭПМ использованы разработанная методика оптимизации, предполагающая определение обобщенного критерия оптимальности по формулам (8), (9) и (10), и представленные выше экспериментальные данные по дизелю Д-245.12С, работающему на смесях ДТ с МЭРМ и МЭПМ. Результаты проведенных расчетных исследований сведены в табл. 6.

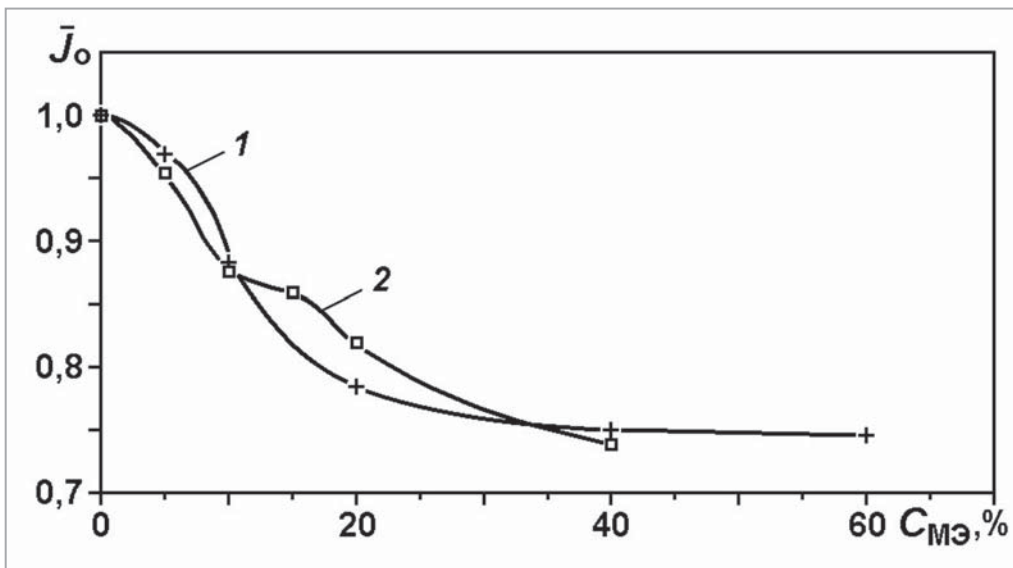


Рис. 12. Зависимость обобщенного критерия оптимальности  $\bar{J}_o$  от содержания метилового эфира растительного масла в смеси с нефтяным дизельным топливом  $C_{MЭ}$ : 1 – смесь нефтяного ДТ с МЭРМ; 2 – смесь нефтяного ДТ с МЭПМ

**Результаты оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с метиловыми эфирами растительных масел для дизеля Д-245.12С**

Вид топлива	Показатели дизеля									
	$C_{NO_x, Nmax}^*$ ppm	$J_{NO_x, Nmax}$	$C_{NO_x, Mmax}^*$ ppm	$J_{NO_x, Mmax}$	$K_{x, Nmax}^*$ %	$J_{Kx, Nmax}$	$K_{x, Mmax}^*$ %	$J_{Kx, Mmax}$	$J_o$	$\bar{J}_o$
<i>Смеси нефтяного дизельного топлива с метиловым эфиром рапсового масла</i>										
ДТ	550	1,000	610	1,000	18,0	1,000	21,0	1,000	4,000	1,000
95% ДТ+5% МЭРМ	550	1,000	650	1,066	18,0	1,000	17,0	0,810	3,876	0,969
90% ДТ+10% МЭРМ	500	0,909	675	1,107	13,5	0,750	16,0	0,762	3,528	0,882
80% ДТ+20% МЭРМ	510	0,927	600	0,984	11,0	0,611	13,0	0,619	3,141	0,785
60% ДТ+40% МЭРМ	575	1,045	635	1,041	10,0	0,556	7,5	0,357	2,999	0,750
40% ДТ+60% МЭРМ	575	1,045	700	1,148	7,0	0,389	8,5	0,405	2,987	0,747
<i>Смеси нефтяного дизельного топлива с метиловым эфиром подсолнечного масла</i>										
ДТ	575	1,000	625	1,000	15,0	1,000	36,0	1,000	4,000	1,000
95% ДТ+5% МЭПМ	550	0,957	600	0,960	13,0	0,867	37,0	1,028	3,812	0,953
90% ДТ+10% МЭПМ	515	0,896	590	0,944	10,0	0,667	36,0	1,000	3,507	0,877
85% ДТ+15% МЭПМ	500	0,870	580	0,928	10,0	0,667	35,0	0,972	3,437	0,859
80% ДТ+20% МЭПМ	500	0,870	580	0,928	8,0	0,533	34,0	0,944	3,275	0,819
60% ДТ+40% МЭПМ	515	0,896	600	0,960	6,0	0,400	25,0	0,694	2,950	0,738

В соответствии с данными табл. 6 все рассматриваемые смесевые биотоплива заметно улучшают показатели токсичности ОГ дизеля Д-245.12С. Причем с увеличением содержания МЭРМ ( $C_{MЭРМ}$ ) и МЭПМ ( $C_{MЭПМ}$ ) в смесях с нефтяным ДТ обобщенный критерий оптимальности  $\bar{J}_o$  монотонно уменьшается (при работе на нефтяном ДТ он равен единице, рис. 12). С точки зрения обобщенного критерия  $\bar{J}_o$  предложенной методики наилучшие результаты достигнуты при использовании смесей 40%ДТ+60%МЭРМ ( $\bar{J}_o = 0,747$ ) и 60%ДТ+40%МЭПМ ( $\bar{J}_o = 0,738$ ).

Перевод дизеля Д-245.12С с нефтяного ДТ на первую из упомянутых смесей – смесь 40 % ДТ и 60 % МЭРМ на режиме максимальной мощности сопровождался снижением дымности ОГ  $K_x$  от 18,0 до 7,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – от 21,0 до 8,5 % по той же шкале. При этом интегральный на режимах 13-режимного цикла удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NO_x}$  возрос с 7,286 до 7,759 г/(кВт·ч), удельный выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  снизился с 2,834 до 1,932 г/(кВт·ч), а удельный выброс несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  уменьшился с 0,713 до 0,681 г/(кВт·ч).

Перевод исследуемого дизеля с нефтяного ДТ на вторую из упомянутых смесей – смесь 60 % ДТ и 40 % МЭПМ на режиме максимальной мощности привел к снижению дымности ОГ  $K_x$  от 15,0 до 6,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – от 36,0 до 25,0 % по той же шкале. При этом интегральный на режимах 13-режимного цикла удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NO_x}$  снизился с 5,949 до 5,742 г/(кВт·ч), удельный выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  – с 2,782 до 1,949 г/(кВт·ч), а удельный выброс несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  – с 1,006 до 0,784 г/(кВт·ч).

Согласно рис. 12, близкий характер протекания двух полученных характеристик  $\bar{J}_o = f(C_{\text{МЭРМ}})$  и  $\bar{J}_o = f(C_{\text{МЭПМ}})$  подтверждает близкие экологические качества этих двух видов биотоплив. Также следует отметить, что уменьшение значений обобщенного критерия оптимальности  $\bar{J}_o$  наиболее заметно при небольших концентрациях  $C_{\text{МЭРМ}}$  и  $C_{\text{МЭПМ}}$ . Это свидетельствует о том, что даже небольшая добавка МЭРМ и МЭПМ в нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ исследуемого дизеля. Проведенные оптимизационные расчеты и близость характеристик  $\bar{J}_o = f(C_{\text{МЭРМ}})$  и  $\bar{J}_o = f(C_{\text{МЭПМ}})$  подтвердили эффективность использования разработанной методики оптимизации состава смесевых топлив. Она может быть использована не только для оптимизации состава смесей нефтяного ДТ с МЭРМ и МЭПМ, но и для смесей ДТ с растительными маслами, другими эфирами, прочих смесевых топлив.

В целом проведенные исследования еще раз показали возможность эффективного использования смесей нефтяного ДТ с МЭРМ и МЭПМ в качестве топлива для отечественных дизелей. Широкомасштабное применение этих топливных смесей в дизелях позволит обеспечить частичное замещение нефтяного ДТ топливами, производимыми из альтернативных сырьевых ресурсов, а также заметно улучшить показатели дымности и токсичности ОГ дизелей.

## Литература

1. Попель О.С., Фортвов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 450 с.
2. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 791 с.
3. Инновационное развитие альтернативной энергетики: Часть 1 / В.Ф. Федоренко, Н.Т. Сорокин, Д.С. Буклагин и др. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 348 с.
4. Тепловые двигатели установок электро- и теплоснабжения, использующие биотоплива: Учеб. пособие для вузов / В.Ф. Каменев, М.Г. Шатров, А.С. Теренченко и др. – М.: Изд-во МАДИ, 2014. – 92 с.
5. Басков В.Н., Панцхава Е.С. Моторные биотоплива: состояние и перспективы развития технологии в мире и в России // Теплоэнергетика. – 2013. – № 4. – С. 43-47.
6. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. – 240 с.
7. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов и др. – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2011. – 536 с.
8. Myo T. The Effect of Fatty Acid Composition on the Combustion Characteristics of Biodiesel (A Dissertation Submitted to the Graduate School of Science and Engineering In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering). – Japan: Kagoshima University, 2008. – 171 p.
9. Knothe G., Van Gerpen J., Krahl J. et al. The Biodiesel Handbook. – Shampaign, Illinois: AOCS Press, 2005. – 286 p.
10. Марков В.А., Шустер А.Ю., Девянин С.Н. Работа дизелей на смесях дизельного

топлива и метилового эфира рапсового масла // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 4. – С. 33-37.

11. Марков В.А., Шустер А.Ю., Девянин С.Н. Особенности применения метилового эфира рапсового масла в качестве топлива для дизелей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2010. – № 3. – С. 56-69.

12. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 376 с.

13. Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А. Работа транспортного дизеля на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 3. – С. 56-62.

14. Марков В.А., Девянин С.Н., Улюкина Е.А. и др. Метилловый эфир подсолнечного масла как экологический компонент нефтяных моторных топлив // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 4. – С. 29-41.

15. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.

16. Марков В.А., Маркова В.В., Сивачев В.М., Сивачев С.М. Определение оптимального состава смесевых биотоплив // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 2. – С. 5-9.

17. Оптимизация состава смесевых биотоплив для транспортного дизеля / Н.А. Иващенко, В.А. Марков, А.А. Зенин и др. // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 5. – С. 22-25.

18. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. – Харьков: Изд-во ХПИ, 2003. – 244 с.

19. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / В.А. Звонов, Г.С. Корнилов, А.В. Козлов и др. – М.: Изд-во «Прима-Пресс-М», 2005. – 312 с.

### Требования по подготовке статей к опубликованию в журнале

В связи с тем, что Международный научно-технический журнал Национальной газомоторной ассоциации «Транспорт на альтернативном топливе» включен в обновленный Перечень ВАКа, просьба ко всем авторам строго выполнять следующие требования при подготовке статей к публикации:

1. Все научно-технические статьи должны иметь **на русском и английском языках** следующие составляющие: **заголовок, ФИО авторов полностью, их должности, ученая степень (при наличии), контакты (e-mail, телефоны), аннотации, ключевые слова.**

2. Все английские тексты следует набирать только строчными буквами, сохраняя начальные прописные буквы в именах собственных.

3. Авторы остальных публикаций (информационных, рекламных и т.д.) представляют на русском и английском языках: **заголовок, ФИО авторов полностью, их должности, адрес и контакты (e-mail, телефоны).**

Редакция журнала также доводит до сведения авторов требования, которые необходимо соблюдать при подготовке статей для публикации.

Материалы статей должны быть представлены по электронной почте в программе WinWord. Объем статьи – не более 15 000 знаков с пробелами.

Представленный текстовый материал с иллюстрациями и таблицами должен иметь сквозную нумерацию. Графический материал должен быть выполнен в формате, обеспечивающем ясность всех деталей рисунков. Формулы и символы должны быть четкими и понятными. Все обозначения в формулах необходимо расшифровать. Нумеруются только те формулы, на которые сделаны ссылки в тексте. Обозначения физических величин и единиц измерений необходимо давать

в Международной системе единиц (СИ). Обязательно соблюдение действующих ГОСТов. Текст и таблицы должны быть выполнены в программе Word в формате doc, rtf. Фотографии и графические рисунки (не менее 300 dpi, СМУК) – в формате jpg, jpeg, tiff, pdf. Не следует форматировать текст самостоятельно.

При пересылке материалов по e-mail следует сопроводить их пояснительной запиской (от кого, перечень файлов и т.д.). Объемные файлы должны быть заархивированы. При подготовке статей к печати необходимо руководствоваться документами, определяющими правила передачи информации через СМИ. Авторский коллектив должен указать ответственное лицо, с которым редакция будет вести переговоры в процессе подготовки статьи к изданию. В список литературы включаются источники, на которые есть ссылки в статье. Ссылаться можно только на опубликованные работы. Список литературы составляется в порядке употребления. В нем приводятся следующие сведения: фамилия и инициалы авторов, название работы; для журнала – название, год издания, номер, страницы, на которых размещена статья; для книг – место и год издания, издательство, общее число страниц. Редакция оставляет за собой право редакторской правки и не несет ответственности за достоверность публикации. Все внесенные изменения и дополнения в представленную к изданию статью согласовываются с автором или представителем авторского коллектива.

Редакция оставляет за собой право размещать опубликованные статьи на сайтах журнала и Национальной газомоторной ассоциации. Редакция не передает и не продает материалы для публикации в других печатных и электронных изданиях без согласования с автором (представителем авторского коллектива).

# Влияние формы полуразделенной камеры сгорания на образование оксидов азота в газовом двигателе

**Р.З. Кавтарадзе**, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**Д.О. Онищенко**, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**А.С. Голосов**, научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.,  
**А.В. Шибанов**, научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

При конвертировании дизелей в газовый двигатель с искровым зажиганием с целью предотвращения детонации необходимо снижение степени сжатия и связанное с ним изменение конструкции камеры сгорания. Исследовано влияние формы камеры сгорания и угла опережения зажигания на экологические и эффективные характеристики газового двигателя. Установлено, что при использовании  $\omega$ -образной камеры сгорания, обеспечивающей наилучшие эффективные показатели, возможно существенное снижение эмиссии оксидов азота путем регулирования угла опережения зажигания в зависимости от режимов частичной нагрузки.

#### Ключевые слова:

газовый двигатель, форма камеры сгорания, кинетическая энергия турбулентности, локальные температуры, оксиды азота.

**Р**ешение энергетических и экологических проблем, непосредственно связанных с развитием поршневых двигателей внутреннего сгорания, предусматривает широкое применение альтернативных топлив. Практически по всем научно обоснованным прогнозам традиционные топлива нефтяного происхождения постепенно будут заменены сначала природным газом, а потом газообразным или жидким водородом [1-4].

В данной работе рассматривается рабочий процесс газового двигателя с искровым зажиганием и турбонаддувом КАМАЗ-740.13.Г-260 со следующими параметрами: ход поршня/диаметр цилиндра  $S/D=120/120$  мм/мм, номинальная эффективная мощность  $N_e=176$  кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>, степень сжатия  $\epsilon=11,25$ .

Двигатель спроектирован на базе серийного дизеля КАМАЗ-740.13-240 ( $S/D=120/120$  мм/мм,  $N_e=191$  кВт при  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>,  $\epsilon=17$ ) в соответствии с концепцией газового двигателя, работающего на обедненных смесях (коэффициент избытка воздуха  $\alpha_v \geq 1,3$ ). С целью предотвращения детонации было предусмотрено увеличение объема полуразделенной камеры сгорания (КС) путем доработки поршня, что привело к снижению степени сжатия и эффективной мощности газового двигателя по сравнению с базовым дизелем.

Изменения геометрических размеров и формы камеры сгорания существенно влияют на характер протекания процессов сгорания, тепловыделения и образования оксидов азота, обуславливающих эффективные и экологические показатели газового двигателя. Определение



оптимальных геометрических размеров КС требует детального исследования изменения локальных параметров рабочего процесса.

В связи с этим в данной работе была поставлена цель: исследовать эффективные и экологические показатели газового двигателя с КС различной геометрии и определить потенциальные возможности по снижению эмиссии оксидов азота путем регулирования угла опережения зажигания в зависимости от режима нагрузки. Задача особенно актуальна для автомобильных газовых двигателей, работающих в основном на режимах частичной нагрузки.

### Математическая модель рабочего процесса газового двигателя

Исследование целесообразно проводить на базе трехмерных математических моделей рабочего процесса. Заметим, что современные экспериментальные методы изучения локальных параметров рабочего процесса поршневого двигателя, например, метод флуоресценции [5], по сравнению с методом трехмерного математического моделирования отличаются дороговизной и меньшей информативностью. Очевидно, что для исследования и использования потенциальных возможностей усовершенствования рабочего процесса трехмерное моделирование является мощным инструментом, а в современной теории поршневых двигателей исследованию и анализу локальных параметров в цилиндре отводится все больше и больше места [5, 6].

Действительно, средние по объему цилиндра или по массе параметры, прежде всего давление и температура рабочего тела, пригодны для оценки интегральных (индикаторные) показателей рабочего цикла и двигателя в целом, таких как КПД, расход топлива, мощность, крутящий момент.

Прогнозирование этих показателей успешно осуществляется относительно простыми термодинамическими методами, неспособными учитывать такие важные факторы, как, например, турбулентность в камере сгорания и ее влияние на смесеобразование, сгорание и теплообмен. Попытка введения в термодинамические соотношения эмпирических коэффициентов с целью учета турбулентности в любом случае носит частный характер и, конечно, не решает данную проблему. В связи с этим определение таких важнейших показателей, как эмиссия вредных веществ или теплонапряженное состояние основных деталей (поршень, крышка цилиндра, гильза, клапаны), необходимо осуществлять с применением локальных параметров. В частности, для определения концентраций твердых частиц сажи и оксидов азота следует использовать локальные температуры, а для оценки тепловой напряженности деталей – локальные тепловые нагрузки на теплопринимающие поверхности деталей.

Проблемы и преимущества конвертирования серийных дизелей на альтернативные топлива подробно проанализированы в [1, 4], поэтому здесь отметим только, что перевод дизеля на газовое топливо по существу снимает проблему эмиссии твердых частиц сажи.

Заметим, что задача моделирования рабочего процесса газового двигателя в данном случае подразумевает количественную оценку эмиссии оксидов азота, возникновение которых, согласно теории Я.Б. Зельдовича, происходит на основе термического механизма [6]. Определяющая роль температуры в химической кинетике образования  $\text{NO}_x$  обуславливает необходимость расчета локальных нестационарных температур в объеме КС, что можно осуществить только с применением многозонной или трехмерной модели рабочего процесса [5-10].

Модель рабочего процесса, используемая в данной работе, основана на

трехмерных фундаментальных уравнениях количества движения (Навье–Стокса), энергии (Фурье–Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности, которые после осреднения по методу Фавра принимают форму Рейнольдса. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса используется  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Процесс турбулентного горения моделируется с помощью известной модели Магнуссена – Хартагера, а процесс образования оксидов азота, как было отмечено, – на основе расширенного механизма Зельдовича. Реализация общей математической модели рабочего процесса газового двигателя осуществляется с применением 3D CRFD-кода AVL-FIRE, ориентированного на решение задач поршневых двигателей.

Подробный анализ используемых моделей, а также описание программного комплекса AVL-FIRE, изложены в [6, 11]. Отметим только, что в случае газового двигателя в отличие от дизеля на традиционном топливе из общей модели рабочего процесса исключаются процессы образования сажи и лучистого теплообмена.

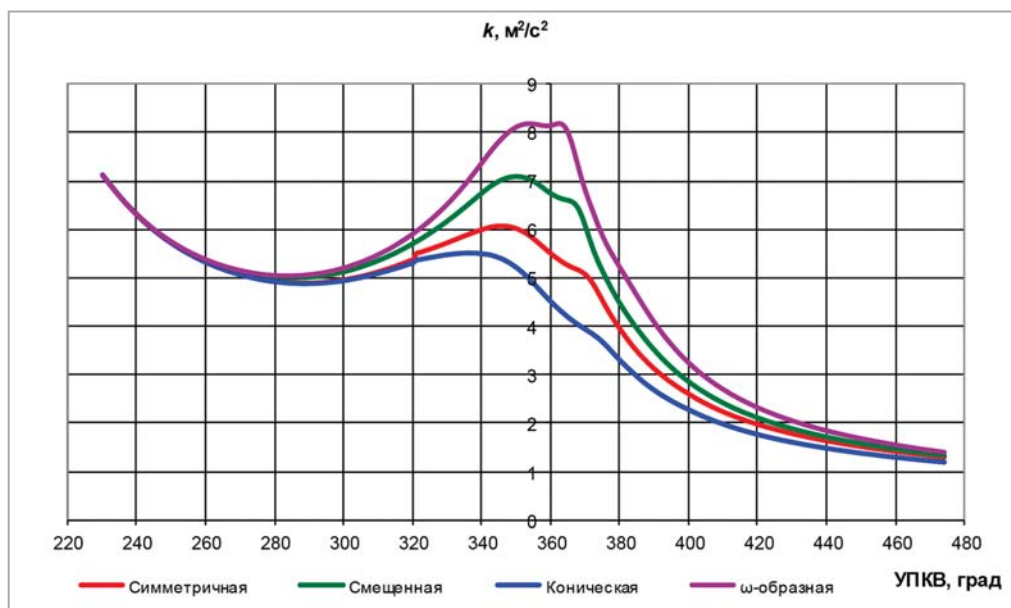
Верификация модели рабочего процесса газового двигателя была проведена путем сравнения результатов численных экспериментов с опытными данными, полученными в стендовых условиях на газовом двигателе с искровым зажиганием КАМАЗ-740.13.Г-260. Опытный двигатель с экспериментальной КС симметричной формы был оснащен датчиком давления фирмы AVL и периферийным оборудованием для индицирования двигателя [7]. По экспериментальным индикаторным диаграммам были уточнены значения эмпирических коэффициентов в модели сгорания Магнуссена – Хартагера, обеспечивающие хорошее согласование эмпирических и расчетных данных. Верифицированная модель рабочего процесса газового двигателя далее была использована для исследования эффективных и экологических показателей

двигателя с различными конструкциями КС. Результаты экспериментальных исследований показали также, что в газовом двигателе при работе на обедненных метановоздушных смесях можно получить мощность и крутящий момент, приблизительно на 8...10 % уступающие аналогичным параметрам базового дизеля.

Моделирование рабочего процесса газового двигателя проводилось для сжатия, сгорания и расширения, при этом значение интенсивности вихревого движения заряда задавалось  $D_n = 1$ . Моделирование процессов впуска и выпуска в системах газообмена можно осуществить в зависимости от постановки задачи – либо на основе трехмерных моделей нестационарного турбулентного движения газа [12], либо с применением более простых квазистационарных моделей [13].

### **Влияние формы КС на кинетическую энергию турбулентности в цилиндре газового двигателя**

Исследования рабочего процесса газового двигателя были проведены для четырех различных вариантов экспериментальных полуразделенных КС – симметричной, смещенной, конической,  $\omega$ -образной. В исследованиях [1, 6, 7], посвященных анализу внутрицилиндровых процессов газового двигателя, приведены подробные характеристики исследуемых камер и показано, что форма КС, расположенной в поршне, оказывает существенное влияние на уровень турбулентности, а в результате и на протекание процесса сгорания. На рис. 1 показано изменение средней по цилиндру кинетической энергии турбулентности в зависимости от угла поворота коленчатого вала (УПКВ) для исследуемых конструкций КС, играющих определяющую роль при формировании эффективных и экологических параметров двигателя.



**Рис. 1.** Изменение средней кинетической энергии турбулентности в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания на режиме частичной нагрузки:  $n=1550 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_a=1,453 \text{ бар}$ ,  $\alpha_p=1,5$ ;  $\theta = -21^\circ \text{ УПКВ}$

Заметно, что высокий уровень турбулентности, характерный для процесса выпуска, независимо от формы КС заметно снижается с приближением поршня к верхней мертвой точке (ВМТ), то есть имеет место так называемое «подавление турбулентности» в результате сжатия. К концу процесса сжатия интенсифицируется течение вытесненной из надпоршневого объема горючей смеси природного газа и воздуха (так называемое течение squish). Вихревое движение в камере, расположенной в поршне, усиливается, и кинетическая энергия турбулентности повышается. Образование очага сгорания в области электродов свечи зажигания также способствует турбулизации рабочего тела, и кинетическая энергия турбулентности достигает своего максимального значения при нахождении поршня вблизи ВМТ.

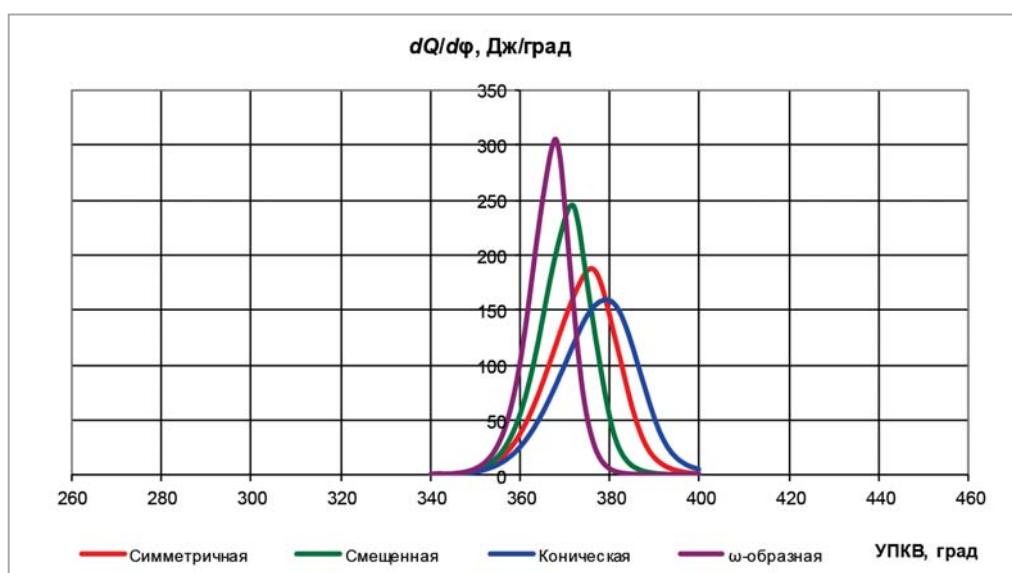
Очевидно, что описанный характер турбулентного течения наиболее ярким образом проявляется при  $\omega$ -образной КС, в случае которой при нахождении поршня в ВМТ величина кинетической энергии турбулентности в цилиндре

практически в два раза больше по сравнению, например, с конической КС.

### Влияние формы КС на скорость тепловыделения в цилиндре газового двигателя

Интенсивное движение газовой смеси и высокие значения кинетической энергии турбулентности, имеющие место в случае  $\omega$ -образной КС (см. рис. 1), приводят к сокращению продолжительности процесса сгорания (рис. 2).

Сравнение характерных признаков скорости тепловыделения (продолжительность, максимальное значение, расположение максимума относительно ВМТ, форма диаграммы) указывает на преимущества  $\omega$ -образной КС. Например, максимальная скорость тепловыделения на исследуемом режиме частичной нагрузки в случае  $\omega$ -образной КС приблизительно равна 305 Дж/град при  $\varphi = 368^\circ$ , тогда как ее значение для конической КС составляет всего 160 Дж/град и наступает гораздо позже



**Рис. 2.** Изменение скорости тепловыделения в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания (режим частичной нагрузки)

(при  $\varphi = 379^\circ$ ). Другие КС приводят к промежуточным результатам (см. рис. 2).

### Влияние формы КС на экологические характеристики газового двигателя

Из исследуемых вариантов камер  $\omega$ -образная КС характеризуется наивысшими значениями локальных температур в цилиндре и наилучшими эффективными показателями рабочего цикла. Однако высокий температурный уровень цикла является причиной интенсификации образования оксидов азота, масса которых на режиме частичной нагрузки составляет 0,00058 г за цикл, что приблизительно в 6 раз больше по сравнению с газовым двигателем с конической КС (рис. 3). С другой стороны, использование конической КС приводит к худшим эффективным показателям газового двигателя.

Другой важный экологический показатель – шум двигателя, как известно, зависит от скорости нарастания давления  $dp/d\varphi$  в цилиндре [6, 14]. Приведенные на рис. 2 зависимости скорости тепловыделения указывают на то, что

скорость нарастания давления и, как следствие, шум двигателя значительным образом зависят от формы камеры сгорания газового двигателя. Это предположение подтверждают результаты численных экспериментов, приведенные на рис. 4. Как видно,  $\omega$ -образная КС на исследуемом режиме частичной нагрузки имеет самое большое максимальное значение скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max} = 4,6$  бар/град, что и обуславливает высокий уровень шума по сравнению с другими камерами.

В целом, по результатам численных экспериментов, приведенным выше, видно, что с точки зрения эффективных показателей двигателя наилучшим вариантом является  $\omega$ -образная КС, ось которой на 5 мм смещена относительно оси цилиндра. Использование такой КС приводит к оптимальным значениям максимального давления цикла  $p_z$  и скорости тепловыделения, а в итоге – к лучшим эффективным показателям газового двигателя [7]. Однако с экологической точки зрения использование  $\omega$ -образной КС в газовом двигателе требует снижения эмиссии оксидов азота, а также уровня тепловых нагрузок на основные детали.

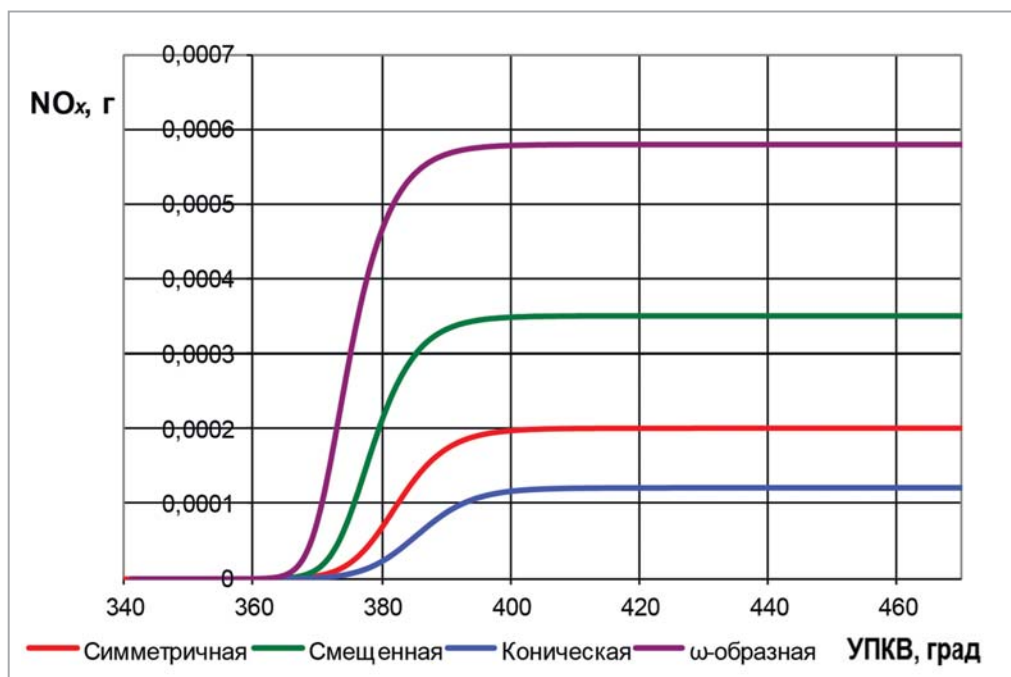


Рис. 3. Изменение массы образовавшихся за цикл оксидов азота в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания (режим частичной нагрузки)

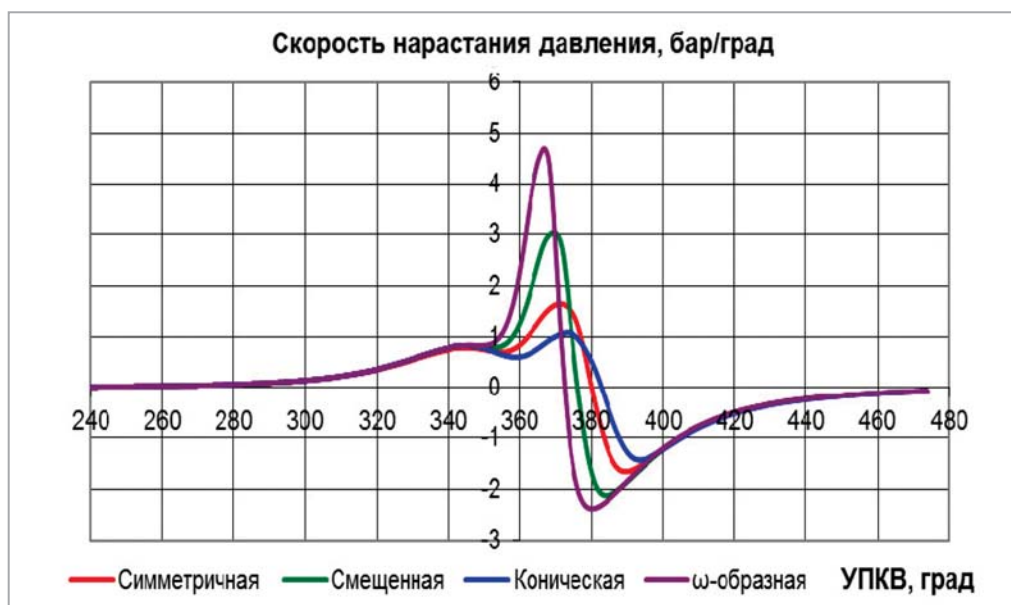


Рис. 4. Изменение скорости нарастания давления в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы камеры сгорания (режим частичной нагрузки)

### Улучшение экологических показателей газового двигателя с ω-образной КС

Дальнейшее усовершенствование рабочего цикла газового двигателя с ω-образной КС, обеспечивающей

наилучшие эффективные показатели по сравнению с другими КС, проводилось путем регулирования угла опережения зажигания  $\theta$ . При этом оптимальное значение  $\theta$  выбиралось в зависимости от режима нагрузки двигателя. Ниже проанализированы результаты исследования

рабочего процесса газового двигателя с  $\omega$ -образной КС для различных значений  $\theta$  ( $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-21^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-35^\circ$ ).

С приближением угла опережения зажигания к ВМТ максимальное давление  $p_z$  в цилиндре уменьшается нелинейно и наступает позже. Разница между давлениями  $p_z$  при предельных значениях  $\theta = -35^\circ$  и  $\theta = -5^\circ$  исследуемого диапазона составляет 56 %, при этом во втором случае  $p_z$  достигается на  $22^\circ$  позже, что с точки зрения эффективного КПД цикла неприемлемо. Что касается максимальной температуры  $t_z$ , осредненной по объему цилиндра, то ее значения для углов опережения зажигания  $-35^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $-21^\circ$  находятся в пределах 2300...2360 К с соответствующими УПКВ, которые отличаются приблизительно на  $1^\circ$ . Далее с приближением  $\theta$  к ВМТ разница более очевидна, и для  $\theta = -5^\circ$  температура снижается до  $t_z=2024$  К. При этом вариант с  $\theta = -35^\circ$  характеризуется максимальной турбулентной кинетической энергией, практически на 30 % большей, чем при варианте с  $\theta = -5^\circ$ .

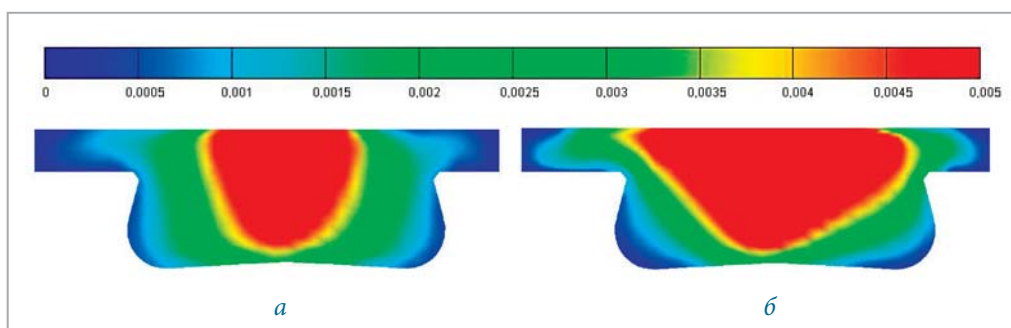
С точки зрения скорости тепловыделения оптимальными являются варианты с  $\theta = -30^\circ$  и  $-25^\circ$ , для которых максимальная скорость тепловыделения приблизительно равна 321 и 337 Дж/град при  $\varphi = 362^\circ$  и  $365^\circ$  на

режимах номинальной мощности и частичной нагрузки соответственно. Максимальная скорость тепловыделения при  $\theta = -35^\circ$  составляет 296 Дж/град, однако она достигается при  $\varphi = 359^\circ$ , когда поршень еще не дошел до ВМТ, что отрицательно сказывается на эффективных показателях рабочего цикла.

Следует подчеркнуть, что указанные выше осредненные температуры рабочего тела используются только для оценки эффективности и общего температурного уровня рабочего цикла, а концентрации оксидов азота вычисляются на основе локальных нестационарных температур рабочего тела. Пример расчета локальных концентраций  $\text{NO}_x$  на режиме номинальной мощности приведен на рис. 5.

Заметим, что характер изменения локальных концентраций оксидов азота коррелируется с изменением локальных температур рабочего тела: первые очаги высоких температур ( $t > 1800$  К) и, соответственно, зоны образования  $\text{NO}_x$  возникают в области свечи зажигания, расположенной в центральной части КС базового дизеля на месте форсунки. Далее образование  $\text{NO}_x$  происходит по мере распространения фронта пламени в цилиндре газового двигателя (см. рис. 5).

Локальные значения массовых долей  $\text{NO}_x$



**Рис. 5.** Изменение локальных концентраций (массовые доли) оксидов азота в цилиндре газового двигателя с  $\omega$ -образной КС на режиме номинальной мощности при  $\theta = -26^\circ$  и различных УПКВ:

*a* –  $\varphi = 380^\circ$ ; *б* –  $\varphi = 390^\circ$

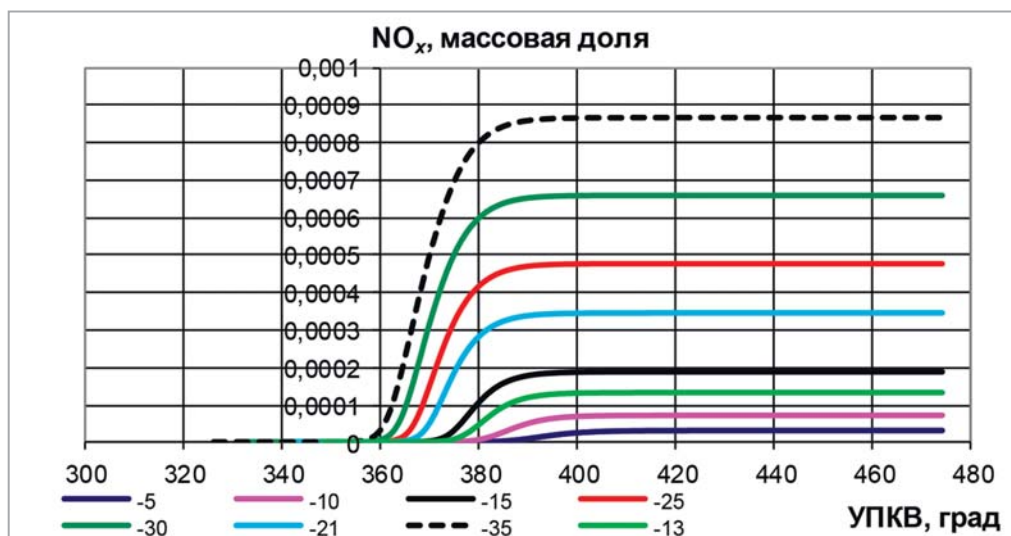


Рис. 6. Массовые доли образовавшихся  $\text{NO}_x$  за цикл в цилиндре газового двигателя с  $\omega$ -образной КС в зависимости от угла опережения зажигания (режим частичной нагрузки)

На основе локальных массовых долей  $\text{NO}_x$  вычисляются массовые доли оксидов азота, образовавшихся за цикл в цилиндре газового двигателя. Результаты таких расчетов, выполненных для различных углов опережения зажигания, приведены на рис. 6. Как видно, угол опережения зажигания имеет значительное влияние на интенсивность образования  $\text{NO}_x$ . Из рис. 6 следует, что количество образованных оксидов азота уменьшается с приближением угла опережения зажигания к ВМТ.

Как видно, существенное снижение эмиссии оксидов азота для дизеля, конвертированного в газовый двигатель с  $\omega$ -образной КС, может быть достигнуто путем регулирования угла опережения зажигания в зависимости от режимов работы двигателя.

Таким образом, при конвертировании серийных дизелей в газовый двигатель с принудительным зажиганием особое внимание следует уделить геометрической форме камеры сгорания, расположенной в поршне. Подтверждено, что в КС газового двигателя между кинетической энергией турбулентности и скоростью тепловыделения существует непосредственная связь, что указывает на необходимость решения задач

эффективности и экологичности рабочего цикла газового двигателя с учетом формы КС. Численные эксперименты, результаты которых приведены в данной работе, показали, что из исследуемых камер наибольшей турбулентностью характеризуется  $\omega$ -образная КС, а наименьшей — коническая.

Лучшие эффективные показатели двигатель с  $\omega$ -образной КС имеет при работе с углом опережения зажигания  $\theta = -25^\circ$  и  $-21^\circ$ , обладая при этом высокими значениями максимального давления цикла и скорости тепловыделения. Для вариантов с  $\theta = -35^\circ$  и  $\theta = -30^\circ$ , обладающих высокими значениями  $p_z$ , максимум тепловыделения достигается слишком рано и его значение не выше, чем при других вариантах исследуемых углов опережения зажигания.

С точки зрения эмиссии оксидов азота рабочий процесс газового двигателя при  $\theta = -21^\circ$  является не лучшим, но вполне приемлемым, а при  $\theta = -35^\circ$  образуется максимальное количество  $\text{NO}_x$ . С учетом этого фактора, а также значений скорости нарастания давления можно заключить, что для исследуемого режима частичной нагрузки газового двигателя оптимальным является угол опережения зажигания  $\theta = -21^\circ$

(для режима номинальной мощности  $\theta = -26^\circ$ ). Очевидно, что метод трехмерного моделирования рабочего процесса, используемый в данной работе, позволяет определить угол опережения зажигания для произвольного режима частичной нагрузки газового двигателя,

обеспечивающий оптимальное сочетание эффективных и экологических показателей двигателя в зависимости от формы камеры сгорания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-08-01238а).*

## Литература

1. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.
2. Kavtaradze R.Z., Natriashvili T.M., Zelentsov A.A. Ignition Delay and Emission of the Noxious Substances in Double-Fuel Engines Working on the natural Gas and Syngases / Chapter 15 (p. 109-120) in the Book: Innovative Methods for Improvement of Technical, Economic and Ecological Efficiency of Motor Cars (ISBN:978-1-63463-671-1). – New-York: NOVA-Publishers, 2015. – 138 p.
3. Кавтарадзе Р.З. Улучшение экологических показателей водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода. //РАН. Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – Т. 45. – № 4. – С. 20-29.
4. Кавтарадзе Р.З., Краснов В.М. Влияние частичной гомогенизации смеси на образование оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 2 (50). – С. 50-56.
5. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 3-е изд. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 515 с.
6. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. 2-е изд. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 589 с.
7. Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Шибанов А.В., Зеленцов А.А., Сергеев С.С. Влияние формы камеры на нестационарные процессы переноса и турбулентного сгорания в дизеле, конвертированном в газовый двигатель // Известия РАН, «Энергетика». – 2009. – № 2. – С. 49-63.
8. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С. Численная методика расчета концентрации  $\text{NO}_x$  на основе многозонной модели рабочего процесса дизеля. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015617793. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.07.2015.
9. Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С., Панкратов С.А. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию // РАН. Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – № 1. – С. 99-107.
10. Кавтарадзе Р.З., Зиновьев И.А. Влияние частичной гомогенизации процесса сгорания на экологические показатели дизеля. ISSN 0236-3933. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-113-127 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2016. – № 4. – С.113-127.
11. FIRE. Users Manual. Version 2015. AVL List GmbH Graz, Austria, 2015. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2015).
12. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А. Влияние формы впускных каналов на эффективные и экологические показатели среднеоборотного дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 6. – С.59-73.
13. Кавтарадзе Р.З. Расчетное определение импульса давлений в выпускной системе комбинированных двигателей // Известия вузов СССР, Машиностроение. – 1977. – № 11. – С. 100-103.
14. Van Basshuysen R., Schäfer F. Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlage, Komponenten, Systeme, Perspektive. 4. Auflage. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden. 2007. – 1032 S.



## Сравнительная оценка выбросов оксида углерода с ОГ двигателем с принудительным зажиганием при работе на бензине и топливном газе

Л.И. Ковальчук, профессор Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота (БГА РФ), г. Калининград, д.т.н.,  
И.В. Мишачков, аспирант БГА РФ

Приведены экспериментально-теоретические модели для сравнительной оценки выбросов оксида углерода с отработавшими газами двигателем с принудительным зажиганием при работе на бензине и топливном газе. Дана сравнительная оценка выбросов оксида углерода с отработавшими газами конкретным двигателем при работе на бензине и топливном газе.

**Ключевые слова:**

двигатель с принудительным зажиганием, оксид углерода, бензин, топливный газ, экологический эффект.

**О**дним из общепризнанных направлений снижения вредного воздействия двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду является переход к альтернативным топливам, в первую очередь перевод двигателей на питание газомоторным топливом (ГМТ). Наиболее перспективными из таких топлив являются природный газ (метан) и топливный газ (пропан-бутановые смеси). В настоящее время компримированный природный газ (КПГ) и сжиженный углеводородный газ (СУГ) являются наиболее подготовленными видами альтернативных топлив для использования в ДВС.

Использование газомоторного топлива в качестве альтернативного в ДВС представляется исключительно целесообразным. Наличие в стране его внушительных запасов, низкая отпускная цена по сравнению с жидким топливом, высокая скорость возврата вложенных средств, экологическая безопасность – по этим показателям в настоящее время ГМТ занимает первое место среди альтернативных топлив.

Экологические проблемы, особенно в городах, являются наиболее существенным фактором, стимулирующим перевод ДВС на газомоторное топливо. По данным различных источников [1-4], при правильно отрегулированном двигателе, работающем на ГМТ, выбросы оксида углерода сокращаются в 5-10 раз. При этом, как правило, не оговариваются условия, при которых были получены сравнительные оценки. Очевидно, что наиболее полная сравнительная оценка токсичных выбросов с отработавшими газами (ОГ) может быть дана в том случае,

если располагать моделями, описывающими закономерности образования выбросов на всех возможных эксплуатационных режимах при работе двигателя на жидком и газомоторном топливах. В соответствии с теоретическими предпосылками и алгоритмом, изложенными в работе [5], в качестве исходной информации для построения модели выбросов оксида углерода используем результаты стендовых испытаний по серии нагрузочных характеристик двигателя VOLVO B280F при работе на бензине.

Испытания проводились без каталитического нейтрализатора в диапазоне частот вращения от 1400 до 2200 мин<sup>-1</sup> с шагом  $\Delta n = 200$  мин<sup>-1</sup>. Для измерения выбросов оксида углерода с ОГ использовался многокомпонентный газоанализатор модификации «Автотест-02.03». Отбор проб проводился на срезе выпускной трубы, в которую для снижения температуры отработавших газов были вмонтированы дополнительные глушители, что позволило довести время замеров на каждом режиме до значений, предусмотренных технической характеристикой газоанализатора.

В процессе испытаний проводились замеры следующих параметров:

$S$  – перемещение дроссельной заслонки, мм;

$G_t$  – часовой расход топлива, кг/ч;

$n$  – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>;

$CO$  – выбросы оксида углерода, %;

$\lambda$  – коэффициент избытка воздуха.

Количество выбросов оксида углерода с ОГ в единицу времени определялось как часть от общего количества продуктов сгорания по формуле:

$$CO_o = G_t (1 + l_0 \cdot \alpha) CO'_6 / 100, \quad (1)$$

где  $CO_o$  и  $CO'_6$  – количество выбросов оксида углерода при работе двигателя на бензине, кг/ч и % соответственно;  $l_0 = 14,964$  кг воздуха/кг топлива – количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг бензина среднего элементарного состава ( $C = 0,855$ ;  $H = 0,145$ );  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

На рис. 1 приведена графическая интерпретация результатов испытаний при работе двигателя на бензине. При построении зависимостей использованы безразмерные параметры

$$CO_o = \frac{CO}{CO_n}; \quad S_o = \frac{S}{S_n}; \quad n_o = \frac{n}{n_n}, \quad (2)$$

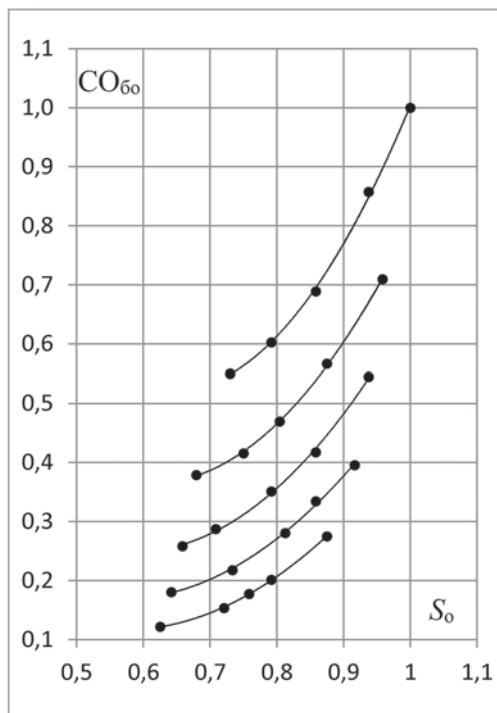
где индекс «о» означает, что это относительные величины, а индексом «н» обозначены нормирующие параметры, численные значения которых приняты следующими:  $CO_n = 6,029$  кг/ч;  $S_n = 24$  мм;  $n_n = 2200$  мин<sup>-1</sup>.

Непосредственно из рис. 1 следует, что нагрузочные характеристики  $CO_{oo} = f(S_o)$  имеют нелинейный характер. Поэтому каждая из них может быть аппроксимирована полиномом второго порядка вида:

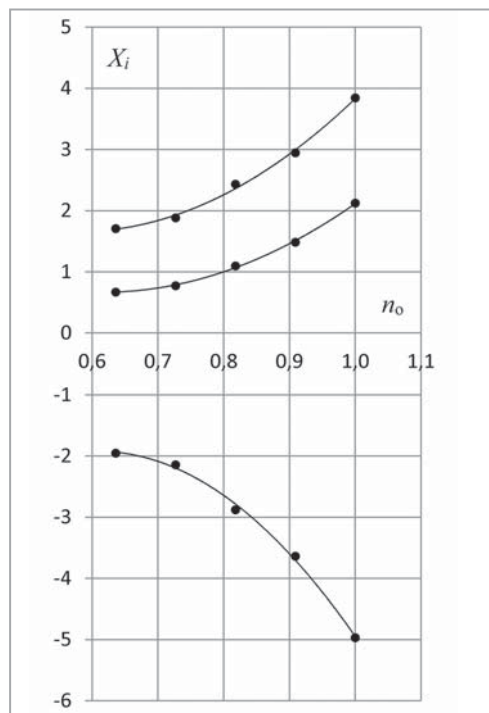
$$CO_{oo} = X_1(n_o) S_o^2 + X_2(n_o) S_o + X_3(n_o), \quad (3)$$

где  $X_1(n_o)$ ,  $X_2(n_o)$ ,  $X_3(n_o)$  – искомые зависимости определяемых параметров от частоты вращения.

В данном случае система полиномов, аппроксимирующих выбросы оксида



**Рис. 1.** Зависимости  $CO_{60} = f(S_o)$  по нагрузочным характеристикам при работе двигателя на бензине



**Рис. 2.** Зависимости коэффициентов  $X_i = f(n_o)$  для CO при работе двигателя на бензине

углерода по нагрузочным характеристикам, имеет вид:

1.  $CO_{60} = 3,8447 \cdot S_o^2 - 4,9652 \cdot S_o + 2,1244$  при  $n = 1,0$ ;
2.  $CO_{60} = 2,9491 \cdot S_o^2 - 3,6342 \cdot S_o + 1,4856$  при  $n = 0,909$ ;
3.  $CO_{60} = 2,4336 \cdot S_o^2 - 2,8768 \cdot S_o + 1,1004$  при  $n = 0,818$ ;
4.  $CO_{60} = 1,8846 \cdot S_o^2 - 2,1395 \cdot S_o + 0,7763$  при  $n = 0,727$ ;
5.  $CO_{60} = 1,7097 \cdot S_o^2 - 1,9488 \cdot S_o + 0,6716$  при  $n = 0,636$ .

Система полиномов (4) позволяет определять закономерности изменения определяемых параметров  $X_i = f(n_o)$  при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой.

На рис. 2 зависимости  $X_i = f(S_o)$  представлены графически. В данном случае это нелинейные зависимости. Поэтому система аппроксимирующих полиномов имеет вид:

1.  $X_1 = 12,144 \cdot n_o^2 - 14,005 \cdot n_o + 5,6939$ ;
2.  $X_2 = -19,845 \cdot n_o^2 + 24,194 \cdot n_o - 9,2965$ ;
3.  $X_3 = 9,7417 \cdot n_o^2 - 11,965 \cdot n_o + 4,3394$ .

Подстановкой (5) в (3) получено уравнение поверхности, образованной смещением зависимости  $X_i = f(S_o)$  при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой.

$$CO_{60} = (12,144 \cdot n_o^2 - 14,005 \cdot n_o + 5,6939) \cdot S_o^2 + (-19,845 \cdot n_o^2 + 24,194 \cdot n_o - 9,2965) \cdot S_o + (9,7417 \cdot n_o^2 - 11,965 \cdot n_o + 4,3394). \quad (6)$$

На рис. 3 приведено сопоставление экспериментальных ( $CO_{60}$ ) и рассчитанных ( $CO_{op}$ ) по формуле (6) относительных значений выбросов оксида углерода с ОГ двигателем с принудительным зажиганием при работе на бензине. Гистограмма распределения погрешностей ( $\delta$ , %) расчета CO приведена на рис. 4. Видно, что уравнение (6) воспроизводит весь массив опытных данных с погрешностью, не превышающей  $\pm 3\%$ .

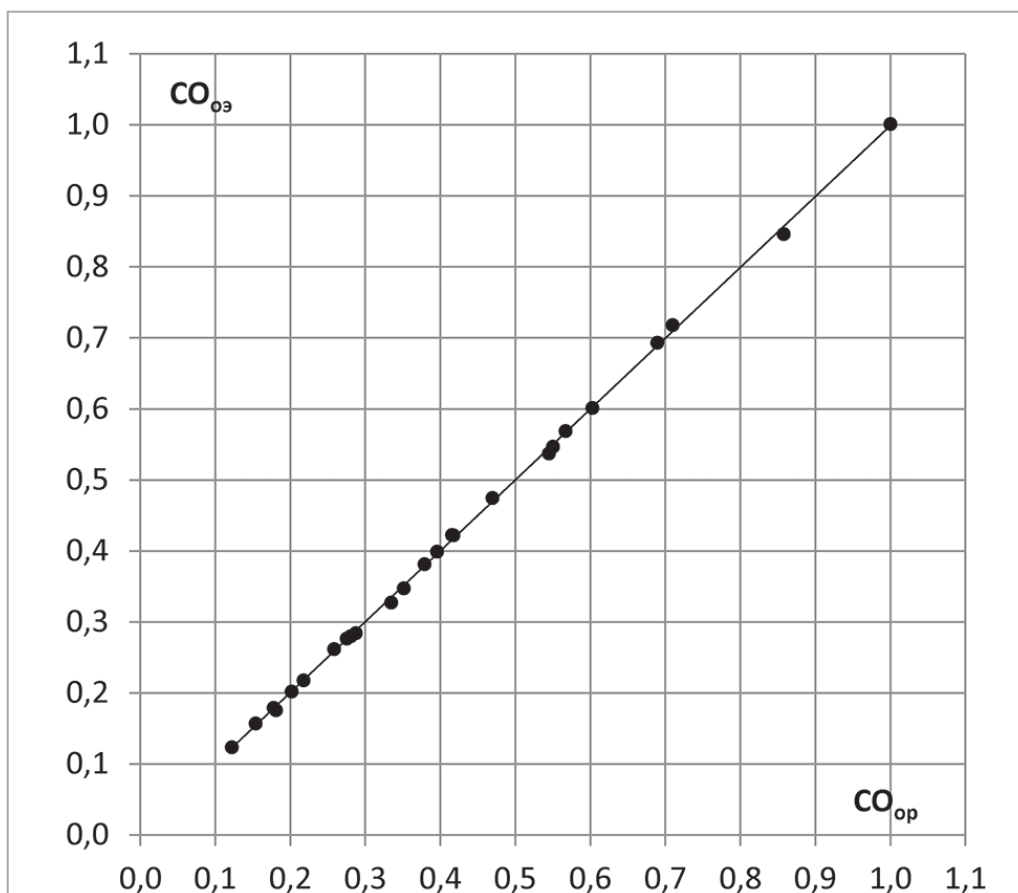


Рис. 3. Зависимость  $CO_{оэ} = f(CO_{оп})$  при работе двигателя на бензине

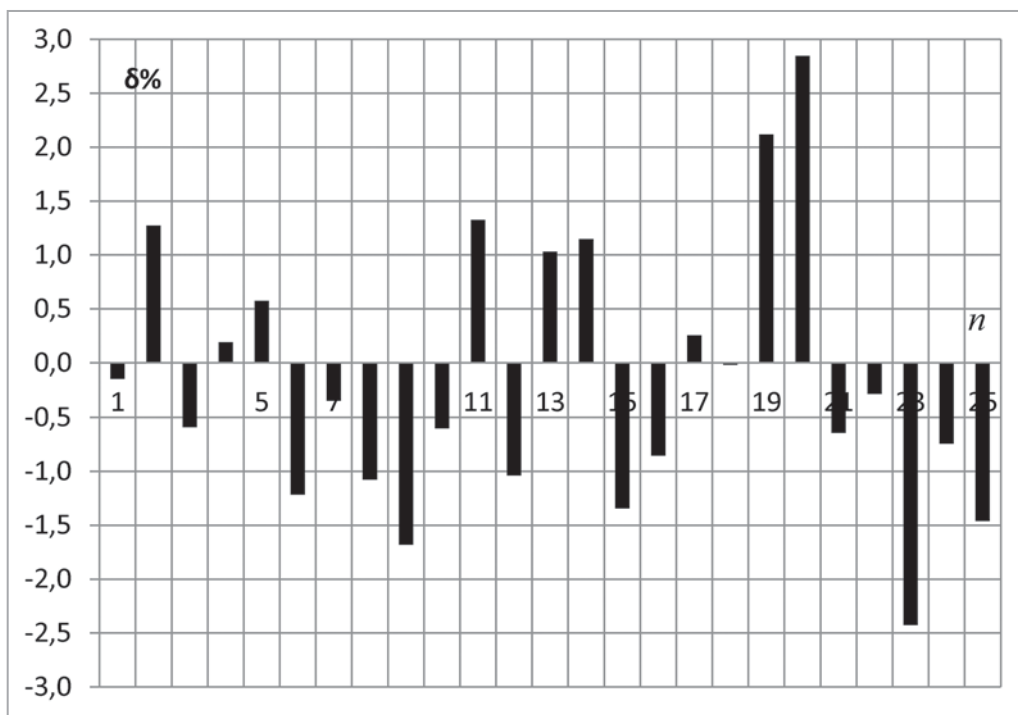


Рис. 4. Гистограмма распределения погрешностей расчета  $CO_{60}$  при работе двигателя на бензине ( $n$  – порядковый номер опыта)

Модель для оценки выбросов оксида углерода с ОГ двигателем VOLVO B280F при работе на топливном газе сформулирована на основе нижеследующих исходных данных:

- использованы результаты замеров выбросов оксида углерода в процессе стендовых испытаний двигателя, приведенных в работе [5];
- количество выбросов оксида углерода с отработавшими газами в единицу времени определялось как часть от общего количества продуктов сгорания при работе двигателя на топливном газе по формуле

$$CO_r = G'_t \cdot (1 + l'_o \cdot \alpha') \cdot CO'_r / 100, \quad (7)$$

где  $CO_r$  и  $CO'_r$  – количество выбросов оксида углерода при работе двигателя на топливном газе, кг/ч и % соответственно;  $G'_t$  – часовой расход газа, кг/ч;  $l'_o = 16,694$  кг воздуха/кг газа – количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг топливного газа среднего элементарного состава (бутан – 58,63 %; пропан – 41,14 %);  $\alpha'$  – коэффициент избытка воздуха;

- при переходе от абсолютных значений информативных параметров к относительным значения нормирующих параметров при работе двигателя на бензине и топливном газе приняты одинаковыми:  $CO_H = 6,029$  кг/ч;  $S_H = 24$  мм;  $n_H = 2200$  мин<sup>-1</sup>.

С учетом названных условий для оценки выбросов оксида углерода с отработавшими газами при работе двигателя на топливном газе получено следующее уравнение:

$$CO_{го} = (0,5098 \cdot n_o^2 - 0,5926 \cdot n_o + 0,2052) \cdot S_o^2 + (-0,8936 \cdot n_o^2 + 1,0595 \cdot n_o - 0,3596) \cdot S_o + (0,4097 \cdot n_o - 0,4835 \cdot n_o + 0,1726). \quad (8)$$

Расчеты выбросов оксида углерода по уравнениям (6) и (8) выполнены для одних и тех же скоростных и нагрузочных режимов. Результаты расчетов представлены на рис. 5 в виде зависимости  $CO_{го} = f(CO_{60})$ , которая аппроксимирована полиномом первого порядка

$$CO_{го} = 0,0151 \cdot CO_{60} + 0,0124. \quad (9)$$

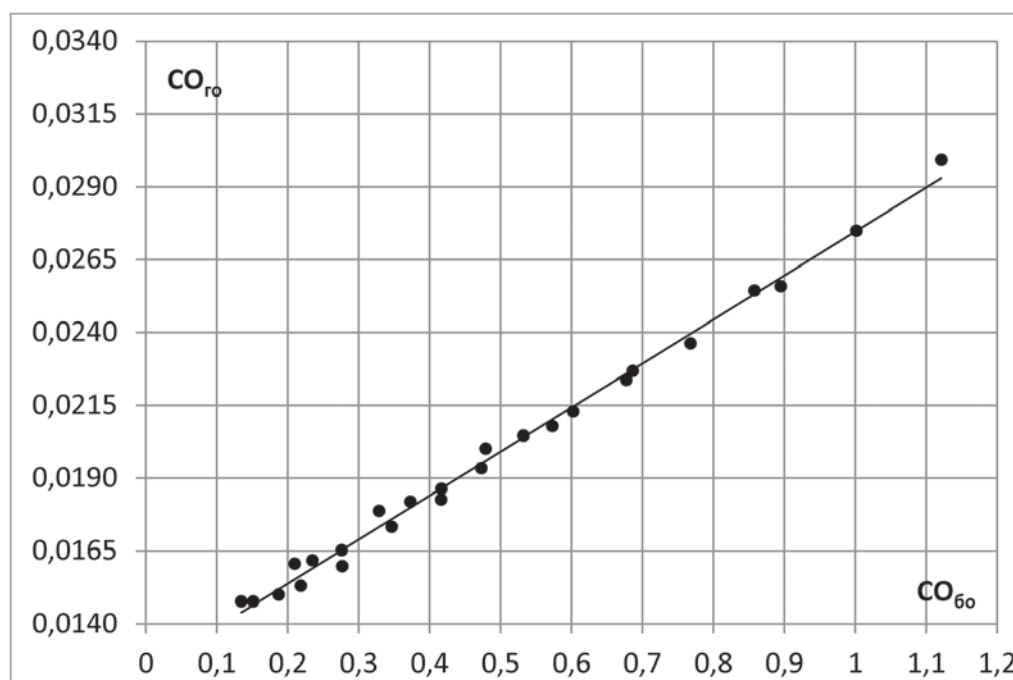


Рис. 5. Зависимость  $CO_{го} = f(CO_{60})$  при работе двигателя на бензине и топливном газе

Уравнение удобно использовать для сравнительной оценки выбросов оксида углерода при работе двигателя на бензине и топливном газе. Например, если выбросы  $CO_{60} = 1,0$  при работе двигателя на бензине, то при работе двигателя на этом же режиме на топливном газе  $CO_{го} = 0,0245$ , то есть меньше в 36 раз; при  $CO_{60} = 0,2$  и  $CO_{го} = 0,1542$  выбросы оксида углерода меньше в 13 раз. Другими словами, при работе двигателя на топливном газе выбросы оксида углерода с ОГ многократно меньше в сравнении с выбросами при работе на бензине. С увеличением частоты вращения и нагрузки это различие меняется, в данном случае примерно по линейному закону.

Следует отметить еще одно важное преимущество перевода двигателей с принудительным зажиганием на газомоторное топливо. Замеры токсичных выбросов на новых автомобилях, оборудованных трехкомпонентными каталитическими нейтрализаторами, показывают, что на установившихся режимах токсичные выбросы при работе на бензине практически равны нулю. На переходных режимах работы токсичные выбросы появляются и удерживаются в зависимости от продолжительности переходного режима в течение 3...10 с. При работе двигателя на газомоторном топливе без каталитического нейтрализатора выбросы оксида углерода изменялись в пределах от 0,09 до 0,12 % независимо от режима работы двигателя.

## Литература

1. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
2. Базаров Б.И. Экологическая безопасность автотранспортных средств / Б.И. Базаров, 2-е издание. – Ташкент: ТАДИ, 2007. – 104 с.
3. Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей / К.А. Морозов. – М.: Легион, 2001. – 80 с.
4. Аكوпова Г.С. Эколого-экономический анализ перспектив использования газомоторного топлива на автомобильном транспорте / Г.С. Аكوпова, Н.Л. Власенко, Д.О. Давыдова // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 6. – С. 23-27.
5. Ковальчук Л.И. Формирование экспериментально-теоретических моделей токсичных выбросов с ОГ двигателя с искровым зажиганием при работе на топливном газе / Л.И. Ковальчук, И.В. Мишачков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 6. – С. 28-33.

### «Газпром» и Mitsui подписали меморандум по сотрудничеству в области СПГ-бункеровки

В рамках Восточного экономического форума 2016 во Владивостоке состоялась рабочая встреча председателя правления ПАО «Газпром» Алексея Миллера и директора-представителя, председателя совета директоров Mitsui & Co., Ltd. Масами Иидзима.

Стороны обсудили ход и перспективы сотрудничества. В частности, речь шла об актуальных вопросах производства сжиженного природного газа в рамках проекта «Сахалин-2» и его наращивания за счет строительства третьей технологической линии СПГ-завода.

По итогам встречи Алексей Миллер и Масами Иидзима подписали Меморандум о взаимопонимании. Документ отражает намерения сторон по совместному проведению технико-экономического и маркетингового анализа бункеровки морского транспорта сжиженным природным газом на территории Дальнего Востока России и Азиатско-Тихоокеанского региона.

«У Газпрома и Mitsui есть опыт продуктивного сотрудничества в рамках проекта «Сахалин-2». Теперь у нас появилась хорошая возможность для развития нового направления партнерства – взаимодействия в сегменте малотоннажного СПГ. Работа в сфере бункеровки позволит нашим компаниям диверсифицировать бизнес и укрепить позиции на динамично развивающемся азиатском рынке», – сказал Алексей Миллер.

Управление информации ПАО «Газпром»

# Энергоустановки на основе топливных элементов с твердым полимерным электролитом

46

С.И. Козлов, доктор технических наук,  
В.Н. Фатеев, зам. директора Центра физико-химических технологий  
НИЦ «Курчатовский институт», профессор, д.х.н

В этой статье продолжено описание топливных элементов с твердым полимерным электролитом. Рассмотрены сферы применения ТЭТПЭ, к числу которых относятся транспорт (автомобильный, железнодорожный, водный), системы резервного (аварийное) энергообеспечения, автономного теплоэлектроснабжения зданий и сооружений, военная и погрузочная техника, зарядные устройства и т.д.

**Ключевые слова:**

топливные элементы, твердый полимерный электролит, энергоустановка, транспорт.

**П**ринципиальная схема энергоустановки на основе топливного элемента с твердым полимерным электролитом (ТЭТПЭ), работающего на чистом водороде, показана на рис. 1.

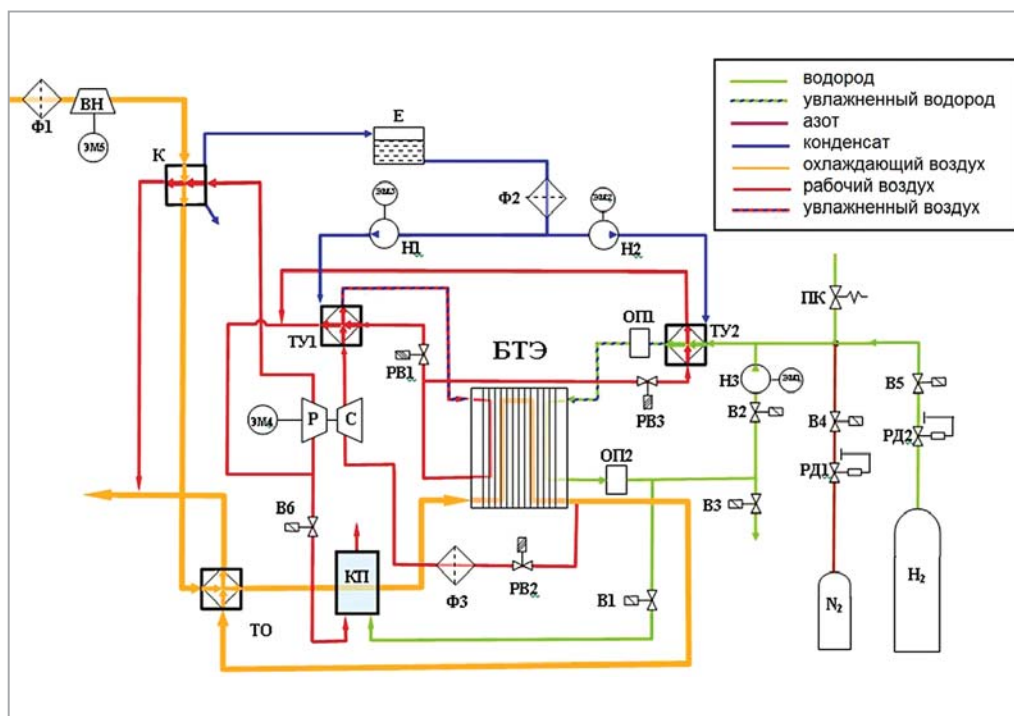


Рис. 1. Принципиальная схема энергоустановки на основе ТЭТПЭ

К основным ее компонентам относятся: батарея топливных элементов (БТЭ); система сбора конденсата и увлажнения реагентов, включающая резервуар (Е); система термостатирования (охлаждение); система безопасности (баллон с азотом для обеспечения продувок системы перед заполнением водородом).

При использовании природного газа или другого органического топлива (например, метанола) энергоустановка будет включать в себя конвертор, реактор сдвига и систему очистки от СО.

В настоящее время разработаны и изготавливаются ТЭПЭ различной мощности (до 500 кВт) и для многих областей применения. Стоимость батареи ТЭПЭ составляет около 50 % стоимости всей установки. Современные ЭУ мощностью в несколько кВт стоят более 3000 долл. США за 1 кВт мощности. Однако существенное (примерно в 2 раза) снижение цены возможно уже в ближайшем будущем при увеличении объемов производства установок.

С учетом относительно низких рабочих температур и соответственно быстрого пуска и останова ТЭПЭ, а также высокой маневренности по производительности (возможность работы при плотностях тока от нуля до 1 А/см<sup>2</sup>) наиболее перспективными областями применения ТЭПЭ следует считать следующие: транспорт, установки для резервного (аварийное) энергообеспечения и децентрализованной энергетики на основе возобновляемых источников энергии, а также портативные зарядные устройства.

В 2006 г. было запущено в эксплуатацию около 100 новых автомобилей, автобусов, мотоциклов и т.д. на ТЭПЭ. В конце 2007 г. в мире эксплуатировалось около 900 таких транспортных средств. На автомобилях и автобусах устанавливают практически только ТЭПЭ. В 2005 г. был изготовлен всего один автомобиль с фосфорнокислым топливным элементом. В России созданы два автомобиля на ЦТЭ.

Департамент энергетики США планирует снизить стоимость до 30 долл. за 1 кВт мощности к 2020 г. Это означает, что источник электричества для силовой установки мощностью 100 кВт будет стоить 3000 долл. США, что сопоставимо с ценой двигателя внутреннего сгорания. Определенный прогресс достигнут и в области «холодного» пуска. В настоящее время ТЭПЭ уже могут запускаться при температуре –30 °С [1].

Одним из безусловных лидеров в производстве ТЭ для транспорта является компания Ballard [2]. ТЭПЭ производства этой компании используют DaimlerChrysler, Ford, Honda, Nissan и др. На рис. 2 представлен автомобиль NECAR-5 (Mercedes-Benz A Class), разработанный корпорацией DaimlerChrysler. В автомобиле использовался ТЭПЭ Ballard Mark 900, топливом служил метанол с использованием риформера. Мощность топливных элементов составляла 75 кВт, достигнутая скорость – 150 км/ч [3].



Рис. 2. Автомобиль NECAR-5 на топливных элементах компании Ballard

На автобусах Citaro (рис. 3) установлены топливные элементы компании Ballard суммарной мощностью более 200 кВт. Максимальная вместимость водорода в баллонах, расположенных на крыше, – 44 кг (1,89 тыс. л), степень чистоты водорода – 99,999 %, максимальное давление в водородных баллонах





Рис. 3. Автобус Citaro, разработанный корпорацией DaimlerChrysler, на топливных элементах компании Ballard

– 35 МПа. Салон автобуса Citaro рассчитан на 70 мест, запас хода на одной заправке в городском цикле эксплуатации составляет 200...250 км. Максимальная скорость – до 80 км/ч, длина – 12 м, масса – 15 т [4].

В настоящее время активно ведет разработки для транспорта Китай, который в весьма сжатые сроки добился существенных успехов. Компания Shanghai-Shen Li представила городской автобус на топливных элементах мощностью 100 кВт. На борту размещены 9 водородных баков, вмещающих 990 л водорода. Пробег без дозаправки составляет более 300 км, максимальная скорость более 85 км/ч, разгон (0...50 км/ч) менее 21 с. Автобус имеет габаритные размеры 1148×249,6×360 см, масса 16,5 т, число перевозимых пассажиров 55. Уровень шума составляет меньше 80 дБ [5].

Разработаны также легковые автомобили (рис. 4) с двигателем максимальной мощности 60 кВт (масса батареи

ТЭ 224 кг, габариты 1000×950×130 мм). В качестве топлива используется газообразный водород, который хранится в сжатом состоянии в 9 баллонах или в виде гидридов. Уровень шума менее 60 дБ [5].

Туристические машины, созданные компанией Shanghai-Shen Li, имеют энергоустановку мощностью 10 кВт, масса батареи составляет 120 кг. В качестве топлива используется сжатый газообразный водород в баллонах. Уровень шума менее 60 дБ [5].

Разработки автомобилей на ТЭПЭ представляют также большой интерес для армии, так как такая техника характеризуется низким уровнем шума (особенно при остановке) и отсутствием детектируемых выбросов. На рис. 5 показан джип Aggressor [6], разработанный калифорнийской компанией Quantum Fuel Systems Technologies Worldwide совместно с Центром исследований и разработок в области



Рис. 4. Легковой автомобиль Volkswagen на топливных элементах; справа – показано расположение силовой установки (под полом автомобиля)



Рис. 5. Джип Aggressor на топливных элементах

танко- и автомобилестроения. Aggressor имеет батарею ТЭПЭ мощностью 10 кВт и аккумулятор, обеспечивающий увеличение мощности до 60 кВт. Максимальная скорость – 120 км/ч, разгон до 60 км/ч производится за 4 с. В качестве топлива используется сжатый водород.

Железнодорожный транспорт представляет собой большой рынок для энергоустановок на водородных топливных элементах, так как около 60 % грузов по железной дороге во всем мире перевозят тепловозы.

В 2006 г. в Японии начались испытания на железных дорогах небольшого моторного вагона для пригородных линий NE-train (рис. 6). Электромоторы этого поезда питаются от двух 65-киловаттных водородных топливных элементов. Водород хранится в баллонах. При торможении энергия поезда частично возвращается в аккумуляторные батареи, позволяя дольше двигаться на одной заправке. Максимальная скорость поезда – 100 км/ч, размеры состава – 20,0×2,8×4,052 м. Поезд NE-train является проектом компании East Japan Railway [7].

В США разрабатывается прототип локомотива fuelcell-hybrid switcher (рис. 7) массой 127 т с водородным топливным элементом мощностью 250 кВт (с возможностью установки ТЭ на 1 МВт). Локомотив создается для военных и коммерческих целей [8].

В Дании водородный поезд курсирует между городами по маршруту,

протяженность которого составляет 59 км и ограничена вместимостью водородных баков. Проект получил название Danish Hydrogen Train Project [9]. И в Японии также ведутся разработки водородного железнодорожного транспорта компаниями Hitachi и Kinki Sharyo.

Следует отметить, что для железнодорожного транспорта массогабаритные характеристики ТЭ и быстрый запуск не являются столь значимыми, как для автотранспорта, и конкуренцию ТЭПЭ могут составить другие типы топливных элементов.

В Институте транспорта и инфраструктурных систем Fraunhofer (Германия) создан водородный прототип гибрида трамвая и автобуса (рис. 8). AutoTram оснащен водородным топливным элементом и маховиком, который



Рис. 6. Новый японский состав NE-train на водородных топливных элементах

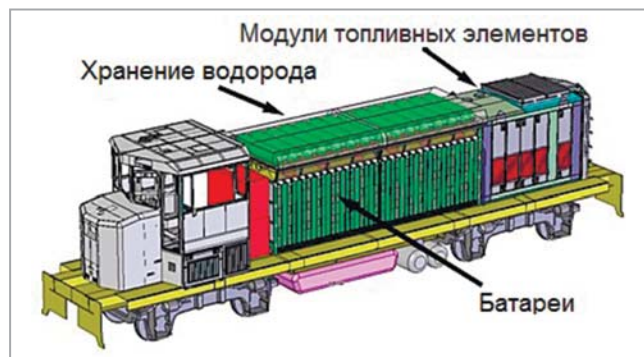


Рис. 7. Прототип локомотива fuelcell-hybrid switcher; справа – схема хранения водорода на борту локомотива

заряжается при торможении и разгоняет вагон при старте. Длина прототипа 18 м, но планируется создание 56-метровых вагонов, вмещающих 300 пассажиров. Топливный элемент изготовлен канадской фирмой Ballard Power Systems, маховик – ССМ Nuenen. 10 кг водорода хранятся в баллонах на крыше. Скорость прототипа – 60 км/ч [10].

В Европе создана некоммерческая Ассоциация водорода и топливных элементов на морском транспорте (Marine Hydrogen & Fuel Cell Association – MHFCA). В ассоциацию вошли 120 организаций. Наряду с разработкой морского транспорта на ТЭПЭ большое внимание уделяется разработке кодов, стандартов и правил использования водородных технологий в морских приложениях [11].

В Германии производятся подводные лодки класса U-212 (рис. 9а) с твердополимерными топливными элементами производства Siemens AG мощностью 34 и 120 кВт. U-212 стоят на вооружении Германии, поступили заказы из Греции, Италии, Кореи, Израиля. Под водой лодка работает на ТЭПЭ и практически бесшумна [12].

Испанская судостроительная компания Navantia S.A. планирует начать производство подводных лодок класса S-80 (рис. 9б) с силовыми установками на ТЭПЭ мощностью 300 кВт. Водород предполагается производить на борту из этанола. Поставщик топливных

элементов – компания UTC Power (США). S-80 предназначены для охраны побережья. Применение водородных топливных элементов позволит сократить уровень шумов и увеличить время нахождения под водой [13].

Исландия ведет работы по переводу на водородные ТЭ (и в первую очередь ТЭПЭ) всего рыболовного флота.

Речные суда с ТЭПЭ очень перспективны для городского водного транспорта и особенно для заповедных районов, национальных парков и т.п. Как и на железнодорожном транспорте, ТЭПЭ на водном транспорте не имеют ярко выраженных преимуществ. Например, Европейский консорциум FellowSHIP (Fuel Cells for Low Emissions Ships) [14] разработал для этих целей установку на расплавкарбонатных топливных элементах мощностью 330 кВт.



Рис. 8. Водородный прототип гибрида трамвая и автобуса AutoTram



а



б

**Рис. 9.** Подводные лодки:

а – класса U-212 с топливными элементами производства Siemens AG;

б – класса S-80 компании Navantia с силовыми установками на ТЭПЭ

Использование водородных топливных элементов актуально и на вспомогательном транспорте, эксплуатируемом на ограниченных пространствах (склады, аэродромы, производственные объекты, военные базы, поля для гольфа и т.д.). Наиболее активно водородные топливные элементы устанавливаются на складские вилочные погрузчики (рис. 10) [15].

ТЭПЭ предполагается устанавливать на велосипеды, мотоциклы, скутеры и др.

Относительно новым направлением является применение ТЭПЭ в авиации. Так, в рамках европейского проекта

New Configured Aircraft (CELINA) компания Airbus разрабатывает конструкцию самолета A330-300, где 40...60 % электроэнергии будут вырабатывать ТЭПЭ [15].

Как уже отмечалось, одним из перспективных и наиболее близких к коммерциализации типов энергоустановок являются установки для резервного (аварийное) энергообеспечения. Компания APC анонсировала выпуск InfraStruXure с интегрированными твердотопливными водородными топливными элементами [16]. Используются модульные ТЭ с твердым полимерным



**Рис. 10.** Складские погрузчики на водородных топливных элементах



**Рис. 11.** Установки резервного энергообеспечения H<sub>2</sub>-ЕСОпому на основе твердополимерных ТЭ мощностью 1...5 кВт

электролитом, которые можно соединять с другими параллельно для наращивания мощности (до 30 кВт). Время автономной работы определяется запасом водорода в резервной емкости. Расчетный ресурс до 10 лет или 5000 включений/выключений.

Резервная автономная энергоустановка НИК «НЭП-1» электрической мощностью 1,0 кВт [17] предназначена для коммунальных нужд, а именно – для обеспечения электроэнергией и теплом жилых зданий, а также в качестве аварийного и резервного источника питания. Топливо – водород, который хранится в композитных баллонах под давлением до 45 МПа.

Отметим, что значимость энергоустановок на твердополимерных топливных элементах настолько велика, что даже в тех странах, где только недавно начаты работы в области топливных элементов, системам резервного энергообеспечения уделяется особое внимание. Примером может служить Армянская компания

H<sub>2</sub>-ЕСОпому, разработавшая установки резервного энергообеспечения на основе твердополимерных топливных элементов мощностью 1...5 кВт (рис. 11) [18].

Следует отметить, что вопросы обеспечения таких установок водородом (автономное хранение больших объемов водорода) могут создать существенные проблемы на их пути к рынку. Эффективным решением таких проблем может стать комбинированное питание этих энергоустановок: чистый водород на стадии экстренного пуска и водород, полученный конверсией метанола или природного газа, для обеспечения длительной работы. Экспериментальная установка мощностью 100 Вт на основе высокотемпературного (до 200 °С) твердополимерного ТЭ с конвертором метанола (разработка Института катализа РАН) была успешно продемонстрирована на Ганноверской ярмарке в 2007 г. [19]. В табл. 1 приведены ее параметры.

Таблица 1

Параметр	ElectroGen XtI
Выходная мощность, кВт	3...5
Масса батареи, кг	209
Масса установки, кг	680
Емкость топливного бака, л	220
Масса топливного бака, кг	193
Исходное топливо	Метанол 62 % / дист. вода 38 %
Расход топлива, л/ч	4,5
Время выхода на рабочий режим, с	90
Уровень шума, дБ	65
Габаритные размеры, мм	1473×889×2134
Рабочая температура, °С	от -40 до 50
Относительная влажность, %	0...95



а



б

Рис. 12. Зарядное устройство компаний Protonex (а) и Voller energy (б)

Существенный интерес также представляют портативные ТЭТПЭ, использующие водород в качестве топлива, и в первую очередь зарядные устройства для портативной оргтехники. На рис. 12а представлено зарядное устройство компании Protonex, мощностью 50...200 Вт, напряжение на выходе 20...30 В, номинальная продолжительность работы на одной заправке топливом 6...12 ч. Работает при температуре окружающей среды от  $-10$  до  $50$  °С. Масса топливной системы – 2,0 кг (из них 1,3 кг – масса топливного картриджа). Топливом является водород, получаемый из борогидрида натрия [20].

На рис. 12б представлено зарядное устройство компании Voller energy, мощностью 70 Вт, напряжении на выходе 13,8 В. Рабочая температура от  $5$  до  $40$  °С. Масса топливной системы 8 кг, размеры 178×448×410 мм. Топливом является водород чистотой 99,99 % (концентрация CO max 5 ppm) или гидридные соединения при давлении 1,6 МПа [21].

Применение ТЭТПЭ для децентрализованного энергообеспечения стационарных объектов развивается не столь интенсивно, однако системы с ТЭТПЭ, работающие на продуктах конверсии природного газа, успешно прошли натурные испытания.

Примером возможного использования ТЭТПЭ для энергообеспечения зданий и помещений может служить топливный элемент SU-1 с конвертором

природного газа производства компании Plug Power Corporation (рис. 13) [22, 23]. Его мощность составляет 5 кВт, рабочее напряжение 120/240 В, 60 Гц переменного тока. Топливный элемент установлен параллельно основной системе электроснабжения здания и работает при номинальной мощности 2,5 кВт. ТЭ снабжен счетчиком электроэнергии и газовым счетчиком, что позволяет оценить его эффективность. Топливный элемент предназначен только для электроснабжения здания, тепловая энергия не используется. Основные характеристики топливного элемента приведены в табл. 2.



Рис. 13. Размещение топливного элемента SU-1

Таблица 2

Параметр	Значение
Установочная электрическая мощность, кВт	5,0; 2,5; 4,0
Вырабатываемая электрическая энергия	120/240 В, 60 Гц
Потребляемое топливо	Природный газ
Выбросы, ppm	NO <sub>x</sub> <5, SO <sub>x</sub> <1
Уровень шума, дБ(А)	Меньше 70

Исследования показали, что стоимость 1 кВт·ч произведенной электроэнергии без учета затрат на обслуживание и амортизацию оборудования составляет 0,0766 долл. США за 1 кВт·ч (2002 г.) [23].

Следует отметить, что для децентрализованного энергообеспечения на основе возобновляемых источников энергии, где энергия аккумулируется

в виде водорода, ТЭТПЭ также считаются наиболее перспективными [24, 25].

Таким образом, ТЭТПЭ прошли успешные испытания практически во всех возможных сферах использования топливных элементов и, пожалуй, лишь в случае систем, комбинированных с конверторами топлива, они не выявили преимуществ перед другими, более высокотемпературными, ТЭ.

## Литература

1. [www.nedstack.com](http://www.nedstack.com)
2. <http://www.ballard.com>
3. Ballard Powers DaimlerChryslers Fuel Cell Vehicle on a 3,000 Mile Drive Across the United States // News Release. - June 4, 2002.
4. Одноместный автомобиль и автобус Citaro на топливных элементах // Автомобилестроение за рубежом. - 2003. - № 5. - С. 3.
5. [www.sl-power.com](http://www.sl-power.com)
6. [www.qttww.com](http://www.qttww.com)
7. [www.jreast.co.jp](http://www.jreast.co.jp)
8. [www.fuelcellpropulsion.org](http://www.fuelcellpropulsion.org)
9. [www.lemvigbanen.dk](http://www.lemvigbanen.dk)
10. [www.ivi.fraunhofer.de](http://www.ivi.fraunhofer.de)
11. [www.mhfca.org](http://www.mhfca.org)
12. [www.industry.siemens.com](http://www.industry.siemens.com)
13. [www.navantia.es](http://www.navantia.es)
14. [www.shipgaz.com](http://www.shipgaz.com)
15. Fuel Cell - HFP Brussels 17/18 March 2005 - EEV - Ref. PR0501855 - Issue1
16. [www.apc.com](http://www.apc.com)
17. [www.nic-nep.ru](http://www.nic-nep.ru)
18. [www.h2economy.com](http://www.h2economy.com)
19. [www.idatech.com](http://www.idatech.com)
20. [www.protonex.com](http://www.protonex.com)
21. [www.voller-energy.com](http://www.voller-energy.com)
22. [www.plugpower.com](http://www.plugpower.com)
23. Ft. Bragg PEM Fuel Cell Demonstration Program LOGAN Energy Corporation Initial Project Description September 5, 2002.
24. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Использование топливных элементов для энергоснабжения зданий // АВОК. - 2004. - № 2. - С. 52-62.
25. Михайлов А., Сайданов В., Ландграф И. Энергетические установки на базе топливных элементов. Перспективы применения // Новости Электротехники. - 2008. - №3 (51).

## Возможности повышения эксплуатационной топливной экономичности многотопливного дизеля изменением его активного рабочего объема

Н.Н. Патрахальцев, профессор РУДН, д.т.н.,  
Бехджуйан Хоссейн (Иран), аспирант РУДН,  
А.А. Савастенко, аспирант РУДН

Приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования возможностей повышения среднеэксплуатационной топливной экономичности дизеля, а также дизеля, работающего на спиртовом топливе (метанол). Показано, что методом регулирования дизеля на режимах малых нагрузок и изменением его активного рабочего объема, происходящим при отключении части цилиндров при реализации стандартного 13-ступенчатого испытательного цикла, можно добиться повышения экономичности как дизеля, так и спиртодизеля на 5...7 %.

### Ключевые слова:

дизель, альтернативные топлива, спиртодизель, среднеэксплуатационная экономичность, малые нагрузки, отключение цилиндров, дизель с изменяемым рабочим объемом.

**В** современных условиях, когда дизели транспортных средств форсируются по мощности для повышения их динамических качеств, все острее встает вопрос повышения топливной экономичности работы двигателей на режимах малых нагрузок и холостых ходов, доля которых существенно возрастает, что особенно характерно для напряженных городских условий движения. В этой связи представляется целесообразным вновь обратиться к известному методу повышения экономичности таких режимов путем регулирования двигателей отключением части цилиндров или циклов, называемому также методом регулирования двигателя изменением его активного рабочего объема [1, 2].

Актуальность проблемы использования в дизелях альтернативных топлив определяется как перспективностью замещения традиционных нефтяных топлив нетрадиционными, особенно возобновляемыми, так и необходимостью повышать экологические качества ДВС. При этом известно, что на режимах, характерных для городских условий, то есть на режимах малых нагрузок и холостых ходов, существенно ухудшаются экологические качества дизелей, в том числе и использующих альтернативные топлива. Следовательно, и в этих условиях целесообразно применение такого же метода.



В данной работе проведено исследование многотопливного дизеля MAN L9204FM с FM-процессом смесеобразования, способного работать как на дизельном топливе (ДТ), так и на спиртовом (Сп) – метаноле или этаноле. (В данном случае рассматривается работа дизеля на метаноле). Информация о характеристиках и прочих параметрах и показателях работы двигателя заимствована из публикации [3].

Дизель имеет отношение хода поршня к диаметру цилиндра  $S/D = 10/9,2$ , рабочий объем цилиндра  $V_h = 0,664 \text{ дм}^3$ ,  $n_{\text{ном}} = 3750 \text{ мин}^{-1}$ , степень сжатия  $\epsilon = 16$ . Благодаря сферической камере сгорания в цилиндре создается интенсивное вихревое движение заряда. Низкие цетановые числа метанола, а следовательно плохая самовоспламеняемость горючей смеси, низкая теплота сгорания, высокая теплота парообразования требуют повышенной теплоты для воспламенения смеси, что особенно сказывается при низких нагрузках и низких частотах вращения вала, то есть при сравнительно пониженном тепловом состоянии камеры сгорания (КС) и двигателя в целом. Для воспламенения спиртовых низкоцетановых топлив применено принудительное зажигание с помощью свечи, установленной в камере сгорания в зоне обогащения смеси.

Задачей исследования является определение цикловых (среднеэксплуатационные) удельных и часовых расходов дизельного и спиртового топлив при свойственных им показателях удельной теплоты сгорания, а также спиртового, приведенного к теплоте сгорания дизельного (Сп<sup>пр</sup>). Определение этих показателей необходимо провести как для полноразмерного дизеля, так и для дизеля, регулируемого изменением его рабочего объема, что достигается отключением подач топлива в определенное число цилиндров. В результате такого отключения активные цилиндры (то есть оставшиеся в работе) догружаются до повышенного уровня с тем, чтобы сохранился исходный уровень исходной малой нагрузки дизеля. Под малой обычно подразумевается нагрузка ниже ~50 % полной.

Для оценки показателей экономичности используются универсальные характеристики, на которых в координатах  $M_e$  или  $p_e - n$  нанесены параметрические кривые постоянных значений удельных эффективных расходов топлива ( $g_e = \text{const}$ ). Для двигателей, использующих альтернативные топлива, применяют параметрические кривые постоянных эффективных КПД двигателя ( $\eta_e = \text{const}$ ) или постоянных удельных эффективных расходов теплоты ( $q_e = \text{const}$ ).

Эффективность работы дизеля при всех работающих (активные) цилиндрах (то есть полноразмерного дизеля) отражают показатели эффективных мощности, крутящего момента, полной работы, выполняемой дизелем, и среднего давления ( $N_e, M_e, L_{e \text{ полн}}$  и  $p_e$ ). При регулировании дизеля на режимах малых нагрузок (МН) методом изменения его рабочего объема подразумевается, что исходный режим МН полноразмерного дизеля сохраняется и при отключении части цилиндров, то есть сохраняются те же исходные  $N_e, M_e, L_{e \text{ полн}}$ . Величина  $p_e$ , строго говоря, свидетельствует об эффективности одного активного цилиндра или всего двигателя при всех работающих цилиндрах. Но применить это  $p_e$  для характеристики двигателя с частью отключенных цилиндров практически нельзя. Зато можно оценить работу всего двигателя, действующего при некотором числе  $z$  активных цилиндров, выполняемой им удельной работой ( $L_{e \text{ уд}}$ ), которая представляет собой отношение полной эффективной работы, выполняемой дизелем, к рабочему объему активных (не выключенные) цилиндров.

Методика оценки экономичности двигателя, регулируемого изменением активного рабочего объема, заключается в следующем. Пусть режим полноразмерного

дизеля (все  $i$  цилиндров активны) задан на универсальной характеристике через среднее эффективное давление  $p_e$ . Тогда полная эффективная работа, выполняемая двигателем, составляет

$$L_{e \text{ полн}} = 500 p_e i V_h, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $V_h$  – рабочий объем одного цилиндра,  $\text{дм}^3$ .

Удельная работа полноразмерного дизеля равна

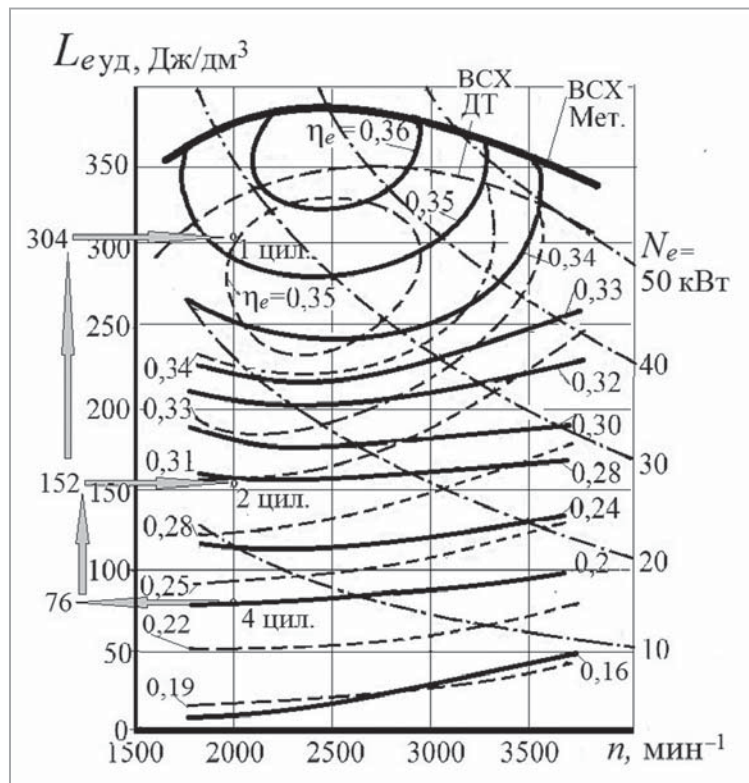
$$L_{e \text{ уд}} = 500 p_e, \text{ Дж/дм}^3. \quad (2)$$

Для дизеля с числом активных цилиндров  $z < i$  получаем:

$$L_{e \text{ уд}} = 500 p_e i V_h / (z V_h) = 500 p_e i/z, \text{ Дж/дм}^3. \quad (3)$$

Приведем пример реализации методики. Пусть известна универсальная характеристика исследуемого дизеля, заимствованная из опубликованной работы [3] и представленная в координатах  $p_e - n$ . В соответствии с методикой и приведенными соотношениями характеристика снабжается ординатой удельной работы  $L_{e \text{ уд}}$ , выполняемой полноразмерным дизелем. При отключении части цилиндров на режиме МН полная работа должна сохраняться, а удельная – изменяться в соответствии с рабочим объемом активных цилиндров  $z$ . (Методика применима при условии, что абсолютные значения механических потерь не зависят от нагрузки, а только от частоты вращения. Адекватность методики была ранее подтверждена [4] сравнением с результатами экспериментальных исследований).

Допустим, что дизель на всех четырех цилиндрах ( $i = 4$ ) работает на режиме МН со средним эффективным давлением  $p_e = 0,151$  МПа при  $n = 2000$   $\text{мин}^{-1}$  (рис. 1). Удельная работа, выполняемая на данном режиме полноразмерным дизелем, равна  $76$  Дж/дм<sup>3</sup>.



**Рис. 1.** Универсальная характеристика объекта исследования дизеля MAN, снабженная ординатой удельной работы  $L_{e \text{ уд}}$  (параметрические кривые постоянных мощностей  $N_e$  относятся только к полноразмерному двигателю)

С уменьшением числа  $z$  активных цилиндров удельная работа возрастает, мощность дизеля сохраняется неизменной. Точки пересечения линий данной удельной работы  $L_{e\text{ уд}}$  с параметрическими кривыми постоянных эффективных КПД дают значения искомым  $\eta_e$  (табл. 1). При этом, поскольку параметрические кривые имеют конечный шаг чередования, для определения промежуточных значений  $\eta_e$  применяется линейное интерполирование.

Таблица 1

**Изменение параметров дизеля при уровне малой нагрузки ~20 % и постоянной частоте вращения при изменении числа активных цилиндров**

$n=2000 \text{ мин}^{-1}$				
$z$	$L_{e\text{ уд}}$	$N_e$	$\eta_{e\text{ ДТ}}$	$\eta_{e\text{ Сп}}$
4	76	6,68	0,24	0,2
3	101,3		0,265	0,22
2	152,0		0,308	0,278
1	304,0		0,349	0,352

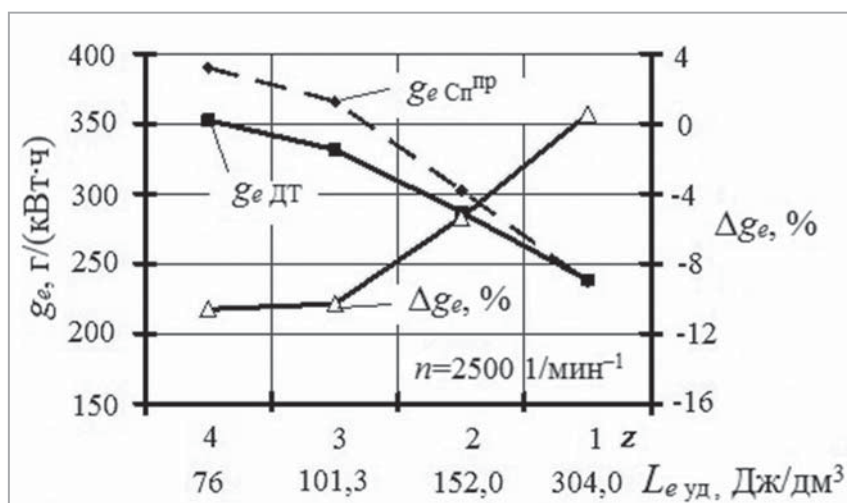
По универсальной характеристике при разной удельной работе двигателя получаем  $\eta_{e\text{ ДТ}}$  и  $\eta_{e\text{ Сп}}$  соответственно при работе на дизельном топливе и на спирте при разном числе активных цилиндров  $z$ . Очевидные пересчеты полученных  $\eta_e$  в удельные и часовые расходы топлива ( $g_e$  и  $G_m$ ) позволяют построить множество характеристик (рис. 2). При этом для сравнения спиртодизеля с дизелем целесообразно выполнить приведение расходов спирта к теплоте сгорания ДТ по соотношениям

$$g_{e\text{ Сп}}^{\text{пр}} = 3600 / (\eta_{e\text{ Сп}} H_{u\text{ ДТ}}) \text{ или } g_{e\text{ Сп}}^{\text{пр}} = (g_{e\text{ Сп}} H_{u\text{ Сп}}) / H_{u\text{ ДТ}}, \quad (4, 5)$$

где удельная теплота сгорания ДТ равна  $H_{u\text{ ДТ}}=42,55$  МДж/кг, а удельная теплота сгорания спиртового топлива равна  $H_{u\text{ Сп}}=20,1$  МДж/кг.

Относительное изменение удельного эффективного расхода дизельного топлива по отношению к спиртовому (приведенное) определяется по соотношению

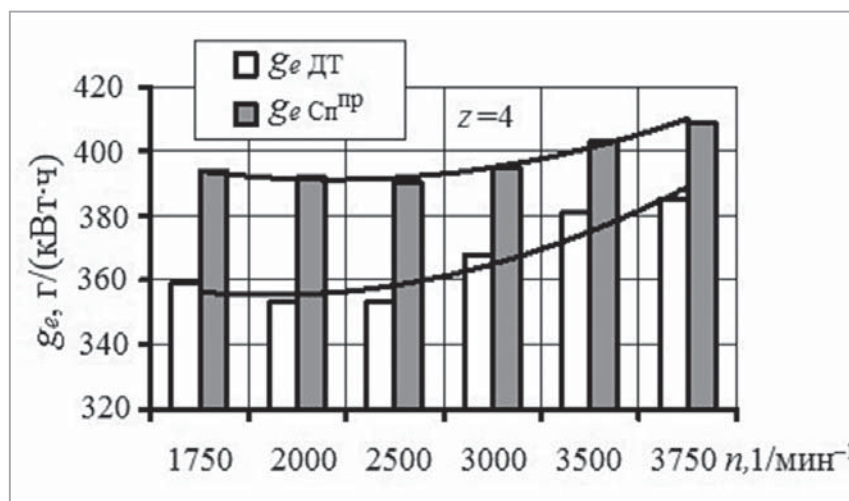
$$\Delta g_e = ((g_{e\text{ ДТ}} - g_{e\text{ Сп}}^{\text{пр}}) / g_{e\text{ ДТ}}) 100 \text{ \%}.$$



**Рис. 2.** Зависимость удельных расходов топлив  $g_{e\text{ ДТ}}$  и  $g_{e\text{ Сп}}^{\text{пр}}$  от удельной работы  $L_{e\text{ уд}}$  дизеля MAN или числа активных цилиндров  $z$  на режиме с нагрузкой, составляющей ~20 % от полной, и частоте вращения вала  $n=2500 \text{ 1/мин}^{-1}$

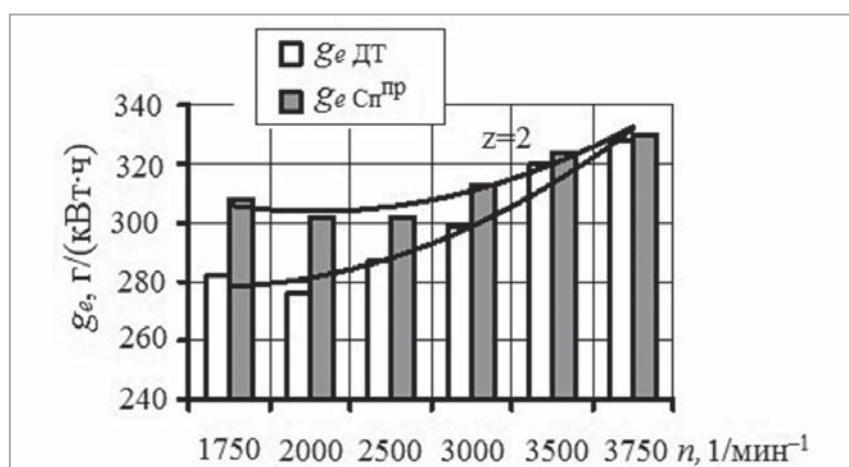
График показывает, что удельные расходы спиртового топлива, приведенного к теплоте сгорания дизельного ( $g_{e_{\text{Сп}}^{\text{пр}}}$ ), только при высокой удельной работе сближаются со значениями удельных расходов ДТ. Чем ниже удельная работа, выполняемая двигателем, тем существеннее ухудшение экономичности спиртодизеля по сравнению с дизелем.

Это объясняется пониженным тепловым состоянием цилиндров при реализации спиртодизелем режимов малой нагрузки.



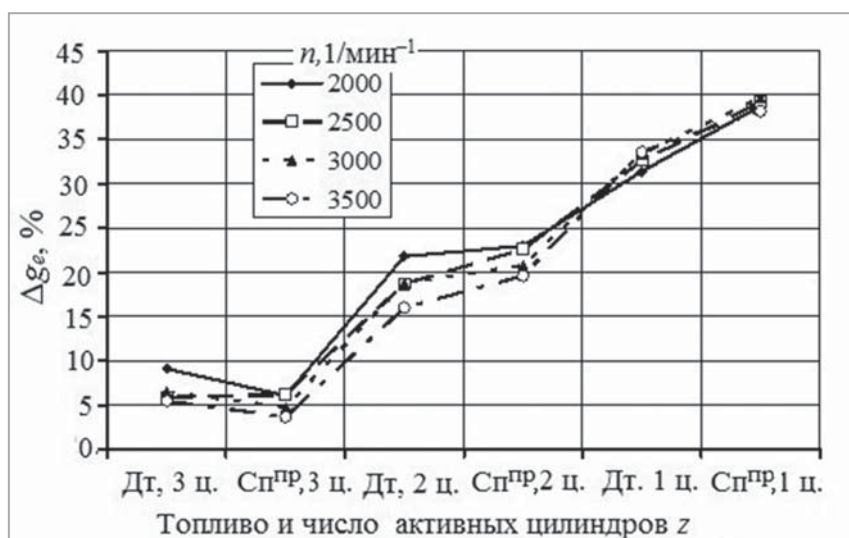
**Рис. 3.** Сравнение удельных расходов ДТ  $g_{e_{\text{ДТ}}}$  и спиртового топлива (после приведения к теплоте сгорания ДТ)  $g_{e_{\text{Сп}}^{\text{пр}}}$  при разных скоростных режимах полноразмерного дизеля MAN ( $z = 4$ ) с нагрузкой около 20 % от полной

На рис. 3 видно, что удельные расходы имеют повышенные значения при минимальных и максимальных частотах вращения. При средних скоростных режимах отмечается минимум изменения  $g_e$ . Объясняется это, очевидно, выбором оптимальных регулировочных параметров дизеля для наиболее характерных скоростных режимов его работы. При отключении двух цилиндров (рис. 4) указанная тенденция практически сохраняется.



**Рис. 4.** Сравнение удельных расходов ДТ  $g_{e_{\text{ДТ}}}$  и спиртового топлива (после приведения к теплоте сгорания ДТ)  $g_{e_{\text{Сп}}^{\text{пр}}}$  при разных скоростных режимах дизеля MAN при числе активных цилиндров  $z = 2$  с нагрузкой около 20 % от полной

На рис. 5 показано, что при нагрузке ~20 % и разных частотах вращения ожидаемые относительные снижения расхода топлива ( $\Delta g_e$ ) при отключении части цилиндров увеличиваются с уменьшением числа активных цилиндров, то есть с ростом удельной работы, выполняемой двигателем. При сравнительно низких удельных работах ( $z = 3$ ) эффективность метода для спиртодизеля несколько ниже, чем для дизеля. При двух активных цилиндрах эффективность примерно одинакова, а при высокой удельной нагрузке, то есть при работе на одном цилиндре, эффективность метода для спиртодизеля оказывается более высокой, достигая 39 %, в то время как для дизеля она составляет 32 %. Очевидно, что здесь сказывается влияние теплового состояния активных цилиндров. Можно сделать вывод, что для многотопливного дизеля при малых нагрузках более целесообразно использовать ДТ, переходя на спиртовое топливо при повышении полной и удельной работ.



**Рис. 5.** Зависимость снижения удельного эффективного расхода топлива дизелем MAN от числа активных цилиндров ( $z$ ) при разных частотах вращения вала и уровне малой нагрузки около 20 % от полной

Таким образом, в реальных условиях ожидаемая экономия топлива зависит от доли режимов с малой нагрузкой во всем времени эксплуатации. Статистически достоверные распределения долей режимов работы дизелей в различных условиях эксплуатации дают стандартные испытательные циклы. Их появление и назначение было связано прежде всего с решением задач определения показателей токсичности выбросов. Но одновременно они стали применяться и для определения достоверных расходов топлива при реализации циклов на испытательных стендах.

Типичным испытательным циклом является 13-ступенчатый испытательный цикл [5]. Цикловой (среднеэксплуатационный) удельный эффективный расход топлива определяется по соотношению

$$g_{e\text{ц}} = \frac{\sum_{j=1}^{13} (G_{\tau j} K_j)}{\sum_{j=1}^{13} (N_{ej} K_j)}, \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч}), \quad (7)$$

где  $G_{\tau j}$  – часовой расход топлива двигателем на  $j$ -м режиме, кг/ч.

Цикловой (среднеэксплуатационный) часовой расход топлива определяется

соотношением

$$G_{т.ц} = \sum_{j=1}^{13} (G_{т.ж} K_j), \text{ кг/ч.} \quad (8)$$

При анализе результатов исследования нужно иметь в виду, что коэффициент загрузки дизеля  $K_3 = \Sigma(N_{e_j} K_j) / N_{e_{ном}}$  (как отношение суммы мощностей в ступенях цикла с учетом весового фактора  $K_j$ ) при реализации испытательного цикла и работе на ДТ составляет  $K_3 = 0,46$ , а при работе на спиртовом топливе  $K_3 = 0,42$ . (Применение спиртового топлива позволило форсировать дизель по составу смеси благодаря снижению дымности ОГ и следовательно по мощности). То есть среднеэксплуатационная загрузка сравнительно велика, если учесть, что коэффициент загрузки дизеля городского автобуса достигает значения 0,22.

Рассмотрим два варианта регулирования двигателя: вариант 1 – при малой нагрузке работа на двух цилиндрах; вариант 2 – в зависимости от величины нагрузки работа двигателя может происходить на одном, двух или трех цилиндрах (при высокой нагрузке в обоих случаях активны все четыре цилиндра).

В табл. 2, 3 приведен пример обработки результатов анализа показателей спиртодизеля для второго варианта регулирования. Расчет показывает, что применение первого варианта регулирования (отключение двух цилиндров) обеспечивает 5 % экономии спиртового топлива по сравнению с полноразмерным двигателем. Второй вариант регулирования (изменение числа активных цилиндров в зависимости от текущей нагрузки) дает экономию 7,1 % топлива. То есть переход от первого ко второму варианту регулирования повышает экономию на ~2 %.

**Пример обработки результатов анализа данных  
при регулировании спиртодизеля по второму варианту**

Таблица 2

№ j	n	N <sub>e</sub> , %	K <sub>j</sub>	N <sub>e</sub> ВСХ	N <sub>ej</sub> , кВт	N <sub>ej</sub> ·K <sub>j</sub>	p <sub>e</sub>	M <sub>e</sub>	L <sub>полн</sub>
1	1750	2	0,083	27,7	0,55	0,046	0,014	3,0	19,0
2	2500	10	0,08	42,7	4,27	0,342	0,077	16,3	102,4
3	2500	25	0,08	42,7	10,68	0,854	0,193	40,8	256,1
4	2500	50	0,08	42,7	21,35	1,708	0,386	81,6	512,2
5	2500	75	0,08	42,7	32,03	2,562	0,579	122,3	768,3
6	2500	100	0,25	42,7	42,70	10,675	0,772	163,1	1024,4
7	1750	2	0,083	27,7	0,55	0,046	0,014	3,0	19,0
8	3750	100	0,1	56,1	56,10	5,610	0,676	142,9	897,2
9	3750	75	0,02	56,1	42,08	0,842	0,507	107,2	672,9
10	3750	50	0,02	56,1	28,05	0,561	0,338	71,4	448,6
11	3750	25	0,02	56,1	14,03	0,281	0,169	35,7	224,3
12	3750	10	0,02	56,1	5,61	0,112	0,068	14,3	89,7
13	1750	2	0,083	27,7	0,55	0,046	0,014	3,0	19,0

Таблица 3

№ j	Алгоритм	Параметры						Сп <sup>сп</sup>		
	z	z V <sub>h</sub>	L <sub>уд</sub>	η <sub>ej</sub>	g <sub>ej</sub>	G <sub>Tj</sub>	G <sub>Tj</sub> K <sub>γ</sub>	g <sub>ej</sub>	G <sub>Tj</sub>	G <sub>Tj</sub> K <sub>γ</sub>
1	1	0,664	28,6	0,14	1279	0,7	0,059	604	0,3	0,028
2	1	0,664	154,3	0,28	640	2,7	0,219	302	1,3	0,103
3	1	0,664	385,7	0,37	491	5,2	0,419	232	2,5	0,198
4	2	1,328	385,7	0,37	491	10,5	0,838	232	4,9	0,396
5	3	1,992	385,7	0,37	491	15,7	1,257	232	7,4	0,594
6	4	2,656	385,7	0,37	491	21,0	5,238	232	9,9	2,474
7	1	0,664	28,6	0,14	1279	0,7	0,059	604	0,3	0,028
8	4	2,656	337,8	0,34	531	29,8	2,982	251	14,1	1,408
9	3	1,992	337,8	0,34	531	22,4	0,447	251	10,6	0,211
10	2	1,328	337,8	0,34	531	14,9	0,298	251	7,0	0,141
11	1	0,664	337,8	0,34	531	7,5	0,149	251	3,5	0,070
12	1	0,664	135,1	0,24	746	4,2	0,084	353	2,0	0,040
13	1	0,664	28,6	0,14	1279	0,7	0,059	604	0,3	0,028

По результатам расчетов получены значения цикловых (среднеэксплуатационные) удельных расходов топлив при разных вариантах регулирования дизеля (рис. 6) и возможные уменьшения удельных расходов благодаря применяемым методам регулирования (рис. 7).

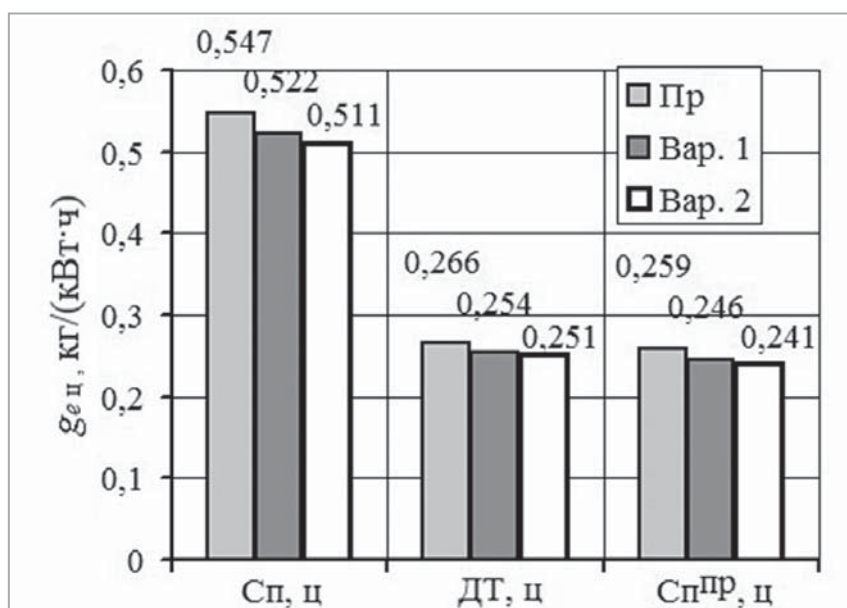
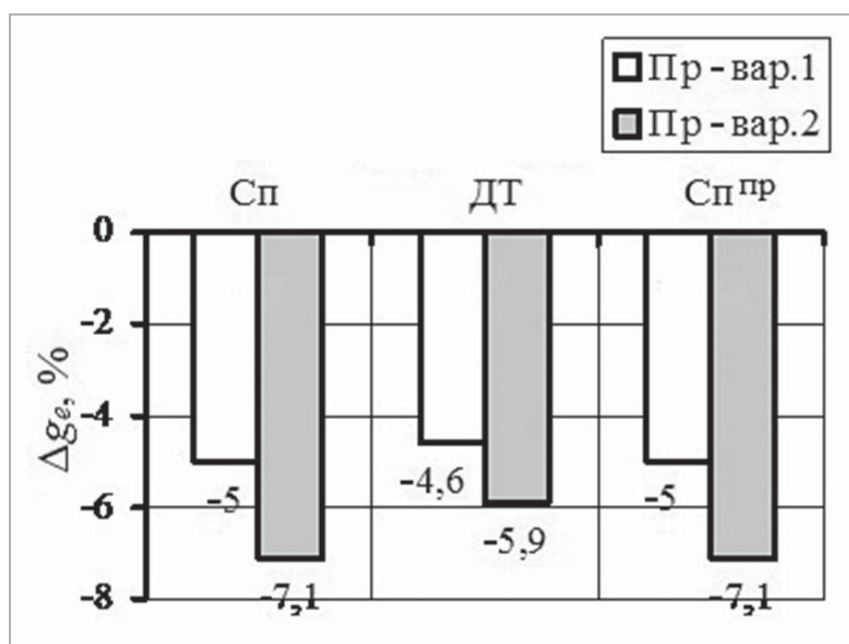


Рис. 6. Влияние варианта регулирования дизеля MAN (Пр – полноразмерный дизель) на изменение циклового (среднеэксплуатационный) удельного эффективного расхода топлива при реализации дизелем 13-ступенчатого ездового испытательного цикла и работе на ДТ или спирте (Сп<sup>сп</sup> – спирт, приведенный к теплоте сгорания ДТ)



**Рис. 7.** Зависимости снижения циклового (среднеэксплуатационный) часового расхода топлива  $g_e$  от вида топлива и варианта алгоритма регулирования дизеля MAN в сравнении с расходами полноразмерного дизеля

Таким образом, исследование показало, что регулированием дизеля методом изменения его рабочего объема можно достичь среднеэксплуатационной экономии топлива. Возможность повышения экономичности существенно зависит от загрузки двигателя. Так, при постоянной нагрузке ~20 % от полной можно ожидать порядка 30 % экономии топлива. При нагрузке на уровне 13-ступенчатого испытательного цикла ожидаемая экономия может составить 5...7 %, причем более высокие значения достигаются при регулировании дизеля варьированием активного рабочего объема в зависимости от фактической нагрузки.

## Литература

1. Патрахальцев Н.Н., Аношина Т.С., Камышников Р.О. Снижение расхода топлива и токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок при его регулировании изменением рабочего объема // Двигателестроение. – 2015. – № 1 (259). – С. 26-29.
2. Vibration reduction in a variable displacement engine using pendulum absorbers / T.M. Nester, A.G. Haddow, S.W. Shaw, J.E. Brevick, V.J. Borovski // SAE Technical Paper Series. – 2003. – 2003-01-1484.
3. Neitz A. Die Eignung von M.A.N.-FM-Dieselmotoren für den Betrieb mit reinen Alkoholkraftstoffen / A. Neitz, F. Chmela // MTZ. – 1981. – Jg. 42. – № 12. – S. 495-499.
4. Патрахальцев Н.Н., Страшнов С.В., Мельник И.С., Корнев Б.А. Регулирование дизеля изменением его рабочего объема // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 1. – С. 19-22.
5. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для высшей школы. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Академический Проект, 2004. – 400 с.



## Новый формат выставки GasSuf

64

18-20 октября 2016 г. в Москве (КВЦ «Сокольники», павильон 4) состоится 14-я Международная выставка газобаллонного, газозаправочного оборудования и техники на газомоторном топливе. На вопросы корреспондента, касающиеся проведения мероприятия, отвечает директор выставки Раиса ГАЗАРЯН.



*Корр. Что представляет собой выставка GasSuf?*

**Раиса Газарян.** GasSuf – ежегодная в России международная выставка газобаллонного, газозаправочного оборудования и техники на газомоторном топливе. Благодаря этому мероприятию специалисты могут ознакомиться с действующим и приобрести современное газобаллонное, газозаправочное оборудование и серийную технику на газомоторном топливе от ведущих российских и зарубежных производителей. Представители дилерских компаний имеют возможность найти новых поставщиков и расширить линейку выпускаемой продукции.

*Корр. Какие компании будут участвовать в выставке и какое число посетителей предполагается? Каковы изменения по сравнению с прошлыми годами?*

**Раиса Газарян.** В выставке традиционно принимают участие ведущие производители и поставщики пассажирского и грузового автотранспорта, серийных автомобилей и сельскохозяйственной техники на газомоторном топливе, газобаллонного оборудования (ГБО), электроники для автомобильного газового оборудования, оснащения и готовых решений для автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС).

Выставочная экспозиция выставки GasSuf в этом году будет представлена в новом формате. Ведущие компании отрасли продемонстрируют полный цикл производственной цепочки. Это будут следующие разделы:

- образцы газозаправочной инфраструктуры (НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА», МГПЗ, Fornovo Gas, Graf, Schwelm, Сервис-АРМ, «Шельф»);
- транспорт на газомоторном топливе («Группа ГАЗ», «РаритЭК»);
- газобаллонное оборудование («Балсити», «Газпарт», «Русские цилиндры», «Еврогалс»).

Хочется отметить, что интерес к выставке со стороны посетителей возрос – число зарегистрировавшихся посетителей на данный момент уже опережает показатели прошлого года на 10 %. К этому числу ожидается приток новых посетителей по сравнению с выставками прошлых лет.



На выставке GasSuf



Газовая техника Группы ГАЗ

**Корр.** Много ли дебютантов окажется на выставке в этом году?

**Раиса Газарян.** Потребление природного газа в качестве моторного топлива в России устойчиво растет, и если в прошлом году в связи с нестабильной экономической ситуацией некоторые компании отменили свое участие, то в этом году мы наблюдаем положительную динамику по числу участников.

Многие экспоненты увеличивают

площадь стендов с целью представить потенциальным клиентам большее количество техники и оборудования.

В этом году в выставке принимают участие новые компании – производители электронного оборудования для ГБО, оборудования для АГНКС, систем для хранения и добычи КПП. Среди них следующие: Kanaiya Brass Products, АЕВ S.p.a «Грант», «КПП комплект», Fluid Line – Мобильные системы газоснабжения, «Фаргаз» и другие.

**Будем рады видеть вас на выставке GasSuf!  
Для бесплатного посещения выставки получите  
электронный билет на сайте [www.gassuf.ru](http://www.gassuf.ru)**

# Как человек приручал природный газ

66

Е.Н. Пронин, начальник отдела ООО «Газпром экспорт»

**П**риродный газ в разных своих проявлениях покорился человеку тысячи лет назад. Вероятно, сначала его использовали в духовных целях. В местах, где газ выходил на поверхность и возгорался по непонятным тогда причинам, древние люди устраивали святилища. Считалось, что эти огни имеют божественное происхождение и являются зримым образом Бога. Один из таких всемирно известных храмов Атешгях (Atesgah) расположен в Азербайджане на Апшеронском полуострове, в 30 км от центра Баку. Он возник в XVII-XVIII вв. на месте таких «вечных» неугасимых огней – горящих выходов естественного газа, благодаря чему храм и носит название Атешгях, что означает «Дом огня» или «Место огня».

С древних времен природный газ имеет для человечества не только духовное, но также промышленное и бытовое значение. Наши предки научились использовать его для отопления, приготовления пищи, варки соли, обжига извести и даже для навигации: факелы горящих газов на побережье Каспийского моря в начале нашей эры служили маяками для моряков. Известно, что в древнем Китае для транспортировки газа от мест выхода на поверхность до потребителя (как мы сказали бы сегодня) строили бамбуковые газопроводы.

Относительно недавно – в XVIII в. – искусственная разновидность природного газа, получаемая из угля, стала применяться для освещения. Этот газ так и называли – светильный. А в середине XIX в. (около 1860 г.), благодаря инженеру Этьену Ленуару, газ освоил еще одну сферу: он стал топливом для первых самоходных транспортных средств. Точнее, Ленуар сначала создал первый в мире транспортный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) именно потому, что для него уже было топливо: в то время – светильный газ.

Кстати, ради исторической правды нужно сказать, что этот первый ДВС был скорее водородным, чем метановым. В состав светильного газа входили водород

(до 50 %), метан (около 30 %) и СО (примерно 9 %). Тем не менее первый двигатель был газовым! После доработки Этьен Ленуар установил его на самодвижущуюся повозку, которую он назвал «Гиппомобиль» – предок современного автомобиля. Следовательно, первый автомобиль также был газовым.

Можно обоснованно утверждать, что Ленуар осуществил первый в мире газовый автопробег (который теперь называется «Голубой коридор») из центра Парижа в тогдашний пригород Жуэньвиль-Ле-Пон, что в 12 км от столицы. Это произошло в 60-х гг. XIX в. Франция гордится Этьеном Ленуаром. В его честь названы улицы в нескольких городах страны.

Через несколько лет в 1872 г. австрийский инженер Пауль Гейнлейн оснастил модифицированным двигателем Ленуара свой дирижабль. Так природный газ впервые применили в авиации. Длина оболочки дирижабля составляла около 50 м, максимальный диаметр – 9 м, а объем – 2407 м<sup>3</sup>. Он приводился в движение четырехцилиндровым двигателем Ленуара на светильном газе мощностью 5 л.с.



Трамвай на газе

Диаметр винта – 4,75 м, скорость вращения 40 оборотов в минуту. Расход газа составлял 7 м<sup>3</sup>/ч. В декабре 1872 г. дирижабль развил скорость равную 19 км/ч. Современники отмечали устойчивость и хорошую управляемость дирижабля в безветренную погоду.

Применение газа на железной дороге также началось в конце XIX в. В 1894 г. в Германии и в 1895 г. во Франции успешно эксплуатировались трамваи на светильном газе. В Берлине, Дрездене и Дессау их общий пробег составил около 500 тыс. миль. По официальным немецким данным, эксплуатационные затраты трамвая на светильном газе на милю были в 1,4 раза меньше, чем у электрического, и в 2,2 раза меньше, чем у традиционной конки.

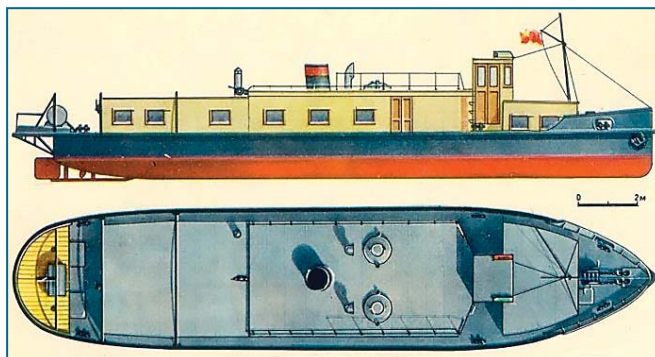
А вот уже в 1896 г. в Великобритании в Блэкпуле (пригород Ливерпуля) началась эксплуатация трамваев на КПГ. Уже тогда англичане отмечали, что газовые трамваи не чадят, работают мягче и тише, чем паровые. Трамвай с полной массой 7 т, оборудованный двухцилиндровым двигателем цикла Отто с искровым зажиганием мощностью 15 л.с., развивал скорость 12...14 миль/ч, маховик двигателя в движении развивал скорость 260, а на холостом ходу 80 оборотов в минуту. Трамвай был рассчитан на 40 пассажиров в салоне и 24 на открытой верхней площадке. Запас газа на борту был незначительным: его хватало всего на восемь миль. В депо была построена компрессорная станция с подводным газопроводом. Мощность компрессора составляла 8 л.с., время заправки трамвая газом – менее минуты.

Итак, вторая половина XIX в. – это период рождения природного газа как моторного топлива для автомобильного, воздушного и железнодорожного транспорта.

Этот экскурс был бы незавершенным без истории о начале применения природного газа на водном транспорте. В мае 1982 г. советский журнал «Техника молодежи» писал, что в 1934 г. в целях экономии жидкого и твердого топлива на Московской судостроительной верфи (МСВ) создали газогенераторную установку для серийного тракторного двигателя ЧТЗ-С-60, который использовали также и для опытного катера-газохода. В навигацию 1935 г. несколько газовых судов совершили пробные походы до Горького, а затем и до Ленинграда. Ну чем не «Голубой коридор» на воде?

Газовые суда марки МСВ оказались довольно надежными, простыми по конструкции и в эксплуатации. Началась серийная постройка газогенераторных плавсредств с одним и двумя тракторными двигателями.

К примеру, деревянный катер МСВ-33 с традиционными гребными колесами по мощности силовой установки (120 л.с.) не уступал обычным речным буксирам, но в отличие от них не нуждался в угле или солярке.



Речной буксир с газогенераторной силовой установкой (рис. из «Техники молодежи»): длина 21,7 м; ширина 4,4 м; осадка 0,14 м (нос) и 0,56 м (корма); водоизмещение 28 т; общая мощность двигателей 100 л.с.; экипаж 9 чел.

В 1936 г. по поручению Наркомата водного транспорта Западно-Сибирское речное пароходство построило газогенераторные буксирные катера для работы на Оби. Они были оборудованы газогенератором МСВ-84 с керамической камерой сгорания, холодильником-очистителем газа и сухим фильтром. Рядом с машинным отделением находился бункер объемом 27 м<sup>3</sup>, вмещавший трехсуточный запас топлива (газогенератор ежедневно поглощал кубометр хвойных чурок). По сравнению с паровыми буксирами силовая установка газоходов оказалась не только значительно легче, но и в два раза экономичнее, а деревянные чурки были намного дешевле солярки и мазута. Эти суда получили широкое распространение, и к 1 января 1941 г. в СССР на газе работал целый флот – 469 (!) газоходов разного назначения. Общая мощность их силовых установок составляла 38 118 л.с.

Можно обоснованно утверждать, что впервые газовое топливо на водных судах в массовом порядке было применено в России!

Говоря о применении газогенераторного транспорта, нельзя не напомнить, что к концу Великой Отечественной войны в СССР таких средств было вдвое больше, чем сегодня в России машин на метане, – 200 тыс. газогенераторных автомобилей, тракторов, передвижных электростанций, катеров, мотовозов и других установок.

## Балтийские СПГ-коридоры

68

Компания Gasum в сентябре 2016 г. откроет первую в Финляндии КриоАГНКС для грузовых автомобилей. Станция строится рядом с портом города Турку. Она оборудована одним постом для СПГ и двумя двухпостовыми колонками для КПГ. Заправка в Турку одна из четырех в коридоре Турку – Хельсинки – Вантаа – Ювяскюля. Половину средств (2,5 млн евро) на строительство этих КриоАГНКС выделил Евросоюз, поскольку данные направления перевозок относятся к основным транспортным коридорам TEN-T. В перспективе предполагается использовать эти станции для заправки автомобилей сжиженным биометаном.

В ближайшие 10 лет компания Gasum намерена увеличить свою газозаправочную сеть до 35 станций.

Турку является привлекательным местом для начала транспортного СПГ-коридора по ряду причин. Здесь расположен порт, в который уже приходит морской паром Viking Grace, работающий на СПГ. Число судов на сжиженном метане будет расти. Отсюда по суше отправляются грузы, прибывшие морем.

Представляется целесообразным продлить этот СПГ-коридор от Хельсинки в Россию и далее в Прибалтику, Польшу, Германию, Чехию и Словакию. Поскольку инфраструктура СПГ активно развивается, предпосылки для организации движения газовых грузовиков по Европе в наличии:

- **Торфяновка.** ООО «Газ-Ойл» завершает строительство многотопливной станции для реализации наряду с традиционными видами топлива СУГ, КПГ и СПГ. Станция расположена очень удобно: непосредственно на трассе Е-18.

- **Петергоф.** ООО «Газпром газэнергосеть» на АГНКС-8 после реконструкции возобновило сжижение природного газа (до 1 т/ч). Там осуществляется налив криоцистерн, однако заправить грузовик пока нельзя. Требуется сооружение заправочной колонки.



Так может выглядеть СПГ-коридор в ближайшем будущем (MetanoGraph)

- **Кингисепп.** Компания «Криогаз» (дочернее общество Газпромбанка) получает сжиженный метан (до 1 т/ч) для зарубежных потребителей. Но и здесь пока нельзя заправить автомобиль.

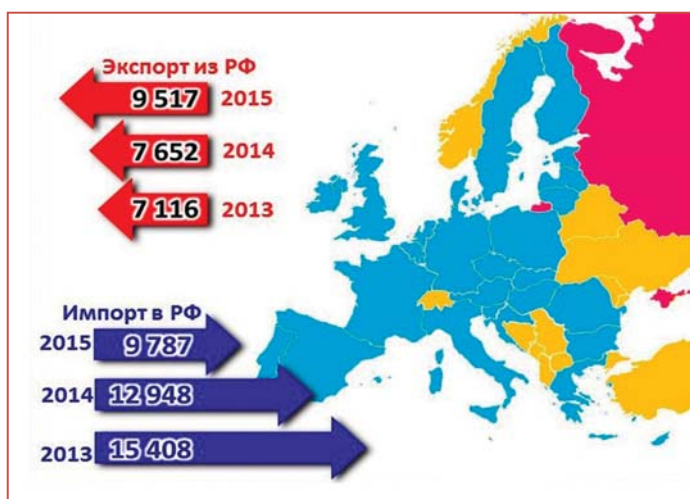
- **Псков.** Комплекс сжижения метана, введенный в эксплуатацию в мае 2016 г. (22,3 тыс. т/год), не оборудован заправочной колонкой.

- **Калининград.** Завод малотоннажного получения СПГ (3 т/ч) также не имеет возможности заправлять грузовики сжиженным метаном.

Таким образом, автомобильный СПГ-коридор от Турку до Санкт-Петербурга можно запускать уже сейчас и в ближайшей перспективе дотянуть его до Пскова и Кингисеппа при условии установки раздаточных колонок. Продолжение коридора до Калининграда и далее в Польшу зависит от строительства КриоАЗС в прибалтийских странах.

Представляется целесообразным стыковать транспортные СПГ-коридоры, создаваемые в Евросоюзе, с коридорами стран Таможенного союза.

Несмотря на то, что с 2013 г. общий объем автомобильных грузоперевозок между Россией и странами ЕС сократился на 14 % (из России в ЕС вырос на 34 %, а из ЕС в Россию сократился на 36 %), у сжиженного природного газа в качестве топлива для грузового автотранспорта благоприятные перспективы.



Автомобильные перевозки между РФ и ЕС, тыс. т (MetanoGraph)

Е.Н. Пронин по материалам <http://www.gasum.com/> <http://www.telsgroup.ru/>

<http://www.ngvglobal.com/> <http://ec.europa.eu/eurostat/>

## Новая техника на СПГ

Польская компания Cryogas M&T Poland (Группа «Криогаз») совместно с Iveco Poland в течение полугода осуществляла демонстрационную эксплуатацию трех грузовиков Stralis на СПГ.

Группа Iveco обеспечила автомобили и их техническое обслуживание, а Cryogas – их заправку сжиженным природным газом. Третьим участником проекта стала компания IKEA Distribution North Europe, которую и обслуживают газовые тягачи Iveco. Главной целью Группы IKEA было установить, действительно ли использование СПГ на грузовиках позволяет сократить выбросы CO<sub>2</sub>.



Грузовики Stralis на СПГ



Цистерна с СПГ

Демонстрация проходила в одном из транспортно-логистических центров IKEA в Ярошти, что в 40 км южнее Лодзи. В опытной эксплуатации участвовали три тягача Ivesco Stralis AT 440S33 TP LNG с двигателем Cursor 8 NG мощностью 243 кВт, соответствующим нормам выбросов Евро-6. Пробег каждого из них составил 40 тыс. км.

Средний расход топлива был на уровне 24,9 кг СПГ на 100 км при массе груза 15,3 т. Для сравнения – расход дизельного топлива при таких же условиях составляет 30,4 л на 100 км. Максимальная дальность пробега на одну заправку топливом грузовика в данной конфигурации – 750 км: 600 км на СПГ + 150 км на КПГ.

Каждый автомобиль был оборудован криогенным баком вместимостью 510 л и кассетой из четырех 70-литровых баллонов для КПГ. В ближайшем будущем ожидается выпуск тягача с дальностью пробега на одной заправке 1500 км и мощностью двигателя 294 кВт.

Выбросы CO<sub>2</sub> были сокращены на 7 %, а затраты на топливо – на 30 %. Одним из результатов демонстрации стал вывод о том, что переход на природный газ позволяет применять менее дорогостоящую и сложную систему очистки выхлопных газов. Также отпадает необходимость использования мочевины AdBlue.



Такой будет сеть КриоАЗС в Польше в 2025 г.

Для заправки газомоторной техники в Польше предполагается создать к 2025 г. сеть КриоАЗС на трассах А, А2, S3, А4, S7, S8 и S61.

Е.Н. Пронин по материалам <http://www.gnmagazine.com/>, <http://www.cryogas.pl>

## Американцы берут пример с России

С 30 мая по 10 июня 2016 г. в США был проведен автопробег автомобилей на природном газе «Автопробег на КПГ от моря до моря» (CNG from Sea to Shining Sea Road Rally). Это – американский аналог российского газового автопробега «Голубой коридор». Любопытно, что проходил он практически в те же дни, что и наш юбилейный десятый.

Американский автопробег стартовал в 10:00 с АГНКС в Лонг-Бич. Автомобили проделали путь в 5 тыс. км от Лонг-Бич (Калифорния) до Вашингтона. Минимальное число автомобилей на разных этапах составляло восемь единиц. Основным организатором автопробега стала Коммунальная компания города Трентон, Графства Гибсон из Штата Теннесси (Gibson County Utility District of Trenton, Tennessee). Ее генеральный директор Пэт Райли (Pat Riley) не только организовал автопробег, но и лично участвовал в нем.

Цель автопробега – демонстрация реальности и целесообразности использования природного газа в качестве моторного топлива. Задача заключалась





Маршрут американского автопробега на КПГ

в том, чтобы проинформировать американскую общественность о преимуществах автомобилей на природном газе. Мероприятие показало возможность пересечь Штаты от Тихого до Атлантического океана, используя только газовое топливо. Президент Американской газомоторной ассоциации (NGV America) Мэтью Годлевски (Matthew Godlewski) высоко оценил результаты автопробега.

Пэт Райли участвовал в автопробеге на автомобиле Ford F-150 2010 г. Пэт проехал всю дистанцию, затратив на КПГ всего 251,6 долл., то есть по 8 центов на милю. В среднем цена бензина по маршруту автопробега составляла 1,85 долл. за галлон. КПГ стоил существенно меньше: на одной из АГНКС природный газ в бензиновом эквиваленте стоил всего 0,35 долл. за галлон. Общий расход природного газа составил чуть менее 600 м<sup>3</sup>.

Колонна останавливалась в 13 городах: Лонг-Бич, Меза, Альбукерке, Оклахома-Сити, Литл-Рок, Мемфис, Трентон, Диксон, Севьервилль, Рок-Хилл, Гринвилл, Ричмонд, Вашингтон. По ходу движения были организованы встречи с прессой, выставки, показывавшие разнообразие метановых автомобилей. В деловую программу входили также семинары, на которых выступали эксперты газомоторного бизнеса и технологий.

Автопробегу оказали поддержку профессиональные ассоциации NGV America, American Public Gas Association (APGA) и American Gas Association (AGA), а также еще более 40 других спонсоров. Спонсорский пакет стоил 500 долл.

Интересно, что по целям, задачам, формату, содержанию американский пробег «От моря до моря» является практически двойником российского «Голубого коридора». А вот по масштабу и качеству информационного обеспечения американский пробег был значительно скромнее тех, которые проводит Газпром и Uniper/E.ON. Возможно, сказались отсутствие опыта. Тем не менее, газомоторщики США сделали большое дело для развития национального рынка природного газа на транспорте.

Metan4U

## Новый газовый паром

73

Судоходная компания Balearia (Испания) планирует заказать два газодизельных парома на СПГ на общую сумму 350 млн евро.

На строительство первого из них компания Balearia уже подписала инвестиционное соглашение на сумму 131,4 млн евро с семью банками – CaixaBank, Banco Sabadell, Banco Santander, Bankia, Banco Popular, Banca March и Bankinter. Это будет первый в Средиземноморье паром на СПГ. Компания утверждает, что использование сжиженного метана обеспечит 30%-е сокращение выбросов CO<sub>2</sub>.



Общая стоимость круизного судна – 187 млн евро. Корабль рассчитан на 1700 пассажиров и 331 автомобиль. Длина парома – 232,2 м, ширина – 30,4 м, скорость 22 узла. На судне будут установлены четыре двигателя, способные работать на СПГ и жидких нефтяных видах топлива. Еще одним источником энергии станут солнечные батареи.

Испанская судостроительная верфь La Naval в Бильбао должна сдать построенный корабль заказчику в первом квартале 2018 г. Эксплуатация первого парома начнется в 2019 г.

Ранее компания Balearia подписала контракт с фирмой Rolls-Royce на переоборудование трех находящихся в эксплуатации скоростных дизельных катамаранов HSC Ramon Llull, HSC Jaume II и HSC Jaume III для работы на сжиженном природном газе. Другой газомоторный контракт подписан с той же компанией Rolls-Royce и энергетическим концерном Gas Natural Fenosa на установку чисто газового двигателя Bergen на паром Abel Matutes.

Газовые двигатели компании Rolls-Royce серий Bergen B и Bergen C, созданные на базе дизельных двигателей, работающих на бедных смесях, позволяют снизить выбросы углекислого газа на 22 %, оксидов азота на 92 %, оксидов серы и твердых частиц практически полностью. Содержание метана в отработавших газах сведено к минимуму.

Двигатель Bergen C26:33 имеет экологический сертификат Министерства охраны окружающей среды США уровня 3 (Tier 3). После доработки он будет сертифицирован под уровень 4.

Рядные и V-образные шести- и девятицилиндровые судовые двигатели Bergen имеют диапазон мощностей от 1 460 до 7 000 кВт. Всего на морских судах их работает более 40. Газовые агрегаты Bergen заказывают для паромов, танкеров, судов обеспечения, кораблей береговой охраны.

Компания Rolls-Royce также продала уже более 500 комплектов газовых двигателей для сухопутного применения, в основном для целей электрогенерации.

Источники: <http://www.gnvmagazine.com/>

<http://worldmaritimenews.com/> <http://www.rolls-royce.com/>

## Тягач Nikola One на водороде

Компания Nikola Motor Company из Солт-Лейк Сити (штат Юта, США) сменила стратегический курс развития с КПП на компримированный водород. Она опубликовала планы создания нового гибридного магистрального седельного тягача Nikola One на водороде. Ранние – метановые – разработки компании будут не только адаптированы под новый вид топлива, но и получат собственное коммерческое развитие.



Аэродинамическое решение автомобиля Nikola One перевозчика сочли интригующим

По данным из различных источников, водородный магистральный тягач Nikola One будет иметь следующие характеристики:

- выбросы вредных и загрязняющих веществ – 0 %;
- класс автомобиля – US Class 8;
- общая масса > 14 969 кг (33 тыс. фунтов);
- колесная формула – 6×6 с электромотором на каждом колесе;
- двигатель – газовый с приводом на турбогенератор;
- мощность двигателя – 1472 кВт;
- крутящий момент – 2711 Н·м;
- блок водородных топливных элементов напряжением 800 В;
- аккумуляторная батарея – 320 кВт·ч;
- топливо – водород;

- кассета баллонов для водорода – 570 л (150 галлонов);
- рабочее давление баллонов – предположительно 70 МПа;
- размещение кассеты баллонов – за кабиной;
- расход водорода – 11,7 л на 100 км;
- время заправки водородом – не более 15 мин;
- автономность хода – 1931 км (1200 миль) на одной заправке;
- тормозная система – рекуперативная;
- независимая задняя подвеска.

Разработчики отказались от перезаряжаемых аккумуляторных батарей в пользу гибридной схемы, чтобы увеличить дальность пробега. По словам Тревора Милтона, генерального директора компании Nikola Motor, даже если бы на грузовике была установлена мегаваттная батарея, – а это в 11 раз больше, чем та, которую устанавливают на спортивном седане P90D, – грузовик смог бы двигаться до перезарядки всего четыре или пять часов, что недостаточно для магистрального тягача.



Кассета из 18650 топливных ячеек для грузовика в сборе

По сравнению с дизельным аналогом эксплуатационные затраты будут сокращены вдвое.

По планам компании Nikola Motor, рабочий прототип первого магистрального тягача с нулевыми выбросами должен быть представлен потребителям 1 декабря 2016 г. Коммерческие продажи предполагается начать в 2020 г. Производство автомобиля должно начаться на заводе в штате Юта через 2-3 года.

Несмотря на радужные планы компании Nikola Motor, автоперевозчики испытывают в отношении проекта определенный скепсис. Особенно в части дальности пробега на одной заправке. Некоторые эксперты допускают использование топливных элементов в качестве системы увеличения пробега, например, на пассажирских автобусах. А вот для внедрения ТЭ на тяжелых грузовиках 2019 год представляется им чрезмерно оптимистичным.

Пока водородной инфраструктуры в США нет вообще. В то же время сеть АГНКС насчитывает уже около тысячи станций. Развивается и сеть электростанций. Та же компания Nikola Motor ввела в эксплуатацию более 700 постов для электромобилей моделей S и X.

Водород для автомобилей Nikola Motor Company намерена получать в 56 собственных гелиопарках, каждый из которых сможет вырабатывать более 100 МВт электроэнергии для электролиза воды. Три станции планируется построить в Калифорнии, четыре в Техасе и одну в Нью-Йорке. Они должны быть построены до 2020 г.

Компания предполагает продавать водородное топливо по 1,5 долл. США за галлон. Однако покупателям первых пяти тысяч грузовиков Nikola One будет предоставлена бесплатная заправка водородом на 1 млн миль.

Об источниках средств на разработку элементов вертикально интегрированной системы «транспорт – топливо – заправка» компания ничего не сообщает. На первом этапе проекта компании требуется от 300 до 500 млн долл.

Тревор Милтон считает, что найти средства будет не так сложно, поскольку на ближайшие 10, а то и 20 лет компания, по его словам, будет сохранять лидерство на рынке электроприводных грузовиков. Он в частности сообщил, что только в августе 2016 г. желающие приобрести грузовик ценой 330 тыс. долл. США уже внесли в компанию депозиты в размере 1500 долл. на общую сумму 2,3 млрд долл. До декабря этого года Nikola Motor Company соберет предварительные заказы (подписка открыта в мае) на сумму в 3,5 млрд долл. США. Сейчас уже заказаны почти 8 000 машин.

Рынок грузовых электромобилей становится достаточно конкурентным. Уже три концерна – Daimler, Mack и BYD – летом 2016 г. объявили о своих планах в этой области. Кроме того, о своих намерениях построить водородный пикап средней грузоподъемности Chevrolet Colorado на водороде объявили компания General Motors и Сухопутные войска США.

Для рынков, где автомобильный водород отсутствует, компания Nikola Motor планирует предлагать версию с газотурбинным генератором на КПГ.

Е.Н. Пронин по материалам <http://newatlas.com/nikola-hydrogen-switch/>,  
<https://nikolamotor.com/>, <https://www.trucks.com/>, <https://twitter.com/>,  
<http://www.foxnews.com/>, <http://www.businessinsider.com/>

## Прогнозы по СПГ для бункеровки

По оценке энергетической консалтинговой компании IHS CERA (США), к 2025 г. объем потребления СПГ в качестве судового топлива может достичь 29 млн т (40 млрд м<sup>3</sup>) в год и 65 млн т (90 млрд м<sup>3</sup>) к 2030 г.

Специалисты считают, что 90 % мировой торговли осуществляется морским путем. При этом 16 большегрузных кораблей имеют такие же выбросы, как и 800 млн автомобилей.

По данным Иберийской газомоторной ассоциации GASNAM (Испания), сегодня в Европе на СПГ работают 48 судов, еще на 29 подписаны контракты. Консультанты из Det Norske Veritas (Норвегия) прогнозируют, что к 2020 г. мировой океан будет бороздить тысяча судов на СПГ. Международная группа Deloitte считает, что проникновение СПГ на испанский морской флот к 2045 г. достигнет 46 %.

<http://www.gnvmagazine.com/>

## Abstracts of articles

P. 6

### *Achievements and perspectives on mobile natural gas filling stations development*

Sergey Semenishev, Petr Kilin

Technoeconomic study on cylinders of different types for mobile LNG filling stations constructing is conducted. Examples of MGFS constructing based on metal-composite cylinders are considered. The article is of interest as for MGFS constructors as for organizations and specialist its operating.

**Keywords:** mobile gas filling station, cylinders type 1-4 for LNG.

#### References

1. Semenishev S.P. Metal-composite cylinders and constructions based on them // Alternative fuel transport. – 2008. – № 3 (3) – P. 36-37.
2. Movchan E.P., Leonov V.N., Semenishev S.P. New conception of multifuel filling station with LNG filler point // Alternative fuel transport. – 2008. – № 4 (4). – P. 54-56.
3. Semenishev S.P. Mobile filling stations in the place without gas pipe // Alternative fuel transport. – 2009. – № 5 (11). – P. 48-49.
4. Semenishev S.P., Glukhov V.P. Mobile LNG stations // Alternative fuel transport. – 2012. – № 4 (28). – P. 66-69.
5. Semenishev S.P., Kilin P.G. Mobile gas filling station MGFS 4300-24,5 // Alternative fuel transport. – 2012. – № 6 (30). – P. 30-31.
6. Semenishev S.P., Glukhov P.G., Kilina O.V., Popova V.K. Perspectives on MGFS use for independent gas-supply and vehicles filling // Gasworld Russia and the CIS. – 2014. – № 35 may/june. – P. 36-37.
7. Semenishev S.P., Glukhov V.P., Merzlyakov P.P., Kilina O.V., Popov V.K. Constructing of Metal-composite cylinders (first stage) // Alternative Fuel Transport. – 2013. – № 3 (33). – P. 19-21.
8. Semenishev S.P., Glukhov V.P., Merzlyakov P.P., Kilina O.V., Popov V.K. Constructing of Metal-composite cylinders (second stage) // Alternative fuel transport. – 2013. – № 4 (34). – p. 52-54.

P. 12

### *Optimization of Biofuel Mixtures with Rapeseed Oil Methyl Ester and Sunflower Oil Methyl Ester Additives*

Vladimir Markov, Sergey Devyanin, Sergey Zykov

An opportunity of using oil diesel fuel with rapeseed oil methyl ester and sunflower oil methyl ester mixtures as a fuel for diesel engines is considered. The analysis of chemical-physical characteristics of the tested biofuel mixtures is carried out. The results of experimental research of a D-245.12S diesel engine with the engine running on diesel fuel and biofuel mixtures are demonstrated. A method of optimization of oil biofuel mixtures composition is suggested. Optimization calculations are conducted.

**Keywords:** diesel engine, oil diesel fuel, alternative fuel, rapeseed oil methyl ester, sunflower oil methyl ester, biofuel mixture, optimization.

#### References

1. Popel O.S., Fortov V.E. Renewable energy in the world today. – M.: MPEI Publishing House, 2015. – 450 p.
2. Alternative fuel for internal combustion engines / A.A. Alexandrov, I.A. Arkharov, V.A. Markov et al., ed. A.A. Alexandrov, V.A. Markov. – M.: OOO SIC "Engineer", LLC "Oniko-M", 2012. – 791 p.
3. Innovative development of alternative energy: Part 1 / V.F. Fedorenko, N.T. Sorokin, D.S. Buklagin etc. – M.: Federal State "Rosinformagroteh", 2010. – 348 p.
4. Thermal engines installations electricity and heat using biofuels: Proc. manual for schools / V.F. Kamenev, M.G. Shatrov, A.S. Terenchenko etc. – M.: in MADi, 2014. – 92 p.
5. Baskov V.N., Pantskhava E.S. Biofuels: state and prospects of development of the technology in the world and in Russia // Thermal Engineering. – 2013. – № 4. – S. 43-47.
6. Vasilev I.P. Effect of plant fuels for environmental and economic performance of the diesel engine. – Lugansk: Publishing House of the University of the East. Dal, 2009. – 240 p.
7. The use of vegetable oils and fuels on the basis of their diesel engines / V.A. Markov, S.N. Devyanin, V.G. Semenov etc. – M.: OOO SIC "Engineer", 2011. – 536 p.
8. Myo T. The Effect of Fatty Acid Composition on the Combustion Characteristics of Biodiesel (A Dissertation Submitted to the Graduate School of Science and Engineering In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering). – Japan: Kagoshima University, 2008. – 171 p.
9. Knothe G., Van Gerpen J., Krahl J. et al. The Biodiesel Handbook. – Shampaign, Illinois: AOCS Press, 2005. – 286 p.
10. Markov V.A., Schuster A.U., Devyanin S.N. Work diesel engines on mixtures of diesel fuel and rapeseed oil methyl ester // Alternative fuel transport. – 2009. – № 4. – S. 33-37.
11. Markov V.A., Schuster A.U., Devyanin S.N. Features of the application of the methyl ester of rapeseed oil as a fuel for diesel engines // Vestnik MSTU. NE Bauman. Mechanical Engineering. – 2010. – № 3. – P. 56-69.
12. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. The toxicity of the exhaust gases of diesel engines. – M.: Publishing House of the MSTU. Bauman, 2002. – 376 p.
13. Markov V.A., Devyanin S.N. Nagornov S.A. Work transport diesel engine on mixtures of diesel fuel and rapeseed oil methyl ester // Alternative fuel transport. – 2013. – № 3. – P. 56-62.
14. Markov V.A., Devyanin S.N., Ulyukina E.A. and others. The methyl ester of sunflower oil as the environmental component of petroleum motor fuels // Alternative fuel transport. – 2015. – № 4. – P. 29-41.
15. Vasilev F.P. Optimization methods. – M.: Factorial Press, 2002. – 824 p.
16. Markov V.A., Markova V.V., Sivachev V.M., Sivachev S.M. Determination of the optimal composition of mixed biofuels // Automotive. – 2015. – № 2. – P. 5-9.
17. The composition of optimization of the mix of biofuels for transport diesel / N.A. Ivashchenko, V.A. Markov, A.A. Zenin et al. // Safety in Technosphere. – 2007. – № 5. – P. 22-25.
18. Parsadanov I.V. Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on an integrated fuel and environmental criteria. – Kharkov: Publishing House of the KPI, 2003. – 244 p.
19. Evaluation and control particulate matter emissions from the exhaust gases of diesel engines / V.A. Zvonov, G.S. Kornilov, A.V. Kozlov and others. – M.: Publishing house "Prima-News-M", 2005. – 312 p.

P. 31

### *Influence of the semidetached combustion chamber structure on formation of nitrogen oxides in the gas engine*

Revaz Kavtaradze, Dmitry Onishchenko, Andrey Golosov, Anton Shibanov

On converting of diesel engines in the gas engine with spark ignition for the purpose of detonation prevention decrease in degree of compression and the change of a design of combustions chamber connected with it is necessary. Influences of the combustion chamber structure and a corner of an advancing of ignition on ecological and effective characteristics of the gas engine are investigated. It is established that using  $\omega$ -type combustion chamber provides the best effective indicators, probably essential decrease in issue nitrogen oxides by regulation of a corner of an advancing of ignition depending on modes of partial loading.

**Keywords:** gas engine, design of combustions chamber, kinetic energy of turbulence, local temperatures, nitrogen oxides.

#### References

1. Kavtaradze R.Z. Thermal processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen. – M.: Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Publishers, 2011. – 238 p.
2. Kavtaradze R.Z., Natriashvili T.M., Zelentsov A.A. Ignition Delay and Emission of the Noxious Substances in Double-Fuel Engines Working on the natural Gas and Syngases / Chapter 15 (p. 109-120) in the Book: Innovative Methods for Improvement of Technical, Economic and Ecological Efficiency of Motor Cars (ISBN:978-1-63463-671-1). – New-York: NOVA-Publishers, 2015. – 138 p.
3. Kavtaradze R.Z. Improving the Ecological Indices of a Hydrogen Diesel Engine with Direct Gaseous Hydrogen Ingection // Machine engineering and reliability issues. – 2016. – T. 45. – № 4. – P. 20-29.
4. Kavtaradze R.Z., Krasnov V.M. Influence of partial homogenization of a mix on formation of nitrogen oxides in the chamber of combustion of a hydrogen diesel engine // Alternative fuel transport. – 2016. – № 2 (50). – P. 50-56.
5. Kavtaradze R. Z. Local heat exchange in piston engines. 3<sup>rd</sup> edition. – M.: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), 2016. – 515 p.

6. Kavtaradze R.Z. The Theory of Piston Engines. Special Chapters. The second edition. – M.: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), 2016. – 650 p.
7. Leont'ev A.I., Kavtaradze R.Z., Shibano A.V., Zelentsov A.A., Sergeys S.S. Influence of the chamber form on non-stationary processes of carrying over and turbulent combustion in a diesel engine converted in the gas engine // News of the Russian Academy of Sciences, "Power" (in Russian: Energetika). – 2009. – № 2. – P. 49-63.
8. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Golosov A.S. Numerical design procedure of concentration  $NO_x$  on a basis a multizone of model of working process of a diesel engine. The certificate on the state registration of the computer programs № 2015617793. Date of the state registration in the Register of the computer programs of 22.07.2015.
9. Leont'ev A.I., Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Golosov A.S., Pankratov S.A. Improvement of piston engine operation efficiency by direct conversion of the heat of exhaust gases into electric energy // High Temperature. – 2016. – Vol. 54, No 1. – P. 99-107.
10. Kavtaradze R.Z., Zinovev I.A. Partial homogenization effect of the combustion process on the environmental performance of diesel // Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Mech. Eng. – 2016. – No 4. – P. 113-127.
11. FIRE. Users Manual. Version 2015. AVL List GmbH Graz, Austria, 2015. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2015).
12. Kavtaradze R.Z., Zelentsov A.A. Influence of intake port shape on effective and ecological parameters of middle-speed diesel engine // Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Mech. Eng. – 2015. – No 6. – P. 59-73.
13. Kavtaradze R.Z. Settlement definition of an impulse of pressure in final system of the combined engines // News of High Schools of the USSR, Mechanical engineering. – 1977. – № 11. – P. 100-103.
14. Van Basshuysen R., Schäfer F. Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlage, Komponenten, Systeme, Perspektive. 4. Auflage. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden. 2007. – 1032 S.

**P. 40**

**Comparative evaluation of carbon oxide emissions with exhaust gas on forced ignition engine while operation on petrol and fuel gas**

**Leonid Kovalchuk, Ilya Mishachkov**

Test and theoretical models for comparative evaluation of carbon oxide emissions with exhaust gas on forced ignition engine while operating on petrol and fuel gas are carried out. Comparative evaluation of carbon oxide emissions with exhaust gas on exact engine while operating on petrol and fuel gas is given.

**Keywords:** forced ignition engine, carbon oxide, petrol, fuel gas, environmental impact.

**References**

1. Zvonov V.A. Toxic level of internal-combustion engine / V.A. Zvonov. – M.: Manufacturing engineering, 1981. – 160 p.
2. Bazarov B.I. Environmental compliance of vehiculars / B.I. Bazarov, 2<sup>nd</sup> edition. – Tashkent: Tashkent State Automobile & Road Technical University, 2007. – 104 p.
3. Morozov K.A. Automobile engines toxicity level / K.A. Morozov. – M.: Legion, 2001. – 80 p.
4. Akopova G.S. Ecology and economic analysis of natural gas motor fuel usage perspectives on vehiculars / G.S. Akopova, N.L. Vlasenko, D.O. Davidova // Alternative fuel transport. – 2014. – № 6. – P. 23-27.
5. Kovalchuk L.I. Test and theoretical models of toxicity emissions with exhaust gas engine spark-plug ignition while operating on fuel gas / L.I. Kovalchuk, I.V. Mishachkov // Alternative fuel transport. – 2014. – № 6. – P. 28-33.

**P. 46**

**Power plants based on fuel cells with solid polymer electrolyte**

**Sergei Kozlov, Vladimir Fateev**

Description of fuel cells with solid polymer electrolyte is extended in this article. Spheres of fuel cells application including transport usage (automobile, railway and water), setup of back-up (emergency) power supply, autonomous heat and energy supply of buildings, military and loading machines, chargers and etc are discussed.

**Keywords:** fuel cells, solid polymer electrolyte, power plant, transport.

**References**

1. [www.nedstack.com](http://www.nedstack.com)
2. <http://www.ballard.com>
3. Ballard Powers DaimlerChryslers Fuel Cell Vehicle on a 3,000 Mile Drive Across the United States // News Release. – June 4, 2002.
4. Single seater and bus Citaro on fuel cells // Automobile production abroad. – 2003. – № 5. – P. 3.
5. [www.sl-power.com](http://www.sl-power.com)
6. [www.qtww.com](http://www.qtww.com)
7. [www.jreast.co.jp](http://www.jreast.co.jp)
8. [www.fuelcellpropulsion.org](http://www.fuelcellpropulsion.org)
9. [www.lemvigbanen.dk](http://www.lemvigbanen.dk)
10. [www.ivi.fraunhofer.de](http://www.ivi.fraunhofer.de)
11. [www.mhfca.org](http://www.mhfca.org)
12. [www.industry.siemens.com](http://www.industry.siemens.com)
13. [www.navantia.es](http://www.navantia.es)
14. [www.shipgaz.com](http://www.shipgaz.com)
15. Fuel Cell - HFP Brussels 17/18 March 2005 - EEV - Ref. PR0501855 - Issue
16. [www.apc.com](http://www.apc.com)
17. [www.nic-nep.ru](http://www.nic-nep.ru)
18. [www.h2economy.com](http://www.h2economy.com)
19. [www.idatech.com](http://www.idatech.com)
20. [www.protonex.com](http://www.protonex.com)
21. [www.voller-energy.com](http://www.voller-energy.com)
22. [www.plugpower.com](http://www.plugpower.com)
23. Ft. Bragg PEM Fuel Cell Demonstration Program LOGAN Energy Corporation Initial Project Description September 5, 2002.
24. Brodach M.M., Shilkin N.V. Fuel cells usage for buildings energy deliver // Association of HVAC Engineers. – 2004. – № 2. – p. 52-62.
25. Mikhailov A., Saydanov V., Landgraf I. Power plants based on fuel cells. Usage prospective // Electric engineering news. – 2008. – № 3 (51).

**P. 55**

**Opportunities on gaining an exploitation fuel performance of multifuel diesel engine by variation of its active displacement**

**Nikolay Patrakhaltsev, Behdjouyan Hosseyn (Iran), Andrey Savastenko**

Results of computation and experimental research of diesel fuel middle operating efficiency and diesel, using methanol, as alternative fuel are carried out. Using control method of a diesel on light load regimes and include changes during its active swept volume, while part of cylinders is being cut out due to realization of standard 13-stage test-cycle, gain in performance of diesel as well as alcohol-diesel for 5-7 % may be expected.

**Keywords:** diesel, alternative fuels, alcohol diesel, middle operating efficiency, light load, cylinder cutout, modify swept volume.

**References**

1. Patrakhaltsev N.N., Anoshina T.S., Kamyshnikov R.O. Reduced fuel consumption and diesel emissions toxicity at low load conditions when changes in the regulation of the working volume // Engine-building. – 2015. – № 1 (259). – P. 26-29.
2. Vibration reduction in a variable displacement engine using pendulum absorbers / T.M. Nester, A.G. Haddow, S.W. Shaw, J.E. Brevick, V.J. Borovski // SAE Technical Paper Series. – 2003. – 2003-01-1484.
3. Neitz A. Die Eignung von M.A.N.-FM-Dieselmotoren für den Betrieb mit reinen Alkoholkraftstoffen / A. Neitz, F. Chmela // MTZ. – 1981. – Jg. 42. – № 12. – S. 495-499.
4. Patrakhaltsev N.N., Strashnov S.V., Melnik I.S., Kornev B.A. Regulation of a diesel by changing its working volume // Tractors and farm machinery. – 2012. – № 1. – S. 19-22.
5. Kulchitskii A.R. Toxicity of automobile and tractor engines: Study guide for higher education. – 2<sup>nd</sup> ed. and ext. – M.: Academic Project, 2004. – 400 p.

## Авторы статей в журнале № 5 (53) 2016 г.

**Бехджуян Хоссейн (Иран),**  
магистр техники и технологии, аспирант кафедры  
теплотехники и тепловых двигателей РУДН

**Голосов Андрей Сергеевич,**  
к.т.н., заведующий отделом  
НИИ «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
тел. 903 152-25-83 (моб.), 499 265-78-32 (служ.),  
e-mail: golosow@mail.ru

**Деянин Сергей Николаевич,**  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тракторы и автомо-  
били» Российского государственного аграрного университета –  
МСХА им. К.А. Тимирязева, тел. 917 519-63-94,  
e-mail: devta@rambler.ru

**Зыков Сергей Анатольевич,**  
к.т.н., доцент кафедры «Автомобильный транспорт»  
Российского государственного аграрного университета –  
МСХА имени К.А. Тимирязева, тел. 916 033-34-23,  
e-mail: zykov.sa@yandex.ru

**Кавтарадзе Реваз Зурабович,**  
д.т.н., профессор кафедры «Поршневые двигатели»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел. 910 4690012 (моб.),  
499 2657832 (служ.), e-mail: kavtaradzerz@mail.ru

**Килин Пётр Григорьевич,**  
ведущий конструктор ПАГЗ ООО «НПП ГазСервисКомпозит»,  
тел.: (3412) 911-067

**Ковальчук Леонид Игнатьевич,**  
д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт и сервис  
автомобилей» Балтийской государственной академии  
рыбопромышленного флота (БГА РФ), г. Калининград,  
тел. 8 962 254 91 90

**Козлов Сергей Иванович,**  
доктор технических наук,  
тел. 8 495 719 60 88; д.т. (499) 128-59-51,  
e-mail: si.kozlov2008@gmail.com

**Марков Владимир Анатольевич,**  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
«Поршневые двигатели» Московского  
государственного технического университета  
им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
тел. (917) 584-49-54,  
e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru

**Мишачков Илья Викторович,**  
аспирант кафедры «Автомобильный транспорт  
и сервис автомобилей», г. Калининград, Балтийская  
государственная академия рыбопромышленного флота  
(БГА РФ), тел. 8 911 459 31 36

**Онищенко Дмитрий Олегович,**  
д.т.н., профессор кафедры  
«Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
тел. +79254757570 (моб.), +74992657832 (служ.),  
e-mail: doctor@baumanracing.ru

**Патрахальцев Николай Николаевич,**  
д.т.н., Заслуженный работник высшей школы РФ,  
профессор кафедры теплотехники и тепловых  
двигателей инженерного факультета  
Университета дружбы народов (РУДН),  
р.т. 952-62-47, м.т. 915 278-54-06,  
e-mail: nikpatrah@mail.ru

**Пронин Евгений Николаевич,**  
начальник отдела ООО «Газпром экспорт»,  
руководитель ПК5 Международного газового союза,  
тел.: (812) 646-16-54, e-mail: e.pronin@mail.ru

**Савастенко Андрей Андреевич,**  
магистр техники и технологии, аспирант кафедры  
теплотехники и тепловых двигателей РУДН

**Семеничев Сергей Петрович,**  
к.т.н., генеральный директор ООО «НПП ГазСервисКомпозит»,  
тел.: +7 (3412) 911-067, e-mail: hi-tec11@mail

**Фатеев Владимир Николаевич,**  
заместитель директора Центра физико-химических технологий  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
профессор, д.х.н., e-mail: Fateev\_VN@nrcki.ru

**Шибанов Антон Владимирович,**  
к.т.н., научный сотрудник НИИ «Энергомашиностроение»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел. 903 585-67-96 (моб.),  
e-mail: golosow@mail.ru

## Contributors to journal issue No 5 (53) 2016

**Behdjouyan Hosseyn (Iran),**  
master of engineering and technology, graduate student  
of Russian Peoples' Friendship University (RPFU)

**Devyanin Sergey,**  
D. Sc. (Eng.), professor, head of «Tractors and Automobiles»  
department of the Russian State Agrarian University –  
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
m.t. + 7 917 519-63-94, e-mail: devta@rambler.ru

**Fateev Vladimir,**  
RRC «Kurchatov Institute» Professor, Deputy Director,  
tel. 499 196 94 29, e-mail: fat@hepti.kiae.ru

**Golosov Andrey,**  
PhD, research assistant of Bauman Moscow State Technical  
University, mobile phone: +7 9031522583,  
e-mail: golosow@mail.ru

**Kavtaradze Revaz,**  
professor of Bauman Moscow State Technical University, Doctor  
of Engineering, mobile phone: +7 910 469-00-12,  
office phone: +7 (499) 265-78-92,  
e-mail: kavtaradzerz@mail.ru

**Kilin Peter,**  
leading designer of «NPP GazServisKompozit»,  
phone: +7 (3412) 911-067

**Kovalchuk Leonid,**  
Doctor of Engineering, Professor of the  
“Highway Transportation and Automobile Service” chair in the  
Baltic Fishing Fleet State Academy (BFFSA) Kaliningrad,  
phone: + 7 962 254 91 90

**Kozlov Sergey,**  
doctor of technical sciences, tel. + 7 (499) 128-59-51,  
e-mail: si.kozlov2008@gmail.com

**Markov Vladimir,**  
D. Sc. (Eng.), professor of «Piston engines» department  
of the Bauman Moscow State Technical University,  
phone: + 7 917 584-49-54,  
e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru

**Mishachkov Ilya,**  
PG student of the “Highway Transportation and Automobile  
Service” chair in the Baltic Fishing Fleet State Academy (BFFSA)  
Kaliningrad, phone: + 7 911 459 31 36

**Onishchenko Dmitry,**  
professor of Bauman Moscow State Technical University,  
Doctor of Engineering, mobile phone: +7 925 475-75-70,  
e-mail: doctor@baumanracing.ru

**Patrakhaltsev Nikolay,**  
Dr.Sc., prof. of Department of Thermotechnics and Thermal  
Engines of Russian Peoples' Friendship University (RPFU),  
Moscow, e-mail: nikpatrah@mail.ru

**Pronin Eugene,**  
head of department, Gazprom Export,  
IGU WOC5 Chairman, phone: + 7 (812) 646-16-54,  
e-mail: e.pronin@mail.ru

**Savastenko Andrey,**  
master of engineering and technology, graduate student  
of Russian Peoples' Friendship University (RPFU)

**Semenishchev Sergey,**  
Ph.D., General Director of «NPP GazServisKompozit»,  
e-mail: hi-tec11@mail.ru

**Shibanov Anton,**  
PhD, research assistant of Bauman Moscow State Technical  
University, mobile phone: +7 903 5856796,  
e-mail: golosow@mail.ru

**Zykov Sergey,**  
PhD, assistant professor of «Tractors and Automobiles»  
department of the Russian State Agrarian University –  
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
mobile phone: +7 916 033-34-23,  
e-mail: zykov.sa@yandex.ru





# Подписка – 2016

## Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе»

Россия, 142717, Московская обл., Ленинский р-н., п. Развилка, а/я 253  
Тел.: +7 (498) 657 29 77, e-mail: transport.1@ngvrus.ru, transport.2@ngvrus.ru  
www.ngvrus.ru

80

### Уважаемые читатели! Продолжается подписка на 2016 г.

Подписчики	Годовая, 6 номеров	Полугодовая, 3 номера
Россия	6 000 руб.	3 000 руб.
Страны СНГ	6 000 руб.	3 000 руб.
Страны дальнего зарубежья	190 евро	120 евро

Отдельные экземпляры журнала (1 000 руб) можно приобрести в редакции.

Электронная версия журнала (формат PDF, 6 номеров):

- для РФ и стран СНГ – 3 000 руб.
- для стран дальнего зарубежья – 100 евро.

Подписку на 2016 г. можно оформить по факсу, электронной почте или непосредственно в редакции; также через агентства «Роспечать» (подписной индекс 72149).

### Стоимость размещения рекламных полноцветных материалов в журнале:

В текстовом блоке	В рублях	В долларах США	В евро
1 страница (210 × 290 мм)	35 400	900	770
½ страницы (125 × 176 мм)	17 700	550	480
¼ страницы (70 × 176 мм)	11 800	300	260
Презентация (1 стр.)	11 800	300	260
Специальный раздел (1 стр.)	5 900	—	—
На обложке			
1-я страница (150 × 210 мм)	41 300	1000	860
2-я или 3-я страницы (290 × 210 мм)	35 400	900	770
4-я страница (290 × 210 мм)	39 000	950	820

### Технические требования к рекламным модулям:

Макет должен быть представлен в электронном виде: форматы eps, tiff, jpeg, pdf.

Требуемые разрешения: полноцветные и монохромные материалы не менее 300 dpi.