



# ТРАНСПОРТ

## НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ



№ 2 (50) 2016



Оптимальная структура АГНКС

Водный транспорт на СПГ

Механизм ценообразования на рынке СУГ



В соответствии с приоритетными направлениями деятельности НП «Национальная газомоторная ассоциация» на 2015-2016 гг., утвержденными Общим годовым собранием (решение 8.11 Протокола № 1 от 25.06.2015 г.), Исполнительный орган проводит работу по организации семинара на тему

## **ГАЗОМОТОРНОЕ ТОПЛИВО: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ**

**Семинар состоится**

**21 апреля 2016 года в конференц-зале № 1 ПАО «Газпром»  
(г. Москва, ул. Наметкина, д. 16).**

21 апреля 2016 года



г. Москва, ул. Наметкина, д. 16

Предложения по участию направлять электронной почтой на адрес:

**E-mail: [Y\\_Drygina@vniigaz.gazprom.ru](mailto:Y_Drygina@vniigaz.gazprom.ru)**

или сообщить по тел.:

**8 (498) 657-41-35, 657-29-76**

**до 18 апреля 2016 года**

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**

начальник службы по связям с общественностью  
и СМИ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
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 15.02.2016 г.

Подписано в печать 15.03.2016 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

#### На обложке:

совещание в Нижнем Новгороде на Горьковском автомобильном заводе

## В НОМЕРЕ

Алексей Миллер:

Успех развития рынка газомоторного топлива  
зависит от слаженного взаимодействия Газпрома,  
автопроизводителей и органов власти. .... 3

**Евдокимов Я.А., Лавров Е.П.**

Эволюция АГНКС  
Часть 2. Разработка оптимальной структуры. .... 5

**Ишков А.Г., Романов К.В., Тетеревлев Р.В.,  
Акопова Г.С., Власенко Н.Л., Косолапова Е.В.,  
Грицюта Д.О., Есиева Ф.Т.**

Экологическая эффективность  
автотранспортного комплекса в регионах  
России при переводе на природный газ. .... 15

**Кириллов Н.Г.**

Водный транспорт на сжиженном природном газе:  
мировые тенденции и первое российское  
судно-газоход на СПГ ..... 26

**Власов А.А., Ильвес Р.Л.,**

**Кюют А.Я., Ольт Ю.Р.**  
Применение биоэтанола второго поколения  
в малообъемном двигателе и влияние  
на экологические показатели ..... 34

**Лиханов В.А., Лопатин О.П.**

Исследование мощностных и экономических показателей  
дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе,  
метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях. .... 43

**Кавтарадзе Р.З., Краснов В.М.**

Влияние частичной гомогенизации смеси на образование  
оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля ..... 50

**Ерохов В.И., Одиноква И.В.**

Совершенствование экологических параметров  
газодизельных автомобилей. .... 57

Электронные торги:

прозрачный механизм ценообразования на рынке СУГ ..... 67

**Пронин Е.Н.**

Развитие водородной автоинфраструктуры Европы ..... 69

Заправка нового класса ..... 72

Зоны регулируемых выбросов ..... 73

Abstracts of articles ..... 76

Авторы статей в журнале № 2 (50) 2016 г. .... 78

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 15.02.2016

Endorsed to be printed on 15.03.2016

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

Alexey Miller:

NGV fuel market success depends  
on Gazprom's, auto manufacturers'  
and government agencies' seamless interaction ..... 3

**Yaroslav Evdokimov, Evgeniy Lavrov**

Development of CNG filling station  
Part 2. Optimal structure creation ..... 5

**Alexander Ishkov, Konstantin Romanov,**

**Roman Teterevlev, Gretta Akopova,**

**Nadezhda Vlasenko, Elena Kosolapova,**

**Daria Gritsuta, Fariza Esieva**

Ecological efficiency of motor transport network  
in Russia regions during conversion to natural gas ..... 15

**Nikolay Kirillov**

Water transport on liquefied natural gas:  
global trends and the first Russian ship on LNG ..... 26

**Andrey Vlasov, Risto Ilves,**

**Arne Küüt, Jüri Olt**

The use of second-generation bioethanol  
in a small displacement engine  
and its influence on ecological parameters ..... 34

**Vitaly Likhanov, Oleg Lopatin**

The study of power and economic indicators  
of diesel 4H 11,0/12,5 at operation on natural gas,  
methanol- and ethanol-fuel emulsions ..... 43

**Revaz Kavtaradze, Vladimir Krasnov**

Influence of partial mixture homogenizing  
on the formation of nitrogen oxides  
in the combustion chamber of hydrogen diesel ..... 50

**Viktor Erokhov, Irina Odinkova**

Refinement of ecological parameters  
for gas and diesel vehicles ..... 57

Online auctions:

Transparent pricing model at LHG market ..... 67

**Eugene Pronin**

Development of European's hydrogen auto infrastructure ..... 69

Top notch filling station. .... 72

Controlled blowout zones ..... 73

Abstracts of articles ..... 76

Contributors to journal issue № 2 (50) 2016 ..... 78

**Алексей Миллер:**

### **Успех развития рынка газомоторного топлива зависит от слаженного взаимодействия Газпрома, автопроизводителей и органов власти**

3

15 февраля в Нижнем Новгороде на Горьковском автомобильном заводе председатель правления ПАО «Газпром» Алексей Миллер и полномочный представитель Президента РФ в Приволжском федеральном округе Михаил Бабич провели совещание, посвященное развитию российского рынка газомоторного топлива и стимулированию спроса и предложения на газомоторную технику с учетом применения механизмов государственной поддержки.

В мероприятии приняли участие представители министерств и ведомств, главы регионов России, крупнейших отечественных автопроизводителей, заместитель председателя правления ПАО «Газпром» Виталий Маркелов, члены правления Владимир Марков, Вячеслав Михаленко и Сергей Прозоров, руководители профильных подразделений и дочерних обществ ПАО «Газпром».

Было отмечено, что в России проводится масштабная работа по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива. Локомотивом этой деятельности выступает Газпром: компания создает и развивает газозаправочную инфраструктуру, совместно с федеральными и региональными органами власти совершенствует отраслевое законодательство, сотрудничает с отечественными производителями по вопросам расширения ассортимента газомоторной техники и оборудования, активно закупает газомоторный автотранспорт.

В результате совместных действий участников рынка потребление газомоторного топлива в России стабильно растет. Сегодня сеть автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) в стране насчитывает более 270 единиц, 213 из них принадлежат Газпрому. Объем реализации компримированного природного газа (КПГ) через газозаправочную сеть компании увеличился в 2015 году на 8 % и составил 433 млн м<sup>3</sup>. Газпром реализует масштабную программу строительства



Алексей Миллер и Михаил Бабич

новых АГНКС. Только в 2016 году компания завершит сооружение 35 АГНКС и реконструирует четыре станции в 21 регионе России. В результате объем потребления газа через сеть АГНКС Газпрома увеличится на 11 % – до 480 млн м<sup>3</sup>.

Одновременно растут объемы продаж автотранспорта, работающего на природном газе. В прошлом году было продано 3172 газомоторных транспортных средства (в том числе 3044 – отечественного производства), что на 39 % больше, чем в 2014 году. Еще около 5000 единиц автотранспорта в прошлом году было переоборудовано для использования природного газа в качестве моторного топлива. Таким образом, в 2015 году парк газомоторной техники увеличился более чем на 8 тыс. единиц. Общее количество такой техники в России на сегодняшний день составляет порядка 110 тыс. единиц.

Однако уровень потребления сжатого природного газа в России остается крайне низким – лишь 0,5 % от всех видов моторных топлив, а средняя загрузка АГНКС составляет около 25 %. Одна из причин заключается в том, что стоимость газомоторного транспорта, выпускаемого автопроизводителями, дороже его жидкотопливных аналогов, что существенно замедляет спрос на природный газ.

Для дальнейшего развития рынка необходимо расширение газомоторного автопарка на 15-20 тыс. единиц автотехники в год и повышение ее доступности для потребителя.

В свою очередь Газпром вносит в увеличение газобаллонного автопарка в стране значительный вклад. В компании реализуется специальная программа по переводу транспорта на природный газ. В настоящее время в Группе «Газпром» из более чем 30 тыс. единиц техники, пригодной для перевода на газомоторное топливо, 24 % составляет техника на природном газе. В 2015 году Группа закупила 1184 единицы газобаллонной техники, план на 2016 год – 1459 единиц.

«Для России с ее крупнейшими запасами природного газа развитие рынка газомоторного топлива – стратегическая задача. Природный газ в качестве моторного топлива экологичен, экономичен и безопасен. Поэтому у газомоторной отрасли в нашей стране большие перспективы. Это комплексная работа, успех которой зависит от слаженного взаимодействия всех участников рынка: Газпрома, автопроизводителей и органов государственной власти», – сказал Алексей Миллер.

Алексей Миллер и Михаил Бабич договорились направить совместное обращение в правительство РФ по совершенствованию взаимодействия всех участников рынка газомоторного топлива.

По итогам совещания было принято решение проработать подходы, направленные на стимулирование выпуска и закупки газомоторной техники. Автопроизводителям рекомендовано разработать и утвердить комплекс мер по дальнейшему совершенствованию газобаллонных транспортных средств и развитию сети сертифицированных центров обслуживания автотранспорта, работающего на природном газе.

На заводе Алексей Миллер также осмотрел производство автомобилей «Группы ГАЗ» и выставку техники, работающей на ГМТ.

Производство и реализация природного газа в качестве моторного топлива – одно из приоритетных направлений деятельности ПАО «Газпром». Для системной работы по развитию рынка ГМТ создана специализированная компания – ООО «Газпром газомоторное топливо».

Для расширения линейки газобаллонных транспортных средств, представленных на российском рынке, компанией «Газпром газомоторное топливо» заключены соглашения о взаимодействии с 26 российскими и иностранными производителями, а также с крупнейшими поставщиками газомоторных транспортных средств.

«Группа ГАЗ» является крупнейшим в России производителем коммерческих автомобилей и автобусов всех классов и назначений, работающих на КПП.

Управление информации ПАО «Газпром»

# Эволюция АГНКС

Продолжение цикла статей. Начало см. в № 1 (49) 2016 г.

АГНКС – это производственный объект с известным набором оборудования. Подбор этого оборудования определяется требуемой производительностью станции и ограничивается доступными ресурсами: давлением и выделенными лимитами газа, электрической мощностью, площадью участка и т.д. С другой стороны, владелец АГНКС заинтересован в повышении рентабельности станции. Оказывается, некоторые подсистемы АГНКС поддаются оптимизации, и путем принятия верных структурных решений можно получить заметный эффект.

5

## Часть 2. Разработка оптимальной структуры

Я.А. Евдокимов, научный сотрудник НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА»,  
Е.П. Лавров, начальник проектного отдела НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА»

В статье описаны некоторые способы уменьшения затрат на сжатие газа компрессорами АГНКС, приведены достоинства и недостатки этих способов. Также показано, какие факторы необходимо учитывать при проектировании АГНКС и выборе оборудования для нее.

### Ключевые слова:

автомобильная газонаполнительная компрессорная станция, компримированный природный газ, проектирование и строительство АГНКС.

### Затраты энергии на подготовку КПП

В предыдущей статье мы рассмотрели особенности КПП как автомобильного топлива и показали достоинства современных методов заправки. Теперь рассмотрим другую сторону работы АГНКС, а именно, подготовку газа к заправке.

Напомним главное отличие газового топлива от жидкого – в баллоне автомобиля КПП хранится под высоким (около 20 МПа) давлением. Поступает газ на АГНКС под значительно меньшим давлением. Чтобы топливо попало в автомобильный баллон, необходимо поднять давление при помощи компрессора, на

это, разумеется, затрачивается электроэнергия. Основную часть эксплуатационных затрат АГНКС и составляет стоимость электроэнергии, использованной на сжатие газа, поэтому важно обратить внимание на энергоэффективность этой части технологического процесса.

Чтобы понять, как можно уменьшить затраты на электроэнергию для работы компрессоров, рассмотрим переходы энергии газа из одной формы в другую при его прохождении от входа АГНКС до баллона автомобиля (рис. 1).

Суммарная энергия газа состоит из потенциальной (энергия сжатия), кинетической (энергия движения)

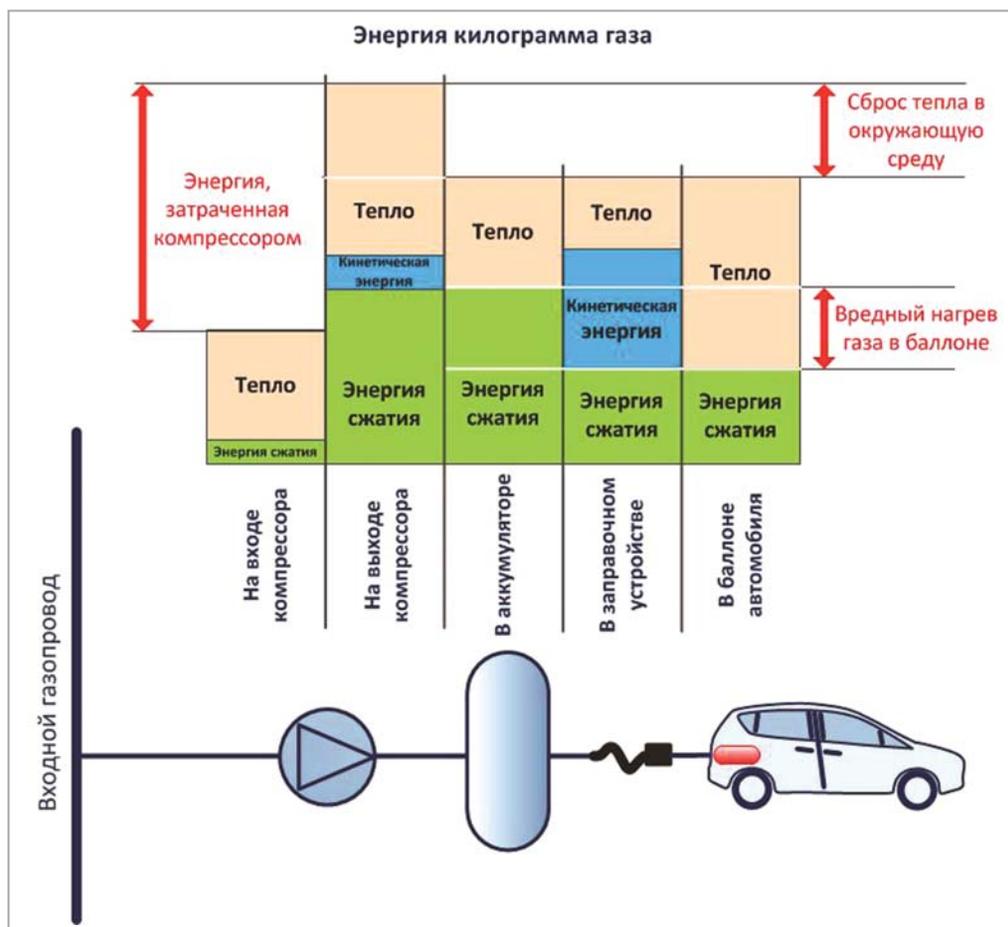


Рис. 1. Преобразование энергии газа при заправке

и теплосодержания. Для полноты картины надо добавить еще потенциальную энергию высоты над уровнем моря, но перемещения газа вверх–вниз при заправке столь невелики, что это можно не учитывать. Сумма указанных составляющих постоянна в силу закона сохранения энергии.

На входе АГНКС газ имеет достаточно низкое давление, а его теплосодержание определяется температурой входного газопровода. При работе компрессора энергия тратится на сжатие газа и его неизбежный нагрев. Соотношение полезного сжатия и вредного нагрева выражается политропическим КПД компрессора. Этот параметр характеризует конструктивное совершенство и важен при выборе компрессорного оборудования. Лишнее тепло сбрасывается в окружающую среду при помощи аппаратов

воздушного охлаждения (АВО), на их обдув вентиляторами также расходуется электроэнергия.

Газ, находящийся в баллонах-аккумуляторах АГНКС, покоится, то есть его кинетическая энергия равна нулю. Следовательно, энергия одного килограмма газа в аккумуляторах состоит из потенциальной составляющей, пропорциональной давлению, и тепловой составляющей, пропорциональной температуре. При заправке газ перемещается по трубе в баллон, причем при попадании из заправочного устройства непосредственно в баллон газ расширяется – сильно в начале заправки и слабее к ее окончанию. При этом газ охлаждается, теплосодержание переходит в кинетическую энергию струи, а потенциальная энергия падает. Затем разогнавшийся газ останавливается в баллоне, кинетическая энергия

«возвращается» в потенциальную. Но давление в заправляемом баллоне всегда ниже, чем в аккумуляторе (ведь иначе газ не будет двигаться в баллон), из-за чего остается избыток энергии, которая и переходит в тепло. В результате суммарное теплосодержание газа в баллоне выше, чем теплосодержание той же массы газа в аккумуляторе, а, значит, и температура газа выше.

$$\begin{aligned} E_{п\_акк} + U_{акк} &= E_{п\_запр} + U_{запр} + E_{к\_запр} = \\ &= E_{п\_балл} + U_{балл}. \end{aligned}$$

Из приведенной формулы видны два пути уменьшения суммарных затрат энергии:

1. применение компрессоров с максимальным КПД;
2. обеспечение минимально необходимого давления, лишь на небольшую величину превышающего давление заправки баллона.

Первый путь очевиден – характеристики компрессоров должны учитываться при проектировании строительства или модернизации АГНКС. Как и в других отраслях, низкая цена оборудования может обернуться высокими затратами в эксплуатации и наоборот.

На втором пути остановимся подробнее.

## Медленная заправка

Минимально необходимые затраты энергии будут получены, если создавать компрессором давление, немного превышающее давление в баллоне. На практике

это означает, что заправка будет происходить очень медленно.

Такой способ существует, он получил название «медленной заправки» (рис. 2). Понятно, что применимость ограничена теми случаями, когда скорость заправки не критична. Там, где заправку можно организовать во время простоя автотранспорта (например, ночью), это решение может снизить эксплуатационные затраты АГНКС. При этом нет необходимости в баллонах-аккумуляторах, вполне достаточно небольших баллонов-депульсаторов на выходе компрессоров, что упрощает эксплуатацию АГНКС и удешевляет оборудование. Также в режиме медленной заправки нужно заправлять ПАГЗ. Это как раз тот случай, когда скорость заправки не критична, а вот расход энергии велик, и экономия от такого режима становится существенной.

С технической точки зрения для организации медленной заправки необходима отдельная линия от компрессора к колонке, не связанная с аккумуляторами. В некоторых случаях может оказаться целесообразной схема с подключаемым и отключаемым по надобности аккумулятором. Соответствующая технологическая схема должна быть принята при проектировании АГНКС с учетом планируемого режима работы станции.

## Быстрая заправка

Медленная заправка обеспечивает минимальное потребление энергии компрессорами АГНКС, но пригодна

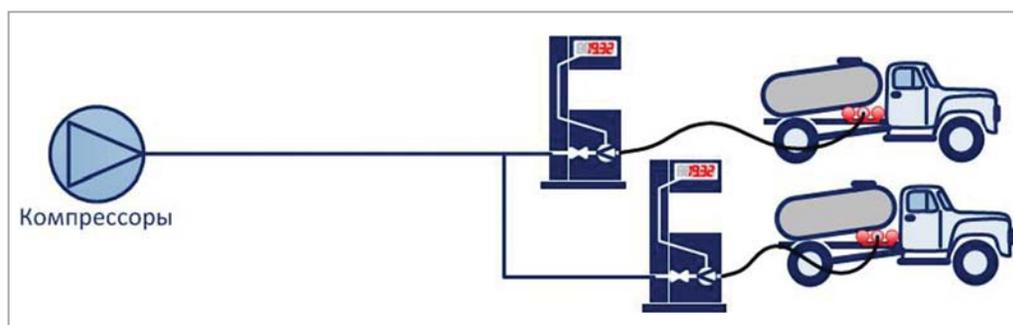


Рис. 2. Заправка по «медленной» схеме

только для автопарков. В большинстве случаев, когда строится или модернизируется АГНКС общего пользования, требуется обеспечить максимальную скорость заправки, о чем мы уже говорили в предыдущей статье. Для этого необходимо, во-первых, поднять давление существенно выше, чем давление заправки, а во-вторых, обеспечить хранение запаса газа для сглаживания неравномерного отбора (рис. 3). При этом возникают следующие проблемы:

- затраты энергии на закачку растут с увеличением давления в аккумуляторах;

- при падении давления в аккумуляторах ниже 20,5...21 МПа заправка становится неполной, так как баллон автомобиля не будет наполняться до необходимого давления. С другой стороны, при таком давлении аккумуляторы еще содержат значительную массу газа, на сжатие которой затрачена энергия. А уменьшить объем аккумуляторов не представляется возможным, чтобы не увеличивать частоту пусков компрессоров. В результате большой объем аккумуляторов увеличивает территорию, занимаемую АГНКС, усложняет, делает дороже техническое обслуживание и контроль состояния оборудования;

- как уже рассматривалось выше, часть энергии газа в аккумуляторах бесполезно тратится на нагрев газа в баллоне автомобиля, с другой стороны, высокое давление в аккумуляторах необходимо для закачки газа в баллон.

### Разделение аккумуляторов на секции – что это дает?

Закачка газа из аккумуляторов в баллон автомобиля происходит под действием разности давлений. Скорость движения газа по трубам и заправочному устройству растет с увеличением перепада, но только до тех пор, пока не достигается скорость звука. Дальше рост перепада давлений не приводит к увеличению скорости газа. Кинетическая энергия, приобретенная газом при движении в баллон, превращается в теплоту в баллоне, то есть приводит к нагреву газа в баллоне – чем больше перепад, тем больше нагрев.

Слишком большой перепад давлений между аккумулятором и баллоном не имеет смысла и даже вреден. С другой стороны, для заправки баллона до 19,6 МПа необходимо иметь давление в аккумуляторах выше 20,5 МПа. Но в начале заправки оно в баллоне существенно ниже, то есть для перетекания газа достаточно и меньшего перепада давлений.

На этом основаны двух- и трехступенчатая схемы заправки. Пустой баллон заправляется от аккумуляторов низкого, затем среднего давления, и только в конце заправки подключается секция аккумуляторов, в которой газ находится под высоким давлением. Перепад давлений между аккумулятором и баллоном при такой схеме ниже, следовательно, бесполезное расширение газа меньше,

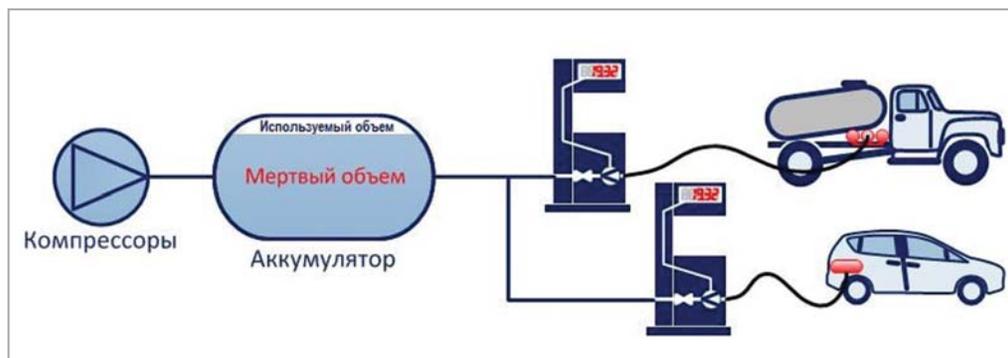


Рис. 3. Схема быстрой заправки

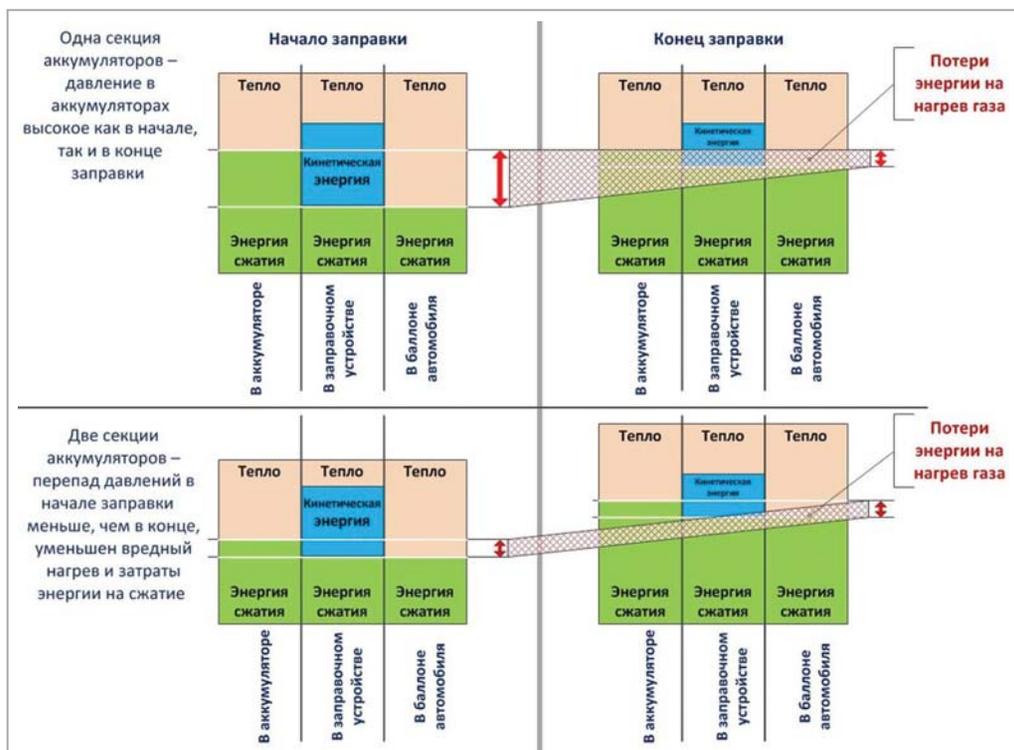


Рис. 4. Преобразования энергии газа при заправке с одной и двумя секциями аккумуляторов

а значит меньше и его нагрев. При этом потенциальная энергия килограмма газа, закачанного в аккумуляторы, в среднем ниже, соответственно ниже и затраты электроэнергии компрессорами на сжатие этого газа (рис. 4).

Тут надо предостеречь читателей от стремления оценивать энергопотребление по номинальной мощности привода компрессора и длительности его работы. Такая оценка дает очень приблизительный завышенный результат и может применяться только как «оценка сверху». Мощность, потребляемая компрессором, пропорциональна расходу (объемная производительность) и степени сжатия компрессора, причем от степени сжатия зависимость не прямая. Объемная производительность у поршневого компрессора неизменна при постоянной частоте вращения, а вот степень сжатия меняется существенно в процессе заполнения аккумуляторов.

Необходимо отметить, что секционированный аккумулятор используется

более полно, то есть такое же число заливок обеспечивается гораздо меньшим геометрическим объемом.

Рассмотрим это подробнее. Аккумуляторы работают без включения компрессоров до тех пор, пока давление позволяет заправлять автомобили.

Многоступенчатая схема (рис. 5) имеет несколько преимуществ:

- нагрев газа в баллоне уменьшается, поскольку перепад давлений в каждый момент заправки меньше, чем при заправке от одного аккумулятора;
- уменьшается энергия, затраченная компрессорами на сжатие, поскольку снижен избыток давления в аккумуляторах;
- благодаря отдельному подключению секций аккумуляторов к колонкам повышается пропускная способность АГНКС – автомобиль, подъехавший на заправку с пустым баллоном, заправляется вначале из секции низкого давления и не «отбирает» газ у автомобиля, одновременно заканчивающего заправку от секции высокого давления;

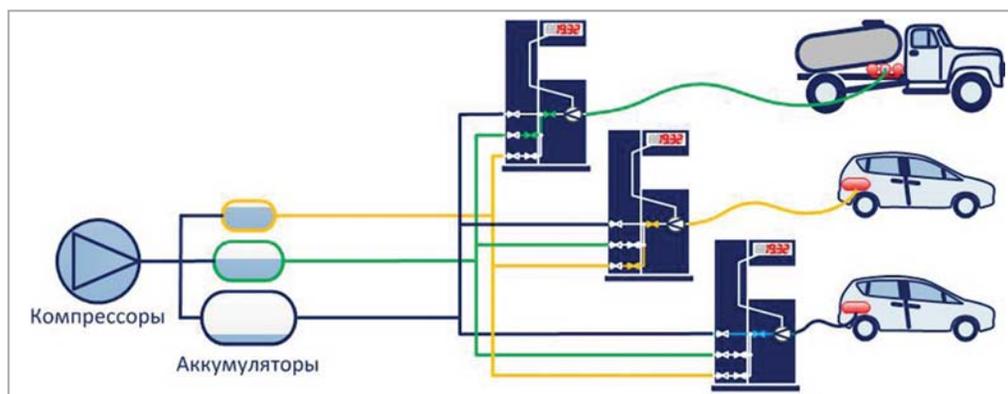


Рис. 5. Схема заправки с секционированными аккумуляторами

- объем аккумуляторов используется более полно, то есть при том же объеме существенно уменьшается частота включения компрессоров, а значит, меньше расходуется их ресурс, или при той же частоте включения компрессоров можно использовать аккумуляторы меньшего объема, а значит, сэкономить занимаемое место.

Расчет оптимального объема аккумуляторов достаточно сложен и может занять большую часть статьи. Возможно, мы еще вернемся к этой теме, а сейчас отметим только, что при одноступенчатой схеме заправки эффективный (используемый) объем аккумуляторов составляет около 10 % полного геометрического объема, а при двухступенчатой – примерно вдвое больше. Это означает, что можно вдвое уменьшить или объем аккумуляторов, или частоту пусков компрессоров.

Как уже отмечалось, мощность, потребляемая компрессором при заполнении аккумуляторов, зависит от степени сжатия. Чтобы было проще оценить потребление и сравнить различные варианты, введем показатель «среднее давление в аккумуляторах»  $p_{\text{вых\_сред}}$ , как осредненное за большое время работы значение. При одинаковой производительности АГНКС среднее давление даст оценку мощности и потребляемого количества электроэнергии.

Рабочий процесс компрессора близок к адиабатному (политропический).

Работа сжатия одного килограмма газа в таком процессе рассчитывается как

$$l = -\frac{n}{n-1} \cdot \frac{R_0}{M} \cdot \left( E^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right),$$

где  $n$  – показатель политропы;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная;  $M$  – молярная масса газа;  $E$  – степень сжатия.

Для анализа длительной работы будем использовать не мгновенное, а среднее значение степени сжатия, то есть

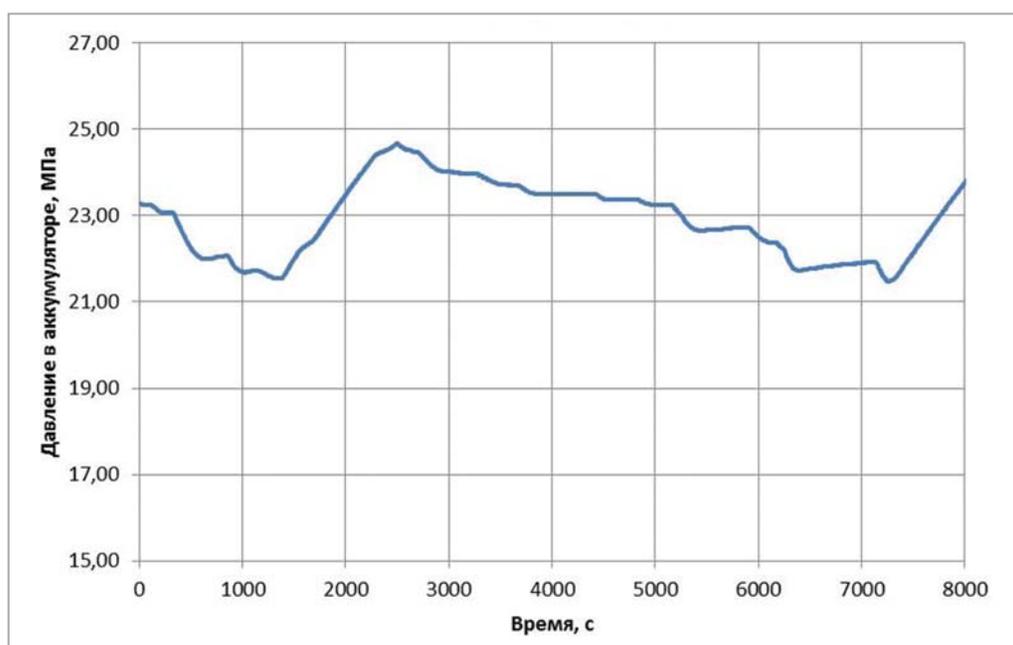
$$E = \frac{p_{\text{вых\_сред}}}{p_{\text{вх}}}.$$

Соответственно, потребляемая мощность рассчитывается как  $N=lG$ , где  $G$  – массовый расход. Для вычисления потребляемой механической мощности на валу нужно учесть еще КПД процесса, который указан в паспортных данных компрессора. Для сравнения мощности в разных режимах работы достаточно получить отношение

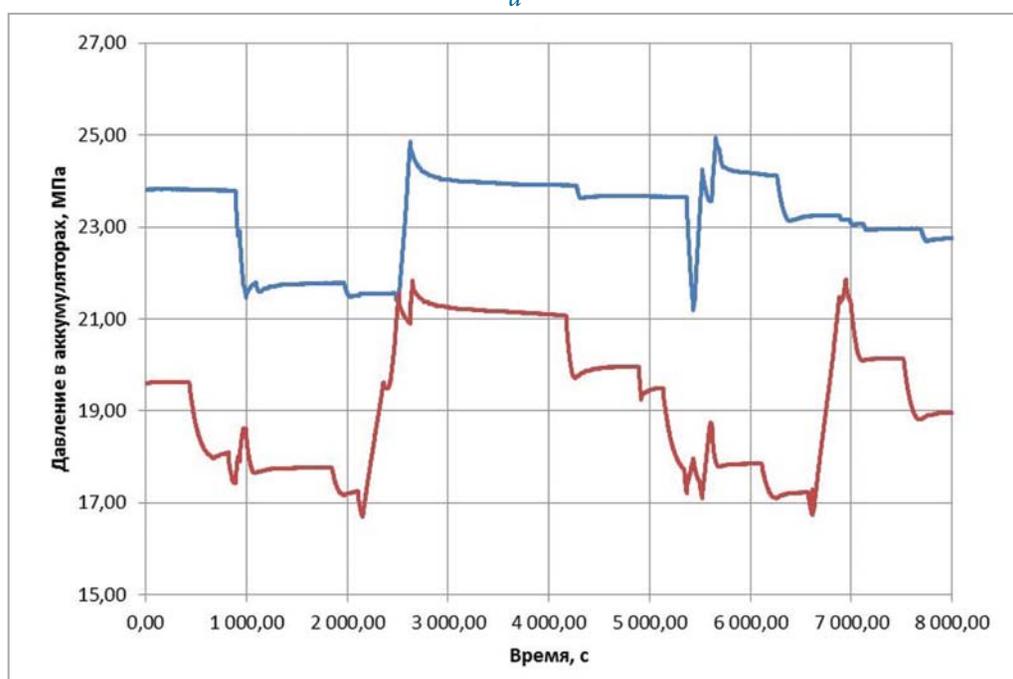
$$\frac{\left( E_2^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}{\left( E_1^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)},$$

так как остальные параметры газа и его расход будут одинаковы.

Также для сравнения потребления электроэнергии введем показатель «относительное время работы компрессоров» как отношение времени их работы к исследуемому интервалу времени.



а



б

**Рис. 6.** Изменение давления газа в аккумуляторах при односекционной (а) и двухсекционной (б) схемах

Нами были проанализированы две АГНКС со сходными условиями работы и однотипными компрессорами, но отличающиеся схемой аккумуляторов – одноступенчатой и двухступенчатой. Данные, полученные за некоторое время работы, приведены на рис. 6 и в табл. 1.

Расчет средней мощности по приведенной выше формуле дает среднюю мощность в 1,75 раза больше в двухступенчатом варианте. Это объясняется тем, что несмотря на меньшее среднее давление степень сжатия на АГНКС № 2 намного больше из-за очень низкого

Таблица 1

Параметр	АГНКС № 1	АГНКС № 2
Схема аккумуляторов	Одноступенчатая	Двухступенчатая
Входное давление, МПа	1,13	0,25
Среднее выходное давление, МПа	23,12	21
Относительное время работы компрессоров	0,235	0,125
Средний период между пусками компрессоров, ч	1,5	1
Объем аккумуляторов, м <sup>3</sup>	18	4,8

входного давления. Тем не менее видно, что необходимое выходное давление на второй АГНКС достигается при меньшей в 1,9 раза продолжительности работы компрессоров. Таким образом, общий расход электроэнергии на АГНКС с двухступенчатыми аккумуляторами составляет  $1,75/1,9=0,92$  от расхода электроэнергии на первой АГНКС, то есть понижен на 8 % при приблизительно равной производительности.

Заметим, что в России при относительно дешевой электроэнергии экономия 8 % может оказаться несущественной в денежном выражении. Но у многоступенчатой заправки есть интересные преимущества, не лежащие на поверхности. Рассмотрим эти «побочные эффекты», которые могут где-то оказаться интереснее «основных».

1. *Снижение необходимого объема аккумуляторов.* При одноступенчатой заправке невозможно опускать давление в аккумуляторе ниже давления заправки, а значит, большая часть объема газа в аккумуляторе не используется. В многоступенчатом варианте можно опустошать аккумулятор низкого давления существенно больше, следовательно неиспользуемый объем снижается. Газ в аккумуляторе высокого давления

расходуется значительно медленнее в этом варианте, а значит, и объем может быть меньше. Все это приводит к уменьшению необходимого числа баллонов в аккумуляторах и соответственно их стоимости, места, занимаемого аккумуляторами, и количества арматуры для подключения баллонов. Помимо высвобождения площади на территории АГНКС, снижаются затраты на обязательную периодическую процедуру освидетельствования баллонов высокого давления.

2. *Уменьшение среднего времени заправки.* При одноступенчатой схеме все колонки обслуживаются одним трубопроводом, пропускная способность которого распределяется между всеми заправляемыми одновременно автомобилями. В многоступенчатой схеме заправки низким и высоким давлением происходят независимо, к тому же заполнение аккумуляторов занимает на много меньше времени из-за их малого объема. Все это повышает среднюю производительность заправки и делает ее продолжительностью стабильной и прогнозируемой.

Следует хорошо понимать, что многоступенчатая заправка требует более сложного и дорогого оборудования,

Способ	Достоинства	Недостатки и ограничения
Использование медленной заправки	Существенная экономия затрат электроэнергии на заправку, а также на капитальных вложениях	Способ подходит только для хорошо планируемой заправки в течение длительного времени. Решение необходимо для заправки ПАГЗ
Секционирование аккумуляторов	Некоторое (5...9 %) снижение затрат электроэнергии. Существенное (в 1,5-2 раза) снижение частоты пусков компрессора или существенное (в 1,5-2 раза) уменьшение необходимого объема аккумуляторов	Увеличивает количество трубопроводов и кранов, требуются более сложные колонки. Необходим расчет экономического обоснования при проектировании

а также то, что преимущества многоступенчатой заправки будут полностью реализованы только при правильном выборе объема секций аккумуляторов (проектирование АГНКС) и заданных уровней поддержания давления в них (наладка и эксплуатация АГНКС). Бессмысленно подключать входы многоступенчатой колонки к одному общему аккумулятору. Нет смысла также поддерживать в аккумуляторах низкого давления такое же давление, как в аккумуляторах высокого давления.

### Выводы об оптимизации подготовки КПП

В этой статье мы рассмотрели способы уменьшения затрат на сжатие газа компрессорами АГНКС. В табл. 2 приведены достоинства и недостатки обоих способов.

При проектировании АГНКС и выборе оборудования для нее необходимо учитывать следующие факторы.

1. Назначение и место установки АГНКС. Понятие и критерий «оптимальности» будут отличаться для АГНКС, обслуживающей постоянный автопарк с прогнозируемыми пробегами и про-

стоями, и АГНКС, установленной рядом с автомобильной дорогой для общего пользования.

2. Объем начальных вложений и постоянные эксплуатационные затраты в какой-то степени компенсируют друг друга. Необходимо осознанное и взвешенное решение о выборе того или иного оборудования со сбалансированными характеристиками.

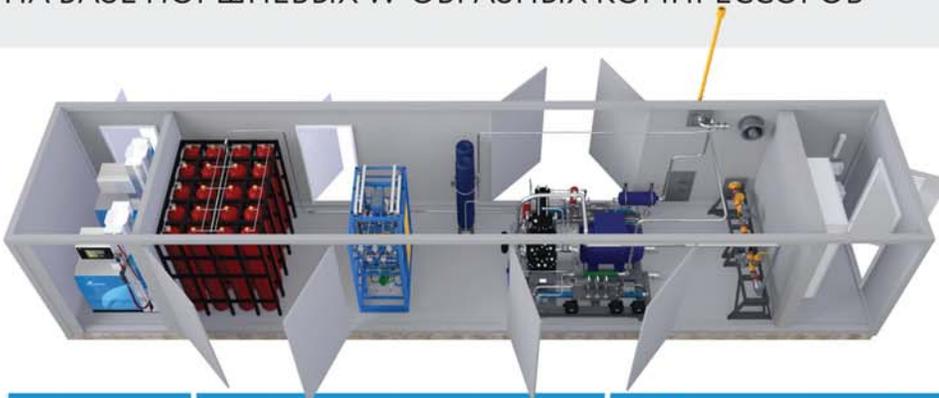
3. Иногда при модернизации оптимальным решением будет использование части имеющегося оборудования несмотря на несколько повышенные эксплуатационные затраты. Именно поэтому в рассмотренном примере АГНКС № 1 была применена одноступенчатая схема, чтобы использовать имеющиеся аккумуляторы.

Мы рассмотрели АГНКС, подключенную к газопроводу. Но отнюдь не всегда есть возможность устройства такой станции. Если по каким-то причинам подвод газа осложнен, решением может стать использование передвижных газозаправщиков (ПАГЗ) и организация с их помощью так называемой «виртуальной трубы». Здесь тоже есть множество особенностей, которые мы рассмотрим в будущих публикациях.

**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

# Экологическая эффективность автотранспортного комплекса в регионах России при переводе на природный газ

**А.Г. Ишков**, заместитель начальника департамента – начальник управления  
ПАО «Газпром», д.х.н.,

**К.В. Романов**, начальник отдела ПАО «Газпром», к.э.н.,

**Р.В. Тетеревлев**, главный технолог ПАО «Газпром»,

**Г.С. Аكوпова**, начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.,

**Н.Л. Власенко**, ведущий научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.б.н.,

**Е.В. Косолапова**, заместитель начальника лаборатории

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.,

**Д.О. Грицюта**, инженер I категории ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

**Ф.Т. Есиева**, младший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Представлены показатели экологической эффективности газомоторного топлива с использованием сценария перевода 50 % автотранспортных средств на сжатый природный газ в федеральных округах и крупных городах России.

Изложены способ расчета показателей выбросов и результаты расчетов, свидетельствующие о том, что перевод автотранспорта на природный газ приведет к сокращению выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ на 49 % и диоксида углерода – от 21 до 25 %.

Для решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха в регионах и крупных городах наиболее целесообразным является путь использования газомоторного топлива, что может значительно повысить экологическую эффективность транспортного сектора и внести существенный вклад в энергетическую безопасность страны.

#### Ключевые слова:

газомоторное топливо, сжатый природный газ, автотранспортный комплекс, способ расчета выбросов, экологическая эффективность.

**В** настоящее время проблема экологической эффективности моторных топлив приобретает все большую актуальность и масштабность. Это связано с тем, что разработанные системы снижения токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания уже не в состоянии (даже при массовом использовании)

остановить все более прогрессирующее загрязнение воздушного бассейна выбросами загрязняющих веществ (ЗВ) и парниковых газов, вызванное постоянно возрастающим парком автотранспортных средств. Поиск новых методов и перспективных технологий, направленных на совершенствование экологических качеств автотранспортных средств

и изучение конкуренции различных видов топлива (бензин, дизельное топливо, природный газ) по показателям экологической эффективности, может стать существенным шагом в активизации развития газомоторной отрасли и стимулировании спроса на природный газ на внутреннем рынке России.

Процессы перехода на использование сжатого природного газа (КПГ) в качестве газомоторного топлива (ГМТ) в Российской Федерации активизированы на федеральном уровне. Приоритеты государственной политики в сфере внедрения газомоторной техники определены в указах и посланиях Президента России, Прогнозе долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года, Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, Энергетической стратегии России на период до 2030 года, Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года и других документах.

В целях развития рынка КПГ издано распоряжение правительства Российской Федерации от 13.05.2013 г. № 767-р «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива» [1].

Во исполнение перечня поручений, данных правительству Российской Федерации по вопросу расширения использования газа в качестве моторного топлива (№ Пр-1298) [2], разработан и утвержден Комплексный план мероприятий по расширению использования ГМТ до 2020 года (№ 6819п-П9 от 14.11.2013 г.) [3], который представляет собой совокупность правовых, экономических, организационных мер поддержки производства и использования природного газа в качестве моторного топлива.

В результате реализации мероприятий, предусмотренных в подпрограмме Комплексного плана, к концу 2020 г. планируется следующее:

- суммарный объем потребления ГМТ техникой специального назначения составит 244,4 млн м<sup>3</sup>;
- число тракторов и комбайнов, работающих на ГМТ, составит 1350 ед.;
- количество коммунальной техники, работающей на ГМТ, составит 7200 ед.;
- количество дорожной и строительной техники, работающей на ГМТ, составит 8100 ед.

Предполагается, что в результате этих мер объем выбросов ЗВ от техники специального назначения в окружающую среду снизится на 6 % по отношению к уровню 2013 г.

Замещение традиционных видов топлива на ГМТ направлено на снижение транспортных издержек в экономике, повышение конкурентоспособности транспортной системы Российской Федерации и позволит уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, климат и здоровье населения. По мнению экспертов, это замещение является стимулом развития отечественной автомобильной отрасли. Спрос на газомоторный транспорт и технику растет как со стороны коммерческих, так и со стороны муниципальных предприятий. Сегодня газомоторные модели присутствуют в линейке выпускаемой продукции большинства российских автопроизводителей.

### Развитие газомоторной составляющей в автотранспортном секторе России

Для динамичного развития рынка ГМТ в России необходим комплексный подход и условия, позволяющие увеличивать парк техники, работающей на природном газе, развивать газозаправочную сеть и сопутствующую инфраструктуру, повышать качество топлива и заинтересованность потребителей моторного топлива, прежде всего – населения, усиливать участие государства в регулировании развития рынка.

По состоянию на 2014 г. общий парк автомобилей в России составлял около 56 млн ед. Динамика развития (рис. 1) показывает ежегодный рост общего числа автотранспортных средств (АТС) [4-5]. Так, в 2014 г. в сравнении с 2013 г. парк вырос почти на 2369 тыс. ед., в том числе численность легковых автомобилей увеличилась на 2,2 млн. При этом число легковых автомобилей со сроком эксплуатации более 10 лет в 2014 г. составило 19,9 млн. На рис. 1

показано распределение автотранспортных средств по видам. Статистика показывает, что особенно интенсивный рост парка АТС наблюдается в крупных городах.

Динамика потребления топлива подвижным составом автомобильного транспорта РФ представлена на рис. 2, где прослеживается постоянное нарастание объемов использования моторных топлив. Динамика потребления ГМТ пока характеризуется невысокими

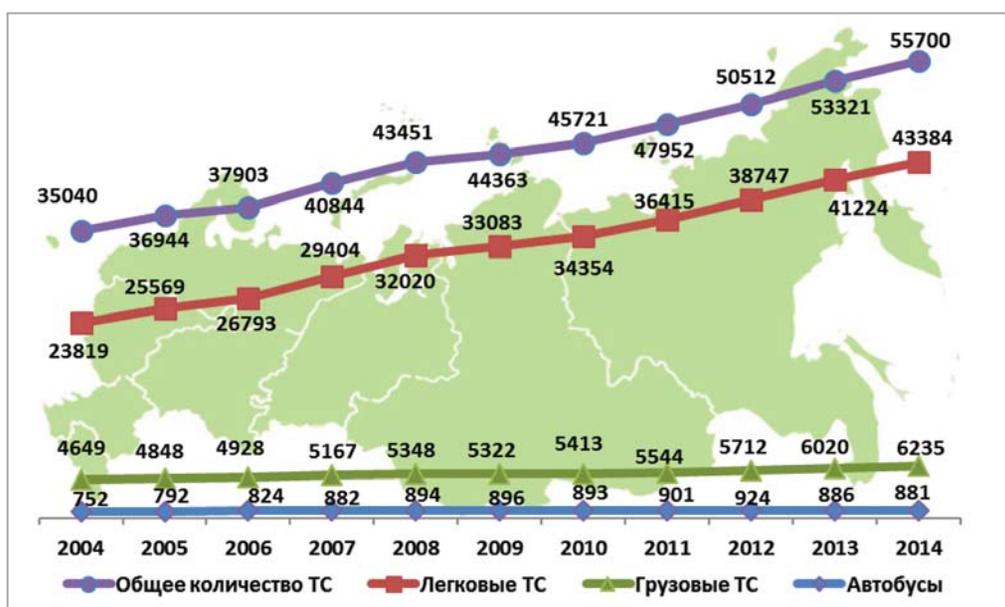


Рис. 1. Динамика роста автомобильного парка в Российской Федерации за 2004-2014 гг. (тыс. ед.)

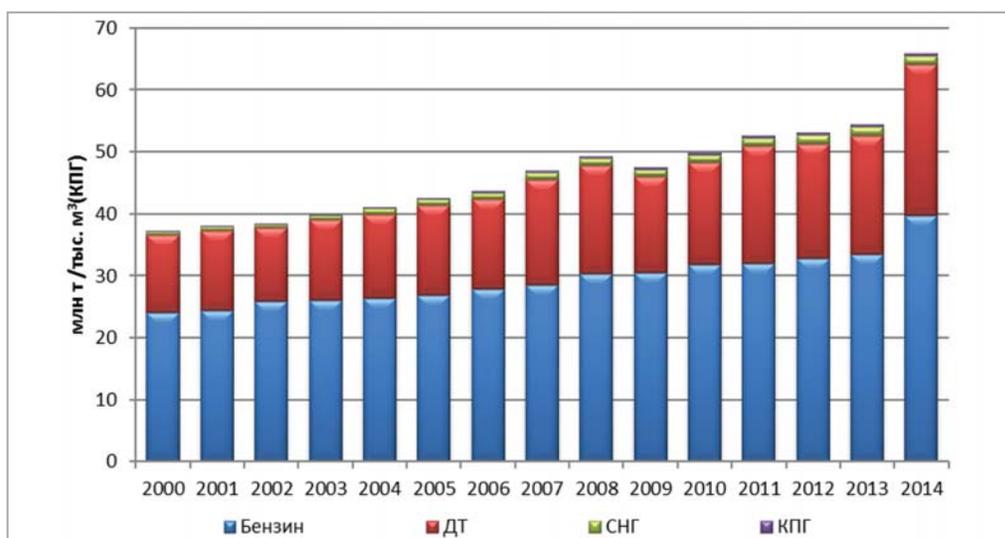
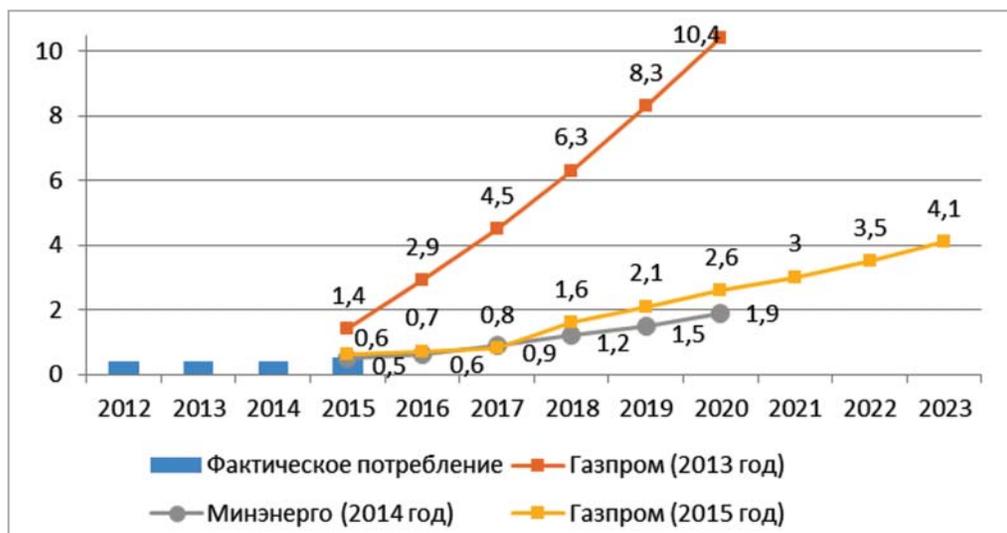
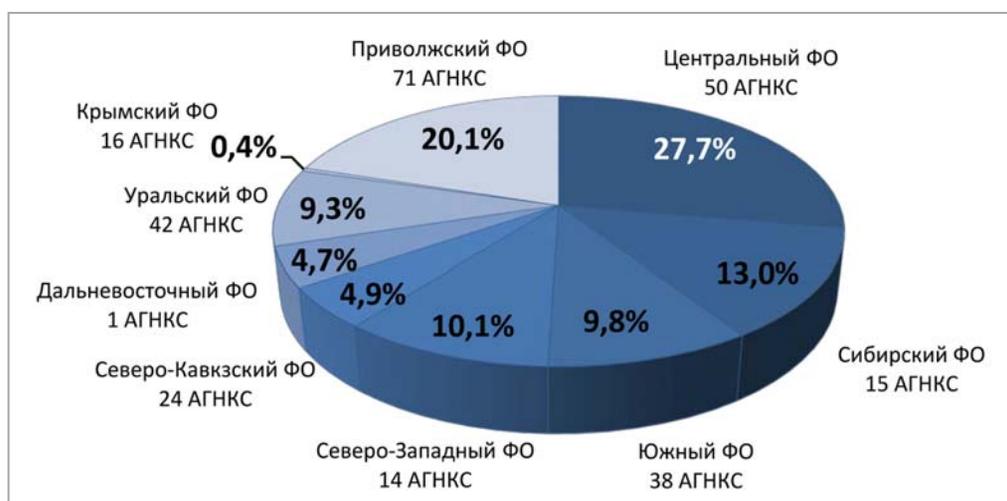


Рис. 2. Динамика потребления топлив подвижным составом автомобильного транспорта РФ



**Рис. 3.** Основные характеристики газомоторного сектора. По прогнозу потребление КПГ в России к 2020 г. составит: 10,4 млрд м<sup>3</sup> (Газпром, 2013 г.); 2,6 млрд м<sup>3</sup> (Газпром, 2015 г.); 1,6 млрд м<sup>3</sup> (Минэнерго, 2014 г.)  
 Источник – Минэнерго России, Газпром



**Рис. 4.** Структура потребления КПГ и распределение АГНКС по федеральным округам РФ

показателями. В настоящее время в структуре потребления моторных топлив в округах РФ доля КПГ в среднем составляет 0,4 %.

Особое внимание уделяется вопросу синхронизации увеличения производства техники на природном газе с расширением газозаправочной инфраструктуры в регионах. Для формирования у потребителя четкой идентификации природного газа в качестве нового вида моторного топлива компания «Газпром газомоторное топливо» ведет масштабную работу по

созданию федеральной сети автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) – строительство новых и модернизацию действующих станций.

Основные характеристики газомоторного сектора – потребление КПГ, число АГНКС и их распределение по федеральным округам в Российской Федерации\*, динамика роста спроса на КПГ – представлены на рис. 3-5.

\* По данным ООО «Газпром ВНИИГАЗ».



**Рис. 5.** В 2014 г. число АГНКС составило 271 ед., включая Крымский Федеральный округ (на фото АГНКС, Самара)

Цель ПАО «Газпром» как участника рынка газомоторного топлива – сделать природный газ доступным моторным топливом, создать на территории РФ единую федеральную сеть газозаправочных станций и другие элементы инфраструктуры. По данным на начало 2015 г. в 58 регионах РФ действует 271 АГНКС с суммарной проектной производительностью около 2 млрд м<sup>3</sup>/год. Российский парк автомобилей, работающих на природном газе, оценивается примерно в 119 тыс. ед., 6 % которых принадлежат ПАО «Газпром». Российскими АГНКС на 01.05.2015 г. реализовано 0,4 млрд м<sup>3</sup> КППГ [6].

В России существуют разные оценки и плановые прогнозы по росту рынка КППГ (см. рис. 3, 4). В 2013 г. компания «Газпром газомоторное топливо» сообщила о перспективах роста потребления КППГ в стране с 0,4 млрд м<sup>3</sup> в 2013 г. до 10,4 млрд м<sup>3</sup> в 2020 г. Фактические результаты Минэнерго показали, что потребление в 2015 г. оценивается на уровне 0,5 млрд м<sup>3</sup>. В прошлом году оценка потенциального спроса на КППГ в стране в 2020 г. снизилась с 10,4 млрд до 2,6 млрд м<sup>3</sup>, а к 2023 г. предполагается

потребление 4,1 млрд м<sup>3</sup>. Существенный пересмотр планов может быть вызван снижением инвестиционной активности компаний (производители инфраструктуры и потребители газа) в связи с ухудшением общеэкономической ситуации в 2014-2015 гг. Минэнерго России также прогнозирует потребление КППГ в России. Прогнозы ведомства немногим ниже оценок Газпрома от 2015 г. и предполагают рост потребления менее чем в 5 раз за 2015-2020 гг.

Следует отметить, что Россия на мировом рынке природного газа в качестве моторного топлива занимает 14 место по общему спросу на КППГ.

### **Анализ экологической ситуации в городах и регионах РФ**

В Российской Федерации имеются достаточно благоприятные условия для газификации транспортных средств, прежде всего, за счет природного газа, запасы которого дают возможность рассматривать его как надежный энергоресурс. Единая система газоснабжения обеспечивает подачу природного газа

более чем в 20 тыс. населенных пунктов России, в том числе в 700 городов, транспорт которых является потенциальным потребителем этого вида моторного топлива.

Проблемы городской экологии занимают специфическое место во всем комплексе экологических проблем. Это обусловлено, во-первых, общемировой тенденцией увеличения доли городского населения. В частности, в России в городах концентрируется около 73 % населения. Во-вторых, функционирование предприятий, транспорта, объектов инфраструктуры на ограниченной территории города способствует образованию практически всех существующих видов антропогенного загрязнения, что в условиях высокой концентрации населения приводит к крайне опасному повышению степени экологического риска для всех компонентов окружающей среды – атмосферного воздуха, растительности, почвы, водных объектов, увеличивается также шумовое воздействие. Все это в комплексе отрицательно сказывается на здоровье и качестве жизни.

На настоящем этапе особенно актуальной становится проблема оптимизации экологической обстановки в городах-миллионниках. Ранее способы улучшения экологической ситуации были направлены в основном на борьбу с последствиями загрязнения. Однако бороться только с последствиями загрязнения среды или ориентироваться на традиционные подходы (например, снижение уровня антропогенного воздействия с помощью технологических мер) недостаточно, необходима природоохранная политика, предупредительные (профилактические) меры, экологическая оптимизация территории.

На протяжении многих лет в России остается достаточно высоким уровень загрязнения атмосферного воздуха. Известно, что выбросы ЗВ автомобильным транспортом в сравнении с другими

источниками наносят наиболее весомый ущерб окружающей среде.

По данным Госдоклада о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации, подготовленного Министерством природных ресурсов и экологии в 2014 г., были проанализированы показатели загрязнения воздуха вследствие выбросов от стационарных источников и транспорта. Так, в период за 2007-2014 гг. снижение общих выбросов от автотранспортных средств составило 7,5 %, при этом объем выбросов СО, твердых веществ и оксидов азота уменьшился на 3,6; 49,4 и 22,1 % соответственно. Тем не менее в 2014 г. произошло увеличение общего объема выбросов ЗВ от автотранспортных средств на 197,2 тыс. т в сравнении с 2013 г.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и автомобильных источников и их динамика за период 2005-2014 гг. представлены на рис. 6 [5].

В настоящее время доля автомобильного транспорта в общем объеме выбросов ЗВ в атмосферный воздух составляет около 44 % в целом по Российской Федерации (рис. 7), а в крупных городах этот показатель достигает 80...90 % [5].

Приведенные на рис. 4 данные по динамике выбросов ЗВ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта показывают, что в период с 2008 по 2014 г. происходили некоторые колебания объема выбросов ЗВ по отношению к выбросам в 2008 г., принятым за 100 %, в пределах  $\pm 0,2...3,6$  %, которые зависели от многих факторов, в том числе от роста автопарка, срока эксплуатации, экологического класса.

В 2013 и 2014 г. отмечено увеличение объема выбросов ЗВ в сравнении с динамикой снижения в 2008-2012 гг., что связано с ростом автопарка, в котором доля автотранспортных средств со сроком эксплуатации более 10 лет пока очень медленно уменьшается.



Рис. 6. Динамика выбросов ЗВ в атмосферный воздух в РФ за 2005-2014 гг.

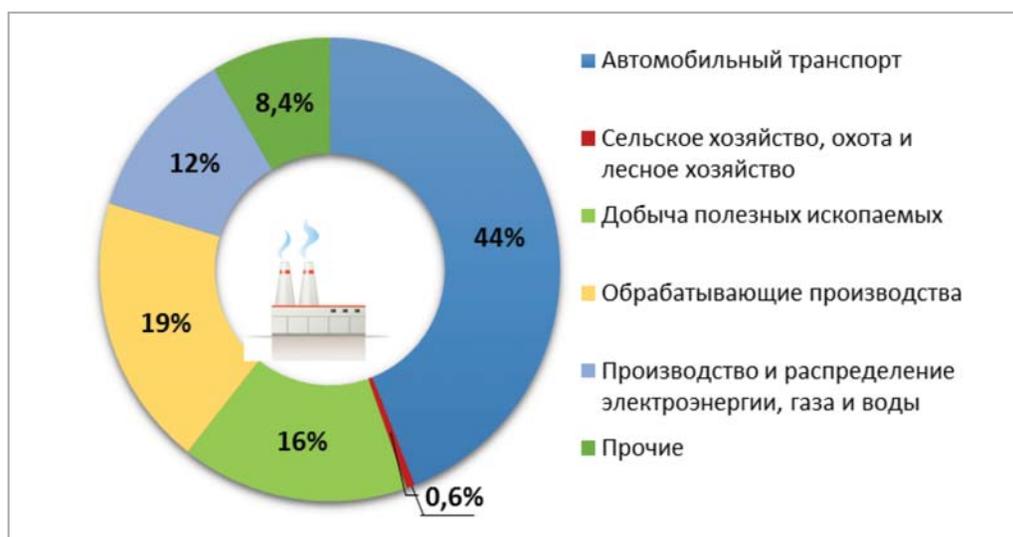


Рис. 7. Доля автотранспорта в выбросах ЗВ в атмосферный воздух

Сохраняется тенденция роста загрязнения атмосферного воздуха вблизи автомагистралей и на улицах городов с интенсивным движением транспорта. Доля выбросов ЗВ от автотранспорта в крупнейших российских городах значительно превышает долю выбросов от стационарных источников.

Среди парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу транспортом в России, доминирует  $\text{CO}_2$ , при этом на долю автотранспорта приходится

98 % совокупного объема выбросов от транспорта. Рост выбросов обусловлен в значительной степени продолжающимся увеличением числа личных автомобилей, которое к 2035 г. в РФ достигнет среднего для Восточной Европы уровня (350...400 транспортных средств на 1000 жителей), что будет сопровождаться соответствующим увеличением объема выбросов парниковых газов с 116 т (оценочный показатель в 2009 г.) до 210 т  $\text{CO}_2_{\text{экв}}$  (прогнозируемый показатель в 2030 г.) [7].

## Способ расчета выбросов в атмосферный воздух

22

Последствиям произошедших изменений уделяется, обычно, больше внимания, чем перспективным оценкам. Однако больший интерес представляет перспективный вариант. Поэтому для расчета выбросов был выбран сценарий перевода на природный газ 50 % существующего парка автотранспортных средств России. Этот показатель основан на оптимистичном варианте развития отрасли с учетом следующих факторов:

- Распоряжения Правительства РФ [1] и Перечня поручений Правительству РФ [2] в части перевода 50 % муниципального транспорта в крупных городах;
- программы ОАО «Газпром», в которой анонсированы планы по расширению использования КПП и СПГ в качестве моторного топлива, согласно которым количество газомоторной техники различных типов в 2017 г. должно составить не менее 50 % [8];
- реального стремления достижения расчетных объемов реализации КПП, сопоставимых даже с нынешним потреблением газомоторного топлива в странах, являющихся мировыми лидерами по использованию автотранспортных средств на природном газе.

Расчет валовых выбросов CO<sub>2</sub> и загрязняющих веществ существующим парком автотранспортных средств проводили с использованием данных Госдоклада [5], расчетной методики [9] и с учетом следующих необходимых для расчета параметров:

- парка АТС в федеральных округах и крупных городах;
- пробега каждого вида АТС (легковые, грузовые, автобусы) в год (усредненные показатели);
- удельные выбросы CO<sub>2</sub> и каждого индивидуального ЗВ, взятого в расчет (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, ТЧ, летучие органические соединения – ЛОС), для каждого вида топлива (бензин, дизельное топливо, КПП) с учетом его класса (Евро-0, Евро-2, Евро-3 и выше) [9].

Для расчета валовых выбросов CO<sub>2</sub> и загрязняющих веществ по сценарию перевода 50 % парка автотранспортных средств на КПП использованы данные по существующему парку АТС в федеральных округах и крупных городах РФ, включающие две составляющие:

1) парк переведенного на КПП автотранспорта, состоящий из суммы половины парка АТС на бензине, половины парка на ДТ и всего существующего парка на КПП;

2) оставшийся парк АТС на бензине и ДТ, не переведенный на КПП.

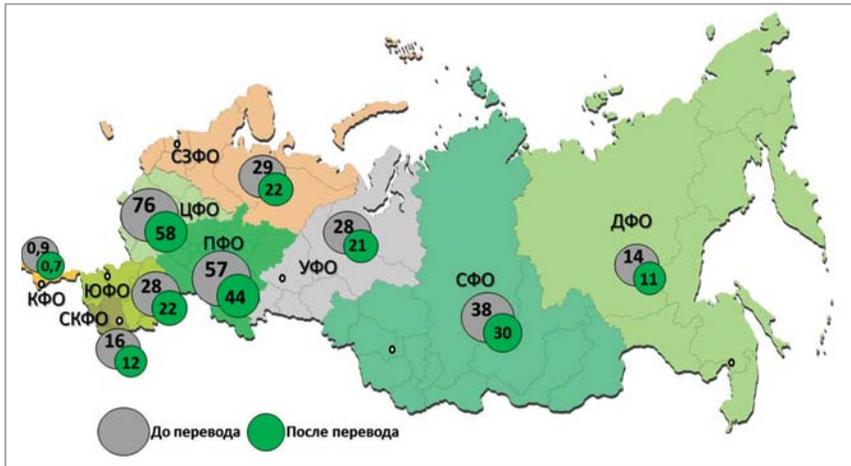
Блок-схема расчета валовых выбросов CO<sub>2</sub> и ЗВ представлена на рис. 8.

## Результаты расчета выбросов в атмосферный воздух

На рис. 9 показаны результаты сокращения выбросов диоксида углерода и ЗВ по сценарию перевода 50 % парка автотранспортных средств на КПП в федеральных округах Российской Федерации (по данным ООО «Газпром ВНИИГАЗ»).



Рис. 8. Блок-схема расчета валовых выбросов CO<sub>2</sub> и ЗВ



а



б

Рис. 9. Сокращение выбросов диоксида углерода (а), млн т, и ЗВ (б), тыс. т, по сценарию перевода 50 % парка автотранспортных средств на КПГ в федеральных округах РФ



а

б

Рис. 10. Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> (а), млн т, и ЗВ (б), тыс. т, на примере субъектов Центрального Федерального округа

Показатель выбросов	До перевода	После перевода
Общее количество выбросов ЗВ, тыс. т	3 255	1 669
CO <sub>2</sub> , млн т	75,9	58,1
CO, тыс. т	2 561	1 313
ЛОС, тыс. т	331	166
NO <sub>x</sub> , тыс. т	320	168
SO <sub>2</sub> , тыс. т	32	16
ТЧ, тыс. т	11	5

Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> составит от 21 до 25 %; сокращение выбросов загрязняющих веществ – 48...49 %.

На примере Центрального федерального округа приведены величины сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и ЗВ по сценарию перевода 50 % парка автотранспортных средств на КПГ для субъектов округа (рис. 10).

Снижение выбросов CO<sub>2</sub> и ЗВ от автомобильного транспорта в Центральном федеральном округе по сценарию перевода 50 % автотранспортных средств на КПГ показано в таблице.

Сокращение выбросов ЗВ и CO<sub>2</sub> от автомобильного транспорта в крупных городах по сценарию перевода 50 % всех автотранспортных средств на КПГ

в Москве и Санкт-Петербурге представлено на рис. 11 и 12.

Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> и ЗВ по сценарию перевода 50 % парка автотранспортных средств на КПГ на примере Москвы и Санкт-Петербурга соответствует тенденции сокращения по федеральным округам РФ и составляет: по CO<sub>2</sub> – 24 %; по ЗВ – 49 %.

Таким образом, экологические преимущества перевода автотранспортных средств на КПГ подтверждены проведенными комплексными исследованиями по жизненному циклу топлив с оценкой эффективности использования ГМТ в федеральных округах и городах Российской Федерации. Эффективность перевода оценена по основным экологическим

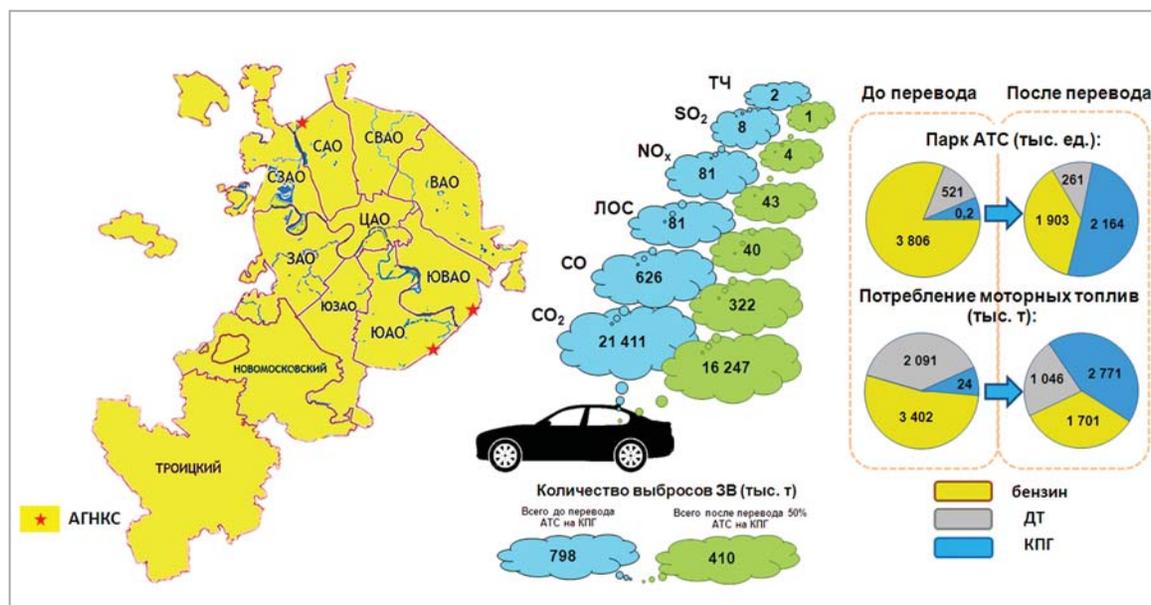
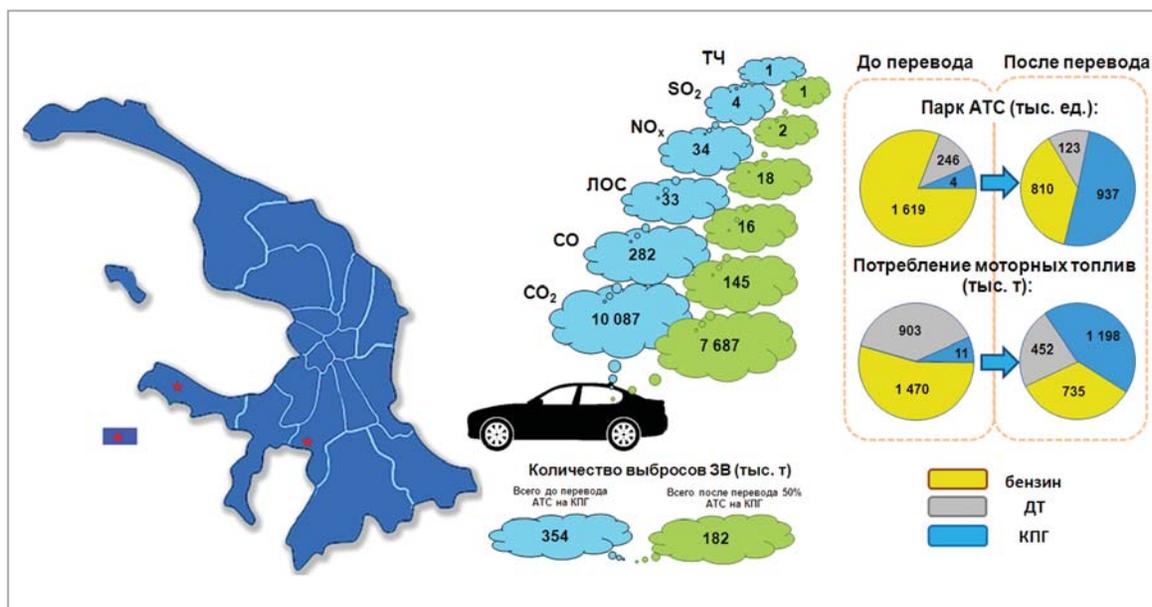


Рис. 11. Сокращение выбросов ЗВ и CO<sub>2</sub> от автомобильного транспорта в крупных городах по сценарию перевода 50 % всех автотранспортных средств на КПГ, г. Москва



**Рис. 12.** Сокращение выбросов ЗВ и CO<sub>2</sub> от автомобильного транспорта в крупных городах по сценарию перевода 50 % всех автотранспортных средств на КПГ, г. Санкт-Петербург

характеристикам топлив, суммарным валовым выбросам ЗВ, по отдельным веществам (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, ТЧ, ЛОС) и CO<sub>2</sub>.

Применение природного газа в качестве моторного топлива отвечает

требованиям времени и принципам устойчивого развития – сохранению здоровья населения и благоприятной окружающей среды при стабильном экономическом росте.

## Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.05.2013 г. № 767-р «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива» // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 5 (35). – С. 5-6.
2. Перечень поручений Президента Российской Федерации по итогам совещания по вопросу расширения использования газа в качестве моторного топлива от 14 мая 2013 г. № Пр-1298. <http://kremlin.ru/events/president/news/18345>.
3. Комплексный план мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива, утвержденный заместителем председателя Правительства Российской Федерации А.В. Дворковичем 14 ноября 2013 года (№ 6819п-П9). <http://aviatp.ru/upload/medialibrary/plan.pdf>.
4. Статистика МВД ГИБДД, 2015 г. <http://www.gibdd.ru/stat/>
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году», 2015 г.
6. Международный газовый союз (на 01.05.2015). <http://www.igu.org/>
7. Проект Программы развития ООН, Глобального экологического фонда, министерства транспорта РФ «Сокращение выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в городах России» <http://www.undp.ru/index.php?iso=RU&lid=2&cmd=programs&id=220>
8. Программа по расширению использования КПГ в качестве моторного топлива на собственном транспорте организаций группы Газпром на 2014-2017 годы. Утв. Приказом ОАО «Газпром» от 14 июля 2014 г., № 338.
9. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух. – М.: НИИАТ, 2008 г.

## Водный транспорт на сжиженном природном газе: мировые тенденции и первое российское судно-газоход на СПГ

Н.Г. Кириллов, зам. генерального директора  
ООО «НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания», д.т.н.

Статья посвящена анализу решения проблем при создании первого российского судна, работающего на сжиженном природном газе (СПГ). Изложены уникальные отечественные технологии по переводу судовых дизелей на двухтопливный режим и использованию быстростъемных криогенных емкостей СПГ. Приведен мировой опыт по использованию сжиженного природного газа на морском и речном транспорте.

**Ключевые слова:**

сжиженный природный газ, судно на СПГ, двухтопливная энергетическая установка, газодизель.

### Мировые тенденции по применению СПГ на морском и речном транспорте

В настоящее время среди всех видов транспорта проблема повышения экологической чистоты отработавших газов (ОГ) наиболее остро стоит для водного транспорта и, прежде всего, морского. Возрастание актуальности этой проблемы для морских судов обусловлено существующими и планируемыми к введению нормами по контролю за выбросами оксидов серы и азота и созданием особых районов морских акваторий, где эти выбросы будут контролироваться. В соответствии с Требованиями Приложения VI МК МАРПОЛ наиболее жесткие нормы устанавливаются для районов контроля выбросов (Emission Control Areas – ECA), к числу которых относятся Балтийское, Северное, Карибское и Средиземное моря, прибрежные воды США

и Канады, побережье Японии, Малаккский пролив (рис. 1).

Так, уже с 1 января 2015 г. в зонах особого контроля над выбросами серы (Sulphur Emission Control Areas – SECA), в число которых входят Балтийское и Северное моря, содержание серы в судовом топливе не должно превышать 0,1 % (это в 10 раз меньше, чем было разрешено до 2015 г.).

Особые требования для дизельных двигателей разработаны Европейским союзом. В частности, выброс серы при нахождении в портах Евросоюза не должен превышать 0,1...0,2 %. При невыполнении этого требования судно должно получать более дорогую береговую электроэнергию, а с 2016 г. в ЕС использование высокосернистого мазута будет караться конфискацией судна.

С 2020 г. будет введено ограничение на содержание серы в судовом топливе на уровне не более 0,5 % по всему миру. В 2022 г. начинает действовать

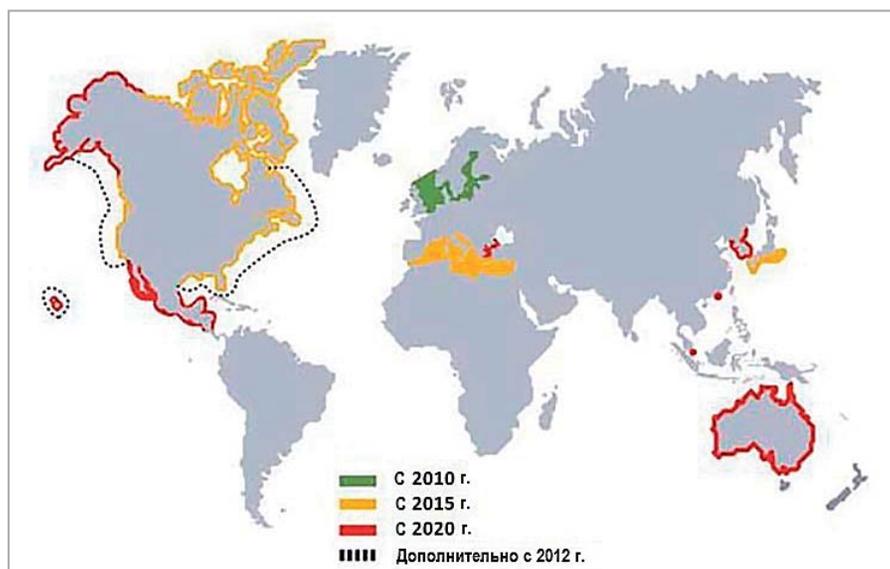


Рис. 1. Районы контроля выбросов (ECA)

международное соглашение о придании Балтийскому морю статуса NECA (Nitrogen Emission Control Area) – это зона особого контроля над выбросами оксидов азота. В соответствии с положениями Конвенции МАРПОЛ статус района NECA предполагает, что все суда, построенные после 1 января 2022 г. и эксплуатируемые в таком районе, должны иметь дизельные установки, отвечающие стандартам Уровня III.

Мазут как традиционное судовое топливо не сможет удовлетворять новым требованиям. Это означает, что судовладельцам и операторам судов придется либо устанавливать дорогостоящее оборудование (скрубберы) по очистке судовых отработавших газов, либо переходить на использование альтернативных, экологически более чистых видов моторного топлива. В настоящее время практически все судовладельцы, готовясь к вводимым ограничениям, в качестве наиболее эффективного варианта рассматривают переход на использование природного газа для судовых энергетических установок. Природный газ позволяет полностью исключить выброс оксидов серы и твердых частиц, снизить содержание в ОГ оксидов азота на 90 % и  $\text{CO}_2$  на 30 % [1].

Природный газ как моторное топливо на судах может находиться в двух состояниях: сжиженном (СПГ) и компримированном (КПГ). Во всех случаях в цилиндры двигателя он подается в газообразном виде. Однако для таких видов транспорта, как авиационный, железнодорожный и водный, использование КПГ весьма проблематично. Это связано с тем, что применение СПГ позволяет существенно улучшить технические показатели транспортных средств по сравнению с использованием КПГ: уменьшить габариты и массу системы хранения бортового топлива; увеличить полезную грузоподъемность и запас хода на одной заправке; сократить за счет более редких заправок непроизводительные затраты, связанные с холостыми пробегам. Преимущества сжиженного природного газа при использовании в качестве моторного топлива объясняются более высокой его плотностью (в 3 раза) по отношению к КПГ. Сжижение позволяет уменьшить объем газа, занимаемый в обычных условиях, почти в 600 раз, что приводит по сравнению со сжатием газа к уменьшению массы системы хранения природного газа на транспортном средстве в 3-4 раза, а объема в 1,5-3 раза [2].

Мировой опыт показывает, что в судовой энергетике природный газ может использоваться только в виде СПГ ввиду наиболее приемлемых массогабаритных характеристик топливной системы. Поэтому если сегодня в мире насчитывается около 100 морских и речных судов на СПГ, то к 2030 г. по прогнозам их будет в 370 раз больше, то есть 3700.

В соответствии со стратегией, подготовленной Европейской комиссией, к 2020 г. все морские порты ЕС, а к 2025 г. также все крупные речные порты должны быть оборудованы пунктами бункеровки сжиженным природным газом. При этом портовые власти будут вольны определять конкретные способы бункеровки и логистики СПГ. Пункты бункеровки предполагается оборудовать не только в портах Северного и Балтийского морей (зоны ECA), но и во всех других портах, включая средиземноморские. Спрос на судовое газомоторное топливо возрастет с 0,6 млн до почти 16 млн т/год к 2030 г.

Маршруты основной части морских грузоперевозок России проходят через районы контроля выбросов, в частности

через Балтийское и Северное моря. Соответственно для нашей страны переход на новые экологические стандарты имеет особую актуальность. Принятие указанных выше ограничений неминуемо повлечет за собой существенное уменьшение грузооборота морским транспортом со странами ЕС и Англии и, как следствие, – существенное уменьшение торгового оборота в случае, если заранее не побеспокоиться о необходимых технических мероприятиях для достижения соответствия новым экологическим требованиям.

Тема использования сжиженного природного газа актуальна и для речных судов. С одной стороны, из-за большой агрегатной мощности энергетических установок речные суда являются основным источником загрязнения атмосферы в таких локальных зонах как порты в черте городов, гидротехнические сооружения и акватории рек. С другой, переход на природный газ позволит снизить себестоимость перевозок речным транспортом и переключить на него часть грузов с автомобильного и железнодорожного видов транспорта [3, 4].



Рис. 2. Заправка судна смешанного плавания сжиженным природным газом в порту Роттердама

Перевод речных судов на СПГ – общемировой тренд в развитии судовой энергетики (рис. 2). Так, в ноябре 2015 г. исследовательская компания DNV GL Netherlands завершила работы по оценке создания Трансевропейской транспортной сети на основе СПГ-коридора на маршруте рек Рейн – Майн и Дунай. Исследования финансировал консорциум, состоящий из 50 европейских компаний, включающий Группы портов Рейна, порты Роттердама, Антверпена, Страсбурга и Мангейма. Эти порты играют ведущую роль в Европе по развитию использования СПГ в качестве топлива для внутренних водных путей.

Представители DNV GL отмечают, что исследование помогло завершить дискуссии вокруг вопроса использования СПГ в качестве судового топлива для речного транспорта и начать развитие данного инновационного направления. Кроме Европы, и другие развитые страны мира разрабатывают меры по улучшению экологической обстановки на внутренних водных путях. Так, по инициативе китайской национальной газовой компании CNGC на всем протяжении судоходной части реки Янцзы (более 2500 км) строятся береговые комплексы для заправки судов сжиженным природным газом и вводятся в опытную эксплуатацию суда на СПГ. Например, в китайском прибрежном районе Тангу, где размещаются свободные экономические зоны Binhai New Area и Тяньцзиньская зона экономического и технического развития, успешно завершён демонстрационный проект по переводу рыболовных судов на сжиженный природный газ. Аналогичную процедуру по переводу на газовое топливо планируется провести еще на 50 судах. В результате будет получен стратегически важный опыт эксплуатации целого флота судов на СПГ.

В Российской Федерации одним из наиболее перспективных направлений использования природного газа на судах внутреннего и смешанного плавания

является перевод на газомоторное топливо судов, работающих в черте крупных городов: прогулочных и экскурсионных, буксиров, теплоходов портового флота и лоцманских катеров. С одной стороны, именно для этих судов проблема экологической безопасности стоит особенно остро, а с другой – для их заправки топливом может быть использована городская газовая инфраструктура. В этой области использование СПГ в качестве моторного топлива целесообразно, в первую очередь, для судов Волжского, Московского, Камского, Волго-Донского, Северо-Западного, Кубанского и Западно-Сибирского пароходств.

Перспективным является также использование судов-газоходов смешанного и внутреннего плавания в районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, где находятся предприятия по добыче природного газа, в том числе заводы по сжижению природного газа, и отсутствуют нефтеперерабатывающие предприятия, что вызывает трудности в обеспечении флота топливом нефтяного происхождения.

## Российский опыт создания судна-газохода на СПГ

Ранее сжиженный природный газ на отечественном водном транспорте не использовался. Основной причиной являлось отсутствие российского опыта в создании судовых энергетических установок, использующих СПГ в качестве моторного топлива. Однако в настоящее время ситуация кардинально изменилась – создано первое отечественное судно-газоход на СПГ, что явилось технологическим прорывом использования СПГ в судовой энергетике.

В 2014 г. под руководством автора специалистами компании ООО «НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания» (ООО «НПО «СПбЭК») впервые в России была выполнена опытно-конструкторская работа (ОКР) по

созданию опытного образца судовой энергетической установки для работы на сжиженном природном газе. Для проведения ее натурных испытаний на двухтопливном режиме «дизельное топливо – сжиженный природный газ» был выбран теплоход «Нева-6» валовой вместимостью около 210 рег. т.

В ходе выполнения ОКР специалистами ООО «НПО «СПбЭК» был проведен целый комплекс научных исследований по обоснованию технической возможности и экономической целесообразности частичного перевода судов внутреннего и смешанного плавания на сжиженный природный газ, включающий решение следующих задач: определение области применения СПГ на речном и морском транспорте; анализ зарубежного опыта использования СПГ в качестве топлива на водном транспорте; разработку концепции технических решений для перевода судовых дизелей на двухтопливный газодизельный режим работы с использованием СПГ в качестве основного моторного топлива; разработку концепции технических решений по конструктивному исполнению и эксплуатации в условиях судна изотермических емкостей с криогенным топливом; определение экономической оценки целесообразности использования СПГ в качестве топлива на речных и морских судах в РФ, а также разработку комплекта рабочей конструкторской документации опытной судовой энергетической установки на СПГ.

Основные проблемы, которые необходимо было решать при создании судна-газохода, были связаны с технологией перевода судовых дизелей 3Д6 теплохода «Нева-6» на двухтопливный газодизельный режим, выбором типа и размещения криогенных изотермических емкостей с СПГ на судне, способа газификации криогенного топлива и обеспечения взрывобезопасности машинного отделения, а также с технологией бункеровки (заправка) криогенных емкостей сжиженным природным

газом и разработкой системы автоматического управления двухтопливным режимом. Трудность решения указанных задач определялась полным отсутствием отечественного практического опыта по использованию СПГ в судовой энергетике.

При переводе судовых дизелей 3Д6 модернизируемого судна «Нева-6» на двухтопливный режим был выбран вариант внешнего смесеобразования. При таком смесеобразовании природный газ подается во впускной воздушный коллектор, из которого газоздушная смесь поступает в цилиндры дизельного двигателя. В конце такта сжатия в цилиндр впрыскивается запальная доза дизельного топлива (около 30 % номинальной цикловой подачи), которое необходимо вследствие того, что давление в конце сжатия не обеспечивает достижения температуры самовоспламенения метана, составляющей 650...720 °С и значительно превышающей температуру самовоспламенения дизельного топлива



**Рис. 3.** Газодизель 3Д6 с комплектом навесного газового оборудования, размещенного на боковой стенке машинного отделения судна-газохода «Нева-6» на СПГ, для подачи природного газа

(350...400 °С). Такой способ воспламенения обеспечивает возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно.

Уникальность указанной ОКР заключается в том, что перевод судовой энергетической установки пассажирского судна типа «Нева» на двухтопливный газодизельный режим работы производится без демонтажа штатных судовых дизелей. Судно дооснащается комплектом навесного газового оборудования (рис. 3) с системой автоматического управления двухтопливным режимом, оптимизированной на береговом испытательном стенде для замещения 70 % дизельного топлива при работе на номинальной мощности. Такой подход в значительной степени позволяет снизить затраты на перевод судна или другого транспортного средства на газодизельный цикл.

Основные рабочие параметры газодизеля (например, температура выхлопных газов, масла и охлаждающей жидкости) остаются в пределах допусков, установленных заводом-изготовителем. Как только в двигатель поступает газ, регулятор уменьшает подачу дизельного топлива, сохраняя номинальные обороты и обеспечивая необходимую выходную мощность. Система автоматизированного управления двухтопливным режимом позволяет обеспечивать автоматический перевод работы судовых двигателей с газового топлива на дизельное и ручной перевод с дизельного топлива на газовое. Контролируемые параметры газодизеля: температура выхлопных газов; давление и температура воздуха во впускном коллекторе; разрежение на впуске и вибрация двигателя; давление природного газа на входе и на выходе из регулятора и др.

Система автоматического управления двухтопливным режимом переводит работу двигателя на использование только дизельного топлива с сохранением необходимого уровня выходной

мощности при возникновении одной из следующих ситуаций: отсутствие природного газа; предельно низкое или высокое давление природного газа после испарителя; высокая температура выхлопных газов; низкая нагрузка по сравнению с номинальной мощностью (менее 15 %); нагрузка более 100 % от номинальной мощности. Пуск и остановка газодизеля на основе модернизированного двигателя 3Д6 происходит только на дизельном топливе.

Следующим оригинальным решением специалистов ООО «НПО «СПбЭК», не имеющим аналогов в мире, при создании судна-газохода на СПГ являлась разработанная технология применения быстросъемных криогенных модулей для хранения СПГ на борту судна. При выборе данной технологии в первую очередь руководствовались тем, что модули должны иметь приемлемые габариты для их установки практически на любом речном судне, достаточный объем СПГ и легкость транспортировки от места заправки до конечного потребителя.

Критериями определения места размещения быстросъемных криогенных модулей СПГ на теплоходе «Нева-6» были безопасность будущей эксплуатации судна-газохода и минимизация длины трубопроводов всех материальных сред (газовые магистрали, контуры промежуточного теплоносителя и т.д.) для уменьшения стоимости оборудования и работ по его монтажу. На основе данных критериев был выбран вариант размещения быстросъемных криогенных модулей СПГ на верхней палубе теплохода «Нева-6» непосредственно над машинным отделением.

В соответствии с разработанной технологией на открытой палубе судна заблаговременно было подготовлено место для быстросъемных криогенных модулей, которое представляет собой каркас из сваренных металлических двутавровых балок, прикрепленных к бортам судна (рис. 4).



**Рис. 4.** Подготовка металлического каркаса для установки быстросъемных криогенных модулей с СПГ на верхней палубе теплохода «Нева-6»

Разработанная технология предусматривает погрузку уже заправленных сжиженным природным газом быстросъемных криогенных модулей (рис. 5), что снижает затраты потенциальных судовладельцев и исключает все проблемы, связанные с вопросами технологического обслуживания модулей (заправка, расхолаживание, захолаживание, дегазация, слив, хранение СПГ и т.д.), которое осуществляется непосредственно на месте заправки модулей сжиженным природным газом квалифицированными специалистами по криогенной технике.



**Рис. 5.** Погрузка быстросъемных криогенных модулей с СПГ на теплоход «Нева-6»

Доставка быстросъемных криогенных модулей может быть осуществлена от места производства (или места заправки) СПГ до места бункеровки (например, речного порта) специализированными грузовыми автомобилями. Замена криогенных модулей с СПГ может проводиться в любом месте, где возможна швартовка судна и есть площадка для установки погрузчика (например, автомобильного крана), и будет занимать не более 3 часов.

Решения по обеспечению безопасности опытной эксплуатации судна, переоборудованного для работы на СПГ, основывались на положениях, предусмотренных дополнением № 2 «Временные технические требования к судам-газоходам, использующим компримированный природный газ» к Правилам классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского Речного Регистра, которые были утверждены распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № НС-17-р от 30.01.2004 г.

В настоящее время, с учетом накопленного опыта, специалисты ООО «НПО «СПбЭК» готовы разработать техническую документацию по дооборудованию отечественных судов смешанного и внутреннего плавания для работы на СПГ. Швартовые и ходовые испытания судна-газохода показали (рис. 6), что использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива на судах внутреннего плавания возможно и целесообразно.

Анализ результатов швартовых испытаний судна-газохода «Нева-6» выявил ряд принципиальных положений:

- при эксплуатации снижение финансовых расходов на топливо практически пропорционально соотношению цен дизельное топливо – сжиженный природный газ;
- газосмесительное оборудование конструктивно просто, не содержит сложных и прецизионных деталей



**Рис. 6.** Судно-газоход «Нева-6» на ходовых испытаниях в районе речного порта Волгограда

и узлов, при серийном выпуске сравнительно недорого;

- существенную статью расхода составляет оборудование для хранения запаса СПГ, его стоимость зависит от вида емкостей и способа их размещения на судне;

- при использовании двухтопливного режима было достигнуто значительное снижение концентрации вредных веществ в отработавших газах (от 20 до 40 %).

Использование СПГ как универсального моторного топлива XXI века –

интенсивно развивающееся направление, которое уже в ближайшее время может превратиться в самостоятельную высококорентабельную отрасль отечественной экономики. В рамках этого направления полученный специалистами ООО «НПО «СПбЭК» уникальный опыт по созданию первого в России судна-газохода на СПГ с судовой энергетической установкой, работающей в двухтопливном режиме, даст уже в ближайшее время мощный толчок российским судостроителям к созданию высокоэкономичных и экологичных судов речного и смешанного плавания.

Однако для масштабного перехода водного транспорта на использование сжиженного природного газа предусматриваются следующие меры:

- стимулирование разработки и производства судов внутреннего и смешанного плавания, работающих на СПГ, повышение их надежности, безопасности и энергоэффективности, развитие сопутствующей сервисной инфраструктуры;

- развитие заправочной инфраструктуры СПГ на внутренних водных путях Российской Федерации;

- разработка механизмов стимулирования использования природного газа в качестве газомоторного топлива и совершенствование нормативно-правового обеспечения в сфере использования СПГ и др.

## Литература

1. Кириллов Н.Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технологии производства и системы долгосрочного хранения. – М.: ИРЦ «Газпром», 2002. – 64 с.

2. Кириллов Н.Г. Новые технологии в применении сжиженного природного газа как моторного топлива и хладагента для авторефрижераторной техники и автотранспортных средств. – М.: ИРЦ «Газпром», 2003. – 30 с.

3. Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н. Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства // Газохимия. – 2011. – № 6. – С. 23-29.

4. Кириллов Н.Г. Природный газ как моторное топливо и экология автомобильного транспорта России. – М.: ИРЦ «Газпром», 2003. – 31 с.

## Применение биоэтанола второго поколения в малообъемном двигателе и влияние на экологические показатели

**А.А. Власов**, докторант Технологического института Эстонского университета естественных наук (Тарту, Эстония), инженер-специалист,  
**Р.Л. Ильвес**, научный сотрудник Технологического института Эстонского университета естественных наук (Тарту, Эстония), д.т.н.,  
**А.Я. Кюют**, доцент Технологического института Эстонского университета естественных наук (Тарту, Эстония), д.т.н.,  
**Ю.Р. Ольт**, профессор, заведующий кафедрой Технологического института Эстонского университета естественных наук (Тарту, Эстония), д.т.н.

Целью данного исследования является изучение влияния топлива на основе биоэтанола второго поколения на экономические и экологические параметры малогабаритного двигателя, а также возможность его применения в качестве моторного топлива в сельском хозяйстве. Помимо этого, в настоящей работе рассмотрено влияние исследуемого топлива на возникновение коррозии и износ элементов двигателя. В ходе проведения экспериментальных исследований было использовано топливо на основе биоэтанола второго поколения для двухтактного двигателя внутреннего сгорания. По результатам экспериментов полученные данные были проанализированы и представлены в сравнении с результатами использования традиционного бензинового топлива. Анализ вредных веществ, содержащихся в выхлопных газах, показал значительное снижение оксида углерода, но при этом было отмечено увеличение оксидов азота. Использование биоэтанола второго поколения в качестве топлива в двухтактном двигателе не сопровождалось быстрым износом его элементов, однако было установлено наличие коррозии на поверхностях металлических деталей. С точки зрения экономичности топливная система двухтактного двигателя должна быть модифицирована для достижения лучших экономических и экологических параметров.

**Ключевые слова:**

двухтактный двигатель, биотопливо, биоэтанол, моторное масло, коррозия.

**Б**иоэтанол второго поколения является одним из наиболее подходящих возобновляемых видов топлива для двигателей внутреннего сгорания. Органическое лигноцеллюлозное сырье (древесные, сельскохозяйственные отходы, солома и т.д.) используется для производства биоэтанола второго поколения. Преимуществом изготовления биоэтанола второго поколения является то, что оно не конкурирует с производством пищевых

продуктов [1, 2]. Однако на данный момент проблемой являются низкие мощности по производству биоэтанола в Эстонии [3], а также его физико-химические свойства, препятствующие его широкому использованию по сравнению с традиционными видами топлива.

Одной из возможностей использования биоэтанола в качестве моторного топлива является применение его как дополнительного топлива, что может потребовать двойной топливной системы, которая позволит использовать биоэтанол без специальных добавок. Для этой цели двигатель должен быть оснащен отдельной топливной системой для биоэтанола [4], что в свою очередь потребует дополнительных затрат.

Использование топливных смесей биоэтанола широко изучено: например, смеси биоэтанол–дизель–биодизель [5, 6], биоэтанол–бензин [7-10] и биоэтанол–дизель [11, 12]. Основной проблемой в производстве биоэтанола является выработка безводного этанола и его смесей. В создании топливных смесей на основе этанола одной из главных проблем является его несмешиваемость с традиционным топливом и маслом из-за разности в полярности молекул: этанол имеет полярные молекулы, а бензин – неполярные.

Первичный метод смешивания, который показал положительные результаты, был разработан в лаборатории Эстонского университета естественных наук. Применение биоэтанола в смеси с традиционным топливом возможно в малогабаритных двухтактных двигателях. Это разумно в условиях, когда объемы производства биоэтанола являются небольшими. Как правило, силовые установки с двухтактными двигателями работают в непосредственной близости от людей (бензопилы, триммеры и др.), поэтому содержание и токсичность вредных веществ в отработавших газах (ОГ) особенно важны. Использование биоэтанола в двухтактных двигателях по

сравнению с бензином позволяет снизить содержание вредных веществ в ОГ [13]. В то же время воздействие биоэтанола на рабочие детали двигателя вызывает проблемы. В ходе эксплуатации двухтактному двигателю необходимо топливо с хорошими смазочными свойствами для того, чтобы было обеспечено надлежащее функционирование поршневой группы. Другая не менее важная проблема заключается в показателях экономичности двигателя, а именно – в расходе топлива. Для решения этих проблем необходимо создание соответствующей топливной смеси биоэтанола и традиционного топлива, а также проведение испытаний двухтактного поршневого двигателя.

Целью данного исследования является изучение влияния на экономические и экологические параметры малогабаритного двигателя использование топлива на основе биоэтанола второго поколения, а также возможность его применения в качестве моторного топлива в сельском хозяйстве. Также было исследовано воздействие топливной смеси биоэтанола на рабочие детали двигателя.

Испытания проводились при использовании двух одноцилиндровых двухтактных двигателей генераторов NPEGG780-2. Техническая информация двигателей генераторов представлена в табл. 1 и на рис. 1, физические показатели протестированных топлив – в табл. 2.

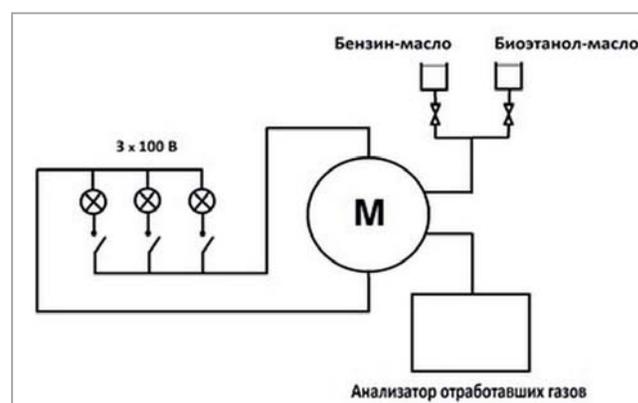


Рис. 1. Принципиальная схема испытательного оборудования

Таблица 1

### Техническая информация о двигателях

Параметры	Значение
Ход поршня, мм	40
Объем цилиндра, см <sup>3</sup>	63
Максимальная мощность двигателя, кВт/мин <sup>-1</sup>	1,5/3000
Соотношение масла и топлива	1/50
Система зажигания	C.D.I

Таблица 2

### Свойства испытанных топлив

Параметры	Топливо			
	Этанол	Этанол-масло	Бензин	Бензин-масло
Плотность*, кг·м <sup>-3</sup>	0,8096	0,8297	0,7593	0,7672
Вязкость**, мм <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>	1,653	1,746	0,584	0,660
Сила трения***, Н	19,94	11,06	20,61	15,01

\* Измерения проведены при температуре окружающей среды 15 °С

\*\* Был использован метод тестирования ASTM D445 [14]

\*\*\* Для измерения был использован экспериментальный модуль GUNT TM 260.03 [15]

В тестах была использована смесь традиционного бензина (АИ-95) и топливного масла, а также комбинация биоэтанола второго поколения и масла. В топливных смесях было использовано моторное масло для двухтактных двигателей Addinol Super Synth. Данные генераторы, оснащенные двухтактными двигателями, были выбраны для того, чтобы обеспечить наиболее постоянные условия тестирования. В сравнительных испытаниях двигателей важно, чтобы все рассматриваемые устройства в ходе проводимых экспериментов работали в одинаковых условиях (температура воздуха, атмосферное давление).

Основными рабочими требованиями, которые должны наиболее строго соблюдаться, являются нагрузки двигателя и условия окружающей среды. При использовании двигателей генераторов в ходе проведения экспериментальных исследований похожие рабочие условия могут быть обеспечены и гарантированы

проще, чем, например, при использовании бензопилы.

Экспериментальные испытания двигателя были проведены в два этапа: тест 1 и тест 2. При проведении теста 1 карбюратор генератора, работающего на биоэтаноле, был отрегулирован таким образом, чтобы двигатель работал стабильно. Необходимость регулировки обусловлена низкой теплотворностью этанола и большим содержанием кислорода. Для загрузки генераторов были использованы потребители электроэнергии мощностью  $P=200$  Вт для каждого испытуемого генератора. Общая продолжительность испытаний составила 300 ч: тест 1 – 200 ч, тест 2 – 100 ч. Тест 1 был проведен с оригинальными регулировками топливной системы генераторов. При выполнении теста 1 были устранены проблемы в работе генератора на биоэтанольной смеси. В связи с этим перед тестом 2 были произведены изменения двигателя, работающего

на биоэтанольной топливной смеси. Проблема была вызвана недостатками в топливной системе, в результате чего возникла необходимость в изменении конструкции карбюратора генератора, работающего на биоэтаноле (генератор 2). Диаметр отверстия сопла был рассчитан из следующего соотношения:

$$d_2 = \frac{B_{f2} d_1}{B_{f1}},$$

где  $B_{f1}$  – количество измеренного бензина–масла в случае немодифицированного сопла (тест 1), г·ч<sup>-1</sup>;  $B_{f2}$  – теоретически необходимое количество биоэтанола, г·ч<sup>-1</sup>;  $d_1$  – диаметр немодифицированного отверстия, мм;  $d_2$  – диаметр модифицированного отверстия, мм.

Расчеты необходимого количества топлива при использовании биоэтанола продиктованы условиями испытаний и были основаны на удельной теплоте сгорания для бензина  $Q=43,5$  МДж·кг<sup>-1</sup>, для этанола  $Q=26,8$  МДж·кг<sup>-1</sup> [16]. Результаты показывают, что диаметр сопла  $d_2=1,16$  мм. При этом некоторые литературные источники предполагают увеличение диаметра сопла по меньшей мере в 1,5 раза [17]. С учетом низкой эффективности работы двигателя при использовании биоэтанола, а также проблем, связанных со смазкой деталей двигателя, было принято решение увеличить первоначальный диаметр отверстия сопла для обеспечения необходимого соотношения топливно-воздушной смеси ( $\lambda=0,9$ ). Таким образом, первоначальный диаметр сопла  $d_1=0,71$  мм был увеличен до  $d_2=1,37$  мм (рис. 2).

Измерения проводились в начале и в конце экспериментальных испытаний. По итогам полученных результатов с помощью сравнительного анализа был исследован расход топлива генераторов, а также выхлопы вредных веществ с ОГ в зависимости от типа топлива и регулирования топливной системы.

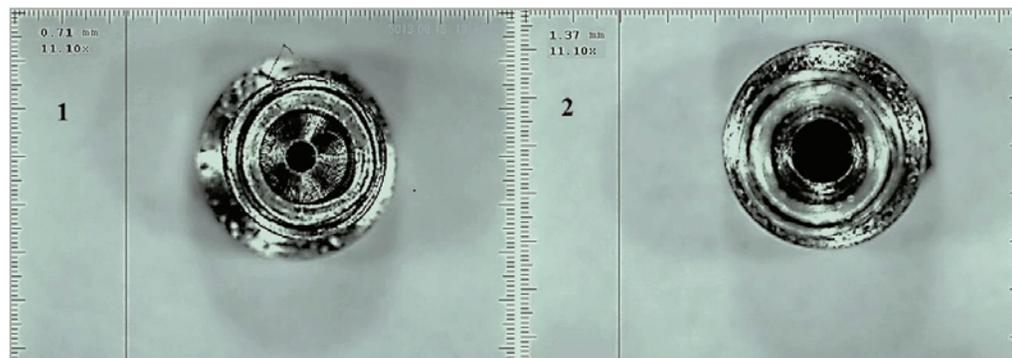
Для определения содержания вредных веществ в ОГ двигателей генераторов

было использовано устройство ВЕА-350. Отметим, что результаты измерений теста 1 и теста 2 непосредственно несопоставимы из-за различных условий испытаний. Оба теста проводились в разное время года, соответственно и окружающие условия были разными (например, температура воздуха при проведении теста 1 была 12,5 °С, а при проведении теста 2 – 26,0 °С).

Также по результатам экспериментов был определен и проанализирован износ рабочих деталей двигателя [9] и дана оценка влиянию коррозии, которая не будет рассмотрена в данной статье.

Ниже представлены результаты, полученные в ходе экспериментальных испытаний, а также основные возможные проблемы, которые могут возникнуть и повлиять на работу двигателя в долгосрочной перспективе.

В ходе анализа выходных параметров двигателя, работающего на биоэтанольной смеси, расход топлива  $G_s$  в тесте 1 увеличился на 134,6 % по сравнению с расходом топлива генератором, работающим на традиционной топливной смеси  $G_g$ . Следует отметить, что стандартное увеличение потребления топлива, наблюдаемое при использовании этанола, составляет 60...70 % в зависимости от теплотворности топлива. Проблема заключалась в слишком малом отверстии сопла при работе на биоэтанольной смеси, в результате чего топливной смеси было недостаточно (см. рис. 2а). Для решения данной проблемы в ходе теста 1 проходящий в двигатель воздушный поток был ограничен посредством частичного закрытия воздушного клапана карбюратора, что обеспечило стабильное функционирование двигателя на ранее упомянутой нагрузке, но привело к образованию более богатой топливно-воздушной смеси. Помимо этого, малый диаметр сопла карбюратора также создавал дополнительную проблему в работе топливной системы, где масло собиралось



**Рис. 2.** Немодифицированное (а) и модифицированное (б) сопла генератора 2

в нижней части поплавка-камеры, что приводило к остановке двигателя. Однако с модифицированным карбюратором оседание масла не наблюдалось, и двигатель продолжал стабильно работать. На основании этого можно сказать, что в двигателе с модифицированным карбюратором использование топливной смеси биоэтанола и масла представляется возможным.

Расход топлива  $G_s$  в тесте 2 при использовании биоэтанольной смеси снизился на 19 % в сравнении с тестом 1, что является положительным итогом. В результате модификации карбюратора удельный расход топлива  $g_{es}$  биоэтанольной смеси уменьшился на 275 г/кВт·ч. По итогам вышесказанного можно сделать вывод, что для улучшения выходных параметров при использовании биоэтанола в генераторе необходимо провести регулировку топливной аппаратуры. Следует отметить, что в данной научной работе регулировка не была проведена по причине того, что целью авторов являлось исследование двигателя генератора с оригинальными заводскими характеристиками, то есть с наименьшими модификациями.

В ходе изучения смазочных свойств биоэтанольного топлива и его влияния на коррозию была рассмотрена внутренняя поверхность цилиндра, поршневые кольца, поршневой палец, шатун, подшипники коленчатого вала и отверстие шейки. Микрометрическое измерение

износа деталей проводилось три раза. Первоначальное измерение было произведено до начала экспериментов (тест 1), второе – между тестом 1 и тестом 2, третье – после теста 2. Были измерены геометрические параметры износа деталей, а также шероховатости их поверхностей. В результате установлено, что диаметр цилиндра двигателя генератора, работающего на традиционной топливной смеси, уменьшился на 6 мкм, а диаметр цилиндра двигателя генератора, работающего на биоэтанольной топливной смеси, увеличился на 7 мкм. Данное явление, возможно, было вызвано различием в температурах сгорания топлив, что привело к расширению деталей в ходе рабочего процесса.

При оценке размеров поршневых колец было установлено, что использование биоэтанольной топливной смеси несколько повышало их износ. При изучении седиментации топливных остатков на поверхности поршня после 200 ч испытаний лучший результат наблюдался при использовании биоэтанольной топливной смеси (рис. 3). Также при оценке рабочих поверхностей деталей выявлено, что при использовании традиционной топливной смеси наблюдалось осаждение топливных остатков.

По итогам теста 2 (после 300 ч работы) наблюдалось формирование коррозии на рабочих поверхностях деталей

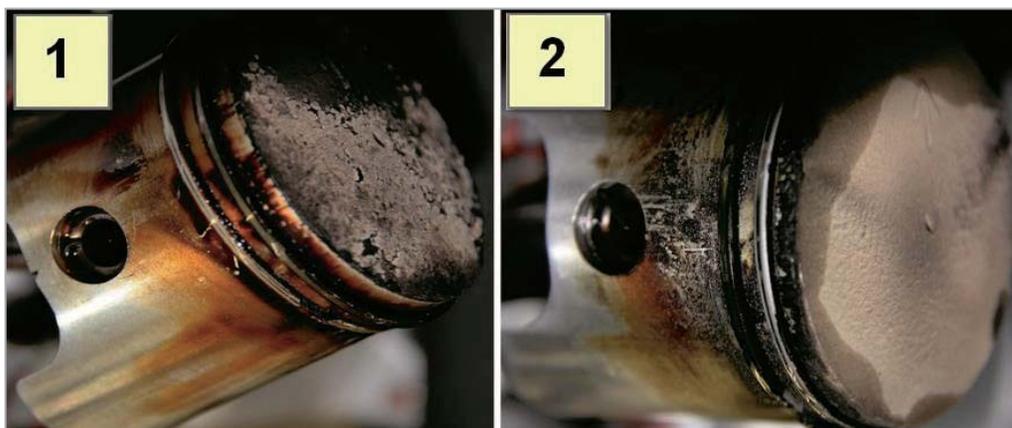


Рис. 3. Сравнение поршневых осадений генераторов 1 и 2

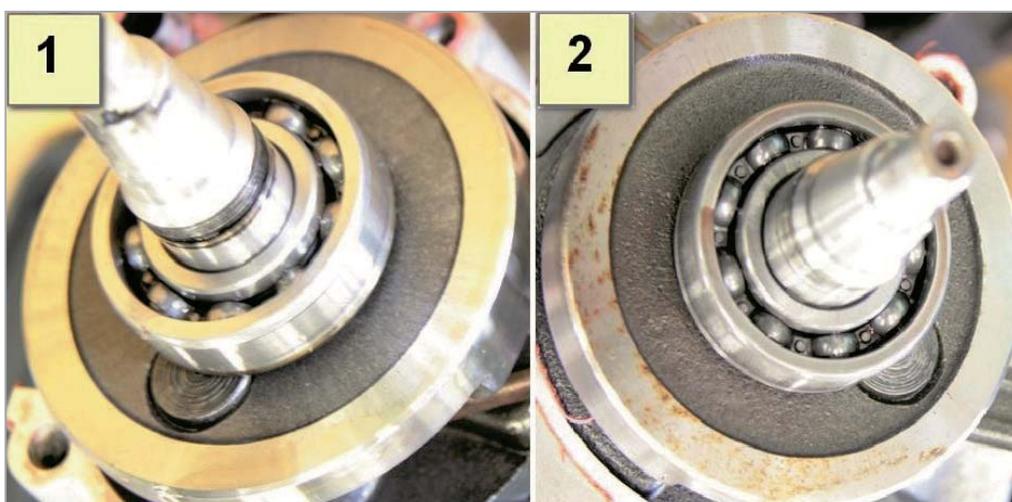


Рис. 4. Сравнение коррозии генератора 1 и 2

двигателя генератора 2, которые находились в непосредственном контакте с биоэтанольным топливом (рис. 4). Однако следует учитывать, что микрометрические измерения производились через месяц после проведения испытаний генератора, и подобные изменения характерны для обычного использования данного устройства. По итогам наличия коррозии можно сказать, что представляется актуальной разработка антикоррозионных добавок на основе возобновляемого сырья.

При анализе содержания в ОГ оксида углерода по итогам теста 1 установлено, что при использовании биоэтанольной топливной смеси эмиссия CO на 87 % выше по сравнению с традиционным топливом (рис. 5). Однако анализ

результатов теста 2 (после изменения регулировок генератора) показал, что эмиссия CO при использовании биоэтанольной топливной смеси более чем в 10 раз ниже эмиссии при традиционной топливной смеси. Это может быть объяснено образованием более качественной топливно-воздушной смеси и, следовательно, более полным сгоранием. В свою очередь высокая эмиссия CO в ходе теста 2 при использовании традиционного топлива может быть связана с осаждением продуктов сгорания топливного масла, что ухудшало процесс горения. Также это было подтверждено увеличением эмиссии углеводородов CH, поэтому данная проблема нуждается в дальнейшем изучении.

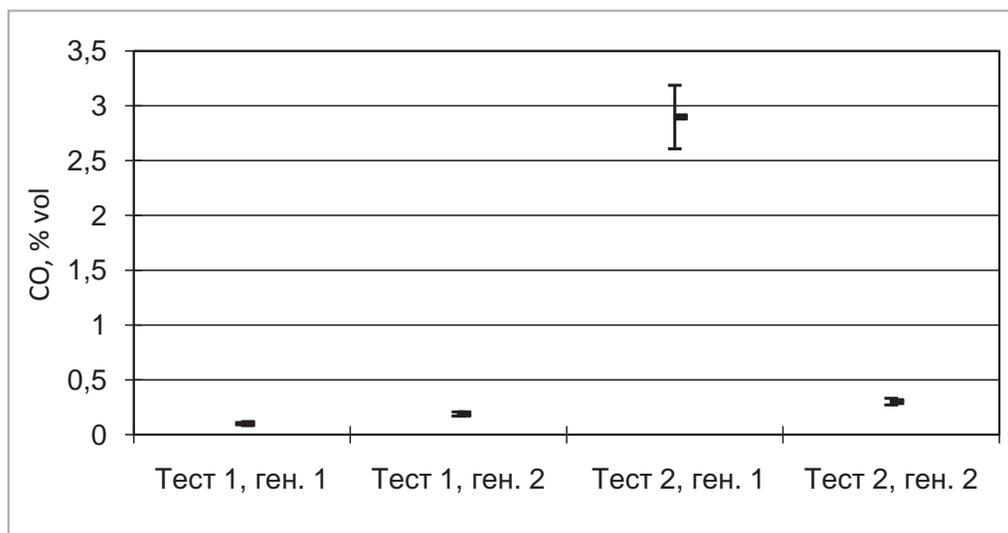


Рис. 5. Сравнение эмиссии CO в выхлопных газах

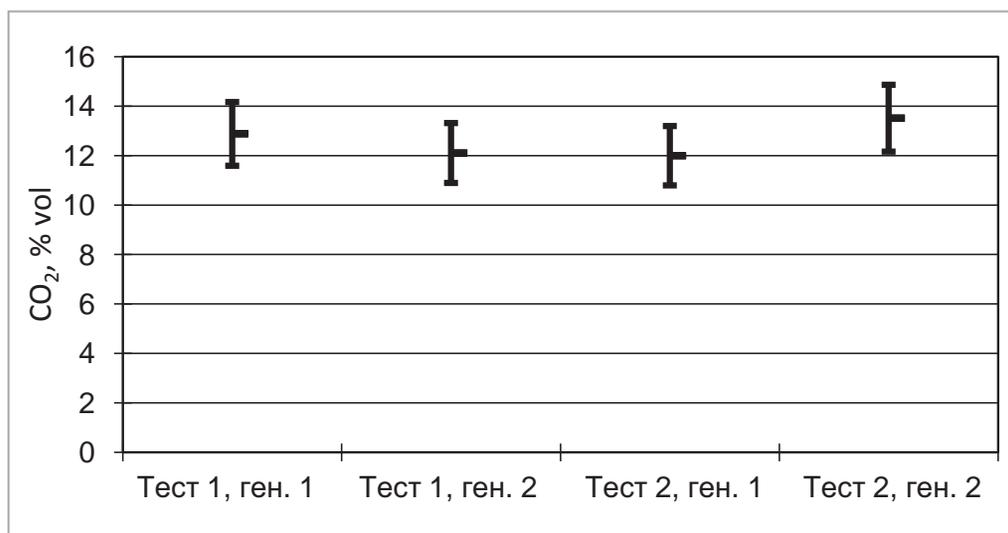


Рис. 6. Сравнение эмиссии CO<sub>2</sub> в выхлопных газах

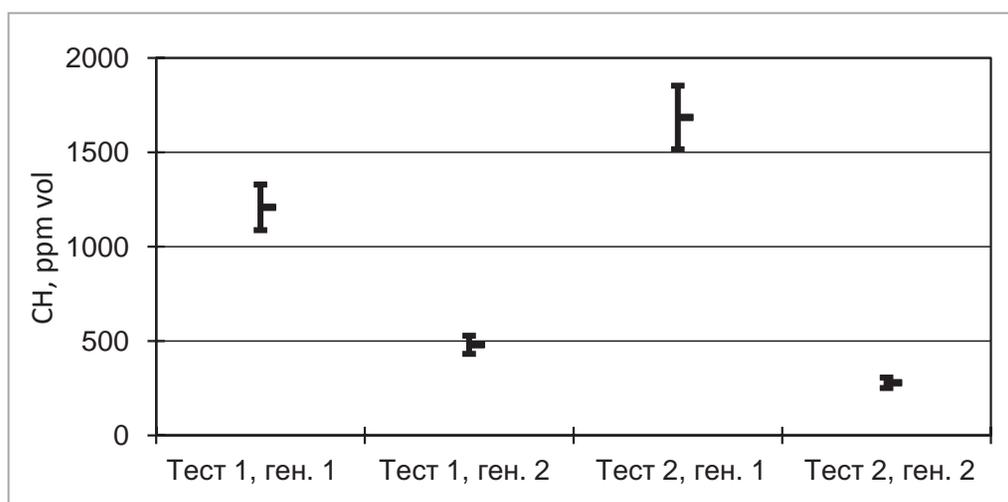


Рис. 7. Сравнение эмиссии CH<sub>4</sub> в выхлопных газах

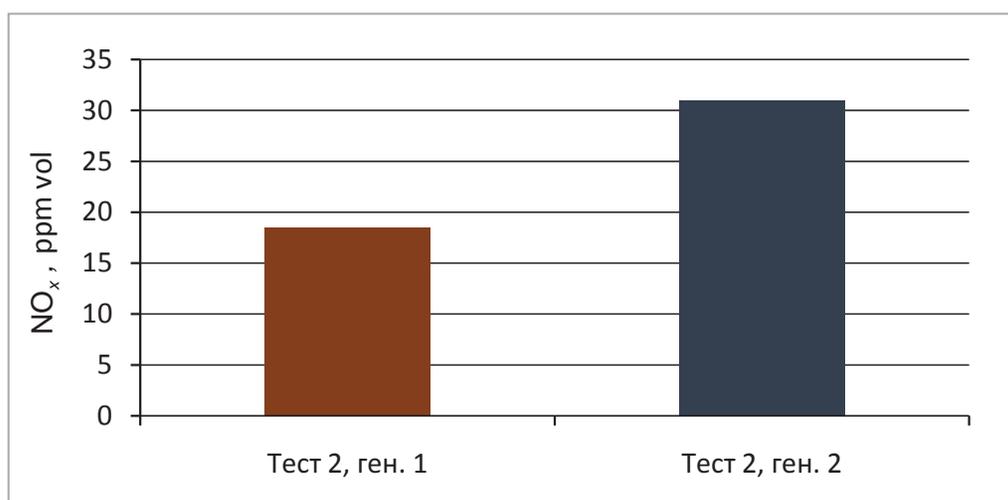


Рис. 8. Сравнение эмиссии NO<sub>x</sub> в выхлопных газах (тест 2)

Изменение доли CO в отработавших газах коррелирует с количеством углекислого газа CO<sub>2</sub> (рис. 6). По результатам теста 1 установлено снижение на 6,3 % эмиссии CO<sub>2</sub> при использовании биоэтанольной топливной смеси в сравнении с традиционным топливом. В свою очередь по итогам теста 2 эмиссия CO<sub>2</sub> увеличилась на 12,7 % по сравнению с традиционным топливом.

Установлено, что более эффективное сгорание характеризуется снижением эмиссии углеводородов в ОГ при сравнении тестов 1 и 2 (рис. 7). Поэтому наилучшие результаты наблюдались в ходе теста 2, что указывает на более полное сгорание топлива и связано с его расходом G.

Также, помимо CO и CH, наиболее опасными компонентами для здоровья человека являются оксиды азота NO<sub>x</sub>. Одной из причин увеличенного содержания оксидов азота в ОГ при использовании биоэтанольной топливной смеси является наличие раннего угла опережения зажигания, что не было изменено в настоящих экспериментах. Оптимальный угол опережения зажигания позволяет более эффективно использовать топливо в двигателе. Поэтому для обеспечения уменьшения эмиссии NO<sub>x</sub> угол опережения зажигания должен быть изменен на более поздний.

По итогам проведения теста 2 установлено, что при использовании биоэтанольной топливной смеси эмиссия NO<sub>x</sub> выше на 67,6 % по сравнению с традиционной топливной смесью (рис. 8).

В ходе теста 2 также установлено, что избыточное количество кислорода в выпускном коллекторе может привести к изменению протекания последующих термических реакций, что в свою очередь скажется на увеличении NO<sub>x</sub> в ОГ. Уменьшению эмиссии оксидов азота в ОГ способствует снижение температуры сгорания, которая, в свою очередь, может увеличить расход топлива и эмиссию CH.

Изучение содержания токсичных веществ в выхлопных газах нуждается в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях.

Таким образом, согласно результатам испытаний, рекомендуется использовать соотношение моторного масла и биоэтанола в топливной смеси 1/50. При использовании топливной смеси биоэтанола необходим поиск решения проблемы, связанной с образованием коррозии.

Меньший износ деталей двигателя установлен при использовании биоэтанольной топливной смеси в сравнении с традиционной, также в меньшей степени продукты сгорания осаждались на рабочих поверхностях деталей двигателя.

Уровень вредных веществ в выхлопных газах модифицированного двигателя генератора при использовании биоэтанольной топливной смеси ниже в сравнении с традиционной топливной смесью: CO на 89,6 %; CH на 83,5 %. Однако выбросы NO<sub>x</sub> на 67,6 % выше по сравнению с обычной топливной смесью, и этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Двухтактный двигатель внутреннего сгорания при работе на топливной смеси биоэтанола нуждается в реконструкции карбюратора, а также в дальнейшем регулировании системы зажигания для достижения наименьшего расхода топлива, предотвращения высвобождения масла из топливной смеси и обеспечения наилучших экологических показателей.

## Литература

1. Ritslaid K., Küüt A., Olt J. State of the Art in Bioethanol Production // *Agronomy Research*. – 2010. – № 8(1). – Pp. 236-254.
2. Чупраков А.И. Исследование рабочего процесса дизеля 4ч 11,0/12,5 при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2012, Санкт-Петербург.
3. Küüt A. Characteristics of bioethanol fuel obtained from lignocellulose biomass in internal combustion reciprocating engines with spark- and compression-ignition., *Estonian University of Life Sciences*. – Tartu: Ecoprint, 2013. – Pp. 25-28.
4. Patent EE 05665 B1. Formation method of fuel-air mixture of reciprocating engine and flexibelfuel system. 2013. [http://www.epa.ee/ul/doc/valjaanded/patendileht2013\\_03.pdf](http://www.epa.ee/ul/doc/valjaanded/patendileht2013_03.pdf)
5. Labeckas G., Slavinskas S., Mazeika M., Laurinaitis K. Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Filled with Ethanol-Diesel-Biodiesel Blend. *Engineering for Rural Development, Latvija*, 2010. – Pp. 266-271.
6. Yilmaz N., Vigil F.M., Donaldson A.B., Darabseh T. Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration, *Fuel* 115, 2014. – Pp. 790-793.
7. Olt J., Mikita V., Sõõro T., Küüt A., Tamm R., Raidla E., Ilves R., Ristlaid K., Raudsepp V., Viitkar U. Bioetanool ottomootori kütusena // *Agraarteadus: journal of agricultural science*. – 2009. – № 2. – Pp. 26-35.
8. Hilbert D. High. Ethanol Fuel Endurance: A Study of the Effects of Running Gasoline with 15% Ethanol Concentration in Current Production Outboard Four-Stroke Engines and Conventional Two-Stroke Outboard Marine Engines. *National Renewable Energy Laboratory, Colorado*, 2011.
9. Anderson P., Tamminen J., Standström C.E. Piston ring tribology. *VTT Research notes 2178, Otamedia Oy, Espoo*, 2002. – Pp. 105.
10. Ерощенко С., Корогодский В., Каграманян А., Врублевский А., Василенко О., Обозный С. Экспериментальные исследования двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива при работе на бензо-этанольной смеси. *Двигатели внутреннего сгорания, том 1*. – Харьков: НТУ«ХПИ», 2012. – С. 8-9.
11. Olt J., Mikita V., Ilves R., Küüt A. Ethanol as an Additive Fuel for Diesel Engines. *Engineering for Rural Development, Latvija*, 2011. – Pp. 248-253.
12. Matuszewska A., Odziemkowska M., Czarnocka J. Properties of bioethanol – diesel oil mixtures. In Méndez-Vilas, A. (ed.) *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments. FORMATEX 2013*. – Pp. 352-359.
13. Demirbas A. *Green energy and technology 3. Biofuels*, Springer-Verlag, 2009. – Pp. 96-99.
14. Standard ASTM D445 ASTM D445 Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids.
15. GUNT Hamburg. Test stand GUNT TM 260.03. Available at: <http://www.mutiaranata.com/product/detail/tm-260-03-experimental-module-pin-on-disc> (10.02.2016).
16. Merker G.P., Schwarz C., Teichmann R. *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Praxis, ATZ, Germany*, 2012. – Pp. 20.
17. Taraba J.L., Turner G.M., Razov R. The use of ethanol as an unmixed fuel for internal combustion engines *Energy in agriculture, Department of Agricultural Engineering University of Kentucky, Lexington*, 1981. – Pp. 6-8.

# Исследование мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе, метано- и этано-топливных эмульсиях

**В.А. Лиханов**, профессор, зав. кафедрой ФГБОУ ВО «Вятская ГСХА», д.т.н.,

**О.П. Лопатин**, доцент кафедры ФГБОУ ВО «Вятская ГСХА», к.т.н.

Представлены результаты экспериментальных исследований по улучшению эффективных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения компримированного природного газа с рециркуляцией отработавших газов, метано-топливной и этано-топливной эмульсий.

#### Ключевые слова:

дизель, компримированный природный газ, рециркуляция отработавших газов, метано-топливная эмульсия, этано-топливная эмульсия, эффективные показатели.

**В** работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской государственной сельскохозяйственной академии, по улучшению эффективных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения компримированного природного газа (КПГ) и рециркуляции отработавших газов (РОГ), метано-топливной (МТЭ) и этано-топливной (ЭТЭ) эмульсий. Исследования проводились с целью определения и оптимизации основных параметров работы дизеля на дизельном топливе (ДТ), КПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

Система питания дизеля на КПГ позволяет замещать 80 % ДТ (20 % – запальная порция ДТ). В результате проведенных исследований стабильности и первичных испытаний на двигателе

в качестве оптимальных для дизеля 4Ч 11,0/12,5 были приняты эмульсии следующего состава [1, 2]:

- МТЭ: метанол – 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5 %, вода – 7 %, ДТ – 67,5 %;

- ЭТЭ: этанол – 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5 %, вода – 7 %, ДТ – 67,5 %.

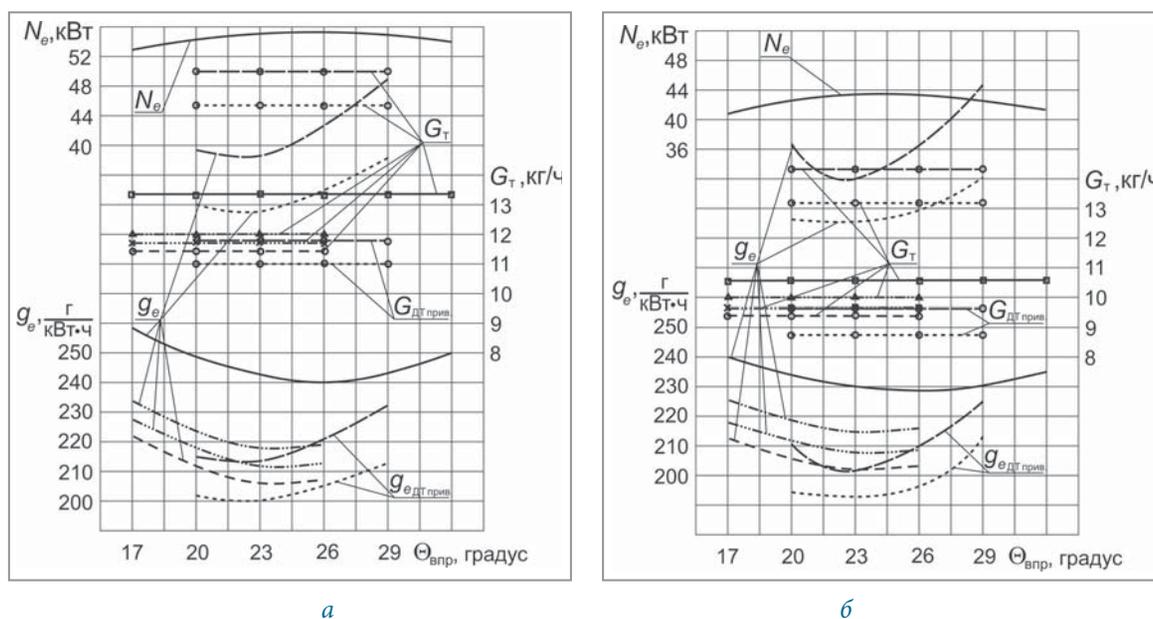
Анализ графиков (рис. 1а), соответствующих газодизельному и газодизельному с РОГ процессам при  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$  (номинальный скоростной режим), показывает, что при работе по газодизельному и газодизельному с РОГ процессам установочный УОВТ при частоте вращения  $2200 \text{ мин}^{-1}$  по условию наилучшей экономичности составляет  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ . Часовой расход топлива при газодизельном процессе и  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$  составляет 11,4 кг/ч, а для газодизельного процесса с 10 %-ной РОГ 11,7 кг/ч, что больше на 2,8 %.

Удельный эффективный расход топлива при  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$  составляет 205 г/кВт·ч, а при газодизельном процессе с 10 %-ной РОГ 211 г/кВт·ч, что выше на 2,8 %. При увеличении УОВТ до  $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$  на газодизельном процессе с РОГ происходит возрастание удельного эффективного расхода топлива, а мощность двигателя остается на том же уровне. При снижении  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $20^\circ$  происходит увеличение удельного расхода топлива, а также падение эффективной мощности двигателя [3, 4].

Анализируя графики (см. рис. 1а) работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на МТЭ при частоте вращения коленчатого вала  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$  и постоянном значении часового расхода МТЭ  $G_{\text{МТЭ}}=17,5 \text{ кг/ч}$ , можно констатировать, что при  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$  достигаются минимальные значения удельного эффективного расхода МТЭ ( $g_{\text{еМТЭ}}=316 \text{ г/(кВт·ч)}$ ) и удельного эффективного расхода ДТ в составе МТЭ ( $g_{\text{еДТприв}}=213 \text{ г/(кВт·ч)}$ ). Здесь можно отметить, что меньшая теплота сгорания МТЭ

по сравнению с ДТ ведет к повышению часового и удельного расходов топлива. При уменьшении  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $20^\circ$  значение  $g_{\text{еМТЭ}}$  повышается до 319 г/(кВт·ч), или на 0,9 %, а удельный эффективный расход ДТ в составе МТЭ  $g_{\text{еДТприв}}=215 \text{ г/(кВт·ч)}$ . При увеличении же  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $26^\circ$  значение  $g_{\text{еМТЭ}}$  повышается до 328 г/(кВт·ч), или на 3,7 % по отношению к  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ , а удельный эффективный расход ДТ в составе МТЭ составляет  $g_{\text{еДТприв}}=221 \text{ г/(кВт·ч)}$ . При дальнейшем увеличении  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $29^\circ$  значение  $g_{\text{еМТЭ}}$  повышается до 343 г/(кВт·ч), или на 7,9 % по отношению к  $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$ , а удельный эффективный расход ДТ в составе МТЭ равен  $g_{\text{еДТприв}}=232 \text{ г/(кВт·ч)}$ .

При работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ЭТЭ с частотой вращения коленчатого вала  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ , постоянным часовым расходом ЭТЭ  $G_{\text{ЭТЭ}}=16,3 \text{ кг/ч}$  (см. рис. 1а) и  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$  достигаются минимальные значения удельного эффективного расхода ЭТЭ ( $g_{\text{еЭТЭ}}=297 \text{ г/(кВт·ч)}$ ) и удельного эффективного расхода ДТ в составе ЭТЭ ( $g_{\text{еДТприв}}=200 \text{ г/(кВт·ч)}$ ).



**Рис. 1.** Влияние применения КПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ на мощностные и экономические показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ:

а –  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $n=1700 \text{ мин}^{-1}$ ;

□ — □ — дизельный процесс; ○ — ○ — газодизельный процесс;

× — × — газодизельный с РОГ 10 %; △ — △ — газодизельный с РОГ 20 %;

○ — ○ — ЭТЭ; ○ — ○ — МТЭ

Здесь также можно отметить, что меньшая теплота сгорания ЭТЭ по сравнению с ДТ ведет к повышению часового и удельного расходов топлива. При уменьшении  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $20^\circ$  значение  $g_{\text{ЭТЭ}}$  повышается до  $300 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ , или на  $1,0 \%$ , а удельный эффективный расход ДТ в составе ЭТЭ достигает  $g_{\text{ДТприв}}=202 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . При увеличении же  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $26^\circ$  значение  $g_{\text{ЭТЭ}}$  повышается до  $305 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ , или на  $2,6 \%$  по отношению к  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ , а удельный эффективный расход ДТ в составе ЭТЭ равен  $g_{\text{ДТприв}}=206 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . При дальнейшем увеличении  $\Theta_{\text{впр}}$  до  $29^\circ$  значение  $g_{\text{ЭТЭ}}$  повышается до  $316 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ , или на  $6,0 \%$  по отношению к  $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$ , а удельный эффективный расход ДТ в составе ЭТЭ равен  $g_{\text{ДТприв}}=213 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ .

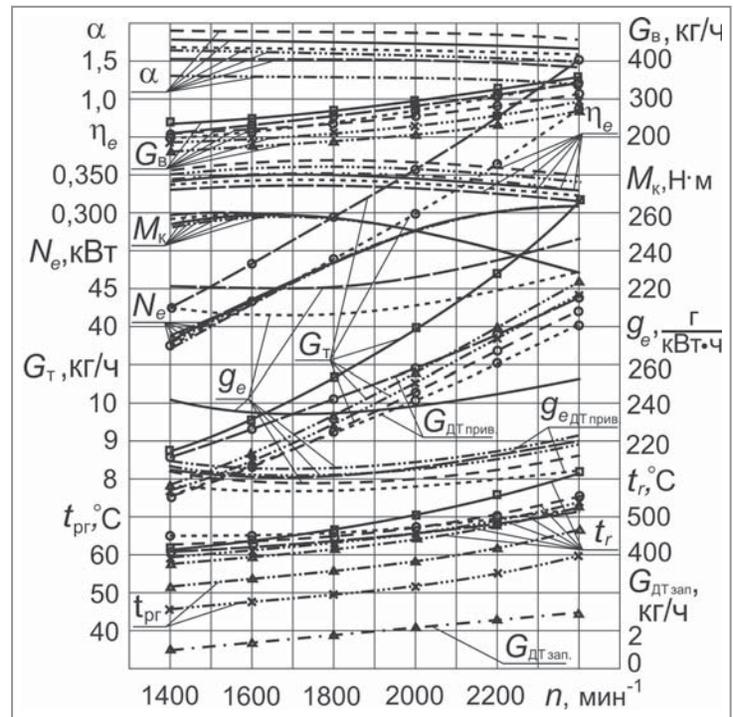
Рассматривая графики регулировочных характеристик (рис. 1б) дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ на частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  (режим максимального крутящего момента), следует отметить, что характер кривых аналогичен номинальному режиму, при этом изменяются лишь абсолютные значения величин.

Зависимость мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном УОВТ  $23^\circ$  (оптимальный для КПП, КПП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) от изменения частоты вращения коленчатого вала без регуляторной ветви представлена на рис. 2.

Рассматривая кривые, соответствующие работе двигателя на КПП, можно отметить, что увеличение частоты вращения приводит к росту часового расхода топлива  $G_T$ , запальной порции ДТ  $G_{\text{ДТ}}$ , эффективной мощности  $N_e$ , часового расхода воздуха  $G_B$  и температуры ОГ  $t_r$ . Значение удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  минимально при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и составляет  $198 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . При частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  значения эффективного КПД  $\eta_e$  и крутящего момента  $M_k$  максимальны и составляют соответственно  $0,37$  и

$259 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  с увеличением частоты вращения незначительно снижается [5, 6].

Анализируя графики работы дизеля на КПП с РОГ видно, что при работе газодизеля с  $10\%$ -ной РОГ эффективная мощность и крутящий момент остаются практически на уровне чисто газодизельного процесса. При увеличении степени рециркуляции до  $20 \%$  происходит снижение эффективной мощности и крутящего момента. Таким образом применение  $10\%$ - и  $20\%$ -ной РОГ в диапазоне  $n$  с  $1400$  до  $2400 \text{ мин}^{-1}$  приводит к увеличению  $g_e$  до  $1,5\dots 2,3$  и до  $4,7\dots 4,9 \%$  соответственно. Значение эффективного КПД, максимум которого достигается при частоте, соответствующей



**Рис. 2.** Влияние применения КПП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ на мощностные и экономические показатели работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала при  $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ :

- — □ — дизельный процесс;
- — ○ — газодизельный процесс;
- × — × — рециркуляция  $10 \%$ ;
- △ — △ — рециркуляция  $20 \%$ ;
- ▲ — ▲ — расход запального ДТ

максимальному крутящему моменту, в газодизельном процессе составляет 0,37, а в газодизельном с 10%- и 20%-ной РОГ – 0,36 и 0,35, что ниже на 2,7 и 5,4 % соответственно. При работе газодизеля с РОГ часовой расход воздуха и  $\alpha$  уменьшаются пропорционально увеличению степени рециркуляции. Температура ОГ при работе с рециркуляцией снижается незначительно с увеличением степени РОГ. Температура рециркулируемых ОГ при работе с 20%-ной РОГ на всех скоростных режимах не превышает 67 °С [7].

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе на ДТ и МТЭ следует отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин<sup>-1</sup> применение МТЭ приводит к увеличению  $G_t$  на 30,2 и 19,5 %, а  $g_e$  на 20,2 и 22,7 % соответственно. В этом же диапазоне частот вращения применение МТЭ приводит к снижению  $\alpha$  на 11,1 и 17,7 %,  $G_b$  на 8,7 и 5,6 %,  $G_{дтприв}$  на 3,4 и 16,3 %,  $g_{едтприв}$  на 15,4 и 12,7 %,  $\eta_e$  на 3,5 и 4,6 % соответственно. Здесь также отметим, что снижение часового расхода воздуха обусловлено присутствием в молекулах МТЭ дополнительного атома кислорода. Крутящий момент и эффективная мощность при частоте вращения 2400 мин<sup>-1</sup> соответствуют дизельному процессу, а при  $n=1400$  мин<sup>-1</sup> незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> соответствует дизельному процессу, а при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> снижается на 16,4 %.

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе на ДТ и ЭТЭ можно отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин<sup>-1</sup> применение ЭТЭ приводит к увеличению  $G_t$  на 22,8 и 14,0 %, а  $g_e$  на 16,9 и 18,2 % соответственно. В этом же диапазоне частот вращения применение ЭТЭ приводит к снижению  $\alpha$  на 5,6 и 5,9 %,  $G_b$  на 13,0 и 5,6 %,  $G_{дтприв}$  на 12,5 и 21,6 %,  $g_{едтприв}$  на 18,7 и 19,1 %,  $\eta_e$  на 1,5

и 3,0 % соответственно. Крутящий момент и эффективная мощность при частоте вращения 2400 мин<sup>-1</sup> соответствуют дизельному процессу, а при  $n=1400$  мин<sup>-1</sup> незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> на 8,9 % превышает температуру ОГ дизельного процесса, а при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> снижается на 17,2 %.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном УОВТ 23° и номинальной частоте вращения  $n=2200$  мин<sup>-1</sup> от изменения нагрузки представлены на рис. 3.

Применение КПГ на дизеле (см. рис. 3) при сохранении эффективной мощности приводит к следующему: снижению часового расхода воздуха, часового расхода топлива и коэффициента избытка воздуха; снижению на малых нагрузках и увеличению на больших эффективного КПД; увеличению на малых и снижению на средних и максимальных нагрузках удельного эффективного расхода топлива и температуры ОГ. Применение РОГ на газодизельном процессе приводит к росту удельного эффективного расхода топлива. Причем, при малом эффективном давлении от 0,13 до 0,26 МПа удельный эффективный расход топлива, например, при работе с 20%-ной РОГ возрастает на 2,3...3,2 %, тогда как при номинальной нагрузке  $g_e$  он выше на 5,1 %, чем при газодизельном процессе, но ниже на 10,3 %, чем при дизельном. Применение 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа приводит к росту  $g_e$  от 3,5 до 6,5 %. Снижение же степени рециркуляции до 10 % на номинальном режиме приводит к росту  $g_e$  всего на 2,4 % относительно газодизельного процесса, что на 12,8 % ниже дизельного процесса. Эффективный КПД при работе на газе с 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа снижается от 3,0 до 3,7 % относительно чисто газодизельного

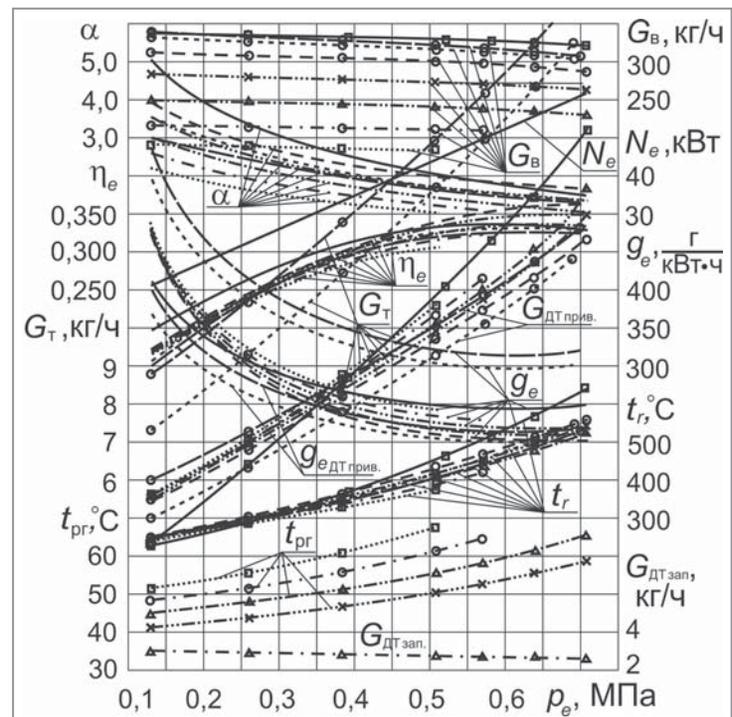
процесса. При работе на номинальной нагрузке с 20%-ной РОГ  $\eta_e$  ниже на 6,6 %. Снижение же степени рециркуляции до 10 % на номинальном режиме приводит к снижению  $\eta_e$  на 3,0 % относительно газодизельного процесса, что на 4,2 % выше дизельного процесса. Часовой расход топлива на номинальном режиме при работе на газе с 20%-ной РОГ увеличивается на 6,4 %, а при работе с 10 %-ной РОГ – на 2,7 %, что ниже на 12,5 % дизельного процесса. Температура ОГ при работе с РОГ снижается незначительно на больших нагрузках с увеличением степени РОГ. Расход воздуха снижается пропорционально количеству добавленных во впускной коллектор ОГ. Температура рециркулируемых ОГ увеличивается с ростом степени рециркуляции и во всем диапазоне изменения нагрузок при степени рециркуляции  $\rho=40$  % не превышает 68 °С. Рост удельного эффективного расхода топлива и снижение эффективного КПД при газодизельном процессе с РОГ в сравнении с чисто газодизельным связаны с ухудшением процесса сгорания в результате недостатка необходимого количества воздуха для окисления топлива [8-10].

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ДТ и МТЭ и ЭТЭ на номинальной частоте вращения, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на МТЭ и ЭТЭ полностью сохраняются и соответствуют дизельному процессу. Часовой расход топлива  $G_T$  при работе дизеля на МТЭ и ЭТЭ больше, чем  $G_{ДТ}$  при работе на ДТ. Значение  $\eta_e$  при работе на МТЭ и ЭТЭ ниже, чем при дизельном процессе, во всем диапазоне изменения нагрузок. Часовой расход воздуха  $G_B$  при работе на МТЭ и ЭТЭ незначительно повышается на малых нагрузках и снижается на средних и максимальных, что связано с присутствием кислорода в дисперсных фазах МТЭ и ЭТЭ. Присутствие кислорода

таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. По результатам регулировочных характеристик в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива для частот вращения 2200 и 1700 мин<sup>-1</sup> был выбран в качестве оптимального для газодизельного, газодизельного с РОГ процессов, а также для работы на МТЭ и ЭТЭ установочный УОВТ 23° до верхней мертвой точки по мениску. Поскольку двигатель не имеет какого-либо устройства для



**Рис. 3.** Влияние применения КПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ на мощностные и экономические показатели работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при  $\Theta_{впр}=23^\circ$  и  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>:

- — □ — дизельный процесс;
- - - - ○ — газодизельный процесс;
- × - - - × — рециркуляция 10 %;
- △ - - - △ — рециркуляция 20 %;
- - · - · ○ — рециркуляция 30 %;
- · · · · · □ — рециркуляция 40 %;
- △ · · · · · △ — расход запального ДТ

быстрого изменения установочного УОВТ, это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

2. При работе на КПП с РОГ при малых нагрузках ( $p_e=0,13...0,26$  МПа) возможно применение РОГ в размере 40 %, а при максимальных нагрузках необходимо снижение степени рециркуляции до 10 %.

3. На номинальном режиме работы ( $p_e=0,64$  МПа,  $n=2200$  мин<sup>-1</sup>) и установочном УОВТ  $\Theta_{впр}=23^\circ$  применение КПП

с РОГ, МТЭ и ЭТЭ приводит к следующим (табл. 1) значениям мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5.

4. На режиме максимального крутящего момента ( $p_e=0,69$  МПа,  $n=1700$  мин<sup>-1</sup>) и установочном УОВТ  $\Theta_{впр}=23^\circ$  применение КПП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ приводит к следующим (табл. 2) значениям мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5.

Таблица 1

Мощностные и экономические показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5

Процесс	$N_e$ , кВт	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$g_{дТприв}$ , г/(кВт·ч)	$G_e$ , кг/ч	$G_{дТприв}$ , кг/ч
Дизельный	55,3	243	–	13,4	–
Применение КПП		207 (снижение на 14,8 %)	–	11,4 (снижение на 14,9 %)	–
Применение КПП и РОГ (10 %)		212 (снижение на 12,8 %)	–	11,7 (снижение на 12,7 %)	–
Применение МТЭ		316 (увеличение на 23,1 %)	213 (снижение на 12,3 %)	17,5 (увеличение на 23,4 %)	11,8 (снижение на 11,9 %)
Применение ЭТЭ		297 (увеличение на 18,2 %)	200 (снижение на 17,7 %)	16,3 (увеличение на 17,8 %)	11,0 (снижение на 17,9 %)

Таблица 2

Мощностные и экономические показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5

Процесс	$N_e$ , кВт	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$g_{дТприв}$ , г/(кВт·ч)	$G_e$ , кг/ч	$G_{дТприв}$ , кг/ч
Дизельный	43,2	230	–	10,7	–
Применение КПП		202 (снижение на 12,2 %)	–	9,3 (снижение на 13,1 %)	–
Применение КПП и РОГ (10 %)		208 (снижение на 9,6 %)	–	9,7 (снижение на 9,4 %)	–
Применение МТЭ		299 (увеличение на 23,1 %)	202 (снижение на 12,2 %)	14,3 (увеличение на 25,2 %)	9,7 (снижение на 9,4 %)
Применение ЭТЭ		286 (увеличение на 19,6 %)	193 (снижение на 16,1 %)	13,1 (увеличение на 18,3 %)	8,8 (снижение на 17,8 %)

1. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метанола-и этанола-топливных эмульсий // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 9. – С. 3-5.
2. Лопатин О.П. Разработка программы по применению оборудования для испытания газодизелей // Молодой ученый. – 2015. – № 12 (92). – С. 229-232.
3. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре газодизеля. В сборнике: Общество, наука, инновации (НПК – 2014) Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция: сборник материалов: общеуниверситетская секция, БФ, ГФ, ФЭМ, ФАВТ, ФАМ, ФПМТ, ФСА, ХФ, ЭТФ. – Вятка: Вятский государственный университет, 2014. – С. 2001-2004.
4. Лопатин О.П. Химизм процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – № 3 (16). – С. 28-30.
5. Лопатин О.П. Исследование индикаторных показателей газодизеля при работе с рециркуляцией отработавших газов // Молодой ученый. – 2015. – № 10 (90). – С. 253-255.
6. Лопатин О.П. Влияние степени рециркуляции отработавших газов на эффективные и экологические показатели дизеля // Приволжский научный вестник. – 2015. – № 5-1 (45). – С. 90-92.
7. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Влияние рециркуляции отработавших газов на индикаторные показатели газодизеля // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – № 4 (17). – С. 31-33.
8. Лопатин О.П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения природного газа и рециркуляции. В сборнике: Сборник научных трудов по материалам Восемнадцатой международной научно-практической конференции «Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов – вклад молодых ученых». – Ярославль: ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2015. – С. 30-34.
9. Лопатин О.П. Результаты индицирования рабочего процесса газодизеля на режиме максимального крутящего момента // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – № 5 (18). – С. 8-9.
10. Лопатин О.П. Влияние степени рециркуляции на характеристики процесса сгорания тракторного газодизеля // Молодой ученый. – 2015. – № 14. – С. 166-168.

### 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, CMYK) – 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 частичной гомогенизации смеси на образование оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля

**Р.З. Кавтарадзе**, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**В.М.Краснов**, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана

Впервые в трехмерной постановке было проведено детальное исследование влияния частичной гомогенизации смеси на образование оксидов азота в камере сгорания дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода. Частичная гомогенизация водородно-воздушной смеси достигается увеличением числа сопловых отверстий водородной форсунки. Адекватность результатов моделирования оценивается путем сопоставления с экспериментальными данными. Определены оптимальные конструктивные параметры водородной форсунки, обеспечивающие минимизацию эмиссии оксидов азота.

**Ключевые слова:**

дизель, гомогенизация смеси, оксиды азота.

## Состояние проблемы

В связи с обострением экологических и энергетических проблем создание высокоэффективных водородных двигателей является актуальной задачей современного двигателестроения. В настоящее время многие ведущие производители (BMW, MAN, Honda, Mazda, Fiat и др.) выпускают транспортные средства, использующие в качестве моторного топлива водород [1, 2]. Необходимо отметить, что практически во всех существующих водородных двигателях (моно- или битопливных, на газообразном или жидком водороде) используется принудительное зажигание водородно-воздушной смеси. В дизелях водород используется только в качестве добавки к основному топливу (примерно 5 % от массы дизельного топлива), в основном для снижения эмиссии твердых частиц сажи [1].

В исторически первой публикации по водородному дизелю [3] описана конструкция и подтверждена работоспособность такого двигателя, созданного Р. Эрреном, однако характеристики и подробности протекания рабочего процесса не указаны. Исключение представляют собой исследования, проведенные в Мюнхенском техническом университете [4, 5] и МГТУ им. Н. Э. Баумана [6-9], в которых проанализированы проблемы реализации дизельного процесса на водороде и доказана целесообразность создания водородного дизеля.

Следует подчеркнуть, что единственными из вредных компонентов отработавших газов (ОГ), содержание которых ограничено законодательными актами, в случае водородного двигателя являются оксиды азота. Заметим, что незначительным количеством токсичных веществ, образующихся в результате выгорания смазочного масла, обычно пренебрегают.

Таким образом, улучшение экологических показателей водородного двигателя подразумевает минимизацию эмиссии оксидов азота, образование которых согласно термическому механизму Я.Б. Зельдовича происходит из-за наличия высоких локальных температур ( $T > 1700 \dots 1800$  K) в камере сгорания.

Исходя из этого была поставлена задача снижения концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода путем частично гомогенного сгорания водородно-воздушной смеси.

Заметим, что в случае традиционного дизеля нет цели гомогенизации топливовоздушной смеси, скорее наоборот. Очевидно также, что достижение полной гомогенизации смеси, сгорание которой принято называть гомогенным сгоранием [10], при внутреннем смесеобразовании сильно затруднено. В связи с этим в данной работе частичная гомогенизация водородно-воздушной смеси и осуществление альтернативного (частично гомогенный) процесса сгорания обеспечиваются путем изменения конструкции водородной форсунки, число сопловых отверстий которой заметно влияет на уровень гомогенизации процессов смесеобразования и сгорания.

## Технические данные исследуемого водородного дизеля

Исследования проводились на одноцилиндровом отсеке четырехтактного дизеля MAN 24/30, конвертированного в водородный дизель с непосредственным впрыскиванием и автономной системой подачи газообразного водорода. Степень сжатия базового дизеля составляет  $\epsilon = 13,5$ , что недостаточно для самовоспламенения водорода, поэтому был применен поршень с камерой типа Гессельмана, обеспечивающей  $\epsilon = 16,8$ . Основные технические данные исследуемого водородного дизеля приведены в табл. 1, а подробные описания опытной установки и экспериментального метода даны в [4-6].

Установка оснащена системой наддува с автономным приводом, обеспечивающей требуемые параметры наддувочного воздуха (до 0,4 МПа). Для исследования влияния интенсивности вихревого движения воздуха, играющего заметную роль в гомогенизации смеси, в экспериментальных исследованиях ее значение увеличивалось от  $D_n = 0,42$  (для серийного двигателя) до  $D_n = 1,36$ , благодаря установке клапана с ширмой на место одного из двух серийных впускных клапанов.

Таблица 1

Технические данные водородного дизеля

Параметр	Значение
Диаметр цилиндра $D$ , мм	240
Ход поршня $S$ , мм	300
Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	800
Степень сжатия $\epsilon$	16,8
Давление впрыскивания водорода $p_{\text{впр}}$ , МПа	30
№ водородной форсунки, суммарная площадь проходных сечений сопловых отверстий $z d_c$ (число×диаметр, мм), мм <sup>2</sup>	№ 1 (6 · 0,7) – 2,31; № 2 (12 · 0,5) – 2,36; № 3 (4 · 0,5 + 4 · 0,7) – 2,32; № 4 (18 · 0,5) – 3,53; № 5 (6 · 0,85) – 3,4

Система впуска с теплообменником для охлаждения наддувочного воздуха позволяла варьировать температуру заряда при впуске от 20 до 70 °С.

Указанные параметры (см. табл. 1) и ряд экспериментальных данных были использованы при 3D-моделировании рабочего процесса водородного дизеля.

### Описание математической модели рабочего процесса водородного дизеля

В основе математической модели рабочего процесса водородного дизеля лежат уравнения количества движения (Навье–Стокса), энергии (Фурье–Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности, описывающие трехмерные нестационарные процессы в цилиндре двигателя. Представление мгновенных параметров рабочего тела в виде суммы осредненного по методу Фавра значения и турбулентных пульсаций приводит к незамкнутой системе уравнений Рейнольдса [6], для замыкания которой в данной работе были использованы как стандартная  $k-\epsilon$ , так и относительно новая  $k-\zeta-f$  модели турбулентности. Последняя относится к категории моделей турбулентности третьего порядка, то есть состоит из трех уравнений переноса – уравнений для  $k$  (кинетическая энергия турбулентности) и  $\epsilon$  (скорость диссипации этой энергии), известных из  $k-\epsilon$ -модели турбулентности, а также уравнения для нормированного масштаба скорости  $\zeta = \overline{W}^2/k$  [11]. В этой модели снижается чувствительность к виду ячейки и степени измельчения сетки, характерная для других моделей турбулентности, и улучшается устойчивость численного решения, что особенно важно для расчета нестационарного турбулентного переноса в камере сгорания поршневого двигателя. Для описания процессов течения и теплообмена в пристеночной области камеры сгорания используются пристеночные функции.

Процесс турбулентного горения моделируется на основе известной модели Магнуссена–Хартагера, преимуществом которой является отсутствие в ней турбулентных флуктуаций параметров, однако модель требует введения эмпирических коэффициентов. Для их определения были использованы экспериментальные индикаторные диаграммы, снятые на водородном дизеле в стендовых условиях [4, 6].

Локальные образования оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля моделируются с использованием расширенного термического механизма Я.Б. Зельдовича, разработанного для монооксида азота. При этом принимается, что  $[\text{NO}_x] \equiv [\text{NO}]$ , что вполне справедливо для поршневых двигателей. Механизмы образования «быстрых» и топливных оксидов азота ввиду их очень малого значения, которыми можно пренебречь, не рассматриваются [6].

Численная реализация модели осуществляется на основе 3D-CFD-кода FIRE, разработанного фирмой AVL List GmbH (версии 2010-2015 гг.). Ядро FIRE основано на численном методе контрольных объемов с использованием усовершенствованного алгоритма SIMPLE [11], предложенного Б. Сполдингом.

Метод определения эмпирических коэффициентов для модели сгорания Магнуссена–Хартагера, а также результаты верификации математической модели рабочего процесса с применением экспериментальной индикаторной диаграммы, использованные в данной работе, изложены в [8, 9].

### Влияние конструкции форсунки на суммарные и локальные образования оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты изменения суммарной (цикловая) концентрации оксидов

азота  $[\text{NO}_x]_{\text{ц}}$ , полученные на водородном дизеле при стендовых испытаниях [4, 5]. В целях обеспечения корректности сравнения измеренных эмиссий оксидов азота соблюдались идентичные значения регулируемых режимных параметров: частоты вращения коленчатого вала  $n$ , суммарного коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{\text{в}}^{\Sigma}$ , угла опережения впрыскивания водорода  $\varphi_{\text{оп}}$ , давления  $p_k$  и температуры  $T_k$  наддувочного воздуха.

Очевидно, что очаги самовоспламенения водорода в цилиндре возникают в локальных зонах, где имеются подходящие значения температуры и коэффициента избытка воздуха (концентрация) для окисления водорода. Локальные температуры в этих очагах достигают высоких значений и инициируют образование термических оксидов азота. На рис. 1 заметно, что при использовании форсунок № 1, 2, 3 практически с одинаковыми суммарными площадями проходных сечений сопловых отверстий (см. табл. 1) концентрации оксидов азота имеют значения, довольно близкие друг к другу. В [5] было высказано предположение, что уровень гомогенизации водородно-воздушной смеси при применении этих форсунок, несмотря на разное число сопловых отверстий, изменяется незначительно. В связи с этим локальные температуры и, следовательно, локальные концентрации оксидов азота примерно одинаково перераспределены по объему цилиндра и имеют приблизительно одинаковый уровень.

Иные результаты получаются при сравнении форсунок № 4 и 5 (см. рис. 1), суммарные площади проходных сечений у которых также почти одинаковые (см. табл. 1). Можно предположить, что форсунка № 4 с 18 сопловыми отверстиями способствует более высокому уровню гомогенизации водородно-воздушной смеси, чем форсунка № 5, что приводит к снижению локальных температур и, соответственно, к уменьшению локальных, а в результате и суммарных концентраций оксидов азота.

Достоверность отмеченных предположений о роли гомогенизации водородно-воздушной смеси в процессе образования  $\text{NO}_x$ , высказанных на основе экспериментальных значений суммарной концентрации оксидов азота (см. рис. 1), можно оценить только по результатам исследования изменений локальных параметров рабочего тела, что можно осуществить посредством 3D-моделирования рабочего процесса водородного дизеля.

В табл. 2 приведены локальные значения температуры и концентраций оксидов азота в перпендикулярном к оси цилиндра сечении при угле поворота коленчатого вала (УПКВ)  $\varphi=365^\circ$  в зависимости от конструкции форсунки.

Прежде всего следует отметить почти полную корреляцию между локальными температурами и локальными образованиями оксидов азота, что, конечно, объясняется термическим механизмом возникновения последних. Как видно из результатов численного моделирования, форсунка № 5 (6-0,85)–3,4 меньше, чем форсунки № 2 (12-0,5)–2,36 и № 3 (4-0,5+4-0,7)–2,32, способствует гомогенизации смеси.



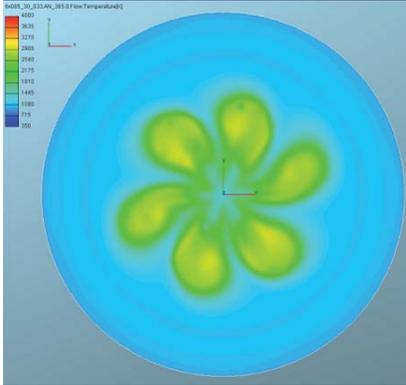
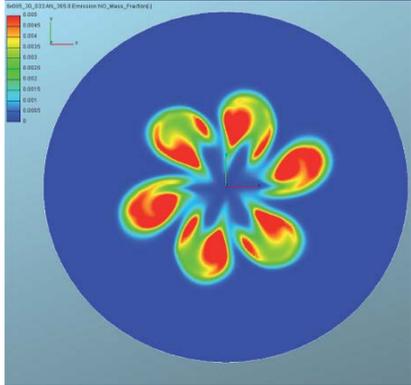
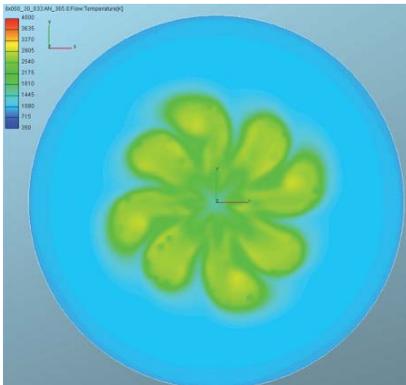
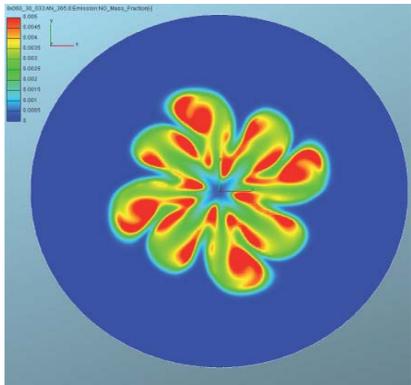
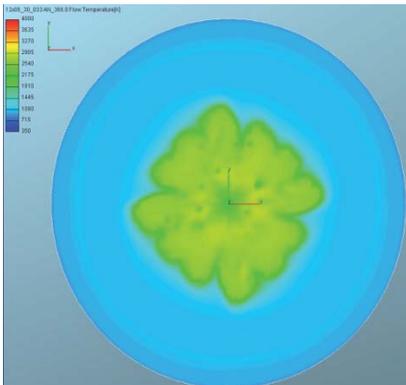
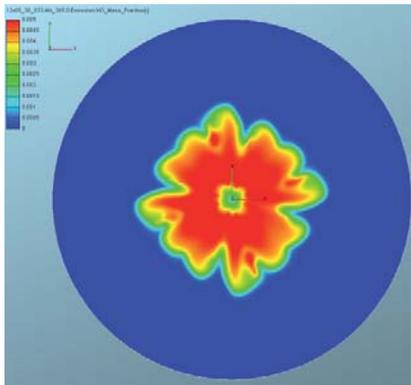
**Рис. 1.** Изменение суммарной (цикловая) концентрации оксидов азота в зависимости от конструкции форсунки (режим работы водородного дизеля):

$n=800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\alpha_{\text{в}}^{\Sigma}=2,4\dots2,5$ ;  $\varphi_{\text{оп}}=15^\circ$ ;  
 $T_k=296 \text{ К}$ ;  $p_k=0,129 \text{ МПа}$

Таблица 2

## 3D-визуализация мгновенных локальных параметров в сечении цилиндра водородного дизеля

54

Форсунка	Локальные температуры	Локальные концентрации $\text{NO}_x$
№ 5 (6 · 0,85)–3,4		
№ 3 (4 · 0,5+4 · 0,7)–2,32		
№ 2 (12 · 0,5)–2,36		

В случае ее применения создаются относительно крупные очаги сгорания с максимальной локальной температурой 3050 К при максимальной средней по объему цилиндра температуре 1550 К (см. табл. 2). Форсунка № 3

(4·0,5+4·0,7)–2,32 с восьмью сопловыми отверстиями из-за увеличенной степени гомогенизации смеси способствует снижению локальных максимальных температур до 2950...3000 К. Максимальное значение средней температуры

цикла при работе этой форсунки составляет  $T_{\max}=1450$  К.

Из трех рассмотренных в табл. 2 форсунок наибольшей гомогенизацией характеризуется форсунка № 2 (12-0,5)–2,36. Она имеет относительно большое число сопловых отверстий при их минимальном диаметре и позволяет снизить локальные температуры до 2850 К при максимальной средней температуре цикла  $T_{\max}=1350$  К.

Следует отметить, что максимальные мгновенные значения нестационарных средних по объему камеры сгорания температур рабочего тела в исследуемом водородном дизеле примерно в два раза меньше по сравнению с максимальными мгновенными значениями локальных нестационарных температур, что обусловлено, прежде всего, высоким суммарным коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha_{\Sigma}^{\Sigma}=2,5$ ).

Характер изменения локальных концентраций оксидов азота обусловлен характером изменения локальных температур, поэтому концентрационные и температурные поля подобны (см. табл. 2). К моменту  $\varphi=365^{\circ}$  УПКВ локальные значения массовых долей оксидов азота составляют:  $[\text{NO}_x]_i=0,005$  для форсунки № 5;  $[\text{NO}_x]_i=0,0046$  для форсунки № 3;  $[\text{NO}_x]_i=0,004$  для форсунки № 2.

Как видно, из этих трех форсунок минимальную концентрацию оксидов азота демонстрирует форсунка № 2 с наибольшим числом ( $z=12$ ) и наименьшим диаметром ( $d_c=0,5$  мм) сопловых отверстий. Благодаря таким конструктивным параметрам форсунка № 2, повышая степень гомогенизации водородно-воздушной смеси, минимизирует локальные, а как следствие, и суммарные за цикл концентрации оксидов азота. Эти результаты показывают, что характер изменения локальных концентраций оксидов азота согласуется с экспериментально полученной характеристикой изменения суммарных за цикл значений  $[\text{NO}_x]_{\Sigma}$  (см. рис. 1). Следует отметить также,

что форсунка № 4, имеющая, как и форсунка № 2, сопловые отверстия с диаметром  $d_c=0,5$  мм, но в 1,5 раза больше их число ( $z=18$ ), интенсивнее всех исследуемых форсунок гомогенизирует водородно-воздушную смесь, что, естественно, способствует выравниванию локальных температур рабочего тела. Вследствие этого суммарная эмиссия оксидов азота при работе форсунки № 4 получается минимальной (см. рис. 1).

При конструкции с форсункой № 3 половина факелов (4 из 8) имеет увеличенную дальность (см. табл. 2). Величина последней, как известно [12], зависит, кроме других параметров, и от диаметра соплового отверстия, то есть  $l\tau \sim \sqrt{d_c}$ . Наличие факелов водорода с различной дальностью меньше способствует гомогенизации процесса сгорания, что также подтверждается сравнением температурных и концентрационных полей в цилиндре в случае форсунок № 2 и 3 (см. табл. 2).

В целом с увеличением числа сопловых отверстий форсунки водород более равномерно распределяется по объему камеры сгорания, что способствует гомогенизации водородно-воздушной смеси и приводит к снижению локальных температур и локальных концентраций  $\text{NO}_x$  в объеме цилиндра. Уровень гомогенизации водородно-воздушной смеси и, соответственно, максимальные температуры и суммарные за цикл концентрации оксидов азота при работе форсунок примерно с одинаковыми суммарными площадями проходных сечений сопловых отверстий (форсунки № 1, 2, 3) изменяются относительно мало, независимо от числа сопловых отверстий.

Из исследуемых конструкций форсунка № 4 с числом сопловых отверстий 18 способствует наиболее высокому уровню гомогенизации водородно-воздушной смеси, что приводит к снижению локальных температур и, соответственно, локальных концентраций оксидов азота.

Начальная скорость тепловыделения в случае применения этой форсунки относительно выше, но затем в фазе расширения скорость тепловыделения снижается, и процесс сгорания затягивается, что, конечно, вносит вклад в уменьшение эмиссии  $\text{NO}_x$ . В результате такая конструкция сопловой части приводит к минимизации концентрации оксидов азота в выпускных газах водородного дизеля.

Несмотря на то, что скорости нарастания давления для рассмотренных

вариантов форсунок находятся в допустимых пределах, следует указать на существование тенденции увеличения уровня шума и механических нагрузок на детали водородного дизеля с ростом числа сопловых отверстий форсунки, что связано с повышением скорости распространения фронта пламени от первичных очагов сгорания по объему цилиндра.

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

## Литература

1. Eichlseder H., Klell M. Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. – Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2008. –288 s.
2. Schüers A., Abel A., Fickel H.Ch., Preis M., Artmann R. Der Zwölfzylinder – Wasserstoffmotor im BMW 750hL // MTZ. – 2002. – № 2. – S. 98-105.
3. Westerkamp L. Der Erren-Wasserstoffmotor // ATZ. –1939. – № 19.– S. 523-524.
4. Кавтарадзе Р.З., Цайлингер К., Цитцлер Г. Задержка воспламенения в дизеле при использовании различных топлив. РАН // Теплофизика высоких температур. –2005. –№6. – Т. 43. – С. 947-965.
5. Rottengruber H., Wiebicke U., Woschni G., Zeilinger K. Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission. Teil 3: Versuche und Berechnungen am Motor // MTZ. –2000. –№ 2. –S. 122-128.
6. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. –238 с.
7. Кавтарадзе Р.З. Рабочие процессы водородного дизеля и улучшение его экологических показателей //Транспорт на альтернативном топливе. –2012.–№ 2(26). –С. 61-64.
8. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Краснов В.М., Климова Е.В. Исследование локального образования оксидов азота в водородном дизеле //Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. –№ 2 (32). – С. 34-40.
9. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Краснов В.М., Климова Е.В. Сравнительный анализ процессов теплообмена в камерах сгорания традиционного и водородного дизеля // Транспорт на альтернативном топливе. –2013. –№ 3(33).–С. 31-36.
10. Basshuesen R., Schäfer F. Handbuch. Verbrennungsmotor. 4. Aufgabe. Vieweg und Sohn Verlag. – Wiesbaden, 2007. 1032 s.
11. FIRE. Users Manual Version 2015.AVL List GmbH, Graz (Austria), 2015.
12. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. –М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.–720 с.

# Совершенствование экологических параметров газодизельных автомобилей

**В.И.Ерохов**, профессор Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ», д.т.н.,  
**И.В.Одинокова**, доцент, докторант Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ», к.т.н.

Приведены конструктивные и функциональные особенности селективного каталитического нейтрализатора. Изложены особенности конструкции и принцип действия модуля подачи мочевины и распыливающего воздуха. Дана оценка технической и экологической эффективности применения системы снижения токсичности и дымности современных дизелей.

**Ключевые слова:**

сажевый фильтр, газовая аппаратура, каталитический нейтрализатор, датчик оксидов азота, сажа, оксиды азота, система управления, модуль подачи мочевины, распыливающий воздух.

**С**нижение токсичности и дымности современных дизелей представляет собой сложную научно-техническую проблему [1]. Система нейтрализации отработавших газов (ОГ) современных отечественных и зарубежных дизелей содержит селективный каталитический преобразователь SCR (Selective Catalytic Reduction), состоящий из каталитического нейтрализатора в виде сотовой структуры и системы Denox.

Система SCR представляет собой селективное каталитическое снижение вредных веществ (ВВ). В дизельный катализатор системы очистки ОГ подают водный раствор мочевины Geregelen Diesel Katalysator (GD-Kat). Система окислительного нейтрализатора дизелей аналогична системе бензиновых ДВС [2].

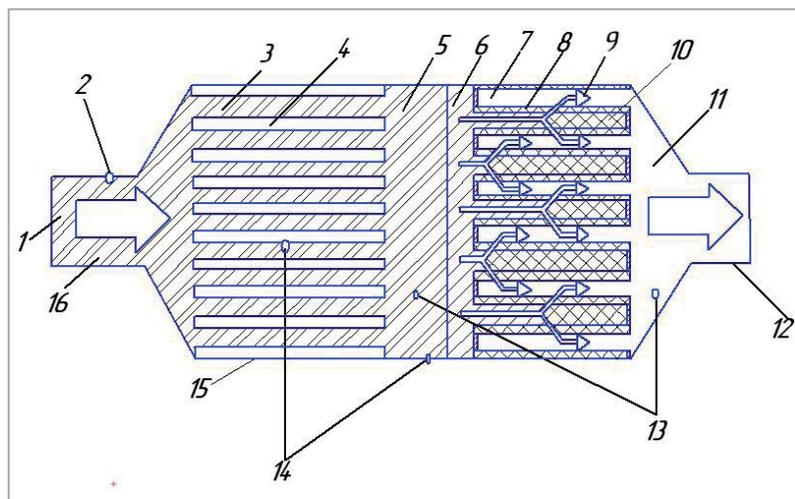
Сравнительно низкая температура ОГ дизеля, равная 200...250 °С, недостаточна для организации эффективных каталитических процессов нейтрализации оксидов азота (NO<sub>x</sub>). Увеличение температуры ОГ на каждые 10 °С ведет к росту скорости химических реакций в 2-4 раза.

Принцип действия системы Denox заключается в организации химической реакции аммиака (NH<sub>3</sub>) с оксидами азота ОГ, в результате которой образуется азот и водяной пар. Система SCR выполняет функции сажевого фильтра ОГ и каталитического нейтрализатора. Схема нейтрализации ОГ в современном катализаторе приведена на рис. 1.

Процесс нейтрализации ОГ включает три выраженные области. Первая область представляет участок, лимитированный законом химической кинетики. Каталитический процесс окисления различных компонентов ОГ обусловлен диффузией



**Рис. 1.** Степень нейтрализации ОГ в зависимости от их температуры в современном катализаторе:  
 1 – химическая кинетика; 2 – диффузия;  
 3 – массоперенос;  $\eta$  – коэффициент нейтрализации



**Рис. 2.** Принципиальная схема окислительного нейтрализатора и сажевого фильтра современного дизеля:  
 1 – входная полость газа; 2 –  $\lambda$ -зонд;  
 3 – катализатор; 4 – канал прохода ОГ;  
 5 – разделительная полость; 6 – керамическая полость; 7 – канал очищенного газа;  
 8 – фильтр частиц сажи; 9 – канал выхода ОГ; 10 – полость очищенного газа;  
 11 – выходная полость газа; 12 – выходной патрубок; 13 – датчики давления;  
 14 – датчики температуры; 15 – корпус нейтрализатора; 16 – входной патрубок

молекул ОГ к рабочей поверхности катализатора и их окислением на его поверхности.

Гетерогенная реакция, протекающая на поверхности каталитического элемента, представляет собой уравнение баланса массы реагирующего компонента и может быть выражена зависимостью

$$V_r dc = k_v c f_n dx, \quad (1)$$

где  $V_r$  – объемный расход ОГ;  $c$  – текущая концентрация компонента ОГ,  $m^3$ ;  $k_v$  – константа скорости реакции в единице объема;  $f_n$  – поперечное сечение потока газа (трубопровод),  $m^2$ ;  $x$  – текущее значение координаты по длине слоя катализатора,  $m$ .

Принципиальная схема окислительного нейтрализатора и сажевого фильтра современного дизеля приведена на рис. 2.

Принцип работы фильтра связан с задержкой частиц сажи и последующим их сжиганием. Величина гидравлического сопротивления не должна превышать 3,5...40 кПа. При пробеге 400...500 км электронный блок управления (ЭБУ) двигателя включает режим многофазного впрыска топлива.

Поверхность фильтрующего элемента покрыта тонким слоем катализатора, повышающего температуру до 560...600 °C. Толщина стенок между ее каналами не превышает 0,4 мм. Матрица сажевого фильтра задерживает до 80 % частиц размером 0,02...0,10 мкм. Нагреватель датчика защищен слоем глинозема ( $Al_2O_3$ ). Мощность сигнала датчика нагревателя составляет 8 Вт.

При скоплении в фильтре достаточного количества сажи запускается процесс его регенерации, протекающей по командам системы управления двигателем. Процесс активной регенерации продолжается около 10 мин.

Перепад давления на сажевом фильтре определяется посредством дифференциального датчика давления 13. Объемный расход ОГ рассчитывается ЭБУ по величинам массового расхода

воздуха на входе в двигатель и температуры ОГ перед фильтром.

Выжигание сажи осуществляют путем впрыскивания небольшой дозы топлива при повороте коленчатого вала на  $35^\circ$  после ВМТ при движении автомобиля накатом. Испарение дополнительной дозы топлива происходит на такте расширения, исключая процесс самовоспламенения. Регулирование величины дополнительной дозы топлива осуществляют по сигналам датчика температуры ОГ, установленного после сажевого фильтра.

Структура и содержание твердых частиц в ОГ дизелей приведены на рис. 3.

Состав твердых частиц в ОГ современного дизеля следующий: углерод – 41 %; углеводороды (топлива и масла) – 10 %; сульфат ( $\text{SO}_4$ ) – 6 %; сера и оксиды металлов – 15 %; пары воды – 28 %.

Сажа представляет собой микроскопические углеродистые частицы различной формы, величины и структуры диаметром 0,05 мкм. Ядро частицы состоит из чистого углерода, на котором адсорбируются различные углеводородные соединения, оксиды металлов и серы. Размеры частиц при диффузионном сжигании составляют 0,02...0,50 мкм.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) сажи в воздухе составляет: максимальная разовая 0,15 мг/м<sup>3</sup>, среднесуточная 0,05 мг/м<sup>3</sup>.

Механизм образования сажи в случае термического разложения углеводородного топлива может быть представлен зависимостью



Схема выделения углерода в зависимости от параметров процесса сгорания приведена на рис. 4.

Общая продолжительность пребывания углеводородов в кинетической области  $\tau_{кр}$  включает продолжительность прогрева рабочей смеси ( $\tau_{пр}$ ) до температуры самовоспламенения и продолжительность кинетической реакции ( $\Delta\tau_{кр}$ )

$$\tau_{кр} = \tau_{пр} + \Delta\tau_{кр}. \quad (3)$$

Пребывание углеводородов в кинетической области  $\tau_{кр}$  незначительно по величине и продолжительности в сравнении с диффузионным процессом и сопровождается незначительным выбросом сажи  $C_k$  в кинетической области.

Диффузии кислорода в зоне горения препятствуют продукты сгорания. Концентрация кислорода в объеме воздуха значительно больше концентрации его у зоны горения. Отсутствие достаточного количества кислорода в зоне горения тормозит химическую реакцию горения.

Продолжительность  $\tau_{диф}$  диффузионного горения складывается из продолжительности диффузионного перемешивания рабочей смеси, сопровождающегося нагревом компонентов, и временем протекания реакции  $\tau_{диф}$  при кинетическом горении  $\tau_{кр}$ . Если продолжительность  $\tau_{диф}$  существенно больше, то количество выброса углерода существенно выше.

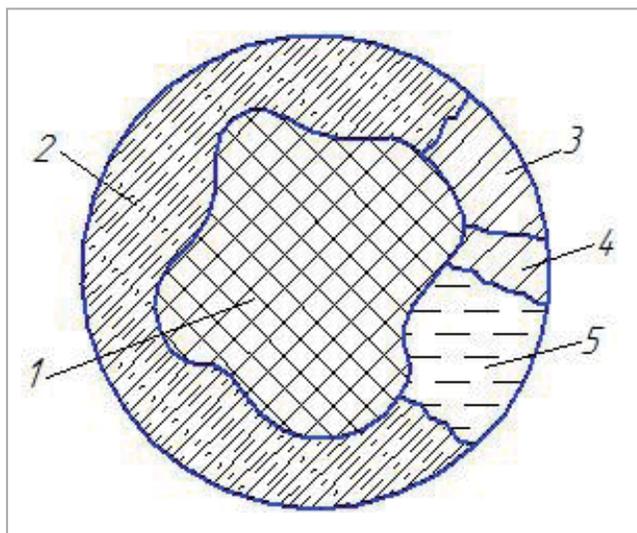
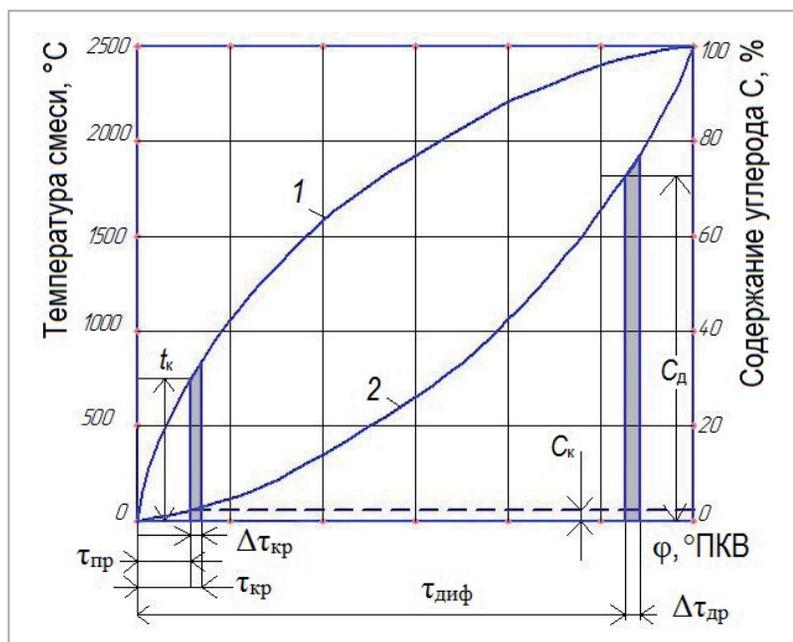


Рис. 3. Структура и состав твердых частиц ОГ современного дизеля:

1 – углерод; 2 – углеводороды; 3 – сульфат ( $\text{SO}_4$ ); 4 – сера и оксиды металлов; 5 – пары воды ( $\text{H}_2\text{O}$ )



**Рис. 4.** Схема образования углерода в зависимости от параметров процесса сгорания: 1 – температура рабочей смеси, °С; 2 – содержание сажи в ОГ, %;  $C_k$  – содержание сажи при кинетическом сгорании;  $C_d$  – содержание сажи при диффузионном сгорании;  $t_k$  – температура кинетического пламени, °С;  $\Delta t_{кр}$  – продолжительность кинетической реакции сгорания;  $\tau_{пр}$  – температура прогрева рабочей смеси;  $\tau_{кр}$  – продолжительность кинетической реакции;  $\tau_{диф}$  – продолжительность диффузионного процесса;  $\Delta \tau_{др}$  – продолжительность диффузионной реакции сгорания;  $\varphi$  – угол поворота коленчатого вала

Горение углерода носит гетерогенный характер и происходит на поверхности твердых частиц, содержание которых в ОГ нормируется. Кинетический параметр  $\tau_{кр}$  незначителен по величине и сопровождается небольшим выбросом сажи в кинетической области.

Выброс твердых частиц может быть представлен зависимостью

$$TЧ = 1,02 C_c + 0,277 C_t \cdot C_{и}, \text{ мг/м}^3, \quad (5)$$

где  $C_c$  – содержание углерода в ОГ, г/м<sup>3</sup>;  $C_t$  – содержание углерода в топливе, %;  $C_{и}$  – содержание углерода в смеси, %.

Структура углеводородов, входящих в состав топлива, влияет на выброс сажи, содержание которой в ОГ возрастает при увеличении углеродного числа (отношение C/H). Закономерность уменьшения выброса сажи обусловлена соотношением в топливе нормальных парафинов, олефинов и ароматических углеводородов [3, 4]. В ОГ дизелей сажа состоит из бесформенных частиц с размерами 0,3...100 мкм. Содержание сажи в ОГ двигателей составляет: для бензиновых двигателей 0,04 г/м<sup>3</sup>, для дизелей – 0,1...0,01 г/м<sup>3</sup>.

Продолжительность сгорания гетерогенной горючей смеси ( $\tau_r$ ) складывается из продолжительности возникновения физического контакта между горючим веществом и кислородом воздуха ( $\tau_{диф}$ ) и времени для протекания самой химической реакции  $\tau_{др}$

$$\tau_r = \tau_{диф} + \tau_{др}, \quad (4)$$

где  $\tau_{диф}$  – продолжительность контакта между горючим веществом и кислородом воздуха;  $\tau_{др}$  – продолжительность химической реакции при диффузионном сгорании.

Диффузионное перемешивание рабочей смеси сопровождается нагревом компонентов и увеличением времени при диффузионном сгорании  $\tau_{др}$ . Продолжительность  $\tau_{др}$  существенно больше кинетической величины. Количество выброса углерода в этой области существенно выше.

Снижение выброса углерода обеспечивают путем улучшения смесеобразования и быстрого подогрева рабочей смеси до температуры самовоспламенения, который сопровождается снижением реакции окисления и уменьшением продолжительности термического распада молекул углеводородов. Термический распад молекул происходит из-за тепловой неустойчивости углеводородов. Молекулы углеводородов претерпевают изменения в зависимости от температуры и длительности ее воздействия.

Механизм образования сажи заключается в том, что энергетические условия в цилиндре дизельного двигателя оказываются достаточными для полного разрушения молекулы топлива. Легкие атомы водорода диффундируют в богатый кислородом слой, вступают с ним в реакцию и изолируют углеводородные атомы от контакта с кислородом.

Содержание сажи в ОГ уменьшается с увеличением угла опережения впрыска топлива (УОВТ), а при уменьшении УОВТ выделение сажи заметно возрастает (рис. 5).

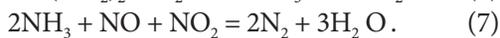
Содержание сажи зависит также от температуры в зоне сгорания. Существуют и другие факторы образования сажи – наличие зон обогащенной смеси и зон контакта топлива с холодной стенкой, а также неоптимальная турбулентность смеси.

Скорость выгорания сажи зависит от размера частиц. Полное ее выгорание наблюдается при размере частиц меньше 0,01 мкм.

В современных дизелях в моторное масло попадает много сажи, которая загрязняет двигатель и способствует его преждевременному износу. Применение присадок к топливу уменьшает содержание сажи в ОГ. Снижение оксидов азота и сажи в ОГ автомобилей наиболее эффективно достигается путем рециркуляции отработавших газов (EGR – Exhaust Gas Recirculation). Влияние рециркуляции ОГ на выброс сажи и оксидов азота показано на рис. 6.

Снижение сажи в ОГ сопровождается ростом оксидов азота. Уменьшение содержания сажи обеспечивают при повышении температуры сгорания и увеличении давления впрыска. Однако повышение температуры сопровождается увеличением оксидов азота.

Принцип действия системы Denox заключается в химической реакции взаимодействия аммиака с NO, в результате которой образуется  $N_2$  и  $H_2O$ :



Применение аммиака в чистом виде имеет определенные трудности. В Германии концерном Total создан безопасный заменитель аммиака на водной основе. Аналогичный заменитель разработан в нашей стране [5]. Организован выпуск этой жидкости и получен сертификат качества.

Разработанная жидкость без цвета и запаха получила название AdBlue. Она содержит 32,5 % мочевины и 65,5 % воды. Температура замерзания ниже  $-11$  °С.

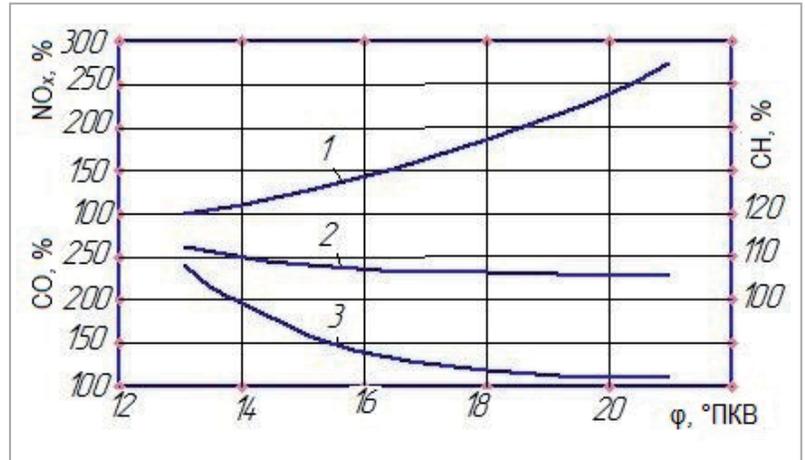


Рис. 5. Влияние угла опережения впрыска топлива на выброс ВВ:

1 – NO<sub>x</sub>, %; 2 – CH, %; 3 – CO, %

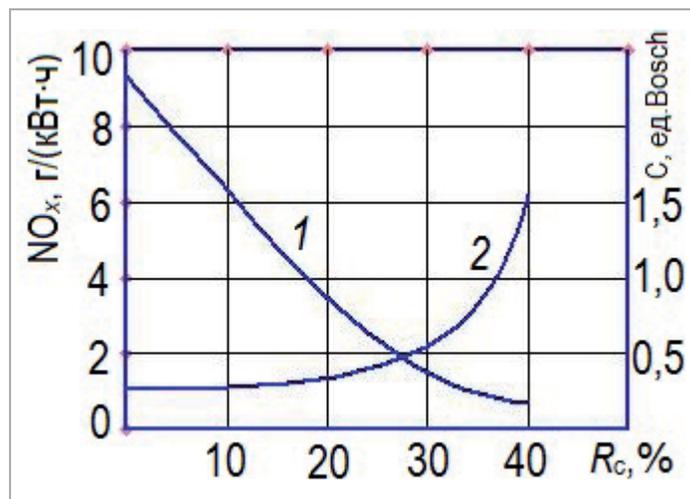
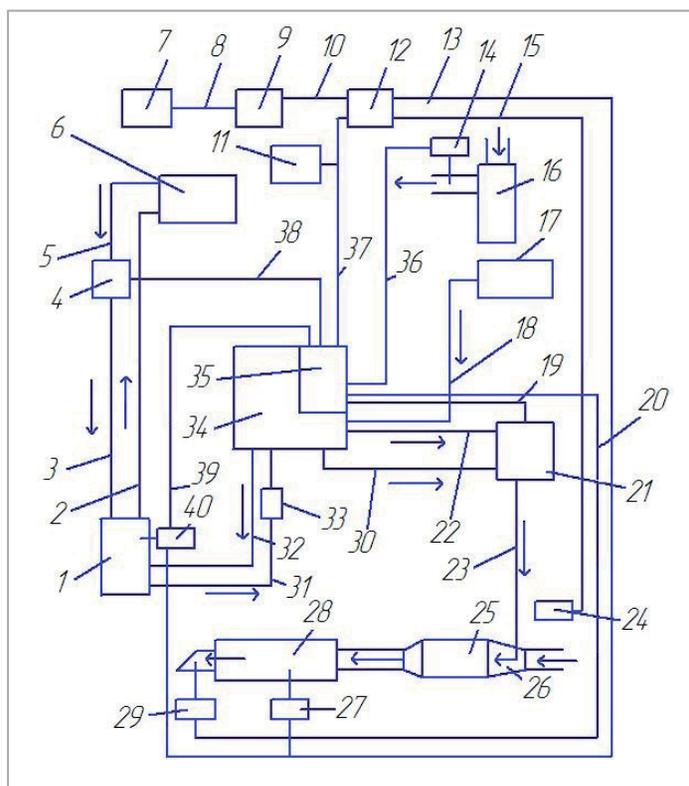


Рис. 6. Влияние рециркуляции на выброс сажи и оксидов азота:

1 – оксиды азота; 2 – сажа;  
R<sub>c</sub> – рециркуляция ОГ



**Рис. 7.** Принципиальная схема системы подачи мочевины современных дизелей: 1 – расходный бак; 2 – трубопровод прямой подачи жидкости; 3 – трубопровод возврата жидкости электромагнитного клапана подогрева жидкости; 4 – электромагнитный клапан подогрева жидкости; 5 – трубопровод возврата жидкости двигателя; 6 – двигатель; 7 – индикатор уровня жидкости; 8 – трубопровод расхода жидкости; 9 – блок управления автомобилем; 10 – линия питания блока двигателя; 11 – диагностический разъем ОВД; 12 – блок управления двигателем; 13 – трубопровод расхода воздуха; 14 – датчик температуры и влажности воздуха; 15 – трубопровод; 16 – воздушный фильтр; 17 – компрессор сжатого воздуха; 18, 22 – трубопровод подачи воздуха; 19, 20, 32, 36-39 – электрическая цепь; 21 – модуль дозирования жидкости; 23 – дозирующая линия подачи жидкости; 24 – датчик температуры перед смесителем жидкости; 25 – смеситель жидкости и сжатого воздуха; 26 – форсунка подачи жидкости; 27 – датчик оксида азота; 28 – каталитический нейтрализатор; 29 – датчик температуры ОГ; 30, 31 – трубопровод подачи жидкости; 33 – линейный фильтр жидкости; 34 – модуль со встроенным блоком управления; 35 – блок управления диагностическим оборудованием; 40 – датчик температуры и уровня жидкости

К числу жидких катализаторов можно отнести водный раствор мочевины 32,5 %, применяемый для восстановления  $\text{NO}_x$ .

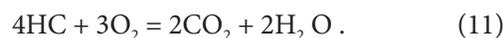
Особенность работы катализатора Denox заключается в применении специального дозатора мочевины, электронный импульс на который поступает от ЭБУ. Принципиальная схема системы подачи мочевины современных дизелей приведена на рис. 7.

Система нейтрализации ВВ ОГ содержит расходный бак 1 с датчиком 40 температуры и уровня жидкости, связанный через трубопровод 2 с двигателем 6, модуль 21 дозирования жидкости с блоком управления, форсунку 26 подачи жидкости и смеситель 25 жидкости и воздуха.

Воздушный ресивер находится под давлением 1,0 МПа. Форсунка распыляет жидкость сжатым воздухом под давлением 0,35 МПа, которая впрыскивается форсункой 26 в поток ОГ перед смесителем 25 жидкости и распыляющего воздуха.

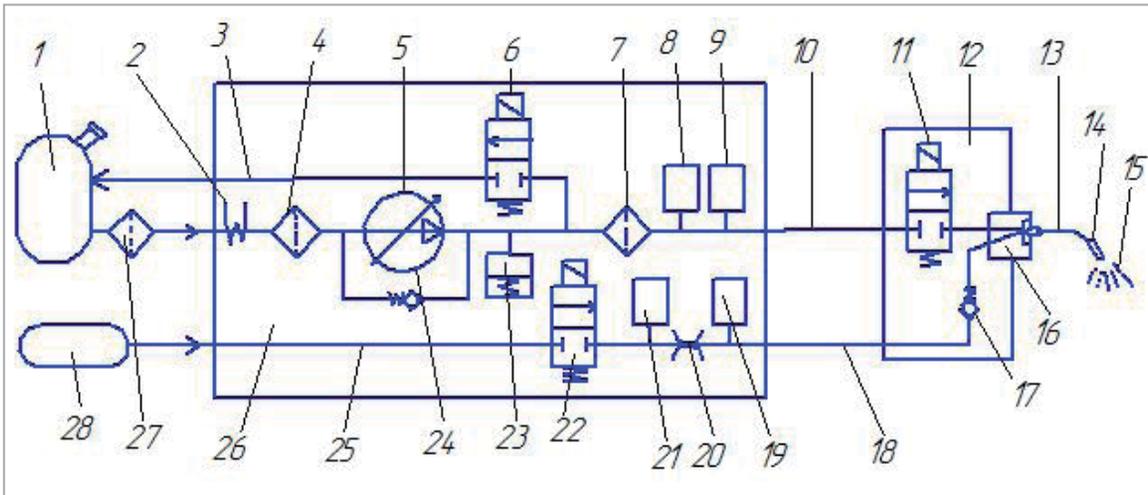
Согласно расчетам химических реакций, для расщепления 100 г  $\text{NO}_x$  необходимо 4,1 г мочевины. При сжигании 1 кг топлива выделяется 82 г  $\text{NO}_x$ . Для распыления 1 кг мочевины необходимо 8,75 кг воздуха. Расход мочевины составляет  $3,5 \text{ см}^3/\text{л}$  топлива.

Реакция протекает в присутствии катализатора



Эффективность метода каталитической нейтрализации ОГ достигает 90 %.

Нейтрализаторы Denox работают с подачей в систему выпуска аммиака  $\text{NH}_3$ , высвобождаемого из мочевины  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . Модуль подачи жидкости и распыляющего воздуха представлен на рис. 8.



**Рис. 8.** Модуль подачи мочевины и распыляющего воздуха:

1 – топливный бак; 2 – кабель обогрева; 3 – трубопровод возврата топлива; 4 – фильтр грубой очистки; 5 – мембранный насос; 6 – клапан сброса воздуха; 7 – фильтр тонкой очистки; 8 – датчик температуры мочевины; 9 – датчик давления мочевины; 10 – трубопровод прямой подачи мочевины; 11 – клапан; 12 – дозирующий модуль; 13 – трубопровод подачи мочевины и воздуха; 14 – ЭМФ; 15 – факел; 16 – смеситель мочевины и воздуха; 17, 23, 24 – обратный клапан; 18 – линия; 19 – датчик давления воздуха после дросселя; 20 – дроссель; 21 – датчик давления воздуха перед дросселем; 22 – регулирующий воздушный клапан; 25 – трубопровод прямой подачи воздуха; 26 – модуль; 27 – предварительный фильтр; 28 – воздушный ресивер (1,0 МПа)

Модуль подачи жидкости и распыляющего воздуха содержит топливный бак 1 для жидкости, подающий мембранный насос 5, клапан 6 сброса воздуха, дозирующий модуль 12, форсунку подачи жидкости 14 и кабель 2 обогрева трубопровода 10 прямой подачи мочевины.

Система нейтрализации  $\text{NO}_x$  оснащена жидкостным мембранным насосом 5, обеспечивающим подачу мочевины из бака 1 к электромагнитной форсунке (ЭМФ) 14.

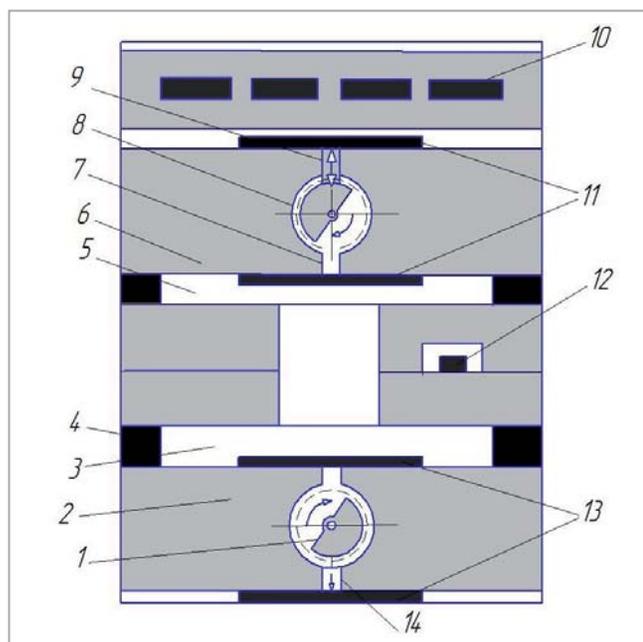
Дозатор 12 снабжен смесительной камерой 16 и клапаном 11. Модуль 26 подачи жидкости содержит дозирующий клапан, клапан сброса воздуха, фильтр предварительной очистки, датчик давления воздуха до ограничителя, кондиционер, датчик давления после кондиционера, насос подачи жидкости, датчики температуры, фильтр, датчик давления жидкости.

Система подачи воздуха содержит ресивер 28, регулирующий воздушный клапан 22, дроссель 20. ЭМФ оснащена воздушным каналом, сообщенным с пневматической системой автомобиля.

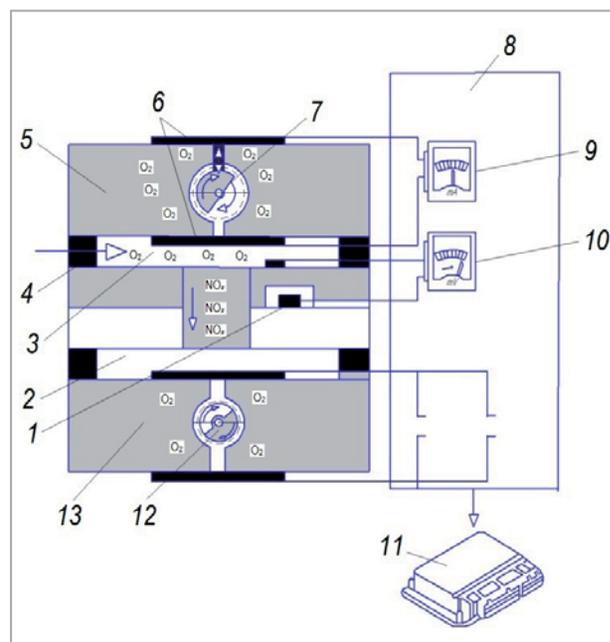
Давление в системе впрыска составляет 0,3...0,6 МПа. Воздушный ресивер 28 находится под давлением 1,0 МПа. Форсунка распыляет мочевины под давлением 0,36 МПа.

Принципиальная схема датчика оксидов азота системы нейтрализации ОГ дизеля при работе на AdBlue приведена на рис. 9.

Датчик содержит сенсорный элемент, установленный после катализатора в глушителе, и электронный блок, размещенный на раме автомобиля. Датчик  $\text{NO}_x$  оснащен электрическим нагревательным элементом, который активируется при включении зажигания. Команда на включение–выключение нагревательного элемента поступает по мультиплексной шине ОГ блока управления системы AdBlue.



**Рис. 9.** Принципиальная схема датчика оксидов азота системы нейтрализации ОГ дизеля при работе на AdBlue:  
 1 – дроссель; 2 – второй нагнетательный элемент; 3 – вторая камера; 4 – заглушка; 5 – первая камера; 6 – первый нагнетательный элемент; 7, 9, 14 – каналы; 8 – штуцер; 10 – нагревательный элемент; 11, 13 – наружный и внутренний электроды; 12 – контрольный элемент



**Рис. 10.** Схема управления первого нагнетательного элемента датчика:  
 1 – контрольный элемент; 2, 3 – вторая и первая камеры; 4 – заглушка; 5 – первый нагнетательный элемент; 6 – наружный и внутренний электроды; 7 – дозатор; 8 – блок управления датчика NO<sub>x</sub>; 9 – микроамперметр; 10 – микровольтметр; 11 – блок управления ДВС; 12 – дозатор второй камеры; 13 – второй нагнетательный элемент

Датчик NO<sub>x</sub> состоит из первой 5 и второй 3 камер, первого 6 и второго 2 нагнетательных элементов, двух пар наружных и внутренних нагревательных электродов 11 и 13. Подача электрического напряжения сопровождается перемещением отрицательно заряженных ионов кислорода от отрицательного к положительному электроду.

Электронный блок датчика передает информацию замеров концентраций газов по мультиплексной шине на другие блоки управления. Анализ замеренных значений осуществляется в блоке управления системы AdBlue [6, 7]. Схема управления первого нагнетательного элемента датчика приведена на рис. 10.

### Работа первой камеры

Часть ОГ поступает в первую камеру 3. Концентрация кислорода в ней снижается для измерения малых доз оксидов азота в ОГ.

Вследствие различных долей кислорода в ОГ и контрольном элементе 1 на электродах 6 можно измерить электрическое напряжение. Блок управления 8 датчика NO<sub>x</sub> регулирует это напряжение на постоянное значение равное 1,0. При этом нагнетательными элементами кислород откачивается или закачивается, и таким образом концентрация кислорода в первой камере 3 регулируется до определенного значения.

Схема управления второго нагнетательного элемента датчика AdBlue приведена на рис. 11.

### Работа второй камеры

Отработавшие газы поступают из первой камеры во вторую. Молекулы  $\text{NO}_x$  в ОГ на специальном электроде распадаются на  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ . Поскольку к внутреннему и наружному электродам приложено симметричное напряжение в 400 мВ, ионы кислорода перемещаются от внутреннего электрода к наружному. Возникающий ток ионов кислорода нагнетательного элемента является величиной для определения доли оксидов азота во второй камере. В связи с тем, что ток ионов кислорода нагнетательного элемента пропорционален доли оксидов азота в ОГ, то по этому параметру можно определить долю  $\text{NO}_x$ .

Ток накачки широкополосного  $\lambda$ -зонда в зависимости от  $\alpha$  приведен на рис. 12.

Ток накачки пропорционален концентрации кислорода в ОГ и является мерой нелинейной величины  $\alpha$ . С помощью тока накачки в измерительную камеру накачиваются ионы кислорода, создавая при этом напряжение между электродами в основном воздушном канале и измерительной камере.

Если в ОГ имеется избыток кислорода (бедная смесь), то элемент накачки направляет кислород наружу (положительный ток накачки). Если имеется недостаток кислорода (богатая смесь), то из-за разложения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  кислород передается из окружающих ОГ в диффузионный зазор (отрицательный ток накачки). Поскольку при  $\alpha=1$  отсутствует необходимость транспортировать кислород, то ток в элементе накачки равен нулю.

Разность электродных потенциалов связана с парциальным давлением кислорода в анализируемом газе и сравнительной среде уравнением Нерста

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_0}{p_x}, \quad (12)$$

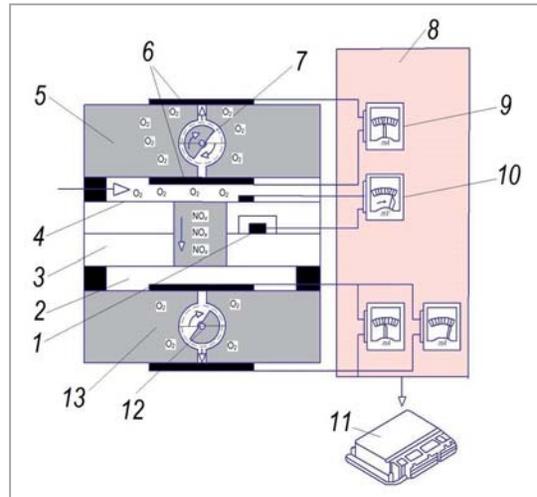


Рис. 11. Схема управления второго нагнетательного элемента датчика AdBlue:

1 – контрольный элемент; 2, 3 – вторая и первая камеры; 4 – заглушка; 5 – первый нагнетательный элемент; 6 – наружный и внутренний электроды; 7 – дозатор; 8 – блок управления датчика; 9 – микроамперметр; 10 – микровольтметр; 11 – блок управления; 12 – дозатор второй камеры; 13 – второй нагнетательный элемент

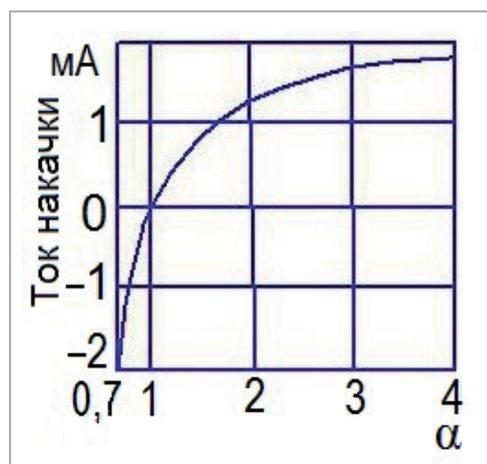


Рис. 12. Ток накачки широкополосного  $\lambda$ -зонда в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

где  $E$  – разность электродных потенциалов ячейки, В;  $R=8,314$  Дж/(моль·К) – газовая постоянная;  $T$  – температура ячейки, К;  $4F=4\cdot96500$  Кл/моль – количество электричества, необходимое для электрохимического переноса 1 моля кислорода;  $p_0$  и  $p_x$  – парциальное давление кислорода соответственно в сравнительной среде и анализируемом газе, Па.

Если давление анализируемого газа равно давлению сравнительной среды, то отношение парциальных давлений в формуле (12) можно заменить отношением концентраций

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{C_0}{C_x}, \quad (13)$$

где  $C_0$  и  $C_x$  – объемные доли кислорода соответственно в сравнительной среде и анализируемом газе, %.

Концентрация выброса ВВ на выходе каталитического нейтрализатора может быть представлена зависимостью

$$C_{\text{вых}} = A \cdot C_{\text{ДВС}} + (C_{\text{ДВС}} - A \cdot C_{\text{ДВС}}) e^{-lct}, \quad (14)$$

где  $A$  – количество ОГ, не подвергающееся нейтрализации;  $C_{\text{ДВС}}$  – концентрация нейтрализуемого вредного компонента ДВС;  $l$  – длина сотового канала, м;  $t$  – температура каталитической поверхности, °С;  $c$  – относительная активная поверхность нейтрализатора.

При отсутствии сигнала в память неисправностей блока управления двигателя заносится ошибка. Включаются лампа Check Engine K83 (MIL) и контрольная лампа системной ошибки AdBlue на дисплее комбинации приборов. Датчик  $\text{NO}_x$  с нагревательным элементом включается только после того, как будет установлено, что конденсат не может разрушить керамическое покрытие датчика. Для этого температура в системе выпуска ОГ должна быть выше точки росы для воды, чтобы возможность нахождения конденсата воды в датчике была исключена.

Применение мочевины в системе нейтрализации ОГ дизеля снижает на 100 °С температуру начала химических реакций. Применение присадки к топливу снижает температуру выжигания сажи.

Неисправная система характеризуется снижением мощности двигателя на 30...40 % и увеличенным расходом топлива до 15 %.

Для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  наиболее перспективно применение нейтрализатора адсорбционно-каталитического типа Denox. Использование SCR для отечественного автомобилестроения обеспечивает нормы Евро-5. Селективный каталитический преобразователь обеспечивает нейтрализацию продуктов неполного сгорания и оксидов азота.

## Литература

1. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей и возможность ее снижения // Грузовик. – 2009. – № 8. – С. 27-41.
2. Двигатели на природном газе с блоком управления EGCA. Электрооборудование. Фирма MAN Truck Bus Aktiengesellschaft, 2011. – 166 с.
3. Газобаллонная установка на сжиженном газе Bi Fuel. Service Training VSQ-1. Программа самообучения 427. VOLKSWAGEN Group Academy. [http://jetta\\_club.org/uploads/SSP\\_rus\\_427\\_dreysteija.Pdf](http://jetta_club.org/uploads/SSP_rus_427_dreysteija.Pdf) 2009. – 59 с.
4. Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В. Оценка экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 2. – С. 23-32.
5. ГОСТРИСО 22241-1-2012. Двигатели дизельные. Восстановитель оксидов азота AUS 32. Часть 1. Требования к качеству. – М., 2013. – 8 с.
6. <http://gas-energy-blue-power.Ru> informatsiya /106-gazodizel-blue-power.
7. Copyright: MAN NutzfahrzeugeAG, 2009. – 96 pp.

## Электронные торги: прозрачный механизм ценообразования на рынке СУГ

На российском рынке сжиженных углеводородных газов (СУГ) АО «Газпром газэнергосеть» – один из крупнейших игроков. Компания реализует СУГ в 83 регионах РФ. И среди предприятий, которые работают на этом рынке, каждый третий – наш клиент. Соответственно компания находится под пристальным вниманием ФАС, и вопрос обеспечения прозрачного ценообразования для компании является принципиальным.

Как компания с госучастием «Газпром газэнергосеть» заинтересована продемонстрировать рынку прозрачный и понятный механизм установления цен на топливо и эти задачи решает также и через участие в биржевых торгах. С 2013 г. «Газпром газэнергосеть» активно реализует нефтепродукты на Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой бирже (СПбМТСБ). Но биржевые торги сжиженным газом оказались не очень удобны по сравнению с торгами нефтепродуктами. На то есть ряд причин. Первая – на бирже продукт реализуется неограниченному кругу лиц, и поставщик должен привезти товар на любую станцию назначения, которую укажет покупатель. Но в политике нашей компании не первый год действует железное правило: мы грузим СУГ только на те станции, где есть соответствующим образом освидетельствованная газонаполнительная станция (ГНС). Биржа не может обеспечить соблюдения этого правила. Вторая – алгоритм биржевых торгов. Двойной встречный аукцион, который используется на биржах, – высокоэффективный инструмент. Но только в том случае, когда ликвидность рынка высока, когда на нем много

игроков. Даже по рынку нефтепродуктов ликвидность не очень велика, хотя в торгах участвуют практически все крупные компании. Каждая из этих компаний торгует на своем базисе (точка отгрузки товара), таких базисов огромное количество, и они географически удалены друг от друга. Поэтому движения, свойственного высоколиквидным рынкам, не происходит.

Да, торги прозрачны, независимые компании получают доступ к нужному им товару. Но в данных условиях в АО «Газпром газэнергосеть» решили пойти другим путем.

Торги по СУГ, которые компания запустила в марте 2014 г. на электронной торговой площадке (ЭТП) eOil.ru, принципиально отличаются от биржевых по алгоритму торгов. Проводятся они не по схеме двойного встречного, а по схеме последовательного аукциона. Аукцион начинается со стартовой цены, при отсутствии спроса она пошагово снижается до определенного минимального уровня. И только с момента, когда весь товар, выставленный на аукцион, был



Газонаполнительная станция



Цистерны для СУГ

заявлен к покупке (либо при достижении минимального уровня) цена прекращает падать.

В ином случае, когда спрос большой, цена повышается, но тоже до определенного максимального уровня. Этот уровень – 5 % к стартовой цене. Время торгов ограничено 30 минутами.

Как продавец АО «Газпром газэнергосеть» в этих торгах не участвует и никак не влияет на цену, на нее влияют только покупатели. Результат аукциона – результат их усилий. При этом стартовая цена каждого аукциона на ЭТП рассчитывается с учетом средневзвешенной цены предыдущих торгов. Также участие в электронных торгах на eOil.ru не требует денежных залогов. С покупателя взимается фиксированная плата за пользование площадкой, притом получает ее не продавец ресурса, а владелец площадки. Если покупатель не хочет участвовать в торгах в течение какого-то месяца, то он не платит сбор.

За время проведения торгов СУГ на ЭТП общий объем электронных торгов продуктом превысил 15 млрд руб. Только в течение 2015 г. по сделкам, заключенным через ЭТП eOil.ru, было поставлено 66 574 т пропан-бутана технического (в среднем 5548 т ежемесячно), что составило около 4 % объемов пропана и пропан-бутана производства ПАО «Газпром». Всего в 2015 г. закупки СУГ через ЭТП eOil.ru осуществляли 62 компании.

В 2016 г. АО «Газпром газэнергосеть» последовательно наращивает электронную торговлю сжиженным углеводородным газом. С января 2016 г. объем СУГ, выставяемый компанией на электронные торги, увеличен до 432 т в день. Таким образом, ежемесячный объем продукта, реализуемого на ЭТП, составляет порядка 9000...9500 т (6,5 % от объемов пропана и пропан-бутана производства ПАО «Газпром»).

Электронные торги сжиженным углеводородным газом проводятся компанией «Газпром газэнергосеть» по будним дням с 11:00 до 11:30 (МСК) на базе продажи ст. Сургут (отгрузка может проводиться с любого завода АО «Газпром газэнергосеть», поставка осуществляется железнодорожным транспортом), а также с 12:00 до 12:30 (МСК) на базе продажи ГНС Зеледино Нижегородской области (отгрузка проводится с газонаполнительной станции Зеледино с поставкой автотранспортом).

Специалисты АО «Газпром газэнергосеть» сегодня рассматривают электронные торги как важнейший инструмент развития прозрачного цивилизованного рынка СУГ и работают над совершенствованием системы электронных торгов. В 2015 г. компанией были согласованы и утверждены две торговые политики – в отношении газообразного гелия и нефтепродуктов. Документы, в частности, предусматривают гарантированное обеспечение регионов России данными продуктами и создание прозрачного механизма ценообразования, определяют параметры заключения договоров и поставок товара. Сейчас идет работа по созданию подобного документа и для сжиженного углеводородного газа, а также прорабатывается и готовится к запуску договорная схема, позволяющая допустить к электронным торгам наряду с российскими контрагентами и покупателей с внешнего рынка.

Отдел по связям с общественностью  
и рекламе АО «Газпром газэнергосеть»

## Развитие водородной автоинфраструктуры Европы

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

Водород в качестве моторного топлива продолжает оставаться предметом исследований, разработок и демонстрационных проектов. Существует мнение, что коммерческое внедрение водорода, дескать, совсем рядом: до него осталось менее десяти лет. Компании OMV, Shell, Total, Air Liquide, Linde и Daimler объединили усилия в демонстрационном проекте H2 Mobility (Водородная мобильность).



Mercedes класса B на топливных элементах

Развитием водородной заправочной инфраструктуры уже занимаются многие европейские компании: AGA, Air Liquide Air products, AREVA, BOC, Danish Hydrogen Fuel, H2 Logic, Hydrogen Link, Hydrogen Sweden, HyNor, HyOP, Icelandic New Energy, ITM Power, Linde, McPhy.

В настоящее время в Европе действуют уже чуть менее 50 водородных АЗС: три в Норвегии (план к 2020 г. минимум 20 станций), шесть в Великобритании (план к 2030 г. 1150 станций), восемь во Франции (план к 2020 г. 15-20 станций), девять в Дании и 18 в Германии (план к 2023 г. 400 станций). В Дании, Исландии, Норвегии, Швеции в целом к 2020 г. предполагается открыть 150 водородных заправок.

В Норвегии зарегистрирована новая компания Uno-X Hydrogen AS, задачей которой является строительство национальной сети водородных АЗС. Программа предусматривает создание до 2020 г. минимум 20 станций во всех крупных городах Норвегии: Осло, Бергене, Тронхейме, Ставангере, Кристиансанне и в транспортных коридорах, соединяющих их.

Новое общество создали компания Uno-X Gruppen AS (51 %) и компания NEL Fuel AS (49 %). Первая компания занимается строительством и эксплуатацией АЗС (известный норвежский бренд Uno-X). Вторая специализируется на изготовлении и поставке более чем в 50 стран мира оборудования для производства (методом электролиза воды), хранения, транспортировки и заправки автотранспорта водородом.

На своих станциях (H2Station®) группы Uno-X и NEL планируют обеспечивать компримированным водородом автомобили на топливных элементах. По оценке руководства компании Uno-X, в 2016 г. может начаться рост продаж водородных автомобилей.



АЗС сети Uno-X (Норвегия)

В Дании основа водородной заправочной сети уже создана. В начале марта 2016 г. в городе Колдинг открылась девятая по счету (и уже третья за последние полгода) водородная заправка. С вводом этой станции в эксплуатацию проезд автомобилей на топливных элементах из Дании в Германию стал более комфортным: от Колдинга до Гамбурга, где также есть компримированный водород, всего 245 км.

Водородную заправку в Колдинге построила компания Danish Hydrogen Fuel A/S (DHF), участниками которой являются нефтяная компания ОК, газовая компания Strandmoellen и инжиниринговая компания H2 Logic. Партнеры намерены построить пять заправок, три из которых уже введены в эксплуатацию.

Водородное оборудование размещается на стандартных публичных АЗС компании ОК, работающих круглосуточно. Водород поставляет компания Strandmoellen со своего электролизного завода. Технология заправки H2Station® та же, что применяется в Норвегии, и разработана компанией H2 Logic, которая поставляет и оборудование. Давление заправки автомобиля составляет 70 МПа, что обеспечивает полную заправку автомобиля за 3-5 минут.

Предыдущая водородная заправка была открыта в городе Орхус. Там, как и в Колдинге, предполагается заправлять небольшой парк автомобилей на водородных топливных элементах от производителей Hyundai и Toyota.



Водородная заправка в Колдинге (Дания)



В Скандинавии очень бережно относятся к природе и поэтому готовы внедрять водородные технологии на транспорте даже при том, что их применение не дает непосредственного экономического выигрыша. Главным мотивом организаторов проекта является то, что автомобили на топливных элементах имеют нулевые выбросы.

Источники:

<http://www.nel-hydrogen.com>,

<http://www.ngvjournals.com>

<http://www.nel-asa.com>,

<http://h2me.eu>,

<http://www.fch.europa.eu>

# Заправка нового класса

72

Голландская компания Cryonorm Systems, специализирующаяся на выпуске комплектов оборудования для малотоннажного сжижения природного газа, заправки техники и заливки транспортных цистерн, завершила строительство универсального комплекса для бункеровки речных судов и грузовых автомобилей сжиженным метаном. Это – первая совмещенная заправка в Европе.

Заправочный комплекс построен на новом контейнерном терминале Rotra в Дойсбурге. Он оборудован хранилищем СПГ, заправочной колонкой для грузовиков и вынесенным на берег бункеровочным узлом для барж. К софинансированию строительства привлечены средства Евросоюза по линии развития инфраструктуры заправки техники альтернативными видами топлива в транспортных коридорах TEN-T.

Логистическая компания Royal Rotra, которой принадлежит терминал, сама эксплуатирует девять грузовиков на СПГ. В 2016 г. они должны проехать на СПГ 1 млн км. В СПГ-автопарке компании сегодня работают шесть новых седельных тягачей Scania P340 tractor, оборудованных двигателями Евро-6 и двумя криобаками суммарной вместимостью 350 л.



Строительство комплекса в Дойсбурге (на заднем плане фото виден судоходный канал, на котором обустраивается береговой пункт бункеровки СПГ)

Компания Royal Rotra намерена в I квартале 2016 г. переключить часть грузоперевозок из портов Роттердама и Антверпена с автомобильного транспорта на водный. В результате этого компания сократит примерно 200 рейсов грузовиков в неделю. Перевод автомобилей и барж на использование СПГ также будет способствовать снижению собственных затрат и стоимости транспортно-логистических услуг для клиентов.



Источники: <http://www.ngvglobal.com/>;  
<http://www.cryonorm.com/>; <https://www.rotra.eu>

## Зоны регулируемых выбросов

В соответствии с Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. с изменениями 1978 г. (МАРПОЛ-73/78) в декабре 2015 г. министерство транспорта КНР опубликовало поэтапный план введения в действие ограничений содержания серы в судовом топливе, которые не распространяются на военные, рыболовные и спортивные суда. Китайские власти намерены сократить его примерно на 80 %. Нужно отметить, что Конвенция ограничивает содержание серы не в отработавших газах (ОГ), а в бункерном топливе.

Минтранс Китая подчеркивает, что прямого требования переходить на использование природного газа не существует. СПГ является только одним из инструментов выполнения этих экологических рекомендаций наряду с использованием метанола, скрубберов (система очистки ОГ), подключения к береговым источникам энергии и т.д.

Определены следующие этапы введения ограничений на серу:

- с 1 января 2017 г. доля серы в топливе судов в базовых портах зон с регулируемыми выбросами (ЗРВ – ECZ – Emission Control Zone, аналог европейской ECA – Emission Control Areas) не должна превышать 0,5 %;
- с 1 января 2018 г. требование использовать малосернистое топливо распространится на все порты ЗРВ;
- с 1 января 2019 г. ограничение распространится на всю глубину территориальных вод (12 мор. миль) в границах ЗРВ.

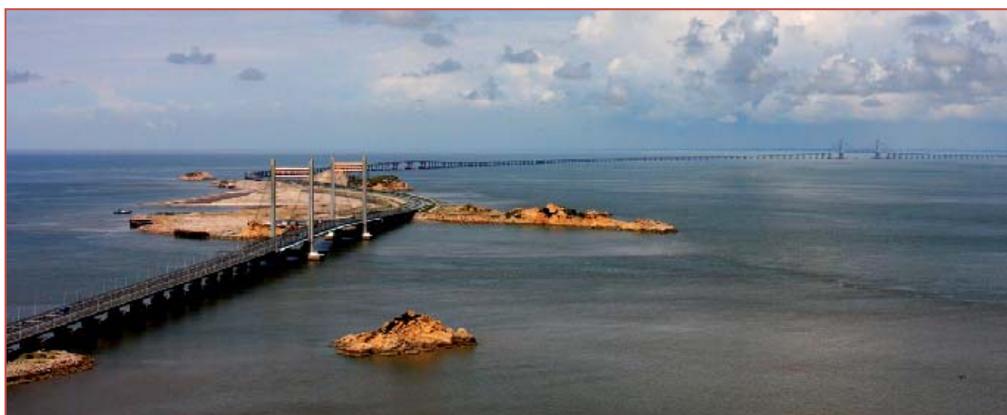
До конца 2019 г. власти Китая должны определиться с тем, будут ли ограничения по содержанию серы ужесточены (например, до 0,1 %, как в Европе, Северной Америке и Карибском бассейне).

В Китае организованы три зоны с регулируемыми выбросами:

- Бохайский залив (в северо-западной части Жёлтого моря) с тремя портовыми комплексами – Тяньжин, Циньхуандао, Таншань, Хуанхуа, обслуживающими Пекинский экономический район;
- дельта реки Янцзы – Нинбо-Чжоушань, Сучжоу, Наньтун, обслуживающими Шанхайский район;
- дельта Жемчужной реки – Шэньчжэнь, Чжухай, Гуанчжоу.



Бохайский залив



Дельта реки Янцзы

Отдельно будет рассматриваться вопрос о портовых комплексах Гонконга и Макао.

О мерах наказания нарушителей в Китае пока ничего не сообщается.

В США, например, Агентство по охране окружающей среды предложило прогрессивную шкалу, предусматривающую базовые штрафы в диапазоне от 150 до 750 долл. за метрическую тонну нештатного топлива, использованную в пределах ЗРВ, в зависимости от содержания серы от 0,15 до 3,5 % и выше при первом нарушении. Последующие и систематические нарушения повлекут за собой штраф в размере от 2 500 до 15 000 долл./т в сутки.

Американская формула учитывает массовое содержание серы в топливе, объем сожженного топлива и систематичность нарушения. Конкретные размеры штрафа зависят от нескольких параметров: типа судна, водоизмещения, скорости

движения, мощности и загруженности главных и вспомогательных силовых установок, среднего расхода топлива в море и у причала и т.д. В Евросоюзе полагают, что американцы, скорее всего, проводят проверку качества топлива по документам, без анализа проб<sup>1</sup>.

Главным фактором привлекательности СПГ для бункеровки морских судов является его относительная дешевизна. Однако нужно помнить, что цена заправленного в судно СПГ, как правило, значительно выше спотовой цены.

Важен вопрос о контроле исполнения требований по сокращению содержания серы в судовом топливе во время пребывания в зоне с регулируруемыми выбросами. Агентство Platts Bunkerworld получило следующие данные из Европейского союза: в первой половине 2015 г. число проверок качества топлива удвоилось; инспекции подверглись 1458 судов, у 89 (6 %) из которых были зафиксированы нарушения, связанные в основном с ошибками в документации; 20 % нарушений были выявлены по результатам анализа проб топлива.

В Швеции незначительные превышения установленной нормы были выявлены только в 5 % проб. А в Норвежской части ЗРВ (Балтийское – Северное моря) оштрафовали только 3 % проверенных судов, содержание серы в топливе которых составило 1,3 %. По данным датской станции мониторинга выбросов в Большом Бельте, в первом квартале 2015 г. топливо 98 % проходящих судов соответствовало требованиям по сере<sup>2</sup>.

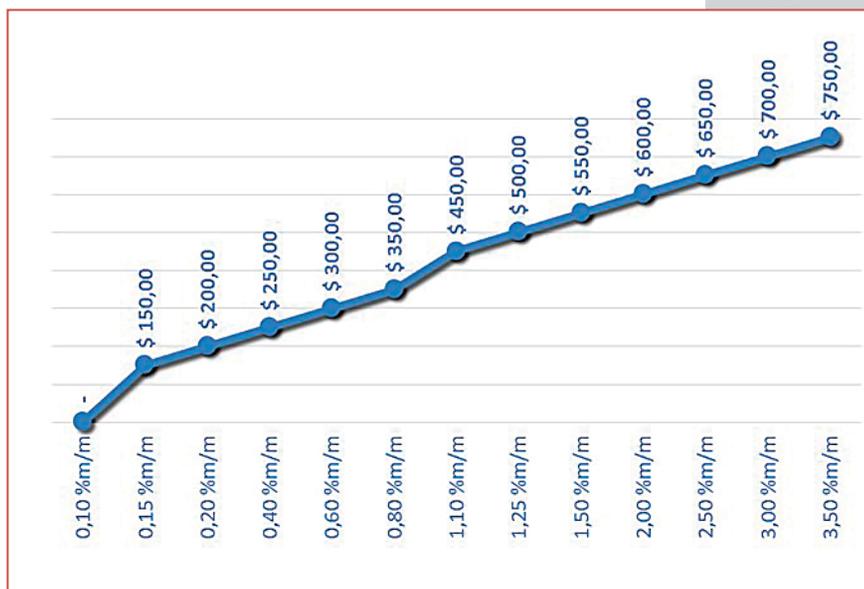
Вероятно, международная практика отбора проб топлива будет расширяться. Об этом свидетельствует создание осенью 2015 г. в рамках Регистра Ллойда новой экспертной компании Lloyd's Register GMT Ltd (LR GMT)<sup>3</sup>. Путем приобретения новых активов и слияния существующих Группа Lloid ставит перед собой задачу стать лучшей компанией в мировом сегменте сбора и анализа проб судового топлива. По данным компании LR GMT, за восемь месяцев 2015 г. только 1,23 % проб топлива выявили превышение содержания серы.

Источники:

<sup>1</sup> North American and U.S. Caribbean Sea Emissions Control Areas. Penalty Policy for Violations by Ships of the Sulfur in Fuel Standard and Related Provisions. U.S. Environmental Protection Agency. January 2015  
<http://www.epa.gov/sites>

<sup>2</sup> ECA Watch: What's the score? November 2015 issue of the Bunker Bulletin  
<http://www.sustainableshipping.com/>

<sup>3</sup> Pecypc Ship & Bunker News;  
<http://shipandbunker.com/>



Шкала штрафов за превышение содержания серы в судовом топливе за 1 т сожженного топлива в сутки в ЗРВ (США, январь 2015 г.)

## Abstracts of articles

P. 5

### *Development of CNG filling station*

#### *Part 2. Optimal structure creation*

Yaroslav Evdokimov, Evgeniy Lavrov

This article describes some of the ways of cost reducing on compressing gas by CNG stations' compressors, the advantages and disadvantages of these methods are given. It also shows what factors have to be considered when designing a CNG station and choosing equipment for it.

**Keywords:** automatic compressor station gas filler, compressed natural gas, design and construction of gas station.

P. 15

### *Ecological efficiency of motor transport network in Russia regions during conversion to natural gas*

Alexander Ishkov, Konstantin Romanov, Roman Teterevlev, Gretta Akopova, Nadezhda Vlasenko, Elena Kosolapova, Daria Gritsuta, Fariza Esieva

The indicators of NGV fuel eco-efficiency during conversion process of 50% vehicles to compressed natural gas in the federal districts and big cities of Russia are presented. Method of emissions calculating and those results showing that conversion of vehicles to natural gas would reduce emissions of pollutants into air by 49% and carbon dioxide – from 21 to 25% are exposed. The most appropriate way of solving the air pollution problem in regions and big cities is to use gas fuel that can significantly improve the environmental performance of the transport sector and contribute significantly to the energy security of the country.

**Keywords:** NGV fuel, compressed natural gas, motor transport network, method of emissions calculating, ecological efficiency.

#### *References*

1. Government decree of the Russian Federation from 13.05.2013, № 767-p "On regulation of relations in the sphere of use of gas motor fuel" // Alternative Fuel Transport. – 2013. – № 5 (35). – P. 5-6.
2. The list of the Russian Federation Presidential instructions following the meeting on expanding the use of gas as a motor fuel from May 14, 2013 № Pr-1298. <http://kremlin.ru/events/president/news/18345>.
3. A comprehensive plan of action to increase the use of natural gas as a motor fuel, approved by the deputy prime minister of the Russian Federation A.V. Dvorkovich November 14, 2013 (number 6819p-P9). <http://aviatp.ru/upload/medialibrary/plan.pdf>.
4. Statistic of Ministry of Internal Affairs State Traffic Safety Inspectorate, 2015 <http://www.gibdd.ru/stat/>
5. State Report "On the state and Environmental Protection of the Russian Federation in 2014", 2015.
6. International Gas Union (on 01.05.2015). <http://www.igu.org/>
7. The United Nations Development Programme project, the Global Environment Facility, the Ministry of Transport of the Russian Federation "Reducing greenhouse gas emissions from road transport in the cities of Russia" <http://www.undp.ru/index.php?iso=RU&lid=2&cmd=programs&id=220>
8. The program to increase the use of CNG as a fuel for their own transport companies of Gazprom 2014-2017. Approved by JCS "Gazprom" Order of July 14, 2014, number 338.
9. Settlement Instructions (method) for inventories of emissions of motor vehicles in air pollutants. – M.: NIIAT 2008

P. 26

### *Water transport on liquefied natural gas: global trends and the first Russian ship on LNG*

Nikolay Kirillov

The article is devoted to the analysis of solutions when creating the first Russian ship on liquefied natural gas. Unique domestic technologies of transferring marine diesel engines to dual fuel mode and the use of mobil-cryogenic LNG tanks are described. The international experience of liquefied natural gas use on the sea and river transport is also analyzed.

**Keywords:** liquefied natural gas, LNG ship, dual-fuel power plant, gas-diesel engine.

#### *References*

1. Kirillov N.G. Liquefied natural gas as a universal motor fuel of the XXI century: technology and long-term storage. – M.: Information and advertising center «Gazprom», 2002. – 64 p.
2. Kirillov N.G. New technologies in the use of liquefied natural gas as a motor fuel and coolant for refrigerated truck equipment and vehicles. – M.: Information and advertising center «Gazprom», 2003. – 30 p.
3. Kirillov N.G., Lazarev A.N. Liquefied natural gas: global market analysis and prospects of domestic production // Gas Chemistry. – 2011. – № 6. – P. 23-29.
4. Kirillov N.G. Natural gas as a motor fuel and the environment of road transport in Russia. – M.: Information and advertising center «Gazprom», 2003. – 31 p.

P. 34

### *The use of second-generation bioethanol in a small displacement engine and its influence on ecological parameters*

Andrey Vlasov, Risto Ilves, Arne Küüt, Jüri Olt

The purpose of this research is to study the influence of a fuel based on second generation bioethanol upon the economic and ecological parameters of a small-dimensioned engine, as well as the possibilities of using second generation bioethanol as fuel in the field of agriculture. In addition, this thesis explores the influence of the studied fuels on the corrosion and wear of engine parts. In the course of experimental studies, we used a fuel based on second generation bioethanol in a two-stroke internal combustion engine. The data received from the experiment's results was analysed and compared to the results of using traditional gasoline fuel. We can claim on the basis of the results of the experiments that a significant drop in carbon oxide was revealed in the analysis of hazardous waste materials found in the exhaust gases, yet the level of nitrogen oxides increased. The use of second generation bioethanol as fuel for a two-stroke engine did not cause the fast wear of the engine components, whereas the presence of corrosion was detected on the surface of metal parts. In terms of efficiency, the fuel system of a two-stroke engine must be modified in order to achieve better economic and ecological parameters.

**Keywords:** two-stroke engine, biofuel, bioethanol, motor oil, corrosion.

#### *References*

1. Ritslaid K., Küüt A., Olt J. State of the Art in Bioethanol Production // Agronomy Research. – 2010. – № 8 (1). – Pp. 236-254.
2. Chuprakov A.I. The study of the working process of a diesel 4h 11.0 / 12.5 by using ethanol fuel emulsion as a fuel. Abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences. 2012, Saint-Petersburg.
3. Küüt A. Characteristics of bioethanol fuel obtained from lignocellulose biomass in internal combustion reciprocating engines with spark-and compression-ignition., Estonian University of Life Sciences. – Tartu: Ecoprint, 2013. – Pp. 25-28.
4. Patent EE 05665 B1. Formation method of fuel-air mixture of reciprocating engine and flexiblefuel system. 2013. <http://www.epa.ee/ul/>

doc/valjaanded/patendileht2013\_03.pdf

5. Labeckas G., Slavinskis S., Mazeika M., Laurinaitis K. Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Filled with Ethanol-Diesel-Biodiesel Blend. *Engineering for Rural Development, Latvija*, 2010. – Pp. 266-271.
6. Yilmaz N., Vigil F.M., Donaldson A.B., Darabseh T. Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration, *Fuel* 115, 2014. – Pp. 790-793.
7. Olt J., Mikita V., Sõõro T., Küüt A., Tamm R., Raidla E., Ilves R., Ristlaid K., Raudsepp V., Viitkar U. Bioetanool ottomootori kütusena // *Agraarteadus: journal of agricultural science*. – 2009. – № 2. – Pp 26-35.
8. Hilbert D. High. Ethanol Fuel Endurance: A Study of the Effects of Running Gasoline with 15% Ethanol Concentration in Current Production Outboard Four-Stroke Engines and Conventional Two-Stroke Outboard Marine Engines. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2011.
9. Anderson P., Tamminen J., Standström C.E. Piston ring tribology. VTT Research notes 2178, Otamedia Oy, Espoo, 2002. – Pp. 105.
10. Eroschenko S., Korogodskii V., Ghahramanyan A., Wroblewski A., Vasilenko A., Obozny S. Experimental research of engine with spark ignition and direct injection of fuel when running on gasoline-ethanol mixture. *Internal combustion engines, volume 1 – Kharkov: NTU "KPI"*, 2012. – P. 8-9.
11. Olt J., Mikita V., Ilves R., Küüt A. Ethanol as an Additive Fuel for Diesel Engines. *Engineering for Rural Development, Latvija*, 2011. – Pp. 248-253.
12. Matuszewska A., Odziemkowska M., Czarnocka J. Properties of bioethanol – diesel oil mixtures. In Méndez-Vilas, A. (ed.) *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments. FORMATEX 2013*. – Pp. 352-359.
13. Demirbas A. *Green energy and technology 3. Biofuels*, Springer-Verlag, 2009. – Pp. 96-99.
14. Standard ASTM D445 ASTM D445 Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids.
15. GUNT Hamburg. Test stand GUNT TM 260.03. Available at: <http://www.mutiaranata.com/product/detail/tm-260-03-experimental-module-pin-on-disc> (10.02.2016).
16. Merker G.P., Schwarz C., Teichmann R. *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Praxis, ATZ*, Germany, 2012. – Pp. 20.
17. Taraba J.L., Turner G.M., Razov R. The use of ethanol as an unmixed fuel for internal combustion engines *Energy in agriculture, Department of Agricultural Engineering University of Kentucky, Lexington*, 1981. – Pp. 6-8.

#### P. 43

#### *The study of power and economic indicators of diesel 4H 11,0/12,5 at operation on natural gas, methanol- and ethanol-fuel emulsions*

Vitaly Likhanov, Oleg Lopatin

The results of experimental studies on improvement of effective indexes of a diesel engine 4H 11,0/12,5 through the use of compressed natural gas and exhaust gas recirculation, methanol-fuel emulsion and ethanol-fuel emulsion.

**Keywords:** diesel, compressed natural gas, exhaust gas recirculation, methanol-fuel emulsion, ethanol-fuel emulsion, effective indicators.

#### References

1. Likhanov V.A., Lopatin A.P. Investigation of combustion process parameters in the application of a tractor diesel and natural gas recirculation methanol- and ethanol-fuel emulsions // *Tractors and farm machinery*. – 2015. – № 9. – P. 3-5.
2. Lopatin O.P. Development of the program for the use of equipment for testing gas diesel engines // *Young scientist*. – 2015. – № 12 (92). – P. 229-232.
3. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Model calculation of nitrogen oxides in the gas diesel engine cylinder. In: *Society, science, innovation (SPC – 2014)*, the annual All-Russian scientific-practical conference: a collection of materials: general university section, BE, GE, FEM, FATA, FAM, FPMT, FCA, HE, ETF. – Vyatka State University, 2014. – P. 2001-2004.
4. Lopatin O.P. The chemistry of the formation of nitrogen oxides in the cylinder gas diesel // *Modern science: current problems and solutions*. – 2015. – № 3 (16). – P. 28-30.
5. Lopatin O.P. Investigation of test performance when working with exhaust gas recirculation // *Young scientist*. – 2015. – № 10 (90). – P. 253-255.
6. Lopatin O.P. Influence of the degree of exhaust gas recirculation in the efficient and environmental performance of diesel // *Privolzhsky Scientific Herald*. – 2015. – № 5-1 (45). – P. 90-92.
7. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Influence of EGR on the performance indicator of gas diesel engine // *Modern science: current problems and solutions*. – 2015. – № 4 (17). – P. 31-33.
8. Lopatin O.P. Improving the environmental performance of a tractor diesel engine by the use of natural gas and recycling. In: *Collection of scientific papers based on the Eighteenth International scientific-practical conference "Innovative directions of agribusiness development and competitiveness of enterprises, industries and complexes – the contribution of young scientists"*. – Yaroslavl: VPO "Yaroslavl State Agricultural Academy", 2015. – P. 30-34.
9. Lopatin O.P. Results indexing workflow gas diesel engine at maximum torque // *Modern science: current problems and solutions*. – 2015. – № 5 (18). – P. 8-9.
10. Lopatin O.P. Influence of the degree of recycling on the characteristics of the tractor gas diesel combustion process // *The young scientist*. – 2015. – № 14. – P. 166-168.

#### P. 50

#### *Influence of partial mixture homogenizing on the formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of hydrogen diesel*

Revaz Kavtaradze, Vladimir Krasnov

For the first time in three-dimensional formulation the effect of the partial mixture homogenization on the formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of a diesel engine with direct injection of hydrogen gas was studied in detail. Partial homogenization of the hydrogen-air mixture is achieved by increasing the number of nozzles of the hydrogen injector. The adequacy of the simulation results is estimated by comparison with experimental data. The optimal design parameters of the hydrogen injectors that ensure minimization of emissions of nitrogen oxides are discussed.

**Keywords:** hydrogen diesel, homogenizing the mixture, nitrogen oxides.

#### References

1. Eichseder H., Klell M. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. – Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2008. – 288 p.
2. Schüers A., Abel A., Fickel H.Ch., Preis M., Artmann R. *Der Zwölfzylinder –Wasserstoffmotor im BMW 750hL // MTZ*. – 2002. – № 2. – P. 98-105.
3. Westerkamp L. *Der Erren-Wasserstoffmotor // ATZ*. – 1939. – № 19. – P. 523-524.
4. Kavtaradze R.Z., Zeilinger R., Zitzler G. *Ignition Delay in a Diesel Engine Utilizing Different Fuels // High Temperature*. – 2005. – Vol. 43. – № 6. – Pp. 951-960.

5. Rottengruber H., Wiebicke U., Woschni G., Zeilinger K. Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission. Teil 3: Versuche und Berechnungen am Motor // MTZ. – 2000. – № 2. – P. 122-128.
6. Kavtaradze R.Z. Thermal processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Publishers, 2011. – 238 p.
7. Kavtaradze R.Z. Workflows hydrogen diesel engine and improving its environmental performance // Vehicles on alternative fuels (in Russian; Transport na alternativnom toplive). – 2012. – № 2 (26). – Pp. 61-64.

**P. 57**

### *Refinement of ecological parameters for gas and diesel vehicles*

**Viktor Erokhov, Irina Odinokova**

Constructive and functional characteristics of a selective catalytic converter are introduced. Design features and module functional principle urea supply and injection air are described. The estimation of the technical and environmental effectiveness of emission control and opacity of modern diesel engines is given.

**Keywords:** particle filter, gas-fittings, catalytic converter, sensor of nitrogen oxides, soot, nitrogen oxides, control system, urea supply module, injection air.

### *References*

1. Markov V.A. Exhaust emissions of diesel engines and the possibility of its reducing // Truck. – 2009. – № 8. – P. 27-41.
2. Natural gas engines with EGCA control unit. Electrical fixtures. MAN Truck Bus Aktiengesellschaft, 2011. – 166 p.
3. The installation of gas-cylinder LPG Bi Fuel. Service Training VSQ-1. Self-study program 427. VOLKSWAGEN Group Academy. [http://jetta-club.org/uploads/SSP\\_rus\\_427\\_dreysteija](http://jetta-club.org/uploads/SSP_rus_427_dreysteija). Pdf2009. – 59 p.
4. Markov V.A., Devyanin S.N., Markov V.V. Assessment of the environmental safety of power plants with diesel engines // Safety in Technosphere. – 2014. – № 2. – P. 23-32.
5. GOSTRISO 22241-1-2012. Diesel engines. The reducing nitrogen oxides AUS 32. Part 1: Quality requirements. – M.: 2013. – 8 p.
6. <http://gas-energy-blue-power.ru>. Ruinformatsiya / 106-gazodizel-blue-power.
7. Copyright: MAN NutzfahrzeugeAG, 2009. – 96 p.

## Авторы статей в журнале

### № 2 (50) 2016 г.

**Акопова Гретта Семеновна,**

к.т.н., начальник лаборатории охраны окружающей среды и ресурсосбережения ОАО «Газпром ВНИИГАЗ», тел. (498) 657-44-54, e-mail: G\_Akopova@vniigaz.gazprom.ru

**Власенко Надежда Львовна,**

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории охраны окружающей среды и ресурсосбережения ОАО «Газпром ВНИИГАЗ», тел. (498) 657 94-54, м.т. 910 421-28-95, e-mail: N\_Vlasenko@vniigaz.gazprom.ru

**Власов Андрей Андреевич,**

докторант, инженер-специалист Технического института Эстонского университета естественных наук, Крейцвальди, 56, 51014 Тарту, Эстония, тел. +37258516464, e-mail: andrey.vlasov@emu.ee

**Грицота Дарья Олеговна,**

инженер I категории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», тел. (498) 657-40-62, e-mail: F\_Esieva@vniigaz.gazprom.ru

**Евдокимов Ярослав Андреевич,**

научный сотрудник НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА», р.т. (812) 648-24-60, доб. 133

**Ерохов Виктор Иванович,**

профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н., адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, р.т. 8 (499) 785-62-05, м.т. 8 916-150-17-87, e-mail: PDO@mami.ru

**Есиева Фариза Таймуразовна,**

младший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», тел. (498) 657-40-62, e-mail: F\_Esieva@vniigaz.gazprom.ru

**Ильвес Ристо Лембитович,**

д.т.н., научный сотрудник Технического института Эстонского университета естественных наук, Крейцвальди, 56, 51014 Тарту, Эстония, e-mail: Risto.Ilves@emu.ee

## Contributors to journal issue

### No 2 (50) 2016

**Akopova Gretta,**

Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Environmental protection and resource saving (OAO «Gazprom VNIIGAZ»), e-mail: G\_akopova@vniigaz.gazprom.ru, phone: + 7 (498) 657 94-54

**Erokhov Viktor I.,**

the professor of the Moscow state technical university (MAMI), Dr.Sci.Tech., the Honored worker of a science of the Russian Federation, e-mail: PDO@mami.ru

**Esieva Fariza,**

junior research associate, LLC Gazprom VNIIGAZ, phone: + 7 (498) 657-40-62, e-mail: F\_Esieva@vniigaz.gazprom.ru

**Evdokimov Yaroslav,**

research associate Scientific-Industrial Corporation «LENPROMAVTOMATIKA», e-mail: evdokimov@lenprom.spb.ru

**Gritsuta Daria,**

category 1 engineer, LLC Gazprom VNIIGAZ, phone: + 7 (498) 657-40-62, e-mail: F\_Esieva@vniigaz.gazprom.ru

**Ilves Risto,**

PhD, Researcher, Institute of Technology, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwalldi 56, 51014, Tartu, Estonia, e-mail: Risto.Ilves@emu.ee

**Ishkov Alexander,**

deputy chief of department – managing director, Public Joint Stock Company Gazprom, Doctor of Chemistry, phone: + 7 (495) 719-27-51, e-mail: A.Ishkov@adm.gazprom.ru

**Kavtaradze Revaz,**

Professor of N.E. Bauman's MGTU, Doctor of Engineering, mobile phone: 8 910 469-00-12, office phone: (499) 265-78-92, e-mail: kavtaradzer@mail.ru

**Ишков Александр Гаврилович,**

заместитель начальника департамента – начальник управления ПАО «Газпром», д.х.н., (495) 719-27-51, e-mail: A.Ishkov@adm.gazprom.ru

**Кавтарадзе Реваз Зурабович,**

профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., м. т. 8 910 469-00-12, р. т. (499) 265-78-92, e-mail: kavtaradzerz@mail.ru

**Кириллов Николай Геннадьевич,**

д.т.н., Заслуженный изобретатель РФ, зам. генерального директора по перспективным разработкам и защите интеллектуальной собственности ООО «НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания», г. Санкт-Петербург, м.т. 8 911-950-83-26, e-mail: kirillov\_ng@mail.ru

**Косолапова Елена Валентиновна,**

к.т.н., заместитель начальника лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», (498) 657-40-62, e-mail: E\_Kosolapova@vniigaz.gazprom.ru

**Краснов Владимир Михайлович,**

аспирант кафедры «Поршневые двигатели» (Э2) МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел. 8 963 979-25-53, e-mail: vikrasnov@gmail.com

**Кюют Арне Янович,**

д.т.н., доцент Технического института Эстонского университета естественных наук, Крейцвальди, 56, 51014 Тарту, Эстония, e-mail: arne.kyut@emu.ee

**Лавров Евгений Павлович,**

начальник проектного отдела НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА», р.т. (812) 648-24-60, доб. 121

**Лиханов Виталий Анатольевич,**

д.т.н., академик РАТ, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», 610017, г. Киров, Октябрьский проспект, 133, р.т. 8 (8332) 57-43-07, e-mail: info@vgsha.info

**Лопатин Олег Петрович,**

к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», служебный адрес: 610017, г. Киров, Октябрьский проспект, 133, кафедра ДВС, р.т. 8 (8332) 37-57-28, м.т. 912 361-77-55, e-mail: nirs\_vsaa@mail.ru

**Одиноква Ирина Вячеславовна,**

доцент, докторант Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ», к.т.н., e-mail: PDO@mami.ru

**Ольт Юри Раймондович,**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственного машиностроения Технического института Эстонского университета естественных наук, Крейцвальди, 56, 51014 Тарту, Эстония, e-mail: jyri.olt@emu.ee

**Пронин Евгений Николаевич,**

начальник отдела ООО «Газпром экспорт», руководитель РК5 Международного газового союза, тел.: (812) 646-16-54, e-mail: e.pronin@mail.ru

**Романов Константин Владимирович,**

начальник отдела ПАО «Газпром», к.э.н., (495) 719-68-23, e-mail: K.Romanov@adm.gazprom.ru

**Тетеревлев Роман Викторович,**

главный технолог ОАО «Газпром», тел. (495) 719-69-20, e-mail: R.Teterevlev@adm.gazprom.ru

**Kirillov Nikolay,**

Doctor of Technical Sciences, Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy General Director of Advanced Engineering and Protection of Intellectual Property «NPO «Saint-Petersburg Electrotechnical Company», St. Petersburg, phone: + 7 911-950-83-26, e-mail: kirillov\_ng@mail.ru

**Kosolapova Elena,**

deputy laboratory chief, LLC Gazprom VNIIGAZ, PhD in Engineering Science, (498) 657-40-62, e-mail: E\_Kosolapova@vniigaz.gazprom.ru

**Krasnov Vladimir,**

graduate student of Bauman Moscow State Technical University, phone: + 7 963 9792553, e-mail: vikrasnov@gmail.com

**Küüt Arne,**

PhD, Docent, Institute of Technology, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 56, 51014, Tartu, Estonia, e-mail: arne.kyut@emu.ee

**Lavrov Evgeniy,** head of engineering department

Scientific-Industrial Corporation «LENPROMAVTOMATIKA», phone: + 7 (812 648-24-60), plus 121

**Likhanov Vitaly,**

Academician of RTA, Professor of Vyatka State Agricultural Academy, Dr. Sci. Tech., phone: +7 (8332) 57-43-07, e-mail: info@vgsha.info

**Lopatin Oleg P.,**

Ph.D., Associate Professor of Vyatka State Agricultural Academy, phone: + (8332) 37-57-28, e-mail: nirs\_vsaa@mail.ru

**Odinokova Irina,**

associate professor, PhD student of Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Ph.D of Engineering Science, e-mail: PDO@mami.ru

**Olt Jüri,**

PhD, Head of the Department of Agricultural and Production Engineering, Professor, Institute of Technology, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 56, 51014, Tartu, Estonia, e-mail: jyri.olt@emu.ee

**Pronin Eugene,**

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

**Romanov Konstantin,**

head of section, Public Joint Stock Company Gazprom, PhD in Economics, (495) 719-68-23, e-mail: K.Romanov@adm.gazprom.ru

**Teterevlev Roman,**

chief technologist (OAO «Gazprom»), phone: + 7 (495) 719-69-20, e-mail: R.Teterevlev@adm.gazprom.ru

**Vlasenko Nadezhda,**

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of Laboratory of Environmental protection and resource saving (OAO «Gazprom VNIIGAZ»), phone: + 7 (498) 657 94-54, e-mail: N\_vlasenko@vniigaz.gazprom.ru

**Vlasov Andrey,**

PhD student, Institute of Technology, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 56, 51014, Tartu, Estonia, phone: +37258516464, e-mail: andrey.vlasov@emu.ee

# 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	I полугодие, 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.