



# ТРАНСПОРТ

## НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

ЖУРНАЛ № 2 (20) 2011

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

НАЦИОНАЛЬНАЯ ГАЗОМОТОРНАЯ АССОЦИАЦИЯ



АФФИЛИРОВАНА  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ ГАЗОВЫМ  
СОЮЗОМ



**ТМК** Трубная  
Металлургическая  
Компания

**ОРСКИЙ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ  
ЗАВОД**

**ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ  
баллонов высокого давления**

462431, Оренбургская область  
г. Орск, ул. Крупской, 1  
тел/факс: (3537) 34-80-60, 34-80-19, 25-83-33  
E-mail: office@ormash.ru, www.ormash.ru

РЕКЛАМА

**145-летие МГТУ «МАМИ»**

**Двигатели внешнего сгорания на речных судах**

**Очистка природного газа для получения СПГ**

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору  
в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны  
культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-30114

**Учредитель и издатель**  
НП «Национальная газомоторная  
ассоциация» (НГА)

**Периодичность** 6 номеров в год

**Главный редактор**  
**П.Г. Цыбульский**  
генеральный директор ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

**Члены редакционной коллегии**  
**Б.В. Будзуляк**  
председатель Комиссии по использованию при-  
родного и сжиженного нефтяного газа в качестве  
моторного топлива, д.т.н.

**В.И. Ерохов**  
профессор «МАМИ», д.т.н.

**Н.Е. Игнатьева**  
заместитель главного редактора

**А.А. Ипатов**  
генеральный директор ФГУП «НАМИ», д.э.н.

**Р.З. Кавтарадзе**  
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**Т.В. Климова**  
начальник отдела по связям с общественностью и  
СМИ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

**С.И. Козлов**  
главный научный сотрудник Центра по использо-  
ванию газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.

**В.А. Марков**  
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**А.В. Николаенко**  
ректор «МАМИ», профессор, к.э.н.

**Ю.В. Панов**  
профессор МАДИ, к.т.н.

**Н.Н. Патрахальцев**  
профессор Российского университета дружбы  
народов, д.т.н.

**Е.Н. Пронин**  
зам. начальника Управления ОАО «Газпром»,  
Председатель совета партнерства НГА

**В.Л. Стивко**  
исполнительный директор НГА, к.т.н.

**В.Н. Фатеев**  
зам. директора РНЦ «Курчатовский институт», д.х.н.

**Редактор**  
**О.А. Ершова**

**Отдел подписки и распространения**  
**В.А. Ионова**

**Компьютерная верстка**  
**Ф.А. Игнащенко**

**Адрес редакции:**  
115304, Москва, ул. Луганская, д. 11, оф. 304.  
Тел./факс: (495) 321-50-44, 363-94-17.  
E-mail: transport.1@ngvrus.ru  
www.ngvrus.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Принт-Лидер»,  
117186, Москва, ул. Нагорная, д. 15, корп. 8  
Номер заказа  
Сдано на верстку 01.02.2011 г.  
Подписано в печать 21.03.2011 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: реклама Орского  
машиностроительного завода**

## В НОМЕРЕ:

Итоги XXI сессии Рабочей группы по газу ЕЭК ООН .....	3
Поздравляем с юбилеем .....	5
<b>А.В. Николаенко</b> МГТУ «МАМИ» смотрит в будущее .....	6
<b>В.И. Ерохов, А.В. Николаенко</b> Применение электрического привода наземного транспортного средства .....	10
<b>С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов, А.И. Филонов, И.А. Куликов, Я.В. Благушко, О.В. Маликов</b> Работы МГТУ «МАМИ» в области автомобилей с гибридными силовыми установками .....	17
Новости из-за рубежа .....	22
<b>В.А. Марков, А.В. Стремяков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский</b> Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смесевом биотопливе .....	24
<b>Л.В.А. Санчес, Н.Н. Патрахальцев, Б.А. Корнев, И.С. Мельник</b> Экспериментальное определение цетановых чисел смесевых и эмульгированных дизельных топлив .....	30
<b>С.В. Гусаков, И.В. Афанасьева, Х. Мурад</b> Анализ возможности применения топлив с низкой удельной теплотой сгорания в ДВС .....	34
<b>В.И. Карагусов</b> Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания на речных судах .....	38
<b>Г.С. Широкова, М.В. Елистратов</b> Комплексная очистка природного газа для получения СПГ .....	42
<b>С.Н. Девянин, В.А. Марков, Л.И. Быковская, В.В. Маркова</b> Использование рапсового масла в топливах для дизелей .....	48
<b>В.Н. Селюков, В.А. Матанцев</b> Комплексная схема производства биодизельного топлива .....	51
<b>В.В. Разносчиков, М.Л. Яновская</b> Оценка эффективности применения синтетических жидких топлив на транспортных самолетах .....	53
Рязань: перспективы применения природного газа на транспорте .....	59
<b>П.Г. Теремякин</b> Основные факторы, влияющие на стоимость владения газобаллонным автомобилем с подчиненной системой управления .....	60
Высокопроизводительные насосные агрегаты серии NZ фирмы FAS (Германия) .....	65
<b>Л.А. Гнедова, К.А. Гриценко, Н.А. Лапушкин, В.Б. Перетряхина, И.В. Федотов</b> Нормирование влагосодержания КПП с учетом региональных климатических условий .....	66
<b>Я.С. Мкртычан</b> Междугородная газонаполнительная компрессорная станция и система заправки транспортных средств КПП .....	69
<b>В.А. Шишков</b> Калибровка электронной системы управления двигателем с искровым зажиганием, работающим на газовом топливе .....	71
<b>Е.Б. Федорова</b> Становление мировой индустрии СПГ .....	74
Авторы статей в журнале № 2 (20) 2011 г. ....	80

**'Alternative Fuel Transport' international science and technology journal, No. 2 (20) 2011**

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)

**Published:** 6 issues a year

**Editor-in-Chief**

**Tsybulsky, P.G.**

Director General of Gazprom VNIIGAZ, PhD

**Editorial board members**

**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

**Ignat'eva, N.E.**

Deputy Editor-in-Chief

**Ipatov, A.A.**

Director General of FGUP NAMI,

Doctor of Engineering

**Kavtaradze, R.Z.**

Professor of N.E. Bauman's MG TU, Doctor of Engineering

**Klimova, T.V.**

acting Head of Public and Mass Media Relations Service of Gazprom VNIIGAZ

**Kozlov, S.I.**

Deputy Director General for Research of Gazprom VNIIGAZ, Doctor of Engineering

**Markov, V.A.**

Professor of N.E. Bauman's MG TU,

Doctor of Engineering

**Nikolaenko, A.V.**

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

**Panov, Yu.V.**

Professor of MADI (GTU), Candidate of Science

**Patrakhaltsev, N.N.**

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

**Pronin, E.N.**

Deputy Head of Directorate, JSC Gazprom, President, NGVRUS

**Stativko, V.L.**

Executive Director, NGVRUS, Candidate of Science

**Fateev, V.N.**

Deputy Director of RNC Kurchatovsky Institute, Doctor of Chemistry

**Editor**

**Ershova, O.A.**

**Subscription and Distribution Department**

**Ionova, V.A.**

**Editorial office address:**

304 - 11, Luganskaya str., 115304, Moscow

Tel/fax: (495) 321-50-44, 363-94-17

E-mail: transport.1@ngvrus.ru,

www.ngvrus.ru

Order number

Passed for press on 01.02.2011

Endorsed to be printed on 21.03.2011

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

<b>A.V. Nikolaenko</b> Moscow state technical university «MAMI» looks ahead .....	6
<b>V.I. Erokhov, A.V. Nikolaenko</b> Application of the electric drive of the ground vehicle .....	10
<b>S.V. Bakhmutov, V.V. Selifonov, A.I. Filonov, I.A. Kulikov, Y.V. Blagushko, O.V. Malikov</b> Scientific activity of MSTU «MAMI» in the field of hybrid electric vehicles.....	17
News from abroad.....	22
<b>V.A. Markov, A.V. Stremyakov, V.S. Akimov, V.A. Shumovsky</b> A Method of Improving Fuel Spray Process Quality in a Diesel Engine Running on Mixture Biofuel.....	24
<b>L.V.A. Sanches, N.N. Patrakhaltsev, B.A. Kornev, I.S. Melnik</b> Experimental determination of cetan numbers of mixtured and emulcified diesel fuels.....	30
<b>S.V. Gusakov, I.V. Afanasieva, H. Murad</b> Analysis of the possibility of using fuels with low specific heat of combustion in internal combustion engines.....	34
<b>V.I. Karagusov</b> Magnetocaloric engines of external combustion on river courts as alternative to diesel engines .....	38
<b>G.S. Shirokova, M.V. Yelistratov</b> Complex natural gas treatment for LNG production .....	42
<b>S.N. Devianin, V.A. Markov, L.I. Bykovskaya, V.V. Markova</b> Analysis of the possibility of using rapeseed oil in the fuel for diesel engines.....	48
<b>V.N. Selukov, V.A. Matantsev</b> Integrated Biodiesel Process Flow Diagram .....	51
<b>V.V. Raznoschikov, M. L. Yanovskaya</b> Efficiency of transport aircrafts on synthetic liquid fuels.....	53
<b>P.G. Teremyakin</b> The main factors affects on the operation cost of LPG car equipped with Slave-Control-System.....	60
<b>L.A. Gnedova, K.A. Gritsenko, N.A. Lapushkin, V.B. Peretryakhina, I.V. Fedotov</b> Rate setting moisture of compressed natural gas in accordance with content regional climatic conditions.....	66
<b>J.S. Mkrtychian</b> The intercity natural gas dual-fuel filling station and the filling system of natural gas vehicles with compressed natural gas .....	69
<b>V.A. Shishkov</b> Calibration of an electronic control system of the engine with spark ignition, working on gas fuel.....	71
<b>E.B. Fedorova</b> Formation of the global LNG industry .....	74
Contributors to journal issue No. 2 (20) 2011 .....	80



## Итоги XXI сессии Рабочей группы по газу ЕЭК ООН

18-20 января в Женеве под председательством генерального директора ОАО «Газпром промгаз» Александра Карасевича состоялась XXI сессия Рабочей группы по газу Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН), а также заседание специальной группы экспертов по поставкам и использованию газа в рамках XII сессии Комитета по устойчивой энергетике ЕЭК ООН.



Сессию открыл приветствием к участникам генеральный директор ОАО «Газпром промгаз», председатель Рабочей группы по газу Александр Карасевич (четвертый слева)

**В** мероприятиях приняла участие делегация ОАО «Газпром» во главе с заместителем начальника Департамента внешнеэкономической деятельности – начальником Управления международных организаций и форумов Сергеем Балашовым, представители 22 стран, 10 международных организаций, а также представители органов государственного управления и крупнейших энергетических компаний стран-членов ЕЭК ООН.

В рамках мероприятия состоялись заседания круглых столов по следующим темам: разработка эффективных механизмов регулирования рынков природного газа в регионе ЕЭК ООН; современное состояние дел и перспективы СПГ в регионе ЕЭК ООН; использование газа на транспорте в регионе ЕЭК ООН; подземные хранилища газа в Европе и Центральной Азии.

В ходе заседания советник Министерства энергетики РФ Теодор Штилькинд представил основные положения Конвенции по международной энергетической безопасности,

предложенной президентом РФ Дмитрием Медведевым.

Исполнительный директор Национальной газомоторной ассоциации Виктор Стативко представил руководителям Европейской и Международной газомоторных ассоциаций концепцию автопробега «Голубой коридор».

Модератором круглого стола по вопросам использования природного газа в качестве моторного топлива был заместитель начальника Департамента по транспортировке,

подземному хранению и использованию газа – начальник Управления по газификации и использованию газа Валерий Матюшечкин. На заседаниях круглого стола и сессии Группы экспертов выступили представители ведущих профессиональных организаций: Международного газового союза (МГС), Европейского делового Конгресса, Международной, Европейской и Российской газомоторных ассоциаций, энергетических компаний ОАО «Газпром», E.On Ruhrgas AG, OMV AG и др., а также ведущие специалисты в



Работой круглого стола руководит Валерий Матюшечкин (крайний справа)

области использования природного газа в качестве моторного топлива из Австрии, Германии, Испании, Нидерландов, России, США.

На заседании объединенной группы экспертов ЕЭК ООН, МГС и ЕДК под председательством зам. начальника Управления по газификации и использованию газа ОАО «Газпром» Евгения Пронина была обсуждена структура и содержание разделов объединенного международного доклада «Использование природного газа на транспорте», который должен выйти весной 2012 г.

В докладах было отмечено, что в условиях все более ужесточающихся экологических требований и истощения в перспективе нефтяных запасов природный газ будет играть возрастающую роль в качестве альтернативного моторного топлива. Для России это открывает дополнительные возможности по экспорту газа, в том числе в виде готового продукта – компримированного природного газа (КПГ) и сжиженного природного газа (СПГ) с соответствующей добавочной стоимостью. На решение этого вопроса, в частности, направлен проект, осуществляемый в настоящее время в Газпроме, по созданию в Европе масштабной сети газовых заправок с его участием.

С учетом важности проблематики по инициативе российской стороны в рамках ЕЭК ООН было принято решение провести исследование по вопросам использования газа на транспорте. Достигнута договоренность с Международным газовым союзом (который традиционно публикует подобные исследования раз в три года) о том, что исследование будет подготовлено совместно, в сотрудничестве также с Европейским деловым конгрессом (ЕДК) и опубликовано к сессии МГС в Куала-Лумпуре в 2012 г. В рамках ЕЭК ООН это будет второе крупное исследование по газомоторной тематике после опубликования в



На заседании сессии Рабочей группы по газу ЕЭК ООН

2002 г. доклада экспертов по проекту «Голубой коридор».

Участниками было также отмечено, что тенденция расширения использования природного газа на транспорте носит устойчивый характер. Европейский парк автомобилей, использующих данный вид топлива, вырос в 2000–2010 гг. в 3,4 раза и составляет 1,2 млн, а численность метановых заправочных станций – в 4,5 раза и превысила 3,2 тыс. Потребление природного газа транспортными средствами в 2010 г. составило 3 млрд м<sup>3</sup>.

По численности газовых автомобилей и потреблению природного газа на транспорте в 2010 г. Россия заняла третье место в Европе после Италии и Украины: 100 тыс. машин и 320 млн. м<sup>3</sup> метана.

Главными тенденциями развития европейского рынка природного газа для транспорта в ближайшей перспективе будут:

- увеличение спроса на КПГ и СПГ, в том числе из России;
- использование метана на водном и железнодорожном транспорте;
- рост производства биометана;
- гармонизация национальных стандартов и правил;
- наращивание заводского изготовления автомобилей, работающих на газомоторном топливе;

■ увеличение парка грузовых автомобилей на СПГ для международных магистральных перевозок;

■ продолжение проекта «Голубой коридор»;

■ развитие системы мер государственного стимулирования для участников газомоторного рынка;

■ укрепление сотрудничества между Рабочей группой по газу с ведущими международными организациями и другими органами ЕЭК ООН по вопросам газомоторного топлива.

На заседании Исполнительного совета были подведены итоги деятельности Газового центра за прошедший год и утверждена программа работы на предстоящий период. Продолжат работу целевые группы по газовым директивам ЕС и поставкам газа, инфраструктуре и рынкам, а также технический комитет по базам данных Газового центра. Форум Газового центра посвятит свое заседание в 2011 г. вопросам долгосрочных контрактов на поставку газа.

Исполнительный совет Газового центра ЕЭК ООН утвердил Сергея Балашова своим Председателем.

*По материалам  
пресс-релизов ОАО «Газпром»  
и ОАО «Газпром промгаз»  
Фото Е.Пронина*

# Поздравляем с юбилеем!

**24** марта 2011 г. исполнилось 65 лет Виктору Лениновичу Стативко!

Это имя неразрывно связано со становлением и развитием советского и российского рынка компримированного природного газа, используемого в качестве моторного топлива. Начав работать по этой теме еще в Оренбурге, затем в ЦК КПСС, Виктор Ленинович продолжил эту работу в Газпроме, а в настоящее время в Национальной газомоторной ассоциации.



В.Л. Стативко родился в г. Орске, там же закончил техникум и начал трудовую деятельность на заводе в НГДУ «Богатовскнефть» в Куйбышевской обл. После службы в армии начал работать на Орском нефтеперерабатывающем заводе, поступил заочно учиться в институт, который окончил с квалификаци-

ей инженера-химика-технолога по переработке нефти и газа. В общей сложности он проработал на заводе 13 лет, пройдя путь от оператора до начальника масляного производства.

В январе 1981 г. молодому руководителю поступает новое предложение – перейти на работу в Оренбургский обком партии в отдел нефтяной и газовой промышленности. И Виктор Ленинович, преодолев естественные в данном случае колебания, начинает осваивать новую сферу деятельности – организаторскую работу. Это был период пика в развитии Оренбургского газового комплекса. Завершалось строительство газоперерабатывающего, началось сооружение гелиевого заводов. Приступили к разработке Карачаганакского газоконденсатного месторождения в Казахстане, которую также производили оренбуржцы. Начали строить первую в области АГНКС.

А в 1985 г. в биографии В.Л. Стативко происходит еще более крутой поворот – его приглашают на работу в Москву в отдел тяжелой промышленности ЦК КПСС. И вот уже в ЦК КПСС ему поручают заниматься только газовой промышленностью, с которой он связан и по сей день. Здесь были уже совершенно другие объемы и масштабы работы, в частности, завершение строительства и пуск в эксплуатацию Астраханского газового комплекса, развитие сети АГНКС на всей территории СССР и др.

В 1992 г. В.Л. Стативко назначают заместителем начальника отдела экономики и финансов ГК «Газпром». В те годы этот отдел вел работу, которую сейчас осуществляют несколько департаментов администрации Газпрома. А Виктор Ленинович в этом отделе занимался акционированием, превращением Государственного газового

концерна в Российское акционерное общество «Газпром», которое в неизменном виде успешно функционирует и поныне. С его помощью в стране появились сотни тысяч акционеров, значит собственников крупнейшей в мире корпорации Газпром.

В 1995 г., в самый драматичный этап в истории отечественного рынка КПГ, он возглавил Управление использования газа в качестве моторного топлива Газпрома. Виктор Ленинович сумел собрать команду профессионалов в Газпроме и организовать продуктивную творческую работу с дочерними обществами и отраслями экономики, что позволило активизировать работы по созданию нового газобаллонного оборудования и газозаправочных станций, разработке новых нормативно-технических документов и региональных программ газификации транспорта, внедрению мер стимулирования в отрасли. Все это помогло переломить тенденцию «умирания» российского рынка КПГ и обеспечить его возрождение. Спрос на КПГ снова стал расти.

В силу своего творческого характера Виктор Ленинович не мог пройти мимо такой темы как создание и внедрение технологического оборудования для малотоннажного производства и распределения сжиженного природного газа. Он не просто стоял у истоков этой темы в Газпроме, а сделал очень много для того, чтобы она стала сегодня привлекательной не только в России, но и в международном масштабе.

Несмотря на огромный жизненный и производственный опыт, Виктор Ленинович постоянно повышал свое образование, он закончил в 1992 г. Академию народного хозяйства при Правительстве РФ, защитил кандидатскую диссертацию в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. За заслуги в области распространения газомоторного топлива В.Л. Стативко награжден премиями ОАО «Газпром» и почетными званиями.

Уважаемый Виктор Ленинович! Сердечно поздравляем Вас с 65-летием! Желаем Вам оптимизма, хорошего настроения, энергии, уверенности в своих силах, новых творческих свершений! Ну и, конечно, желаем Вам, Вашим родным, близким, друзьям крепкого здоровья, счастья и благополучия! И долголетия, долголетия, долголетия!

*Управление по газификации  
и использованию газа ОАО «Газпром»  
Национальная газомоторная ассоциация  
Рабочий комитет 5 «Использование газа»  
Международного газового союза  
Комитет Европейского делового союза  
«Промышленность и строительство»*

*Редакция журнала «Транспорт на альтернативном топливе»*

## МГТУ «МАМИ» смотрит в будущее

**А.В. Николаенко,**  
ректор Московского государственного технического  
университета «МАМИ», к.э.н.

## Moscow state technical university «MAMI» looks ahead

**A.V. Nikolaenko**



**М**ГТУ «МАМИ» – уникальное высшее учебное заведение с богатой историей и многолетними традициями, сохраняющее и приумножающее достижения отечественных образования и науки. Становление и восхождение МАМИ на уровень лучших технических вузов Российской Федерации – часть истории высшей школы в нашей стране.



Жизнь каждого коллектива, любой организации начинается с первого шага, предпринятого инициативными и ответственными людьми, решившими начать новое дело. Для коллектива Московского государственного технического университета «МАМИ» этим шагом и началом сложной, но яркой истории развития вуза была организация в Москве в 1865 г. небольшой ремесленной школы. Со временем ремесленная школа стала Комисаровским техническим училищем – одним из ведущих средних технических учебных заведений царской России, деятельность которого оказала огромное влияние на становление и совершенствование российского профессионального образования.

В 1865 г. во вновь открытую ремесленную школу было принято 23 приходящих и 9 учащихся с проживанием. В 1866 г. школа названа Комисаровской в честь Осипа Ивановича Комисарова, спасшего в апреле 1866 г. жизнь царя Александра II.

В 1870 г. в школе было уже более 200 учащихся. И тогда Министерство торговли

и промышленности преобразовало школу в техническое училище с пятилетним сроком обучения по подготовке мастеров для промышленных предприятий. Учебные программы были пересмотрены и приближены к программам реальных училищ, «чтобы облегчить выпускникам доступ в Императорское техническое училище» (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Училище располагало чугуно- и меднолитейной мастерскими. Механическая мастерская была оборудована разнообразными станками, в том числе токарными, сверлильными, фрезерными, револьверными и др. В училище имелись хорошо оборудованные лаборатории, где проводились испытания как своей продукции, так и продукции других заводов.

В течение многих лет существования училища в нем сложился исключительно квалифицированный коллектив преподавателей. Многим из них было присвоено звание Заслуженного преподавателя. Среди



Памятная медаль с изображением О.И. Комисарова  
в честь спасения Александра II



Чертежный класс Комисаровского училища

них можно отметить И.В. Краснопецева, С.А. Рашкова, М.Я. Кульчитского, М.П.Чижевского.

В училище много лет проработали будущие профессора МАМИ, среди них В.А. Александров, И.В. Грибов, будущий академик АН СССР В.С. Кулебакин, профессор Д.К. Карельских, доцент М.Г. Тихменев и многие другие.

В 1916 г. Комисаровскому, одному из лучших технических училищ России того времени, которое по методам преподавания, составу учебных планов, постановке воспитательной работы соответствовало современному среднему техническому учебному заведению, было присвоено звание Императорского.

После Октябрьской революции в 1919 г. КТУ было преобразовано в 1-й Московский механико-электротехнический техникум имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский техникум) с пятью отделениями: двигателей внутреннего сгорания, автомобильным, паротехническим, обработки металлов, электротехническим сильных токов.

Однако статус техникума не соответствовал большим возмож-

ностям Комисаровского технического училища в подготовке квалифицированных кадров для промышленности, поэтому в 1920 г. Ломоносовский техникум был преобразован в Практический механико-электротехнический институт им. М.В. Ломоносова.

5 января 1922 г. было принято решение о преобразовании

Московского практического механико-электротехнического института имени М.В. Ломоносова в высшее техническое учебное заведение – Московский механико-электротехнический институт им. М.В. Ломоносова.

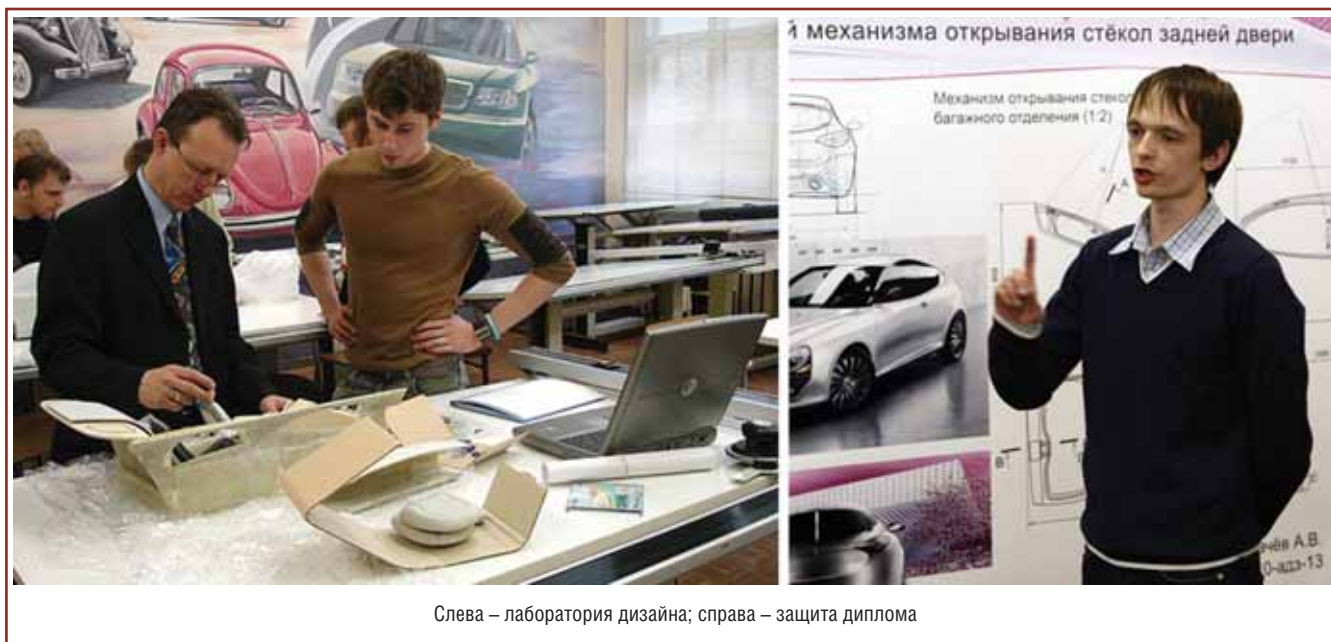
С 1930 г. Ломоносовский институт получил статус специализированного отраслевого автотракторного вуза и стал называться Московским автотракторным институтом имени М.В. Ломоносова. Ректором был избран профессор (позже академик АН СССР) Г.М. Кржижановский.

В 30-е годы прошлого века отечественная автомобильная промышленность добилась значительных успехов. И летом 1932 г. на базе студенческого и профессорско-преподавательского состава Московского автотракторного института им. М.В. Ломоносова создается Московский автомеханический институт (МАМИ) им. М.В. Ломоносова. Основоположники автомобильной и тракторной промышленности страны



Главный корпус МГТУ «МАМИ»





Слева – лаборатория дизайна; справа – защита диплома

и специалисты высшей школы, предвидя быстрое развитие новой отрасли народного хозяйства, практически сразу же после реорганизации МАМИ им. М.В. Ломоносова в автотракторный факультет МММИ ставили вопрос о воссоздании этого специализированного вуза. Самыми активными инициаторами воссоздания Московского автомеханического института являлись нарком среднего машиностроения И.А. Лихачев, будущие организаторы и заведующие кафедрами академик Е.А. Чудаков, профессора И.В. Грибов, Д.К. Карельских, В.И. Сороко-Новицкий, С.С. Четвериков и др.

11 июля 1939 г. Всесоюзный комитет по делам высшей школы при СНК СССР издал приказ «Об организации Московского автомеханического института». Этим же приказом определялся контингент приема на дневное и вечернее отделения в количестве 400 человек.

С началом Великой Отечественной войны институт, как и другие вузы страны, начал перестройку учебно-воспитательного процесса и научно-исследовательской

работы в соответствии с требованиями военного времени. Преподаватели, студенты и сотрудники института установили шефство над воинской частью, было организовано обучение красноармейцев вождению автомобилей и изучение материальной части. Многие студенты и преподаватели института ушли в ряды действующей Красной Армии, чтобы с оружием в руках защищать честь, свободу и независимость нашей Родины.

После войны повысилась роль и ответственность факультетов за качество подготовки специалистов для народного хозяйства. При факультетах были созданы ученые советы, которые систематически обсуждали и решали важнейшие вопросы учебной работы и деятельности кафедр факультета. К концу 1948 учебного года в МАМИ было уже 25 кафедр.

В 50-х годах в связи с ростом международного авторитета СССР и расширением научных и культурных связей из-за рубежа стали прибывать молодые люди для обучения в вузах нашей страны. Первый в МАМИ выпуск специалистов для зарубежных стран

состоялся в 1955 г. Кроме того, за рубежом патентовались изобретения ученых МАМИ, устанавливались прямые связи между учеными.

80-е годы прошлого века характеризуются развитием нового типа взаимодействия вуза и производства – созданием филиалов кафедр на предприятиях отрасли, в частности, на АЗЛК, в НАМИ, НИИТавтопроме, НИИавтоприборов, НПО «Электроника» и др. К 1980 г. удалось построить общежитие и спортивный зал.

Московский автомеханический институт в 1992 г. стал академией, а в 1997 г. получил статус технического университета.

В настоящее время в университете обучаются более 16 тыс. студентов, реализуются 47 образовательных программ высшего профессионального образования по различным формам обучения, работает почти 1 тыс. преподавателей. В университете 40 кафедр, 6 факультетов, 4 филиала, 4 представительства, научно-исследовательский институт, учебный и научно-образовательные центры, имеется 3 благоустроенных общежития.

Для проведения занятий вуз располагает современной технической базой: 5 корпусов, в которых размещены аудитории, учебные и научные лаборатории, компьютерные классы, спортивные залы, научно-техническая библиотека с фондом около 1 млн экземпляров, столовые и буфеты.

МГТУ «МАМИ» выпускает специалистов для работы в автомобильной промышленности и для отраслей, смежных с автомобилестроением: конструкторов, специалистов в области технологии машиностроения, автоматизации, стандартизации, метрологии, управления качеством, экологов, экономистов, маркетологов и многих других. Следует добавить, что МАМИ – единственный вуз, который готовит автомобильных дизайнеров.

Для студентов университета основная цель – быть востребованным в своей стране. Наши выпускники в совершенстве владеют полученными специальностями и имеют колоссальный интеллектуальный потенциал,

работают в различных областях промышленности и производства, имеют прекрасные перспективы для карьеры в России и за рубежом. Совместные с университетами Европы и Азии учебные проекты и научные исследования позволяют успешно интегрироваться в международную образовательную среду.

В университете создан Координационный совет работодателей для содействия в трудоустройстве студентов. Более 80 % выпускников МАМИ находят себе работу в автомобильной сфере.

Научная деятельность МГТУ «МАМИ» ориентирована на автотракторную и смежные с ней области промышленности. За последние десятилетия более 600 научно-технических разработок университета внедрены в промышленность. Ряд разработок отмечен государственными и правительственными премиями, наградами международных выставок.

В университете созданы и функционируют расчетно-конструк-

торское бюро (РКБ-МАМИ) при кафедре «Автоматизированные станочные системы и инструменты», молодежное конструкторское бюро (МКБ-МАМИ) при кафедре «Кузовостроение и обработка давлением», а также студенческое конструкторское бюро (СКБ-МАМИ).

В НТЦ «Спецтехника» МГТУ «МАМИ» и в совместной с ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» научно-исследовательской лаборатории двигателей ведутся разработки гибридных силовых установок на автомобильной технике. В МГТУ «МАМИ» регулярно проходят научно-технические конференции всероссийского и международного уровней, налажена работа Студенческого научно-технического общества.

К своему 145-летию Московский государственный технический университет «МАМИ» добился значительных результатов в ключевых направлениях своей работы: совершенствуется учебная и научная деятельность, развивается материально-техническая база, обновляется научно-техническая библиотека, функционирует санаторий-профилакторий, общежитие университета было признано лучшим в Москве.

Тем самым университет заслужил высокий профессиональный авторитет и признание в России. И юбилейная дата – самое время для того, чтобы осмыслить пройденное и осознать перспективы будущего. Главная задача – не останавливаться, ведь для современного поколения качество отечественного высшего образования должно быть на совершенно новом уровне, необходимо достигать новых высот, успехов и побед.

**Ждем Вас в стенах нашего университета!**



Автомобиль, дизайн которого разработан в МГТУ «МАМИ»

## Применение электрического привода наземного транспортного средства

**В.И. Ерохов,**

профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.,

**А.В. Николаенко,**

ректор МГТУ «МАМИ», профессор, к.э.н.



**Ключевые слова:** электрический привод, топливный элемент, электрохимический генератор, электромобиль, концепция, анод, катод, экономическая и экологическая эффективность.

## Application of the electric drive of the ground vehicle

**V.I. Erokhov, A.V. Nikolaenko**

**Keywords:** an electric drive, a fuel element, the electrochemical generator, an electromobile, the concept, the anode, the cathode, economic and ecological efficiency.



**В.И. Ерохов,** профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.:

Изложена методология проектирования и расчета электрического привода наземного транспортного средства. Разработана классификация существующих и перспективных электромобилей. Объяснен механизм работы электрического химического генератора и основного его компонента – топливного элемента. Разработана принципиальная и конструктивная схема электрохимического генератора и электромобиля в целом. Предложен метод расчета основных элементов электрохимического генератора энергии. Приведены результаты оценки эффективности электромобиля нового поколения.

The methodology of designing and calculation of an electric drive of a ground vehicle is stated. Classification of existing and perspective electromobiles is developed. The mechanism of work of the electric chemical generator and its basic component of a fuel element is explained. The basic and constructive scheme of the electrochemical generator and an electromobile as a whole is developed. The method of calculation of basic elements of the electrochemical generator of energy is offered. Results of an estimation of efficiency of an electromobile of new generation are resulted.

**Ж**есткий регламент мировых стандартов по ограничению содержания двуокси углерода ( $\text{CO}_2$ ) в отработавших газах (ОГ) стимулирует создание новых источников энергии. Снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в ОГ является главной проблемой современной автомобилизации.

Перспектива развития современных наземных транспортных средств (НТС) связана с использованием электрической энергии в качестве энергоносителя, применяемой на протяжении всей истории автомобилестроения. Электрический привод на автомобильном транспорте всегда относили к числу наиболее перспективных силовых установок. В начале XX в. количество электромобилей превышало в два раза парк автомобилей с традиционными двигателями. Во многих странах мира создан

значительный парк электромобилей, насчитывающий свыше 140 типов.

В нашей стране и за рубежом в последние годы ведется поиск оптимальных решений создания принципиально новых, экологически чистых транспортных силовых установок. В современных условиях автомобилизации и жестких экологических требований электромобили просто незаменимы для определенной категории транспортных работ и перевозки пассажиров. Применение электрического привода наиболее эффективно решает проблему повышения экологической безопасности НТС.

Основным препятствием на пути широкого внедрения электропривода является несовершенство источника электрической энергии и нерешенность многих аспектов системы электронного управления НТС.

В мировой практике автомобилестроения существуют различные точки зрения на упомянутые основополагающие и взаимосвязанные проблемы. Сущность технических решений электрического привода по известным причинам имеет закрытый характер. Публикации и патенты носят преимущественно рекламный характер.

В МГТУ «МАМИ» выполнен комплекс работ по обоснованию применения электрического привода электромобиля и формированию предпосылок для решения проблемы.

Задачами исследования является разработка классификации существующих и перспективных современных электромобилей, общей концепции, современной методологии проектирования и расчета электромобиля нового поколения, алгоритма управления электроприводом

автомобиля, принципиальной и конструктивной схемы электрохимического генератора и электромобиля в целом, блок-схемы электропривода электромобиля нового поколения, его экономической и экологической эффективности.

В основу классификации современных электромобилей положены конструктивные особенности и тип электрического привода. Разработанная классификация позволяет идентифицировать НТС в зависимости от типа электрического привода.

**Электромобили** представляют собой транспортные средства, базирующиеся на традиционной схеме путем применения аккумуляторных батарей (АБ). Традиционный электромобиль обладает повышенной массой, снижающей его грузоподъемность в 1,5 раза по сравнению с базовой модификацией и эффективность электропривода. Перспективным является использование электродвигателя с автономным источником электрического тока.

**Гибридные автомобили**, предусматривающие сочетание традиционного и электрического источников энергии, представляют собой промежуточный тип современного электромобиля, не требующего зарядки АБ от внешних источников.

Тяговый электродвигатель обеспечивает НТС дополнительную мощность, не расходуя традиционное топливо и не загрязняя окружающую среду. Традиционный ДВС позволяет развивать высокую скорость движения на уровне современных автомобилей.

**Топливные элементы, используемые на электромобилях**, относятся к новым электрохимическим источникам энергии, получившим название топливных химических элементов (ТХЭ).

**Солнечный электромобиль** находится на стадии концептуального поискового технического решения.

**Гибридные системы** могут иметь последовательную, параллельную и комбинированную конструктивные схемы гибридных силовых установок.

■ *Гибридная установка последовательного типа* обеспечивает одно-временный привод ведущих колес от ДВС и тягового электродвигателя.

Традиционный ДВС в составе гибридной установки используют для зарядки АБ, питающей электродвигатель. Схема гибридной установки повторяет силовую установку электромобиля, дополненную генератором с приводом от ДВС, работающим в зоне максимальной топливной экономичности. Электрический ток, вырабатываемый генератором, обеспечивает зарядку АБ и питание обмотки тягового электродвигателя. Последовательная схема электромобиля работает одновременно с генератором. Тяговую характеристику обеспечивает электродвигатель, питаемый от АБ или генератора.

■ *Гибридные установки параллельного типа* используют тяговый электродвигатель в качестве дополнительного для увеличения суммарной мощности энергетической установки и генератора для зарядки высоковольтной АБ. В параллельной схеме выходные валы мотор-генератора и ДВС жестко связаны между собой. Движение автомобиля возможно с приводом только от тягового электродвигателя.

■ *Гибридная схема смешанного типа (сплит-система)* обладает функциями гибридной установки последовательного и параллельного типов, содержит ДВС, совмещенный с электродвигателем, и комплексную систему управления. Гибридная схема управляет расходом топлива в зависимости от скорости движения НТС. При этом на низких скоростях работает электродвигатель, а в обычном режиме – традиционный ДВС. Электронная система контролирует взаимодействие двух источников энергии, механическая суммирует потоки мощности от двух двигателей, обеспечивая возможность независимой их работы.

**Концепция современного электромобиля нового поколения** в методическом плане ориентирована

на соблюдении содержания  $\text{CO}_2$  в ОГ. Планируемая с 2012 г. норма выброса парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ) составит 135 г/км, а в недалеком будущем снизится до 90 г/км, что требует принципиально новых технических решений. Выброс  $\text{CO}_2$  пропорционален расходу топлива и содержанию в нем углерода.

При полном сгорании 1 кг углерода выделяется 3,67 кг диоксида углерода. Важным условием выполнения жестких норм является применение энергоносителей с низким содержанием углерода в базовом топливе. Применение спиртов, содержащих в 2 раза меньше углерода, и метанола заметно снижает выброс  $\text{CO}_2$ . Высокое содержание водорода в газовом топливе обеспечивает более полное сгорание горючей смеси. При сгорании 1 кг метана выделяется 2,8 кг  $\text{CO}_2$ , а бензина или дизельного топлива – 3,1 кг  $\text{CO}_2$ . Удельные выбросы  $\text{CO}_2$  при использовании природного газа (ПГ) на 30 % меньше в сравнении с базовым топливом.

Недостатком традиционных методов преобразования скрытой химической энергии является невысокий КПД. Большие потери энергии происходят на стадии превращения теплоты в механическую работу. КПД транспортных установок в городских условиях составляет 10...15 %.

Концепция электрического привода представляет собой совокупность теоретических, методологических и технических решений традиционного и электрического приводов современного электромобиля. В основу разработанной концепции положены новые представления об особенностях адаптированного электрохимического генератора, обеспечивающего прямое преобразование химической энергии топлива и окислителя в электрическую. Разрабатываемая теория получения и хранения водорода и окислителя на борту электромобиля частично может быть ориентирована на конверсию метанола.

Для повышения технического уровня традиционного ДВС в составе гибридной установки МГТУ «МАМИ»

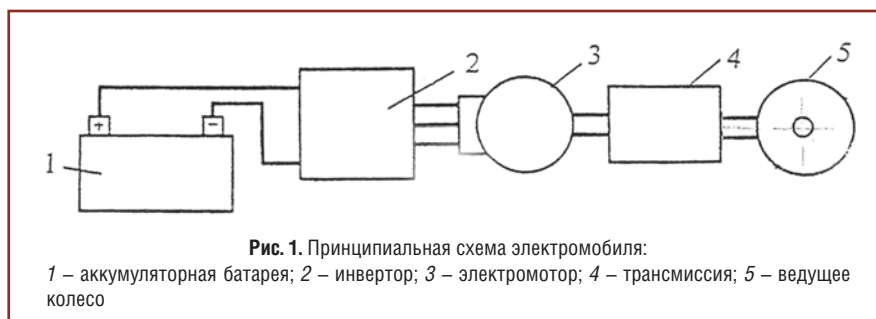
разработал электронную систему впрыска топлива, лазерную систему зажигания, газораспределительный механизм с изменяемыми фазами, систему управления на основе нейротехнологии, методологию применения альтернативных видов топлива и программного обеспечения современного ДВС. Основные технические решения защищены патентами РФ. Мощность бензинового двигателя составляет 40 % мощности комбинированной установки. Двигатель комбинированной силовой установки развивает высокий крутящий момент в широком диапазоне частот вращения.

В результате выполненного комплекса работ сформулирована концепция совершенствования бензинового ДВС существующих и перспективных конструкций.

Традиционные ДВС оснащены ГРМ с нерегулируемыми фазами, которые ухудшают экологические параметры ДВС. Автомобильные ДВС в условиях интенсивного движения и в составе гибридной установки должны иметь несколько уменьшенную продолжительность впуска за счет смещения угла в сторону запаздывания его открытия и закрытия. ДВС при работе на установившихся режимах для эксплуатации на равнинной местности должны иметь более развитые фазы. Применение ГРМ с переменными фазами обеспечивает снижение расхода топлива на 25 %, улучшение топливной экономичности на 10 % на режимах малых и средних нагрузок, снижение уровня токсичности ОГ, а также шума автомобиля.

Выявленные особенности и закономерности смесеобразования и сгорания позволили разработать оптимальные алгоритмы ЭВМ. Структура типичной нейронной сети управления шаговым двигателем содержит входной, скрытые и выходной уровни.

Система рециркуляции ОГ обеспечивает снижение выброса  $NO_x$  на 60...70 % и максимальной температуры цикла из-за уменьшения свежего



заряда и увеличения его теплоемкости. Рециркуляция ОГ включается после прогрева охлаждающей жидкости до температуры 35...40 °С и осуществляется во всем диапазоне частичных нагрузок. Содержащаяся в составе ОГ двуокись азота ( $N_2O$ ) способствует ускорению протекания предпламенных химических реакций, в результате которых сокращается период задержки воспламенения.

Рециркуляция ОГ обеспечивает возврат 10...20 % продуктов сгорания на впуск в цилиндры. Попав в цилиндры, ОГ в начале сгорания действуют как активные центры, но одновременно увеличивают количество балластных компонентов, замедляя реакцию окисления, и снижают температуру ОГ. Бензиновый ДВС с упомянутыми техническими решениями в составе гибридной установки обеспечивает соблюдение жестких экологических и топливно-экономических показателей современных автомобилей.

Замена нефтяных топлив на экологически чистые является одним из радикальных средств решения экологических проблем транспортной энергетики. Наиболее эффективно применение двухтопливной системы для снижения содержания парникового газа  $CO_2$ . Подобные технические решения целесообразно применить в разработанной схеме гибридного автомобиля (рис. 1).

Электродвигатель, способный к кратковременным перегрузкам с хорошей тяговой характеристикой, не нуждается в сложной трансмиссии. Несмотря на простоту технического решения за этой схемой будущее [1]. Важной задачей является повышение энергоемкости батарей, которая предопределяет запас хода электромобиля. Для электромобиля, эквивалентного базовому автомобилю, достаточно иметь мощность двигателя 15 кВт. При этом масса батареи должна составлять 300 кг. Батарея позволяет

### Характеристики аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Удельная стоимость батареи, руб.		Число циклов заряда
		кг	кВт·ч	
Свинцово-кислотная	33	60	3000	1000
Никель-кадмиевая	33	300	10500	3000
Никель-железная	22	120	5250	1000
Цинк-хлорная	110	60	450	150
Цинк-воздушная	66	60	10800	250
Натрий-серная	150	60	300	100
Литий-серная	110	180	900	230
Литий-ионная	120	180	(900)	1000
Серебряно-цинковая	88	120	10500	200
Никель-цинковая	55	240	4500	2000

пройти до перезарядки 60...80 км со скоростью 40...80 км/ч. В мире разработано и эксплуатируется не менее 25 типов различных аккумуляторных батарей. Удельная энергоёмкость и срок некоторых АБ приведены в таблице.

Размеры и массу АБ определяют из условий обеспечения необходимого запаса хода и максимальной скорости движения электромобиля.

$$G_{AB} = w_{уд} G_3 L \gamma_{AB},$$

где  $G_{AB}$  – масса АБ, кг;  $w_{уд}$  – удельный расход энергии на 1 т·км полной массы при заданной скорости движения, кВт·ч/т·км;  $G_3$  – полная масса электромобиля, т;  $L$  – заданный запас хода, км;  $\gamma_{AB}$  – удельная масса аккумуляторной батареи, кг/кВт·ч.

Энергоёмкость свинцово-кислотных, никель-кадмиевых и железо-никелевых батарей составляет 35...50 Вт·ч/кг. Наибольшую энергоёмкость имеют натрий-серные батареи, но срок службы их самый короткий. Через 100 циклов заряда-разряда они выходят из строя. В перспективе их энергоёмкость может возрасти до 300 Вт·ч/кг, срок службы до 2 тыс. циклов. Основным преимуществом никель-кадмиевых аккумуляторов является быстрая зарядка (несколько минут). Зарядка свинцово-кислотной продолжается 4...8 ч. Цинк-воздушная, цинк-хлорная батареи недолговечны, а серебряно-цинковая наиболее дорогая.

Одно из основных преимуществ никель-цинковых аккумуляторных батарей состоит в том, что при равной массе они в 2...2,5 раза мощнее известных свинцово-кислотных. Если удельная энергоёмкость последних обычно 26 Вт·ч/кг, то у батарей новой конструкции 60 Вт·ч/кг. Поставлена задача в перспективе обеспечить энергоёмкость 70 Вт·ч/кг. Применение литий-ионных аккумуляторных батарей обеспечивает снижение их массы до 350 кг.

Для преобразования постоянного тока от АБ в переменный используют инвертор. Первый запуск автомобиля при умеренной температуре окружающего воздуха и достаточной

зарядке АБ осуществляется от своего электромотора. Электронные инверторы практически без потерь позволяют преобразовывать постоянное напряжение аккумуляторной батареи в требуемое напряжение электродвигателя.

Электронные приборы регулируют силу тока, изменяя крутящий момент, блок управления – момент вращения коленчатого вала (КВ) и скорость автомобиля на всех режимах движения. На электромобилях с двигателем переменного тока электронный инвертор преобразует постоянное напряжение аккумуляторной батареи в трехфазное переменное с изменяемой частотой.

В качестве тягового применяют электродвигатель переменного тока – асинхронный или синхронный с постоянными магнитами. Асинхронные электродвигатели обладают значительно более высокой надёжностью и примерно вдвое дешевле. Синхронные имеют в 1,5 раза более высокий максимальный крутящий момент  $M$ , который определяют по формуле

$$M = kIB,$$

где  $k$  – постоянная электродвигателя;  $I$  – сила тока;  $B$  – напряженность магнитного поля.

Напряжение  $U$  в обмотке двигателя пропорционально частоте вращения ротора  $n$  и напряженности магнитного поля

$$U = knB.$$

Частота вращения ротора пропорциональна напряжению цепи и определяет скорость движения электромобиля. Изменяя напряжение в обмотках двигателя, регулируют скорость электромобиля.

Новый этап развития электромобилей связан с созданием гибридных автомобилей, а затем электромобилей, работающих на топливных химических элементах. Соединение недостатков традиционного ДВС и электромобиля может стать существенным сдерживающим фактором широкого применения электромобилей нового поколения. В ближайшей перспективе энергетические

источники на автомобильном транспорте связаны с развитием электрохимических источников энергии. В мировой практике электромобили на топливных элементах (ТЭ) относят к новым научным разработкам.

Перспективным направлением является использование электродвигателя с автономным источником электрического тока. Разработанная комбинированная энергетическая установка обеспечивает получение электрической энергии непосредственно из ТЭ (водород и кислород), минуя стадия сгорания.

В МГТУ «МАМИ» по аналогии с известной системой Toyota Prius разработана прогрессивная система «Сплит», содержащая компоненты последовательной и параллельной схем и дополненная дифференциалом. Электронная система управления контролирует взаимодействие двух типов двигателей. При невысоких скоростях движения работает электродвигатель, а в загородном режиме – совместно ДВС и электропривод. Разработанная специалистами МГТУ «МАМИ» механическая система гибридного автомобиля [2] суммирует потоки мощности от двух двигателей, обеспечивая возможность их независимой работы. Смешанная система экспериментального образца полноприводного автомобиля с гибридно-силовой установкой (ГСУ) многоцелевого автомобиля обеспечивает минимальный расход топлива в городском цикле на уровне 8,2 л/100 км (базовый автомобиль 17,4 л/100 км). Даже существенное снижение расхода топлива (практически в два раза) в городском цикле не позволяет экспериментальному образцу приблизиться к нормам токсичности ОГ. Применение упомянутых оригинальных технических решений не решает проблемы повышения экологической безопасности бензинового двигателя. Для автомобилей массой свыше 3 т применение гибридных автомобилей неэффективно, так как расход топлива в городском цикле не должен превышать 3,4 л/100 км.

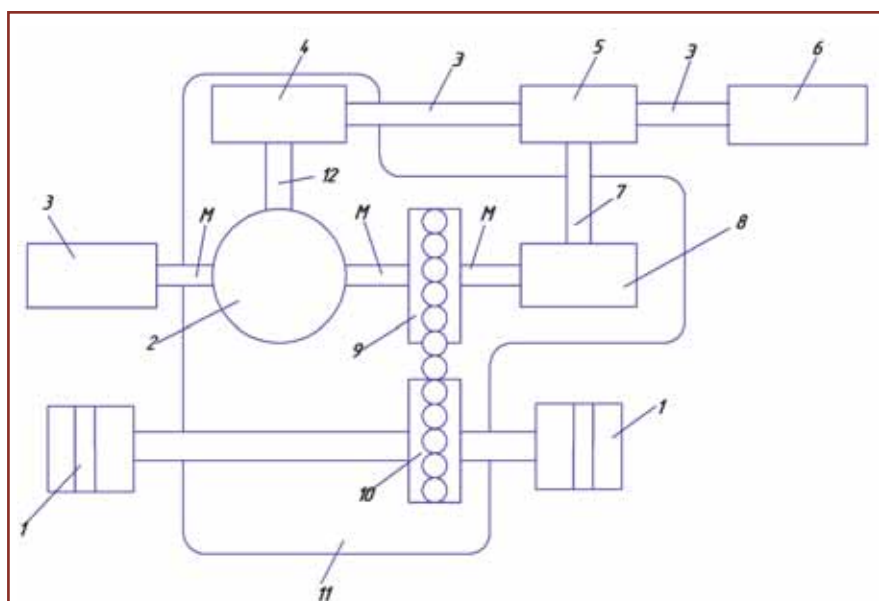


Рис. 2. Принципиальная схема гибридной установки с параллельным потоком энергии:

1 – ведущие колеса; 2 – раздаточная коробка (планетарная передача); 3 – ДВС; 4 – генератор ( $MG_1$ ); 5 – инвертор; 6 – силовой аккумулятор; 7 – электрическая связь; 8 – электродвигатель ( $MG_2$ ); 9 – планетарный редуктор; 10 – главная передача; 11 – трансмиссия; 12 – механическая связь; Э – электрическая связь; М – механическая связь

Гибридная установка НТС (рис. 2) имеет генератор 4 ( $MG_1$ ) и электродвигатель 8 ( $MG_2$ ), который через  $MG_1$  может работать в генераторном режиме, используя для этого ДВС. Ток, вырабатываемый  $MG_1$ , обеспечивает зарядку аккумуляторной батареи или электрическое питание  $MG_2$ . Гибридная силовая установка содержит современный ДВС 3, технологически совмещенный с электродвигателем 8. ДВС развивает высокий крутящий момент в широком диапазоне частоты вращения КВ. При торможении и движении автомобиля накатом электродвигатель работает в режиме генератора, возвращая энергию в АБ.

Топливный химический элемент представляет собой электрохимический генератор (ЭХГ) для прямого преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую на борту автомобиля. ТХЭ содержит гальванический элемент в виде анода и катода, разделенных электролитом (проводник ионов), обеспечивающий окислительно-восстановительную реакцию путем непрерывной подачи водорода и кислорода. Электрическая энергия

генерируется путем подачи топлива на анод, а на катод поступает окислитель.

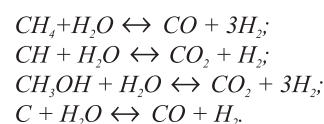
Особенность работы ЭХГ заключается в разделении на катализаторе анода атома водорода на протоны и электроны. В дальнейшем протоны проходят через мембрану к катоду, а электроны поступают во внешнюю цепь, так как мембрана пропускает только протоны. На катализаторе молекула кислорода соединяется с электроном и протоном с образованием воды.

Реакция окисления внутри ТЭ аналогична процессу горения. ТЭ не изнашиваются, не выделяют вредных веществ и работают бесшумно. ТХЭ производит электрическую энергию до полного расходования топлива (водород) и окислителя (кислород) и не требует при эксплуатации подзарядки источника энергии.

Окисление водорода происходит с образованием электрического тока путем формирования потока электронов. Электролитом служат щелочные, твердополимерные мембраны, расплав карбонатов или других солей, заключенных в пористую

керамическую матрицу. Комплекс химических реакций позволяет получить непосредственно электрический ток при окислении натрия, магния. Топливо расщепляется внутри элемента с образованием водорода и CO, поддерживающих протекание токообразующей реакции в элементе.

Топливный элемент работает при поступлении исходного топлива на анод водородосодержащего топлива (метан, ГСН, синтетический газ, метанол, дизельное топливо). В блоке происходят следующие реакции:



Со стороны катода поступает кислород (из воздуха). С электродов снимается разность потенциалов. Излишки водорода вступают в реакцию. Реальный КПД ТЭ – 65 %. Использование ЭХГ позволяет поднять КПД до 90...95 % по электроэнергии. В ТХЭ электрическая энергия генерируется до тех пор, пока на анод поступает топливо, а на катод – окислитель.

Электрохимический генератор содержит ТЭ, системы кондиционирования, подготовки топлива и окислителя, утилизации отходов. В ЭХГ с кислым электролитом водород подается через полый анод и поступает в электролит через очень мелкие поры в материале электрода. При этом происходит разложение молекул водорода на атомы, которые в результате хемосорбции, отдавая каждый по одному электрону, превращаются в положительно заряженные ионы:



Ионы водорода диффундируют через электролит к положительной стороне элемента. Подаваемый на катод  $O_2$  переходит в электролит и реагирует на поверхности электрода с участием катализатора. В процессе реакции водорода и кислорода образуется вода и электрический ток. В ТЭ со щелочным электролитом (концентрированные гидроксиды натрия

или калия) протекают аналогичные химические реакции.

Большинство реакций в топливных элементах обеспечивают электродвижущую силу (ЭДС) около 1 В. Для создания большой мощности топливный элемент собирают из множества ячеек. Включение элемента в нагрузку обеспечивает поступление электронов к катоду, создавая ток и завершая процесс окисления водорода кислородом. Размыкание цепи или прекращение движения ионов останавливает работу топливного элемента.

К наиболее распространенным относятся ТЭ с щелочным электролитом – раствором КОН. В качестве материала электродов применяют никель, устойчивый в щелочных растворах. Рабочая температура ТЭ составляет 80...95 °С, электролитом является 30%-ный раствор гидроксида калия. Щелочные ТЭ работают на чистом водороде. Для ускорения реакции в пористые электроды вводят платину. Пластина ТЭ площадью 1 м<sup>2</sup>, содержащая 40 г платины, способна вырабатывать 5 кВт электроэнергии. В топливном элементе со щелочным электролитом используют только чистый водород и кислород [3-5]. Наличие CO<sub>2</sub> в воздухе и техническом водороде сопровождается карбонизацией щелочи по уравнению

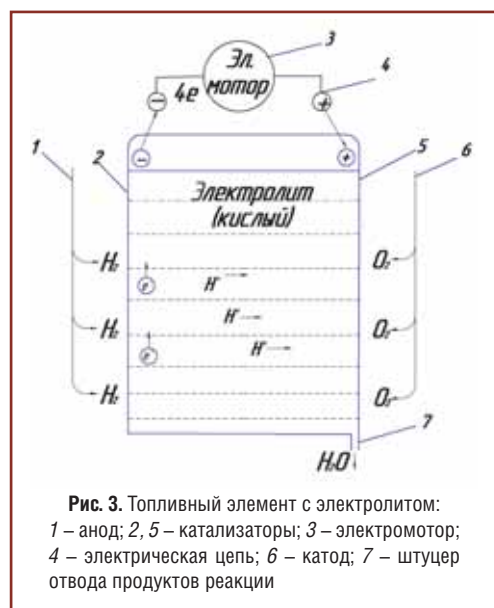
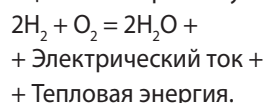
$$2\text{KOH} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}.$$


Рис. 3. Топливный элемент с электролитом: 1 – анод; 2, 5 – катализаторы; 3 – электролит; 4 – электрическая цепь; 6 – катод; 7 – штуцер отвода продуктов реакции

Впервые сущность ТЭ (рис. 3) описал английский исследователь Гроув. Катализатор 2 представляет собой наночастицы платины, нанесенные на углеродное волокно. Мембрана изготавливается из полимера нафтона толщиной 0,1 мм. Катализатор 2 обеспечивает эффективность химических реакций. Анод и катод связаны электрической цепью 4. Для отвода продуктов реакции предусмотрен штуцер 7. На аноде происходит переход положительных ионов водорода в электролит. Оставшиеся электроны образуют отрицательный потенциал и перемещаются к катоду во внешнюю цепь.

В результате реакции во внешней цепи протекает постоянный электрический ток, то есть происходит прямое преобразование химической энергии реакции в электрическую:



ЭДС можно рассчитать по уравнению химической термодинамики

$$E_3 = \frac{\Delta G_{\text{xp}}}{nF},$$

где  $\Delta G_{\text{xp}}$  – изменение энергии Гиббса в результате протекания химической реакции;  $n$  – число электронов на молекулу реагента;  $F$  – постоянная Фарадея (96484 Кл/моль).

Расчет ЭДС для реакции водорода и воды в жидком состоянии при давлении O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>, равного 100 кПа, дает значения  $E_3 = 1,23$  В.

Теоретический КПД преобразования энергии можно представить по уравнению

$$\eta_T = \frac{\Delta G_{\text{xp}}}{\Delta H_{\text{xp}}},$$

где  $\Delta H_{\text{xp}}$  – изменение энтальпии в результате протекания химической реакции (тепловой эффект реакции).

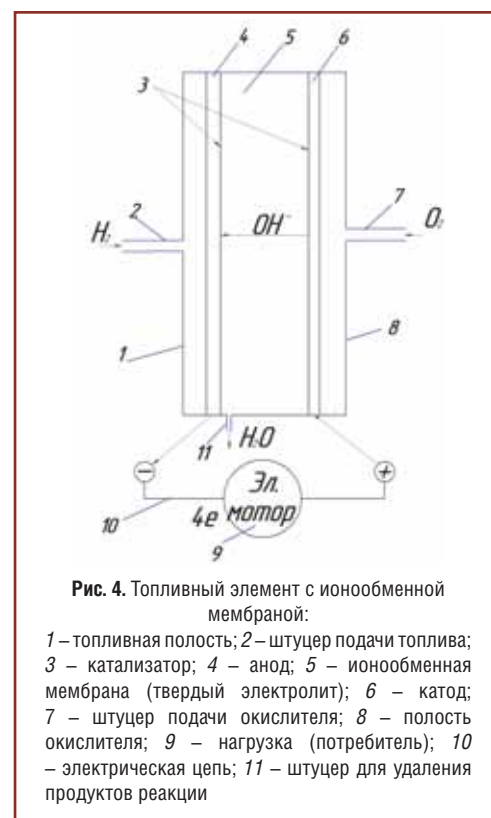


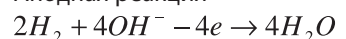
Рис. 4. Топливный элемент с ионообменной мембраной:

1 – топливная полость; 2 – штуцер подачи топлива; 3 – катализатор; 4 – анод; 5 – ионообменная мембрана (твердый электролит); 6 – катод; 7 – штуцер подачи окислителя; 8 – полость окислителя; 9 – нагрузка (потребитель); 10 – электрическая цепь; 11 – штуцер для удаления продуктов реакции

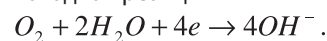
Объединяя большое число элементов, получают мощную установку, в которой постоянный ток преобразовывают в переменный. Наибольшее распространение получил ТЭ с мембранами протонного обмена (с полимерным электролитом). Рабочая температура составляет 80...95 °С. В качестве электролита используется твердая ионообменная мембрана (рис. 4).

ТХЭ состоит из анода 4 и катода 6, разделенных ионообменной мембраной 5, пропускающей только протоны, штуцера 2 подвода топлива на анод 4 и штуцера 7 подачи окислителя, а также штуцера 11 удаления продуктов реакции. Для ускорения химической реакции применяют катализаторы. Поступающий в ТЭ водород разлагается под действием катализатора на электроны и положительно заряженные ионы водорода H<sup>+</sup>. Внешней электрической цепью топливный элемент соединен с нагрузкой 9.

Анодная реакция



Катодная реакция





В последние годы проявляется интерес к ТЭ с твердым полимерным электролитом (ионообменной мембраной). В качестве материалов электролитов используют графит, а катализатора – платину и ее сплавы.

Разновидностью топливного элемента с протонообменной мембраной является прямой метаноловый топливный элемент. В топливном элементе топливо не разлагается с выделением водорода, а используется в нем напрямую. Работа ТЭ основана на реакции окисления метанола на катализаторе до  $\text{CO}_2$ . Прямое электроокисление метанола на аноде имеет вид  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ .

Реакция на катоде имеет вид  $5\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$ .

Общая реакция метанола для топливного элемента имеет вид  $\text{CH}_3\text{OH} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Для ускорения реакции углеводородного топлива приходится повышать рабочую температуру топливного элемента. Наиболее надежной и доступной для производства электромобилей является свинцово-кислотная батарея с ее малой энергоемкостью. Стоимость современного ТЭ существенно выше, чем стоимость свинцово-кислотных батарей. ТЭ работает при температуре 55...75 °С.

Для начала движения и при движении на малых скоростях используют только электромотор. При наборе скорости АБ направляет свою энергию на блок управления электропитанием. ЭБУ направляет энергию на электродвигатели, расположенные в задней и передней частях автомобиля и позволяющие автомобилю плавно трогаться с места. Рабочее напряжение батареи 270 В.

Топливный элемент характеризуется напряжением, мощностью и сроком службы. Напряжение  $U$  топливного элемента меньше ЭДС из-за омического сопротивления  $R$  электролита и электродов, поляризации катода  $\Delta E_{\text{к}}$  и анода  $\Delta E_{\text{а}}$   
$$U = E_0 - IR - (\Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{а}}),$$
где  $I$  – сила тока, А;  $R$  – сопротивление, Ом.

Поляризация электродов обусловлена замедлением процессов, протекающих на электродах, и равна разности потенциалов электрода под током  $E_I$  и при отсутствии тока  $E_{I=0}$ .

$$\Delta E = E_I - E_{I=0}.$$

Поляризация электродов возрастает с увеличением плотности тока  $i$ , то есть тока, отнесенного к единице площади поверхности электрода  $S$ :  $i = I/S$ .

При одном и том же токе можно снизить его плотность и поляризацию, применяя пористые электроды с высокоразвитой поверхностью (до 100 м<sup>2</sup>/г). В пористом электроде происходит контакт газа (реагента), электролита (ионного проводника) и электронного проводника. Процессы в пористых электродах достаточно сложны.

Для ускорения реакций в пористые электроды вводят катализаторы, обладающие высокими активностью и длительностью срока службы, а также приемлемой стоимостью. Наиболее широкое использование получила платина, палладий, никель и некоторые полупроводниковые материалы. Пористые электроды представляют собой сложную структуру, в которой протекают электрохимические реакции. Анализ макрокинетики электродных процессов позволяет оптимизировать структуру и толщину электродов.

Напряжение ТЭ снижается с увеличением тока [4] и для большинства лежит в пределах 0,8...0,9 В. Реальный КПД топливного элемента  $\eta_p$  ниже теоретического и определяется по уравнению

$$\eta_p = \frac{n_p F U}{\Delta H_{\text{хд}}}$$

где  $n_p$  – реальное количество электронов на молекулу реагента.

Реальный КПД ниже теоретического  $\eta_p < \eta_t$  в связи с неполным использованием реагентов и их расходом на собственные нужды установок с ТЭ. Все факторы, увеличивающие напряжение, повышают КПД. От напряжения также зависит и мощность  $P = UI$ .

В процессе работы характеристики ТЭ постепенно ухудшаются, что обусловлено дезактивацией и износом катализаторов, коррозией основ электродов, изменением структуры электродов и другими причинами. Ухудшение характеристик ТЭ ограничивает срок их службы. Для увеличения наработки ТЭ применяют химически стойкие катализаторы (платиновые металлы и оксиды металлов) и основные электроды (графит и никель).

Двигатель комбинированной силовой установки развивает высокий крутящий момент в широком диапазоне частот вращения. Полная его мощность необходима только при трогании с места и преодолении подъемов [6]. Остальное время двигатель работает с неполной нагрузкой. Потери, возникающие при преобразовании электрической энергии в механическую, достигают минимальных значений. При торможении и движении накатом электродвигатель работает в режиме генератора, возвращая энергию в АБ. Мощность бензинового двигателя составляет 40 % мощности комбинированной установки.

Развитие технологии ТЭ позволяет повысить технический уровень современного электромобиля.

## Литература

1. **Ставров О.А.** Электромобили. М.: «Транспорт». 1968. – 100 с.
2. **Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Карпунин К.Е., Авруцкий Е.В.** Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 7. – С. 3.
3. **Коровин Н.В.** Электрохимическая энергетика. М.: Энергоатомиздат. 1991. – 264 с.
4. Макрокинетика процессов в пористых средах. М.: Наука. 1971. – 164 с.
5. **Лаврус В.С.** Источники энергии. М.: Наука и техника. 1997. – 560 с.
6. **Мирзоев Г.К., Казаров А.П.** Разработка электромобилей ОАО «АвтоВаз» // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – № 1. – С. 18-25.

## Работы МГТУ «МАМИ» в области автомобилей с гибридными силовыми установками

**С.В. Бахмутов**, профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.,  
**В.В. Селифонов**, профессор МГТУ «МАМИ», к.т.н.,  
**А.И. Филонов**, ассистент МГТУ «МАМИ»,  
**И.А. Куликов**, аспирант МГТУ «МАМИ»,  
**Я.В. Благушко**, аспирант МГТУ «МАМИ»,  
**О.В. Маликов**, аспирант МГТУ «МАМИ»



**Ключевые слова:** автомобиль, гибридная силовая установка, городской транспорт, двигатель внутреннего сгорания, тяговый электродвигатель, токсичность, топливная экономичность.

## Scientific activity of MSTU «MAMI» in the field of hybrid electric vehicles

**S.V. Bakhmutov, V.V. Selifonov, A.I. Filonov, I.A. Kulikov, Y.V. Blagushko, O.V. Malikov**

**Keywords:** automobile, hybrid powertrain, city transport, internal combustion engine, electric motor, toxicity, fuel efficiency.



**С.В. Бахмутов**, профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.:

В статье дано описание конструкции экспериментального автомобиля-лаборатории, созданного коллективом Научно-образовательного центра «Автомобили с гибридными силовыми установками» МГТУ «МАМИ», а также лаборатории по испытаниям и доводке гибридных силовых установок.

The paper gives a background of construction for the experimental hybrid electric vehicle-laboratory, developed by the team of the Scientific and educational centre "Automobiles with hybrid powertrains", as well as a laboratory for testing and refinement of hybrid powertrains.

**А**втомобили, оборудованные двигателями внутреннего сгорания (ДВС), расходуют огромное количество моторного топлива и выбрасывают в окружающую среду вредные вещества вместе с выхлопными газами. Эта проблема особенно остро стоит в крупных городах и вблизи автомагистралей. Применение гибридной силовой установки (ГСУ) обеспечивает существенную экономию топлива с одновременным значительным сокращением выбросов вредных веществ с отработавшими газами автомобиля. Наряду с этим применение ГСУ позволяет

использовать режим движения на электротяге в тех районах больших городов, где в будущем может быть запрещено движение с включенным ДВС. Проведенные расчеты также показывают, что использование ГСУ на городском транспорте позволяет существенно сократить экологическое загрязнение мегаполисов наименее затратным путем.

На сегодняшний день в Российской Федерации существует определенное отставание от стран Евросоюза в принятии экологических норм для транспортных средств (табл. 1).

Транспортные средства с ГСУ обеспечивают выполнение норм Евро-5 уже сегодня.

Коллективом Научно-образовательного центра «Автомобили

Таблица 1

Страны	Год принятия норм			
	Евро-2	Евро-3	Евро-4	Евро-5
Страны Евросоюза	1997	2000	2005	2008
Россия	2006	2008	2010	2014

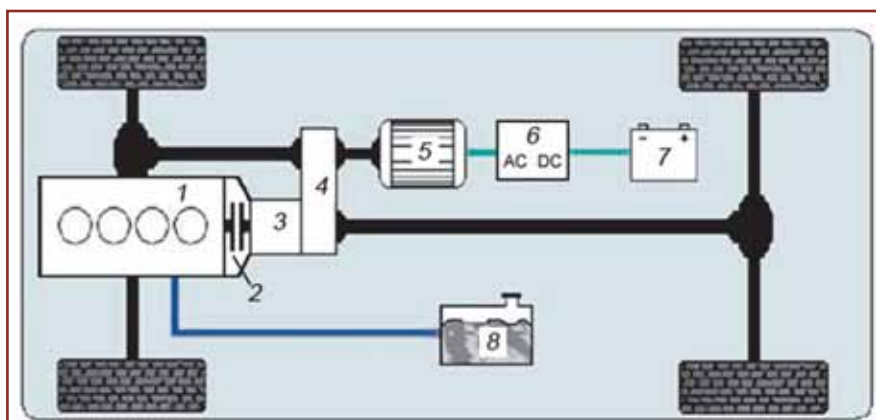
с гибридными силовыми установками» МГТУ «МАМИ» (НОЦ «Автомобили с ГСУ») на протяжении многих лет ведутся работы по созданию автомобилей с ГСУ. За это время накоплен большой опыт по теоретическому исследованию ГСУ, а также стендовым и дорожным испытаниям гибридных автомобилей. Поиск рационального решения экологических проблем крупных городов ведется с учетом возможности создания всей компонентной базы, в том числе и агрегатоносителя, силами отечественной промышленности.

Несколько лет назад в НОЦ МГТУ «МАМИ» была развернута работа по созданию автомобиля с гибридной силовой установкой, который можно выпускать на базе серийного транспортного средства, пригодного для использования в городских условиях в качестве развозного. В результате был создан экспериментальный автомобиль-лаборатория с гибридной силовой установкой.

Разработчики остановились на параллельной схеме ГСУ (двигатель внутреннего сгорания и электродвигатель связаны с ведущими колесами автомобиля), поскольку, во-первых, отечественная промышленность выпускает все необходимые для ее реализации компоненты и узлы; во-вторых, она обеспечивает автомобилю топливную экономичность, практически не отличающуюся от той, которую может дать смешанная схема, используемая, например, в автомобиле Toyota Prius; в-третьих, она проще последней по исполнению.

Общий вид схемы ГСУ представлен на рис. 1.

Данная компоновочная схема реализуется с минимальными затратами на изготовление гибридного автомобиля на базе серийно выпускаемого.



**Рис. 1.** Схема гибридной силовой установки:

1 – ДВС, 2 – сцепление, 3 – коробка передач, 4 – приемно-распределительное устройство (ПРУ), 5 – ТЭД, 6 – преобразователь электрической энергии, 7 – накопитель электрической энергии, 8 – топливный бак

В качестве объекта выбран многоцелевой автомобиль УАЗ-3153, в трансмиссии которого были проведены конструктивные изменения. Раздаточная коробка стала выполнять функции приемно-распределительного устройства (ПРУ), в котором предусмотрен отбор мощности на тяговый электродвигатель с нижнего вала. Нижний вал стал составным, при этом была предусмотрена муфта включения привода тягового электродвигателя (ТЭД). Это позволило

реализовать на автомобиле различные схемы привода от разных источников энергии.

Компоновочная схема ГСУ на опытном образце автомобиля при использовании ПРУ обеспечила возможность применения различных энергетических установок (ДВС, ТЭД или их комбинация) и приводов (полный блокированный, полный от разных источников энергии, индивидуальный – от разных источников энергии на каждый из мостов). При этом



**Рис. 2.** Общий вид автомобиля УАЗ-3153 с ГСУ

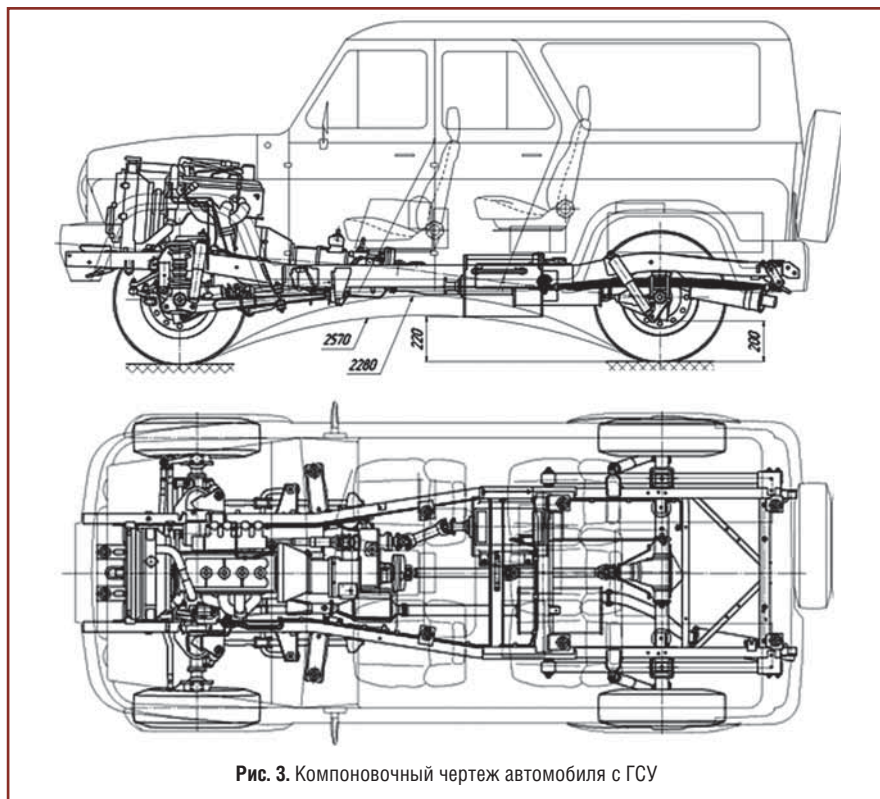


Рис. 3. Компонентный чертеж автомобиля с ГСУ

использование промежуточных агрегатов при передаче мощности не требуется, что повышает общий КПД трансмиссии автомобиля. Возможность движения с полным приводом обеспечивается и при выключенном ДВС, то есть при минимальных

тепловых и звуковых излучениях. Все перечисленные изменения упрощают конструкцию, снижают массу автомобиля и затраты на его производство.

В качестве тягового электродвигателя выбрана асинхронная обратимая электрическая

машина АМ-60 номинальной мощностью 30 кВт.

При выборе мощности электродвигателя учитывалась необходимость движения на электротяге с малой скоростью в городском цикле движения. Трогание и разгон автомобиля до скорости 35 км/ч осуществляются в режиме электромобиля. При избытке мощности ДВС в сравнении с необходимой мощностью для прохождения городского цикла ТЭД работает в режиме генератора, запасая избыточную энергию в накопителе, в качестве которого используется блок подходящих по мощности и энергоемкости тяговых аккумуляторных батарей Optima D-1000. Суммарная энергоемкость накопителя электрической энергии должна обеспечить движение автомобиля с ГСУ в режиме электромобиля со скоростью 10...20 км/ч на расстояние не менее 10 км. Для организации работы обратной электромашин совместно с накопителем энергии в системе ГСУ устанавливается инвертор (рис. 2, 3).

В состав автомобиля с ГСУ входят элементы не только серийного автомобиля (ДВС, коробка передач, приводы переднего и заднего мостов), но и новые устройства: обратимая электрическая машина с приводом, система управления тяговым электрооборудованием и накопитель энергии. Кроме того, раздаточная коробка стала выполнять функции приемно-распределительного устройства: с одной стороны к ней подводится крутящий момент от ДВС, а с другой – от обратимой электрической машины, работающей в режимах тягового электродвигателя и генератора (при торможении автомобиля).

Система тягового электрооборудования выполнена на основе выпускаемых в настоящее время



Рис. 4. Размещение БПУ и БНЭ на автомобиле

Модель автомобиля	УАЗ-3153 (стандарт)	УАЗ-3153 с ГСУ
Колесная формула	4×4	4×4, 4×2
Полная масса, кг	2600	2600
Двигатель	УМЗ-4218.10	УМЗ-4218.10
Максимальные крутящий момент, Н·м мощность, кВт (л.с.)	200 73 (99,2)	200 73 (99,2)
Электродвигатель	–	Обратимая асинхронная электромашина с короткозамкнутым ротором
Максимальные крутящий момент, Н·м мощность, кВт частота вращения, мин <sup>-1</sup> напряжение, В	– – – –	280 35 2600 120
Электрический накопитель	–	Аккумуляторные батареи «Optima D-1000»
Число элементов	–	10
Гибридная силовая установка	–	УМЗ-4218.10 + обратимый асинхронный электродвигатель с комплектом аккумуляторных батарей
Максимальные крутящий момент, Н·м мощность, кВт (л.с.)	– –	480 108 (147)
Максимальная скорость, км/ч	117	125
Время разгона до скорости 80 км/ч, с	18	14

отечественной промышленностью компонентов с учетом практического опыта НПП «КВАНТ». В ее состав входят блоки преобразования энергии и управления (БПУ), силовой коммутации, управления режимами электромашины, накопителей энергии

(БНЭ), а также пульт управления, асинхронный электродвигатель, распределительная панель.

Размещение на автомобиле блока преобразования энергии и управления и блока аккумуляторных батарей представлено на рис. 4.

Технические характеристики автомобиля с ГСУ представлены в табл. 2.

Для обеспечения автоматической работы сцепления автомобиль оснащен электровакуумным приводом сцепления (ЭПС).



Рис. 5. Фрагменты испытаний автомобиля с ГСУ



Рис. 6. Лаборатория по испытаниям ГСУ

Особое внимание было уделено обеспечению работоспособности вспомогательных систем автомобиля с ГСУ при движении в электрорежиме – вакуумного усилителя тормозов (в данном случае используется разряжение из ресивера ЭПС) и привода гидроусилителя руля (ГУР) при неработающем ДВС. Для привода насоса ГУР при движении автомобиля в электрорежиме используется автономный дополнительный электромотор небольшой мощности. При включении ДВС насос ГУР будет приводиться от ДВС.

В случае эксплуатации автомобиля с ГСУ при пониженных температурах окружающей среды предусмотрена установка автономного обогревателя типа Webasto для поддержания требуемого теплового режима как салона автомобиля, так и при необходимости ДВС.

При управлении автомобилем с ГСУ необходимо автоматическое поддержание режима работы ДВС, при котором двигатель работает по характеристике минимальных удельных расходов. Для

этого предусмотрено управление системой питания двигателя от бортового компьютера без механической связи между педалью управления автомобилем и дроссельной заслонкой ДВС.

Экспериментальный образец автомобиля с ГСУ был испытан на автополигоне НАМИ по городскому ездовому циклу ЕЭК ООН (рис. 5).

При этом расход топлива штатной силовой установкой (бензиновый ДВС) составил 20,5, а гибридной 10,2 л/100 км.

Отдельно стоит отметить, что выбросы углекислого газа у автомобиля с ГСУ относительно стандартного сократились на 45 %, а таких вредных веществ, как СО и СН, в три раза. Результаты испытаний лишней раз подтвердили предположение о возможной существенной экономии топлива и резком сокращении вредных выбросов автомобилей с ГСУ при работе их в режиме городского цикла крупных городов.

Данных результатов невозможно достичь без организации масштабных научно-исследовательских

работ, выполняемых на высоком современном уровне.

Сотрудники НОЦ проводят расчетно-теоретические исследования по выбору мощности ДВС и параметров компонентов ГСУ, исследуют топливно-экономические и экологические свойства создаваемых транспортных средств, алгоритмы управления ГСУ, возможности применения перспективных накопителей электрической энергии различных типов, ведут большую работу по регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

Коллективом НОЦ создан научно-исследовательский стенд для испытания гибридной силовой установки последовательно-параллельной схемы, включающей дизель ЗМЗ-5143.10, две обратимые электромшины 4АПА 2Э160М и генератор в качестве нагружающего устройства. Стенд позволяет снимать статические и динамические характеристики установленных агрегатов, определять тягово-скоростные, топливно-экономические и экологические характеристики грузовых автомобилей с ГСУ, а также отрабатывать алгоритмы управления ГСУ. На базе данного стенда в МГТУ «МАМИ» создана лаборатория, в которой проводят комплексные испытания и доводку гибридных силовых установок и их компонентов (рис. 6).

В данный момент коллектив Научно-образовательного центра «Автомобили с ГСУ» МГТУ «МАМИ» работает над созданием перспективных городских грузовых и пассажирских автомобилей с ГСУ и готов сотрудничать с автостроительными и научными предприятиями в области создания и исследования автомобилей с гибридными силовыми установками.

## Новости из-за рубежа News from abroad

### Италия: 4-е заседание Рабочего комитета 5 МГС

В самом начале марта 2011 г. в г. Ливорно (Италия) прошло очередное, четвертое в трехлетнем периоде 2009-2012 гг., заседание Рабочего комитета 5 (Использование газа) Международного газового союза (МГС). Работа Комитета и исследовательских групп входит в заключительную стадию. До очередной Мировой газовой конференции в Куала-Лумпуре остается всего 14 мес. За это время Исследовательская группа 5.3 (Использование природного газа на транспорте), впрочем, как и остальные, должна завершить подготовку Итогового доклада о состоянии и перспективах рынка природного газа, используемого в качестве моторного топлива.

В текущей трехлетке заседание группы по использованию газа на транспорте стало самым

плодотворным. В заседании приняли участие 24 эксперта от 19 компаний из 11 стран. Были представлены такие нефтегазовые и энергетические компании как ОАО «Газпром» (Россия), E. On Ruhrgas (Германия), Eni Gas & Power (Италия), GDF Suez (Франция), OMV Gas Adria (Хорватия), Osaka Gas Co. (Япония), Polish Oil and Gas Company – PGNIG Sa – (Польша), Tokyo Gas (Япония), National Iranian Gas Company (Иран). Кроме того, в работе группы приняли участие руководители и представители



Колонка для КПГ

машиностроительных компаний, международных ассоциаций, средств массовой информации.

Одним из основных вопросов повестки дня стала подготовка материалов к Мировой газовой конференции (МГК-2012) в Куала-Лумпуре (Малайзия).

Координационный комитет уже объявил о приеме заявок на подготовку докладов на сессиях конгресса, одна из которых будет посвящена газомоторной тематике.

Желающие выступить с устным докладом на МГК-2012 должны **до 1 сентября 2011 г. представить тезисы** своих докладов в Программный комитет конференции. Полные тексты принятых докладов авторы должны представить **до 1 февраля 2012 г.** с условиями оформления тезисов можно ознакомиться на сайте МГС.



Колонка для H<sub>2</sub>

**Основными темами докладов (устных и постерных) выбраны следующие:**

■ Роль газобаллонных транспортных средств в формировании устойчивых транспортных систем и низкоуглеродного общества.

■ Пути превращения деятельности по производству и заправке компримированного природного газа в прибыльный бизнес.

■ Сбор, систематизация и распространение информации о новых технологиях в создании газобаллонных автомобилей и газозаправочного оборудования.

■ Рассмотрение случаев эффективной эксплуатации АГНКС.

■ Анализ информации по эксплуатации крупных парков газобаллонных автомобилей на КПГ и СПГ.



Метановые автобусы  
в Ливорно



Цены на топливо:  
СУГ – евро/л; КПГ – евро/кг



Участники заседания Исследовательской группы в Ливорно

■ Синергия природного газа, биометана, водорода и метано-водородных смесей для дальнейшего развития газомоторного бизнеса.

■ Влияние ограничений выбросов CO<sub>2</sub> на рост парка автомобилей на природном газе.

Следует особо подчеркнуть, что запрос на выступление с докладом по перечисленным темам может направить любой эксперт вне зависимости от его принадлежности или членства в МГС.

Члены и гости Исследовательской группы 5.3 выступили с докладами по состоянию и перспективам развития национальных рынков компримированного и биологического природного газа Германии, Ирана, Польши, стран Юго-Восточной Европы. Участники заседания заслушали ряд специальных докладов:

■ Синергия биометана и природного газа.

■ Битопливный газобензиновый (КПГ) гибридный автомобиль Toyota SAI – 2012 концепт кар.

■ Малотоннажное производство СПГ.

■ Презентация компании Landi Renzo.

■ Подготовка опроса по практике эффективной эксплуатации АГНКС.

По итогам заседания Исследовательская группа 5.3 рекомендовала:

■ Приурочить проведение очередного заседания Рабочего комитета к 5-й Пражской международной

конференции «Перспективы расширения использования природного газа на транспорте», которая запланирована на февраль 2012 г. Совмещение этих мероприятий даст положительный синергетический эффект.

■ Расширить разделы Итогового доклада, посвященные вопросам малотоннажного производства СПГ и его использования на колесных и прочих транспортных средствах.

■ Приглашать экспертов, не входящих в состав ИГ 5.3, подавать заявки на выступление с докладом на МГК.

■ Усилить координацию действий между МГС и другими международными институтами: ЕЭК ООН, ЕДК, NGVA Europe, NGV Global и др.

■ Рассмотреть возможность создания Международной электронной библиотеки нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации АГНКС. Фонды библиотеки должны иметь бесплатный доступ.

■ Разработать концепцию буклета «Аргументы в пользу применения природного газа в качестве моторного топлива». Буклет должен содержать убедительные доводы из разных стран, свидетельствующие об экологических и экономических преимуществах природного газа, его безопасности, доступности и т.д.

■ Оценить возможность проведения информационных мероприятий, адресованных аудиторiams

за пределами газомоторного сообщества.

Компания ENI Gas & Power организовала техническую поездку на уникальный многотопливный заправочный комплекс в предместьях Ливорно, реализующий жидкие нефтяные моторные топлива, СУГ и КПГ. Кроме того, здесь отрабатываются технологии получения компримированного водорода и его заправки в автомобили. При этом водород на этой МАЗС получают не из природного газа, а из воды. Объем производства водорода составляет 10 м<sup>3</sup>/ч при затратах энергии на производство 6,3 кВт·ч/м<sup>3</sup>, расход воды – 7,8 л/ч, давление хранения компримированного водорода – 20 МПа.

Эта многотопливная АЗС интересна также тем, что здесь комплексно отрабатываются технологии повышения энергоэффективности объектов. МАЗС является самодостаточным с точки зрения энергетики объектом. Общая потребляемая мощность станции составляет 296 кВт·А. Из них 215 кВт·А идет на обеспечение работы заправочного комплекса, а 81 кВт·А – на получение водорода. При этом 84 кВт·А получают от ветрогенератора, 188 кВт·А – от когенерационной установки и 24 кВт·А – от солнечной энергии. Как видно из энергобаланса МАЗС, 36 % энергии на ней получают из возобновляемых источников. В России пока таких комплексных объектов нет.

*Е. Пронин*



## Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смесевом биотопливе

**В.А. Марков,**  
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**А.В. Стремяков,**  
аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
**В.С. Акимов,**  
студент МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
**В.А. Шумовский,**  
студент МГТУ им. Н.Э. Баумана

Предложена конструкция опытного распылителя форсунки, обеспечивающего улучшение показателей впрыскивания и распыливания топлива. Проведены расчетные исследования топливоподачи дизеля, оснащенного серийными и опытными распылителями. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С с серийными и опытными распылителями. Дизель работал на дизельном топливе и смеси 93 % дизельного топлива и 7 % метилового эфира рапсового масла.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ), смесевое биотопливо, форсунка, распылитель, распыливание топлива.

## A Method of Improving Fuel Spray Process Quality in a Diesel Engine Running on Mixture Biofuel

**V.A. Markov, A.V. Stremyakov, V.S. Akimov, V.A. Shumovsky**

A tested sprayer design offering better characteristics of fuel supply and injection processes is presented. Computational analysis of fuel supply process in the diesel engine equipped with standard and tested sprayers is carried out. The results of experimental research on the D-245.12C diesel engine with standard and tested sprayers are demonstrated. The diesel engine was running on diesel fuel and the mixture of 93% diesel fuel and 7% rapeseed oil methyl ester.

**Keyword:** diesel engine, diesel fuel, rapeseed oil methyl ester, mixed biofuel, injector, sprayer, spraying.

При адаптации двигателей внутреннего сгорания к работе на различных альтернативных топливах возникает несоответствие их физико-химических свойств свойствам штатных нефтяных топлив. В частности, биотоплива на основе растительных масел, все шире используемые

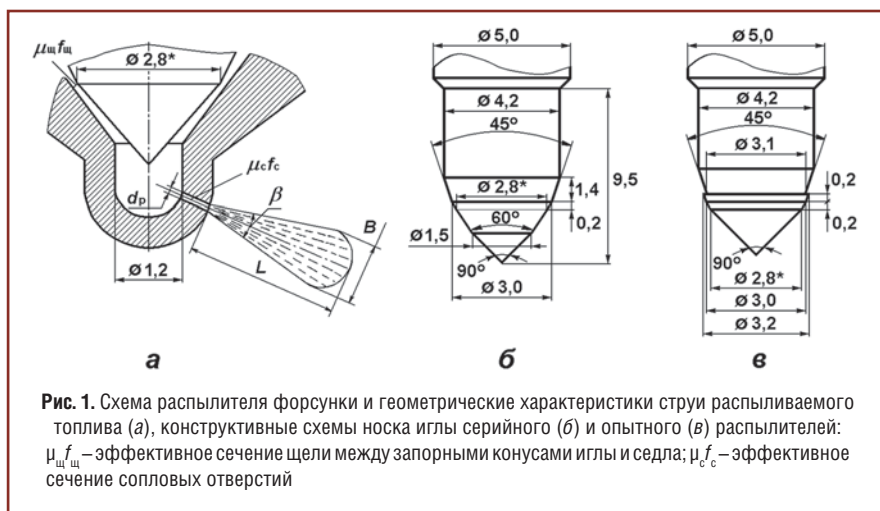
в дизельных двигателях, отличаются от нефтяного дизельного топлива более тяжелым фракционным составом, повышенными плотностью, вязкостью и коэффициентом поверхностного натяжения.

Это приводит к заметному ухудшению качества распыливания топлива

и смесеобразования, недостаточно полному сгоранию топлива, ухудшению показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) [1]. Поэтому одной из первоочередных задач при адаптации дизелей к работе с использованием биотоплив на основе растительных масел является улучшение качества распыливания топлива.

Качество впрыскивания и распыливания топлива предопределяется параметрами и конструктивными особенностями системы топливоподачи дизеля. Одним из основных элементов этой системы является распылитель форсунки, формирующий струи требуемых геометрических размеров, структуры, с необходимыми показателями мелкокости распыливания топлива. При этом характеристики струй распыливаемого топлива – длина  $L$ , ширина  $B$  и угол конуса  $\beta$  струи, направление и динамика ее распространения (рис. 1а) – должны быть согласованы с формой камеры сгорания (КС) для равномерного распределения топлива по объему КС.

В ряде работ показано, что для высокого качества распыливания топлива и последующего смесеобразования желательна высокая турбулизация потока топлива в проточной части распылителя форсунки [2, 3]. Подобное состояние потока топлива на выходе из распыливающих отверстий приводит к турбулизации струи распыливаемого топлива, ее быстрому распаду в КС дизеля и улучшению показателей распыливания и смесеобразования. Обычно турбулизация потока топлива в проточной части распылителя форсунки достигается за счет распыливающих отверстий с дополнительными гидравлическими сопротивлениями: повышенной шероховатостью и наличием острых кромок на их входе и выходе. Известны и другие способы турбулизации потока топлива: винтовые канавки в распыливающих отверстиях, распылители с перекрещивающимися распыливающими отверстиями, канавки на выходе из распыливающих отверстий и т.д. [4-8]. Но изготовление таких турбулизаторов технологически



**Рис. 1.** Схема распылителя форсунки и геометрические характеристики струи распыливаемого топлива (а), конструктивные схемы носка иглы серийного (б) и опытного (в) распылителей:  $\mu_{\text{ш}f_{\text{ш}}}$  – эффективное сечение щели между запорными конусами иглы и седла;  $\mu_{f_c}$  – эффективное сечение сопловых отверстий

достаточно сложно ввиду малого диаметра распыливающих отверстий и их большого числа. В современных системах топливоподачи их число достигает 20 и более [9]. Кроме того, распыливающие отверстия подвержены закоксовыванию. Более простым способом увеличения потока топлива в проточной части распылителя форсунки являются дополнительные гидравлические сопротивления на хвостовике распылителя форсунки [10, 11].

Для определения рациональной формы дополнительных гидравлических сопротивлений на хвостовике распылителя форсунки изготовлено несколько опытных распылителей на базе серийного типа 145.1112110-11 производства Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА). Базовый распылитель используется в форсунках ФДМ-22 дизельных двигателей типа Д-245.12С производства Минского моторного завода (ММЗ). Эти двигатели устанавливаются на автомобили ЗИЛ-5301 «Бычок», тракторы «Беларусь», автобусы Павловского автобусного завода (ПАЗ).

У серийного распылителя 145.1112110-11 с пятью распыливающими отверстиями диаметром  $d_p=0,32$  мм, входные кромки которых расположены в колодце распылителя диаметром  $d_k=1,2$  мм (см. рис. 1, табл. 1), суммарная эффективная площадь составляет  $\mu_p f_p=0,278$  мм<sup>2</sup>.

У серийного распылителя с диаметром иглы  $d_n=5,0$  мм (по направляющей) максимальный ход иглы составляет  $h_n=0,26$  мм. Хвостовик распылителя имеет три конусных участка с различными углами, равными 45, 60 и 90°. Посадка иглы на седло распылителя осуществляется по диаметру  $d_n=2,8$  мм, расположенному на участке с углом конуса 60° (на рис. 1б этот диаметр обозначен звездочкой \*).

Среди опытных распылителей наилучшие показатели топливной экономичности и токсичности ОГ обеспечил распылитель, представленный на рис. 2в. При его изготовлении подрезана часть хвостовика иглы серийного распылителя, расположенная ниже посадочного диаметра  $d_n=2,8$  мм, под

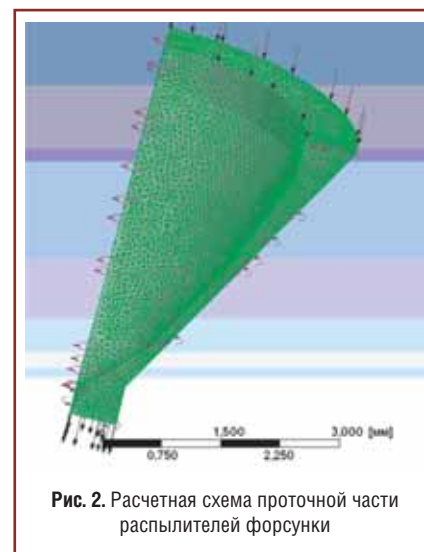
углом конуса 90°. При этом топливо, протекающее через дросселирующее сечение  $\mu_{\text{ш}f_{\text{ш}}}$ , далее расширяется более интенсивно, чем в серийном распылителе, в котором ниже посадочного диаметра  $d_n=2,8$  мм хвостовик имеет конусную часть с углом конуса 60°. Конусная часть хвостовика иглы с углом конуса 45° сточена на 0,1 мм (по диаметру) выше диаметра  $d=3,2$  мм с таким же углом конуса (45°). В результате на хвостовике иглы образуется горизонтальный кольцевой уступ с наружным и внутренним диаметрами 3,2 и 3,1 мм, являющийся местным гидравлическим сопротивлением.

Для оценки влияния созданных местных гидравлических сопротивлений на параметры потока и его турбулизацию в проточной части распылителя форсунки был проведен численный эксперимент с моделированием течения в проточной части серийного и опытного распылителей. Расчет проводился в программном комплексе Ansys CFX 11.0, математическая модель которого содержит уравнения в частных производных, описывающих поток топлива в проточной части распылителя – уравнения неразрывности, количества движения Навье–Стокса, энергии и диффузии, а также уравнения модели турбулентности. Для оценки степени турбулизации потока использовалась величина турбулентной кинетической энергии (удельная кинетическая энергия вихрей в турбулентном потоке)  $k$ , которая физически

Таблица 1

**Расположение распыливающих отверстий распылителя типа 145.1112110-11**

Номер отверстия	Угловое расположение отверстия относительно штифта, градус	Угол наклона отверстия относительно оси распылителя, градус
1	8	62
2	90	71,5
3	172	62
4	237	52
5	303	52



**Рис. 2.** Расчетная схема проточной части распылителей форсунки

характеризуется среднеквадратической флуктуацией (пульсацией) скорости:

$$k = \frac{\overline{U}^2 + \overline{V}^2 + \overline{W}^2}{2},$$

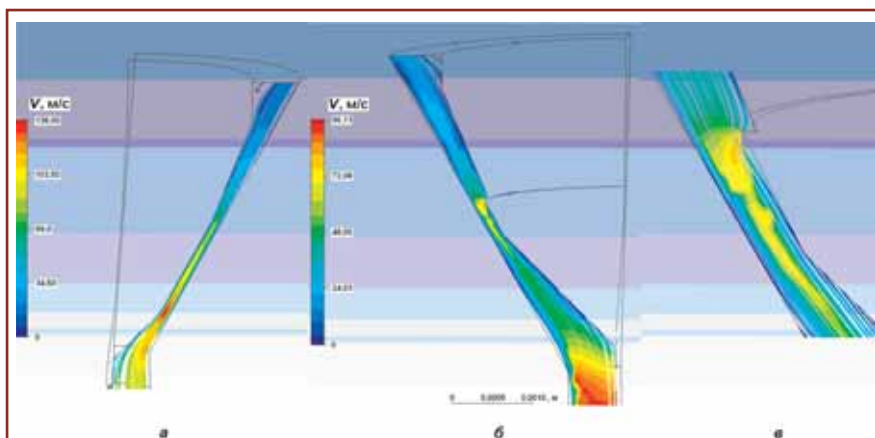
где  $\overline{U}$ ,  $\overline{V}$ ,  $\overline{W}$  – среднеквадратические проекции пульсационной составляющей скорости на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

При расчетах исследован стационарный поток дизельного топлива в распылителях. В качестве расчетной области выбрана проточная часть между хвостовиком иглы и седлом распылителя при максимально поднятой игле (рис. 2). Для уменьшения продолжительности расчета используется четверть расчетной области, при этом на границах заданы условия симметрии. Давление топлива на входе в расчетную область принято равным 51,5 МПа, что примерно соответствует максимальному давлению впрыскивания, обеспечиваемому разделенной системой топливоподачи дизеля типа Д-245.12С на номинальном режиме (при частоте вращения коленчатого вала  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> и цикловой подаче топлива  $q_u=80$  мм<sup>3</sup>). Расход топлива через распылитель принят равным 0,08 кг/с, что соответствует максимальному расходу топлива через форсунку дизеля типа Д-245.12С на указанном номинальном режиме.

Расчетная схема опытного распылителя имеет вид, аналогичный приведенному на рис. 2, при этом граничные условия оставлены неизменными. Для уточнения расчета в области кольцевого уступа сгенерирована более мелкая сетка конечных элементов.

Картина течения (распределение скоростей потока топлива) в проточных частях исследованных распылителей (рис. 3) достаточно предсказуема. По наглядным визуализациям линий тока можно констатировать, что у опытного распылителя в районе кольцевого уступа наблюдается явный отрыв потока, тогда как в проточной части серийного образца течение является безотрывным.

Несмотря на то, что созданное в опытном варианте местное сопротивление, безусловно, увеличивает гидравлические потери, это не приводит



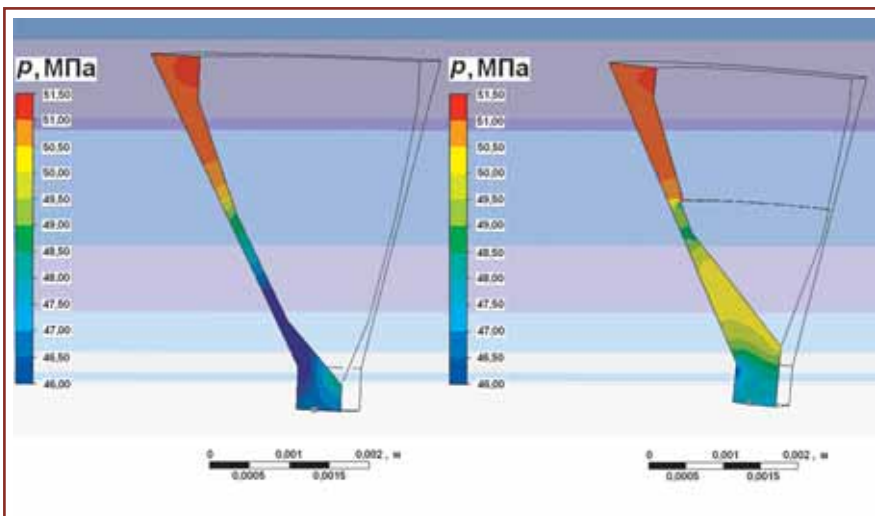
**Рис. 3.** Поля скоростей потока топлива в проточных частях распылителей форсунки: *а* – серийный распылитель; *б* – опытный распылитель; *в* – область гидравлического сопротивления опытного образца (увеличено)

к уменьшению давления на выходе расчетной области (давление впрыскивания). Более того, увеличение сечений проточной части опытного распылителя ниже и выше уступа приводит к увеличению давления на выходе из расчетной области данного распылителя. У серийного распылителя это давление  $p=46,8$  МПа, а у опытного –  $p=47,6$  МПа (рис. 4).

Наибольший интерес с точки зрения турбулизации потока топлива представляет картина распределения турбулентной кинетической энергии в проточных частях распылителей форсунки (рис. 5). Максимальные значения турбулентной кинетической энергии  $k$  зафиксированы в области отрыва потока под кольцевым уступом опытного распылителя. В этой

области турбулентная кинетическая энергия потока топлива достигала значения  $k=265$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> (см. рис 5б). Средние по сечению значения турбулентной кинетической энергии, полученные на выходе расчетной области опытного распылителя, примерно в 2 раза больше, чем у серийного (рис. 6). Также следует заметить, что большие значения энергии в случае с опытным распылителем не имеют столь строгого локального характера, как у серийного образца (около стенки после поворота потока в колодец), а гораздо более равномерно распределены по сечению, что вызвано наличием местного гидравлического сопротивления.

Значения турбулентной кинетической энергии в одной и той же



**Рис. 4.** Распределение давлений топлива в проточных частях распылителей форсунки: *а* – серийный распылитель; *б* – опытный распылитель

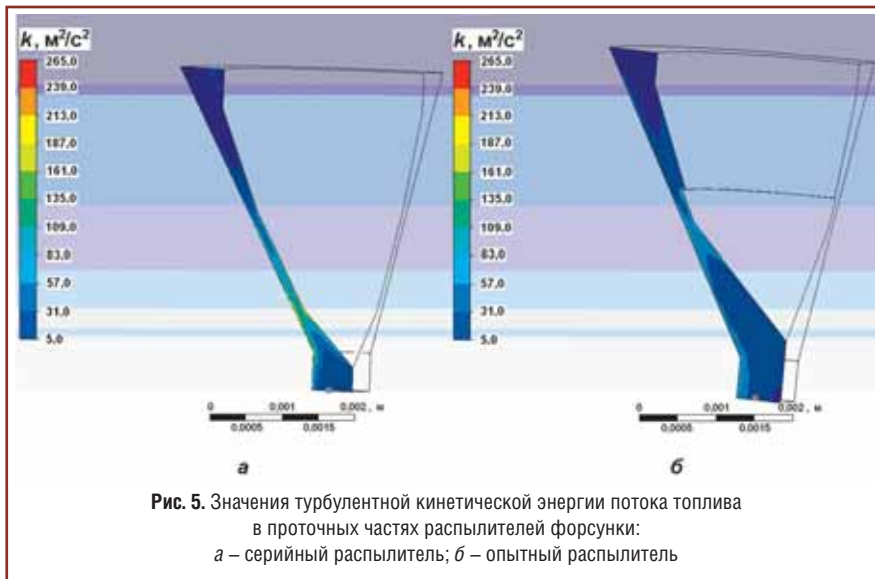


Рис. 5. Значения турбулентной кинетической энергии потока топлива в проточных частях распылителей форсунки:  
а – серийный распылитель; б – опытный распылитель

точке на выходе из расчетной области (точка внизу расчетной области, см. рис. 5) для серийного и опытного распылителей были равны соответственно 10,5 и 16,3 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, а разница в средних по выходному сечению значениях турбулентной кинетической энергии оказалась еще большей в пользу опытного распылителя (см. рис. 6).

Обобщая изложенное, следует отметить, что по степени турбулизации потока топлива и показателям процесса топливоподачи опытный распылитель имеет ряд преимуществ в сравнении с серийным. Помимо того, что его использование приводит к повышению давления впрыскивания топлива, увеличивается и турбулизация потока (турбулентная кинетическая энергия). Высокая турбулентность потока топлива на выходе из расчетной области проточной части

опытного распылителя приводит к интенсификации распыливания, быстрому распаду струи в КС дизеля и улучшению показателей смесеобразования.

В связи с увеличением давления впрыскивания и большей турбулизацией потока топлива на выходе из расчетной области можно предположить, что использование опытных распылителей позволит улучшить качество распыливания топлива и смесеобразования в дизеле, работающем на биотопливах на основе растительных масел, повысить полноту сгорания топлива, улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ.

Для оценки эффективности использования опытных распылителей в двигателях, работающих на указанных биотопливах, проведены

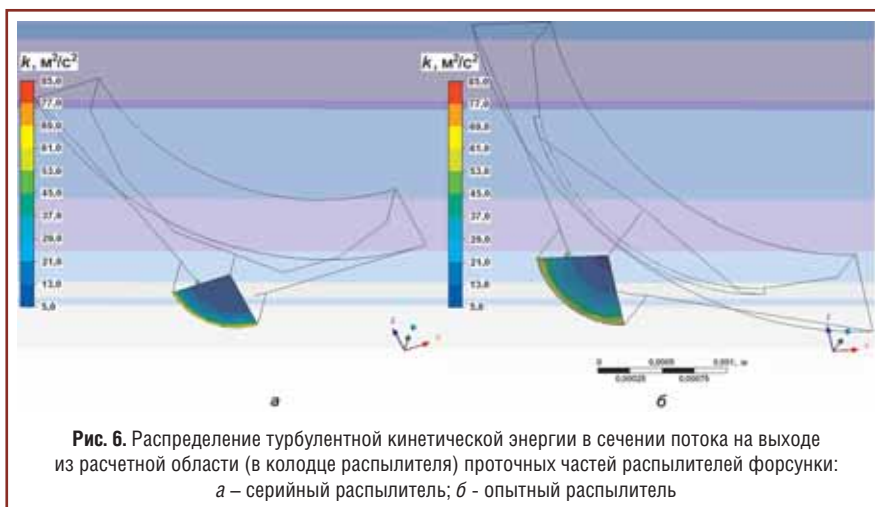


Рис. 6. Распределение турбулентной кинетической энергии в сечении потока на выходе из расчетной области (в колодце распылителя) проточных частей распылителей форсунки:  
а – серийный распылитель; б – опытный распылитель

экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), устанавливаемого на малотоннажные грузовые автомобили ЗИЛ-5301 «Бычок» (табл. 2).

Дизель исследован на моторном стенде АМО «ЗИЛ» на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ)  $\theta=13^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (п.к.в. до ВМТ) и неизменным положением упора максимальной подачи топлива. Стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$  в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 фирмы Yanaco (Япония) с погрешностями измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

На первом предварительном этапе исследований дизеля Д-245.12С с серийными и опытными распылителями использовалось товарное дизельное топливо (ДТ). На втором этапе исследований дизель работал на смеси 93 % ДТ и 7 % метилового эфира рапсового масла (табл. 3).

Испытания на режимах внешней скоростной характеристики показали, что при переводе дизеля Д-245.12С, оснащенного серийными распылителями, с ДТ на смесь 93 % ДТ и 7 % МЭРМ часовая расход топлива  $G_p$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , крутящий момент  $M_e$ , эффективная мощность  $N_e$  и удельный эффективный расход топлива  $g_e$  изменялись сравнительно слабо (табл. 4). Но при этом снижалась дымность ОГ.

Оснащение исследуемого дизеля, работающего на смеси 93 % ДТ и 7 % МЭРМ, опытными распылителями приводило к заметному увеличению часового расхода топлива  $G_p$ , особенно на режимах с высокой частотой вращения коленчатого вала (при  $n > 1600$  мин<sup>-1</sup>). Видимо, это вызвано увеличенной суммарной эффективной площадью распылителя в сборе

$\mu_p f_p$  у опытных распылителей, полученных путем описанной выше дообработки серийных распылителей, исходно имеющих  $\mu_p f_p = 0,278 \text{ мм}^2$ . В результате указанного увеличения часового расхода топлива  $G_T$  использование опытных распылителей сопровождалось увеличением крутящего момента  $M_e$  и эффективной мощности  $N_e$  и снижением коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Но несмотря на пониженные значения  $\alpha$  на режимах с высокой частотой вращения (при  $n > 1600 \text{ мин}^{-1}$ ) опытные распылители обеспечивали меньшие удельный эффективный расход топлива  $g_e$  и дымность ОГ  $K_x$ . Так, при работе исследуемого дизеля на смеси 93 % ДТ и 7 % МЭРМ на номинальном режиме при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  замена серийных распылителей опытными по варианту № 3 приводила к снижению удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от 257,2 до 248,5 г/(кВт·ч), то есть на 3,4 %, и дымности ОГ  $K_x$  – от 15 до 10 % по шкале Хартриджа, то есть на 33,3 %.

По результатам экспериментальных исследований дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49 рассчитаны интегральные удельные массовые выбросы токсичных компонентов. Определены также условный средний эффективный расход топлив и соответствующий ему условный средний эффективный КПД (табл. 5) по методике, изложенной в работе [1].

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что одновременная установка опытных распылителей и использование смесового биотоплива, содержащего 93 % ДТ и 7 % МЭРМ, позволяют значительно улучшить показатели токсичности ОГ. Так, удельный массовый выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  снизился на 30,2 %. При этом удельный массовый выброс несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$  уменьшился на 33,9 %. Дымность ОГ на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  снизилась на 37,5 %, а на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  – на 12,5 %. Условный средний эффективный КПД дизеля  $\eta_{e_{усл}}$  на режимах 13-ступенчатого

Таблица 2

**Технические характеристики дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5)**

Параметры	Значение
Двигатель	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Рабочий объем цилиндра, л	1,08
Степень сжатия	16,0
Система турбонаддува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Камера сгорания	Типа ЦНИДИ
Способ смесеобразования	Объемно-пленочное
Номинальная частота вращения $n$ , $\text{мин}^{-1}$	2400
Номинальная мощность, кВт	80
Механизм газораспределения	Клапанного типа с верхним расположением клапанов
Система охлаждения	Водяная, принудительная
Система смазки	Принудительная, с разбрызгиванием
Фильтр масляный	Сетчатый
Насос масляный	Шестеренчатый
Система питания	Разделенного типа
Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Рядный типа РР4М10U1f (фирма Motorpal) с всережимным центробежным регулятором
Диаметр плунжеров ТНВД, мм	10
Ход плунжеров ТНВД, мм	10
Длина нагнетательных топливопроводов, мм	540
Форсунки	Тип ФДМ-22 (ОАО «Куроаппаратура», г. Вильнюс)
Давление начала впрыскивания, МПа	21,5

Таблица 3

**Физико-химические свойства топлив**

Физико-химические свойства	Топливо		
	ДТ	МЭРМ	93 % ДТ + 7 % МЭРМ
Плотность при 20 °С, $\text{кг/м}^3$	830	877	833,3
Кинематическая вязкость при 20 °С, $\text{м}^2/\text{с}$	3,8	8,0	4,7
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	30,7	–
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,8	42,17
Цетановое число	45	48	–
Температура, °С			
самовоспламенения	250	230	–
помутнения	-25	-13	–
застывания	-35	-21	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,6	14,2
Массовая доля, %			
С	87,0	77,6	86,4
Н	12,6	12,2	12,6
О	0,4	10,2	1,0
Массовая доля серы, %	0,20	0,002	0,19
Коксуемость 10%-ного остатка, % по массе	0,2	0,3	–

Примечание: «-» – свойства не определялись.

Таблица 4

**Показатели дизеля Д-245.12С с различными распылителями при работе на различных топливах на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента**

Показатели дизеля	Распылитель, вид топлива		
	Серийный распылитель, ДТ	Серийный распылитель, смесь 93 % ДТ + 7 % МЭРМ	Опытный распылитель № 3, смесь 93 % ДТ + 7 % МЭРМ
Часовой расход топлива, кг/ч на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	17,42 12,25	17,55 12,50	19,69 12,58
Крутящий момент дизеля, Н·м на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	271 355	272 360	315 359
Коэффициент избытка воздуха $\alpha$ на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	2,28 1,67	2,27 1,66	2,08 1,64
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч) на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	255,5 219,7	257,2 221,1	248,5 223,2
Эффективный КПД дизеля на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	0,332 0,386	0,332 0,386	0,344 0,383
Дымность ОГ, % по шкале Хартриджа на режиме максимальной мощности на режиме максимального крутящего момента	16,0 28,0	15,0 24,0	10,0 24,5

Таблица 5

**Параметры работы дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла при установке различных распылителей, использовании дизельного топлива и смесового биотоплива**

Распылитель, топливо	Условный удельный эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	Условный удельный эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$	Удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ, г/(кВт·ч)		
			$e_{\text{NOx}}$	$e_{\text{CO}}$	$e_{\text{CHx}}$
Серийный распылитель, ДТ	248,12	0,341	6,610	3,612	1,638
Серийный распылитель, смесь 93 % ДТ + 7 % МЭРМ	241,98	0,353	6,470	3,027	1,409
Опытный распылитель, смесь 93 % ДТ + 7 % МЭРМ	242,70	0,352	7,121	2,522	1,083

испытательного цикла увеличился на 3,2 %. И лишь выброс оксидов азота  $e_{\text{NOx}}$  вырос на 7,7 %. Однако такое увеличение эмиссии оксидов азота может быть легко компенсировано оптимизацией (уменьшением) УОВТ  $\theta$ , значения которого сильно влияют на величину  $e_{\text{NOx}}$  и в значительно меньшей степени на другие показатели токсичности ОГ. В частности, по данным работы [12] уменьшение УОВТ  $\theta$  на 1° п.к.в. в сторону запаздывания в одной из модификаций дизеля Д-245 приводит к снижению выброса оксидов азота  $e_{\text{NOx}}$  примерно на 1 г/(кВт·ч).

В целом, проведенные исследования показали эффективность использования опытных распылителей в дизеле, работающем на смесовом биотопливе.

## Литература

1. **Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. – 340 с.
2. **Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И.** Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 360 с.
3. **Кутовой В.А.** Впрыск топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1981. – 119 с.
4. **Vae C., Yu J., Kang J., Kong J., Lee K.O.** Effect on Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray // SAE Technical Paper Series. – 2002. – № 2002-01-1625.
5. **Goney K.H., Corradini M.L.** Isolated Effects of Ambient Pressure, Nozzle Cavitation and Hole Inlet Geometry on Diesel Injection Spray Characteristics // SAE Technical Paper Series. – 2000. – № 2000-01-2043.
6. **Лышевский А.С.** Системы питания дизелей. М.: Машиностроение, 1981. – 216 с.
7. **Мальчук В.И.** Методы совершенствования распыливания топлива в быстроходном дизеле // В сб.: «Поршневые двигатели и топлива в XXI веке». М.: изд-во МАДИ (ТУ). – 2003. – С. 30-36.
8. Совершенствование процесса распыливания топлива и смесеобразования дизеля / В.А. Марков, А.А. Зенин, А.А. Ефанов и др. // Техника и технология. – 2009. – № 4. – С. 9-17.
9. **Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А.** Системы топливоподачи и управления дизелей: учеб. для вузов. – М.: изд-во «Легион-Автодата», 2005. – 344 с.
10. **Марков В.А., Стремяков А.В., Поздняков Е.Ф.** Усовершенствование распылителя форсунки дизеля // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 5. – С. 11-15.
11. **Марков В.А., Стремяков А.В., Мизев К.С., Девянин С.Н., Поздняков Е.Ф.** Метод улучшения качества процессов распыливания топлива и смесеобразования дизеля: сб. науч. тр. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 230-234.
12. Улучшение экологических показателей транспортных дизелей путем управления процессом топливоподачи / А.Г. Кузнецов, В.А. Марков, В.Л. Трифонов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Машиностроение, 2000. – № 2. – С. 62-75.

## Экспериментальное определение цетановых чисел смесевых и эмульгированных дизельных топлив

**Л.В.А. Санчес,**

профессор университета г. Кито (Эквадор), к.т.н.,

**Н.Н. Патрахальцев,**

профессор Российского университета дружбы народов (РУДН), д.т.н.,

**Б.А. Корнев,**

магистр техники и технологий, аспирант РУДН,

**И.С. Мельник,**

магистр техники и технологий, аспирант РУДН

Тенденция к применению альтернативных топлив, добавок и присадок к нефтяным дизельным топливам, а также смесевых, в том числе эмульгированных топлив [1] требует анализа их физико-химических, теплофизических и моторных свойств, включая воспламеняемость и в первую очередь – определение их цетановых чисел. Для достижения поставленной цели модернизирована стандартная установка ИДТ-69 и выполнены предварительные исследования.

**Ключевые слова:** альтернативное топливо, смесевое топливо, эмульгированное топливо, дизельное топливо, цетановое число, анализ физико-химических свойств топлив.

## Experimental determination of cetan numbers of mixtured and emulcified diesel fuels

**L.V.A. Sanches, N.N. Patrakhaltsev, B.A. Kornev, I.S. Melnik**

There is tendency of usage of alternative fuels and additives to naphtha-diesel fuels, mixed and emulsified fuels in diesel engines. In this connection it is necessary to get analyses its physical – chemical, thermo-physical and motor's properties, first of all - inflammability and cetane numbers. With this purpose was improved the installation for determining of cetane numbers of mixed fuels.

**Keywords:** alternative fuel, mixed and emulsified fuels, diesel fuel, cetane number, analyses of physical – chemical properties of fuels.

Одним из основных квалификационных показателей дизельных топлив (ДТ) является их самовоспламеняемость, которую характеризует цетановое число (ЦЧ). Анализ цетановых чисел смесевых и эмульгированных топлив целесообразен в связи с тем, что эти показатели определяют возможности

пуска двигателя, особенно в холодном состоянии, устойчивость и работу на малых нагрузках и холостых ходах, жесткость работы на основных режимах, а также шумность и в конечном итоге надежность и долговечность двигателя, его экономические, энергетические и экологические характеристики.

Цетановое число обычно определяется на стандартной установке типа ИДТ-69 с вихрекамерным одноцилиндровым дизелем ( $D/S = 82,6/114$ ,  $V_h = 0,61$  л, со степенью сжатия ( $\epsilon$ ), изменяемой от 7 до 23, а также с изменяемым углом опережения впрыскивания ( $\phi_{оп}$ ), при частоте вращения  $n = 900$  мин<sup>-1</sup>) [2].

Для расчета цетановых чисел смесевых топлив (на основе дизельного) используют простые соотношения аддитивности типа

$$\text{ЦЧ}_{ад} = \sum \text{ЦЧ}_i g_i,$$

где  $g_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента.

Использование подобных зависимостей дает неверные результаты [3], что объясняется следующим. Период задержки воспламенения (ПЗВ) обусловлен двумя стадиями подготовки горючей смеси к самовоспламенению: физической и химической. Международным стандартом в качестве первичных эталонов при экспериментальном определении ЦЧ выбраны цетан ( $n$ -гексадекан) с ЦЧ=100 и  $\alpha$ -метилнафталин с ЦЧ=0. Они отличаются по воспламеняемости (разные продолжительности химических стадий), но имеют близкие физические свойства, в частности, теплоту парообразования и температуру кипения (одинаковые продолжительности физических стадий). Поэтому различие ПЗВ ( $\tau$ ) при изменении содержания цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином будет определяться различием продолжительности их химических стадий  $\tau_{хц} \ll \tau_{х\alpha-м}$  при равенстве продолжительности физических стадий  $\tau_{фц} = \tau_{ф\alpha-м}$ . Компоненты, например, спиртодизельного топлива отличаются теплотой парообразования и температурой разгонки. Теплота парообразования этанола 919 кДж/кг существенно больше теплоты парообразования ДТ, равной 210 кДж/кг. Отсюда  $\tau_{фс} > \tau_{фдт}$ , а так как  $\tau_{хс} > \tau_{хдт}$ , то соответственно  $\tau_{с} > \tau_{дт}$ . Действительная зависимость ПЗВ смесевых спиртодизельного топлива ( $\tau_{сдт}$ ) будет лежать выше условной зависимости

$\tau'_i$ , соответствующей условию  $\tau_{\phi c} = \tau_{\phi дт}$ , поскольку  $\tau_{xc} > \tau_{х дт}$  и  $\tau_{\phi c} > \tau_{\phi дт}$ . Тогда ЦЧ<sub>сдт</sub> будет меньше ЦЧ<sub>сдт ад</sub> на  $\Delta$ ЦЧ.

Иначе

$$\text{ЦЧ}_{\text{сдт}} = \text{ЦЧ}_1 g_1 + \text{ЦЧ}_2 g_2 - \Delta \text{ЦЧ},$$

где  $g_1$  и  $\text{ЦЧ}_1$  – доля и ЦЧ низкоцетанового компонента;  $g_2$  и  $\text{ЦЧ}_2$  – высокоцетанового компонента.

Причем  $g_1 = 1 - g_2$  [3].

Таким образом, определение ЦЧ смесевых эмульгированных топлив требует их экспериментального исследования. Причем важно знание характеристик изменения ЦЧ в функции от содержания АТ, величины добавки или присадки к ДТ.

Для экспериментального исследования смесевых топлив необходимо подготовить соответствующие смеси, эмульсии. Известна сложность создания ряда стабильных смесей или эмульсий: спиртотопливных, водотопливных и т.д. ввиду несмешиваемости компонентов. Сжиженный пропан-бутан топливный (СПБТ) в жидкой фазе хорошо смешивается с ДТ, но смешивание и хранение таких смесей представляют проблему ввиду высокой испаряемости СПБТ. В связи с этим подготовка и проведение эксперимента достаточно сложны и продолжительны. Получив экспериментальные характеристики, можно искать аппроксимирующие их зависимости, уравнения зависимости ЦЧ от состава смесевоего топлива и т.д., отличные от уравнений простой аддитивности.

Для облегчения и ускорения исследований смесевых и эмульгированных топлив стандартная установка [6] была модернизирована размещением дополнительных емкостей с объемными измерителями расхода альтернативных топлив, добавок, присадок и соответствующими кранами переключения (рис. 1).

Определение цетанового числа осуществляется по методу совпадения вспышек, сущность которого заключается в сравнении испытуемого образца топлива с эталонным, ЦЧ которого известно и составлено из

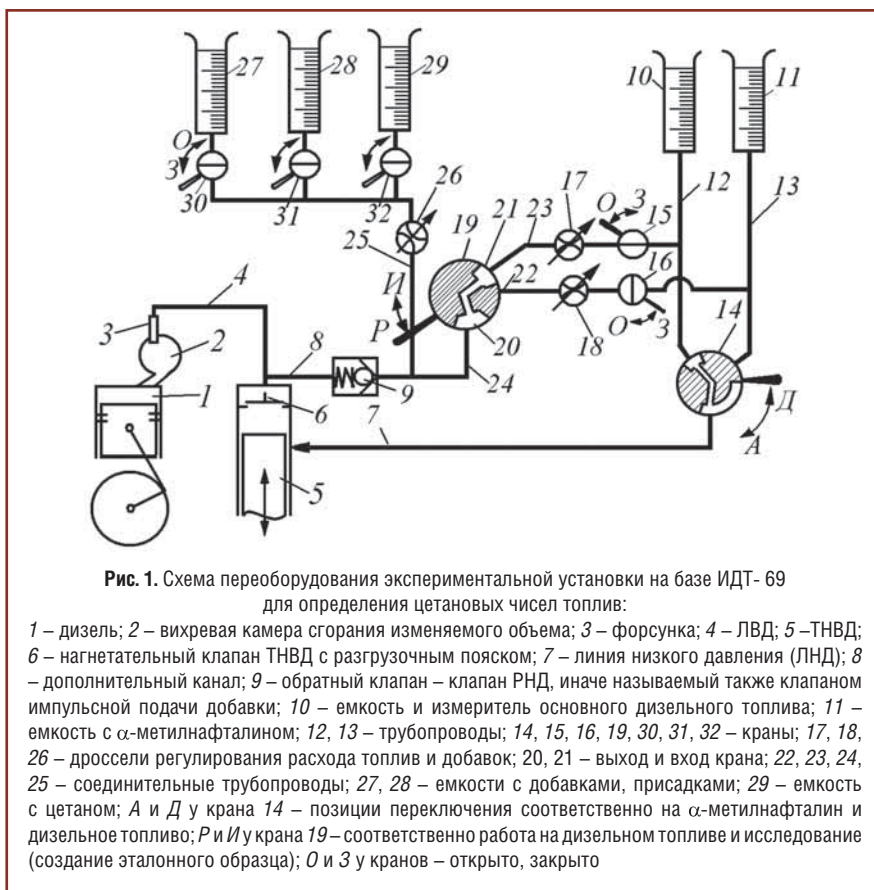


Рис. 1. Схема переоборудования экспериментальной установки на базе ИДТ-69 для определения цетановых чисел топлив:

1 – дизель; 2 – вихревая камера сгорания изменяемого объема; 3 – форсунка; 4 – ЛВД; 5 – ТНВД; 6 – нагнетательный клапан ТНВД с разгрузочным пояском; 7 – линия низкого давления (ЛНД); 8 – дополнительный канал; 9 – обратный клапан – клапан РНД, иначе называемый также клапаном импульсной подачи добавки; 10 – емкость и измеритель основного дизельного топлива; 11 – емкость с  $\alpha$ -метилнафталином; 12, 13 – трубопроводы; 14, 15, 16, 19, 30, 31, 32 – краны; 17, 18, 26 – дроссели регулирования расхода топлив и добавок; 20, 21 – выход и вход крана; 22, 23, 24, 25 – соединительные трубопроводы; 27, 28 – емкости с добавками, присадками; 29 – емкость с цетаном; А и Д у крана 14 – позиции переключения соответственно на  $\alpha$ -метилнафталин и дизельное топливо; Р и И у крана 19 – соответственно работа на дизельном топливе и исследование (создание эталонного образца); О и З у кранов – открыто, закрыто

соответствующих частей цетана и  $\alpha$ -метилнафталина. При работе дизеля на стандартном режиме  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\varphi_{\text{оп}} = 13^\circ$  до верхней мертвой точки (ВМТ) и расходе топлива 13 мл/мин изменением степени сжатия ( $\epsilon$ ) добиваются такого положения, когда воспламенение исследуемого и эталонного топлив происходит в ВМТ, то есть период задержки воспламенения (ПЗВ) равен  $13^\circ$ . Для уточнения определения ЦЧ в качестве эталонных принимают две смеси, одна из которых воспламеняется чуть лучше, а другая – чуть хуже, чем исследуемое топливо.

При этом ЦЧ пересчитывают по соотношению

$$\text{ЦЧ} = \text{Ц}_1 + (\text{Ц}_2 - \text{Ц}_1) (\epsilon_1 - \epsilon) / (\epsilon_1 - \epsilon_2),$$

где  $\text{Ц}_1$  – содержание цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, дающей совпадение вспышек при большей степени сжатия  $\epsilon_1$ ;  $\text{Ц}_2$  – содержание цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, дающей совпадение вспышек при меньшей степени сжатия  $\epsilon_2$ ;  $\epsilon$  – степень сжатия при работе на испытуемом топливе.

Установка работает следующим образом. После подачи топлива топливным насосом высокого давления (ТНВД) 5, когда происходит отсечка подачи, нагнетательный клапан 6 осуществляет разгрузку линии высокого давления (ЛВД) 4 с помощью своего отсасывающего (разгрузочного) пояска (не показан). В ЛВД 4 формируется волна разрежения, которая, проходя многократно по ней, соответственно многократно открывает обратный клапан 9 регулирования начального давления (РНД). В результате по дополнительному каналу 8 в ЛВД 4 поступает топливо или добавка в зависимости от положений кранов. Добавка смешивается с основным топливом, подаваемым насосом 5, благодаря подводу его по линии 7, и впрыскивается форсункой 3 в вихревую камеру 2 дизеля 1. В режимах работы дизеля 1 возможны следующие особенности: подача основного топлива в чистом виде, подача основного топлива и подмешивание к нему альтернативных топлив, присадок, различных,



в том числе негорючих, добавок и подача эталонных смесей цетана и  $\alpha$ -метилнафталина.

При работе на чистом ДТ последнее из емкости 10 по трубопроводу 12 поступает к крану 14, находящемуся в открытом состоянии Д, затем в линию 7 и в насос 5, который нагнетает топливо в ЛВД 4 и т.д. При отсечке подачи, когда нагнетательный клапан 6 при своей посадке в седло формирует в ЛВД 4 волну разрежения, клапан 9 РНД открывается за счет перепада давления на нем, и ДТ по трубопроводу 12 через открытый кран 15, дроссель 17, отрегулированный на заданный расход, по трубопроводу 23 поступает на вход 21 крана 19 и через его выход 20 поступает к клапану 9, а при его открытии – в ЛВД 4, создавая в ней необходимое начальное условие – начальное давление.

Расход ДТ устанавливается по мерному стеклу на емкости 10 и регулируется рейкой насоса 5 и дросселем 17. В этом варианте работы краны 16, 30, 31, 32 закрыты. При необходимости введения в дизельное топливо присадки или добавки открывают соответствующий кран (30 или 31), и альтернативное топливо или добавка (присадка) соответственно из емкости 27 или 28 поступают через регулируемый дроссель 26 по трубопроводу 25 к клапану 9, а при его открытии – в дополнительный канал 8, а затем в ЛВД 4, где присадка или добавка смешиваются с ДТ, поступившим из емкости 10.

Для увеличения расхода присадки или добавки увеличивают открытие дросселя 26 и уменьшают открытие дросселя 17, снижая подачу ДТ. Установив необходимое соотношение топлива и добавки, которые измеряются мерными стеклами на емкостях 10 и 27 или 28, устанавливают угол опережения, равный  $13^\circ$ , и меняют степень сжатия для получения воспламенения в верхней мертвой точке. После этого закрывают краны 15 и 30 или 31, открывают краны 16 и 32, поворачивают кран 14 в положение А, а кран 19 в положение, когда трубоп-

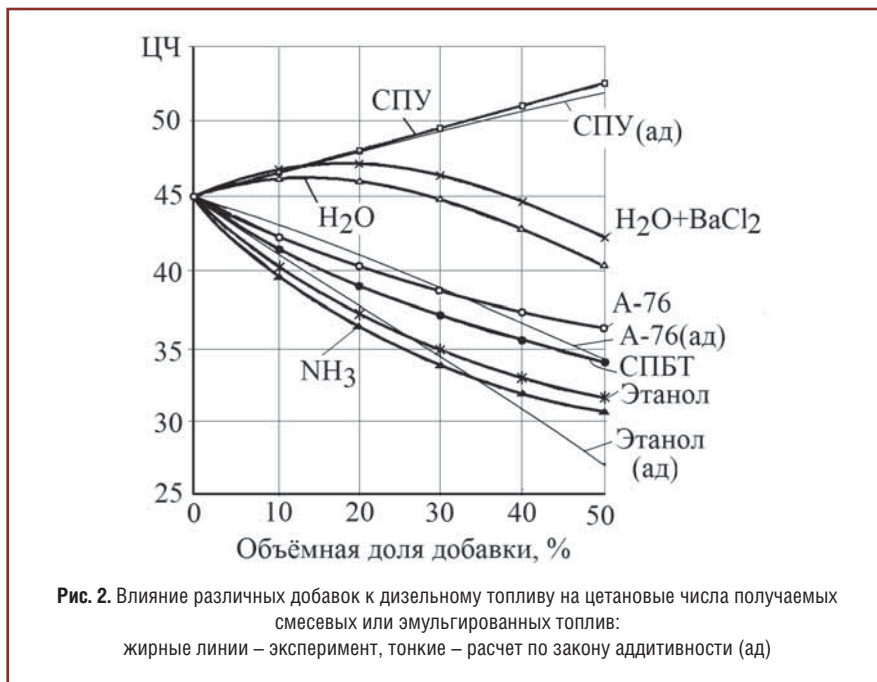


Рис. 2. Влияние различных добавок к дизельному топливу на цетановые числа получаемых смесевых или эмульгированных топлив: жирные линии – эксперимент, тонкие – расчет по закону аддитивности (ад)

ровод 22 совмещается со входом 21, а выход 20 с трубопроводом 24 и дополнительным каналом 8 через клапан 9. С помощью дросселей 26 и 18 меняют расходы соответственно цетана и  $\alpha$ -метилнафталина, добиваясь совпадения момента вспышки с ВМТ при работе дизеля на данном эталонном топливе. Процентное содержание цетана в смеси цетана и  $\alpha$ -метилнафталина определяет искомое ЦЧ.

На модернизированной таким образом установке были определены цетановые числа ряда смесевых и эмульгированных топлив, в которые вводились следующие добавки: легко смешиваемые с ДТ синтетические парафиновые углеводороды (СПУ) и бензин А-76, трудно смешиваемые с ДТ (необходимость эмульгирования) этанол и аммиак ( $\text{NH}_3$ ). Кроме того, исследовано влияние на ЦЧ основного топлива эмульгирование его водой и водным раствором хлорида бария ( $\text{H}_2\text{O} + \text{BaCl}_2$ ), как антидымной присадки. Альтернативные топлива и добавки имели следующие показатели: СПУ –  $\text{ЦЧ}_{\text{сн}} = 60,5$  и плотность  $\rho_{\text{сн}} = 0,691 \text{ г/см}^3$ ; бензин А-76 –  $\text{ЦЧ}_6 = 22$ ,  $\rho_6 = 0,740 \text{ г/см}^3$ ; этанол –  $\text{ЦЧ}_3 = 8,0$ ,  $\rho_3 = 0,789 \text{ г/см}^3$  и аммиак –  $\rho_a = 0,682 \text{ г/см}^3$ .

Следует отметить, что расчетное определение ЦЧ (по соотношению

аддитивности) проводится в зависимости от массовых долей компонентов в смесевом топливе. На исследовательской стандартной установке ЦЧ определяли в зависимости от объемных долей компонентов топлива. Для получения расчетных характеристик аддитивности были проведены пересчеты в объемные доли.

Анализ результатов показал следующее. Высокоцетановое топливо в виде смеси легких синтетических парафиновых углеводородов (СПУ состава  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ , где  $n = 5 \dots 13$ ), легко образующее стабильные смеси с ДТ, практически пропорционально, то есть близко к закону аддитивности, повышает ЦЧ смесевое топливо. В данном случае физическая и химическая составляющие периода задержки воспламенения действуют однонаправленно.

Добавка низкоцетанового бензина с очевидностью снижает ЦЧ такого смесевое топлива, причем, несмотря на сравнительную близость физических свойств бензина и ДТ, характеристика изменения  $\text{ЦЧ}_{\text{см}}$  отклоняется от закона аддитивности, хотя и не столь существенно, как в случае спиртодизельной эмульсии. Интересно отметить, что добавка воды или водного раствора антидымной присадки в

количествах 20...30 % даже повышает ЦЧ, которое с ростом добавки снижается. Повышение ЦЧ очевидно связано с улучшением качества распыливания топлива и смесеобразования, что уменьшает физическую составляющую периода задержки воспламенения. Хотя возможно и влияние на химическую составляющую. Заметно существенное отклонение цетановых чисел, полученных при экспериментах, от расчетных по соотношению аддитивности.

Таким образом, предложенное оснащение установки клапаном импульсной подачи добавки (клапаном РНД) и дополнительными емкостями для компонентов смесового топлива, добавок и присадок позволяет существенно ускорить исследования цетановых чисел различных смесовых и эмульгированных топлив. В то же время применение клапана РНД сопровождается повышением начального давления топлива перед

впрыскиванием, что изменяет качество распыливания и топливоподачу. Следовательно, требуются дальней-

шие исследования для определения точности и достоверности получаемых результатов.

## Литература

- 1. Патрахальцев Н.Н.** Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив: Учебное пособие / Н. Н. Патрахальцев. – М.: РУДН, 2008. – 267 с.: ил.
- 2. Гуреев А.А.** Топливо для дизелей. Свойство и применение / А.А. Гуреев, В.С. Азев, Г.М. Камфер. – М.: Химия, 1993. – 336 с.
- 3. Камфер Г. М.** Расчетная оценка цетановых чисел спиртотопливных смесей / Г.М. Камфер, А.К. Болотов, С.А. Плотноиков // Сб. науч. трудов МАДИ «Улучшение показателей работы автомобильных и тракторных двигателей». – 1990. – С. 59-64.
- 4. Санчес Л.В.А.** Расширение ресурса дизельных топлив и совершенствование рабочего процесса дизеля применением альтернативных топлив, присадок и добавок к топливу: автореф. дисс. канд. техн. наук. 05.04.02 / Леонардо Владимир Альвеар Санчес. – М, 1988. – 16 с.
- 5. Патрахальцев Н.Н.** Пути развития топливных систем для подачи в цилиндр нетрадиционных топлив / Н. Н. Патрахальцев, Л.В. Альвеар Санчес // Двигателестроение. – 1988. – № 3. – С. 11-13.
- 6. Обельницкий А. М.** Топливо и смазочные материалы / А.М. Обельницкий. – М.: Высшая школа, 1982. – 212 с.

**VITKOVICE**  
VITKOVICE CYLINDERS a.s.

Мировой лидер производства бесшовных стальных баллонов высокого давления для различного применения. Поставщик широкого ряда баллонов для сжатого натурального газа (CNG) и заправочных станций.

**CNG баллоны**

- ▶ производство цельнотянутых баллонов из заготовки (брусков)
- ▶ баллоны CNG облегченные с внешним диаметром до 406 мм
- ▶ соотношение емкость/вес 1 литр/0,9 кг
- ▶ соответствие стандартам ISO 11439; ECE R 110; NZS 5454; Covenin 3226; ГОСТ 9731-79; ГОСТ 51753-2001
- ▶ Заводы-производители в Чехии, Польше, Аргентине

**CNG газозаправочные станции**

- ▶ для индивидуального пользования
- ▶ для производственного пользования
- ▶ для коллективного пользования

**Применение баллонов**

- ▶ для стационарных и мобильных систем (PED, TPED or ADR)
- ▶ рабочее давление 200, 250, 300, 330 бар и выше
- ▶ емкость несколько тысяч литров

VITKOVICE CYLINDERS a.s. tel. + 420 596 664 621 fax. + 420 596 664 629  
Czech Republic, Europe e-mail: cng@vilkovicеcylinders.cz  
www.vilkovicеcylinders.com

Представитель в России, член Национальной Газомоторной Ассоциации  
ООО «EXITON GROUP», Москва, тел.(495) 781-26-95, факс (495) 781-26-96  
E-mail: exitongroup@gmail.com

РЕКЛАМА

## Анализ возможности применения топлив с низкой удельной теплотой сгорания в ДВС

**С.В. Гусаков,**  
зав. кафедрой Российского университета дружбы народов (РУДН),  
профессор, д.т.н.,  
**И.В. Афанасьева,**  
аспирантка РУДН,  
**Х. Мурад,**  
аспирант РУДН

В статье представлены результаты расчетно-теоретического анализа применимости топлив с низкой удельной теплотой сгорания в двигателях внутреннего сгорания за счет применения инновационных рабочих процессов с внутренней рециркуляцией теплоты и самовоспламенением от сжатия гомогенных топливно-воздушных смесей.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, низшая теплота сгорания топлива, процесс с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия, рециркуляция теплоты.

## Analysis of the possibility of using fuels with low specific heat of combustion in internal combustion engines

S.V. Gusakov, I.V. Afanasieva, H. Murad

In article results of calculation and theoretical analysis of the applicability of fuels with low specific heat of combustion in internal combustion engines through innovative work processes with internal recirculation of heat and spontaneous ignition from compression of homogeneous fuel-air mixes.

**Keywords:** internal combustion engine, lower heating value of fuel, process with homogeneous charge of compression ignition, recycling of heats.

**Ш**ирокое применение практически во всех сферах деятельности человека двигателей внутреннего сгорания (ДВС) сделало их одним из основных потребителей органического топлива нефтяного происхождения. Среди различных классификационных признаков ДВС можно выделить следующие: стационарные двигатели и двигатели, используемые в качестве силовых установок транспортных средств. Двигатели обоих типов могут незначительно отличаться по своей конструкции, важно другое – транспортному средству с ДВС

требуется иметь определенный запас топлива, емкость для хранения которого на борту этого средства не должна существенно снижать его грузоподъемность, увеличивать габариты и ухудшать другие потребительские качества. Поэтому удельная энергетическая емкость топлива, применительно к двигателям внутреннего сгорания (низшая теплота сгорания), имеет для транспортных ДВС важное значение, следствием чего является, как правило, ориентация на жидкие моторные топлива, получаемые переработкой нефти.

Вопрос об организации системы питания топливом стационарного ДВС в силу специфики его эксплуатации всегда являлся второстепенным. Поэтому такие двигатели потенциально могут использовать низкокалорийное топливо без снижения потребительских качеств энергоустановки в целом. Однако, за исключением ряда специфических условий применения (например, привода насосов на перекачивающих станциях магистральных газопроводов), в качестве стационарных двигателей используются те же самые двигатели, которые изначально проектировались как транспортные: автомобильные, тракторные, тепловозные и др. Этим объясняется то, что принципы организации рабочего процесса в этих двух классах двигателей одинаковы, конструкции систем питания топливом аналогичны и, как следствие, стационарные ДВС так же ориентированы на традиционные виды топлива.

В двигателях с искровым зажиганием, прежде всего, с успехом используются компримированный природный (КПГ) и сжиженный углеводородный (СУГ) газы. Существует опыт эксплуатации такого типа ДВС на горючих газах, получаемых газификацией твердого топлива, преимущественно древесины (генераторный газ), или путем анаэробной переработки органических отходов сельскохозяйственного производства или крупных городов (биогаз). Традиционно сложилось, что эффект от применения альтернативного топлива прежде всего принято оценивать по той мощности, которую при работе на нем развивает двигатель в сравнении с работой на традиционном виде топлив. Так, например, номинальная мощность ДВС заметно снижается при работе на генераторном газе и биогазе, что связано с наличием в их составе негорючих составляющих. Это послужило одной из причин отказа от положительного опыта эксплуатации газогенераторных автомобилей. Однако сейчас ситуация по оценке эффекта применения альтернативных видов топлив кардинально меняется. В одних случаях, как например, с диметилэфиром, на первое место выходят экологические

аспекты их применения, в других, например, с рапсовым маслом, – соображения энергетической безопасности и экономической выгоды.

Несомненно, что экономические и экологические критерии являются основными, и конверсия двигателя для работы на альтернативном виде топлива не должна в качестве обязательного условия подразумевать сохранение номинальной мощности двигателя. Основываясь на этом подходе, рассмотрим в качестве потенциальных видов топлив такие, которые до настоящего времени таковыми не считались в силу своей малой энергоемкости.

В мире постоянно ведутся исследования, направленные на поиск способов сжигания сверхнизкокалорийных топлив, таких как газы, выходящие из угольных шахт, некоторые промышленные газы, газы канализационных стоков и др. Одна из современных концепций получения энергии из потенциальных топлив состоит в повышении температурного уровня окисления горючих составляющих за счет рециркуляции теплоты при горении.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в этом случае количество рециркулирующей теплоты может более чем в два раза превышать количество теплоты, выделяющейся в ходе сгорания топлива [1]. Концентрация топлива,

соответствующая пределу воспламенения, снижается в три и более раза. Одним из технических решений, позволяющих осуществить сгорание очень бедных смесей, является создание условий для теплообмена между продуктами сгорания и свежей смесью, как, например, это реализовано в лабораторной горелке, показанной на рис. 1.

Устройство изготовлено в форме двойной спирали Архимеда из полос металла внешним диаметром около 10 см. Торцы герметизированы и покрыты тепловой изоляцией. Образовавшийся газовый тракт имеет сечение 4×35 мм.

Проведенные исследования показали возможность устойчивого горения при расходе 350...600 мл/с метановоздушных смесей при снижении содержания метана в воздухе до 1,7%, когда стандартный предел воспламенения  $\text{CH}_4$  составляет 5,3%.

Удельная мощность процесса горения в установке составляет

$$q_r = \frac{Q_{cm} c_{\text{CH}_4} H_u}{100 V_{\text{KC}}} \cong 3,4 \text{ МВ т/м}^3,$$

где  $Q_{cm} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  – объемный расход метановоздушной смеси;  $c_{\text{CH}_4} = 5,3\%$  – содержание метана в смеси (соответствующее нижнему концентрационному пределу воспламенения при нормальных условиях);

$H_u = 33,7 \text{ МДж/м}^3$  – низшая теплота сгорания метана;  $V_{\text{KC}} = 0,314 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

– рабочий объем камеры сгорания и теплообменника для сжигания метана (диаметр 10 см, толщина около 4 см).

Удельная мощность установки в сравнении с ДВС невысокая. Так, средняя мощность на 1 л рабочего объема современных автомобильных бензиновых поршневых двигателей составляет  $N_e / V_h = 45,6 \text{ кВт/дм}^3$  при средней степени сжатия  $\varepsilon = 9,5$  [3]. Так как сгорание в двигателях с искровым зажиганием происходит вблизи ВМТ, то для оценки удельной мощности горения следует привести мощность не к рабочему объему цилиндра, а к объему камеры сгорания  $V_{\text{KC}} = V_h / (\varepsilon - 1)$ . Поршневой двигатель – машина периодического действия, поэтому следует учитывать, что процесс сгорания в ней идет не непрерывно. Приняв, что основная стадия процесса сгорания составляет приблизительно  $60^\circ$  угла поворота коленчатого вала, то есть примерно  $\eta_\phi = 1/12$  от двух его оборотов, за которые осуществляется рабочий цикл 4-тактного ДВС, можно оценить среднюю удельную мощность двигателя

$$q_{\text{ДВС}} = \frac{N_e v_h (\varepsilon - 1)}{\eta_\phi} \cong 4650 \text{ МВт/м}^3.$$

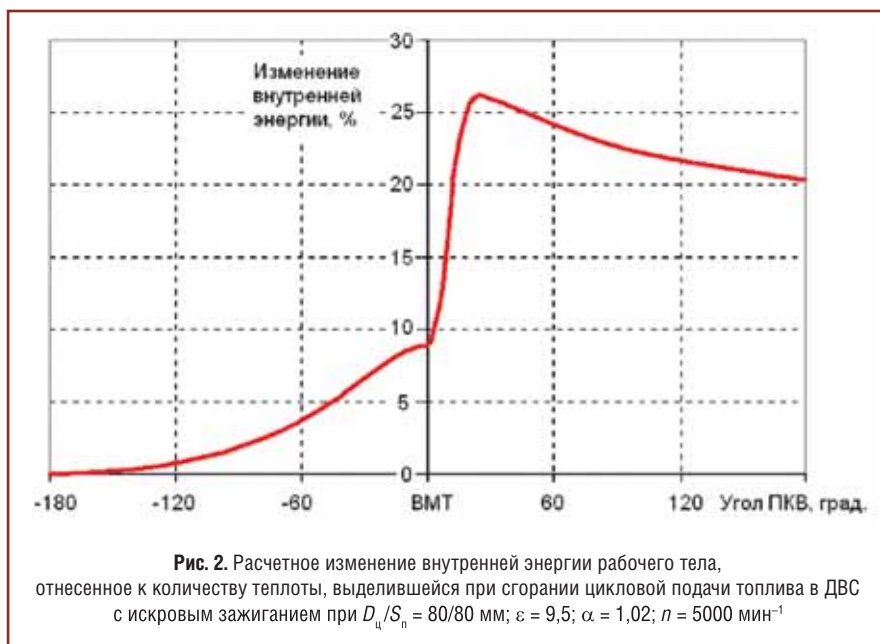
Как видно, оценочная удельная мощность тепловыделения в ДВС более чем на два порядка превышает мощность, реализуемую в горелке с рекуперацией энергии. Поэтому такой способ не реализуем в камерах сгорания поршневых двигателей, так как при имеющейся высокой интенсивности выделения энергии для ее даже частичной рекуперации потребовались бы чрезмерно громоздкие теплообменные устройства.

Следует отметить, что в ДВС при осуществлении рабочего процесса по сути реализуется принцип рекуперации энергии. Действительно, воздушному заряду сообщается в процессе его сжатия некоторая энергия, являющаяся частью энергии, запасаемой в виде кинетической энергии движущихся масс и маховика во время рабочего хода двигателя (рис. 2).

Понятно, что основной целью предварительного сжатия рабочего тела в ДВС является повышение термодинамического КПД цикла, однако взгляд на сжатие – расширение



Рис. 1. Схема устройства для сжигания смесей с очень низким теплосодержанием при интенсивной рециркуляции теплоты [2]



с позиций передачи энергии из одной части цикла в другую позволяет несколько иначе оценить проблемы сгорания топлива.

С ростом температуры топливо-воздушной смеси нижний концентрационный предел (НКП) воспламенения смещается в область более бедных смесей. По мнению А.С. Соколика [4], подогрев смеси вызывает такое снижение НКП горения, что адиабатическая температура горения остается неизменной, то есть уменьшение теплоты сгорания приблизительно компенсируется повышением начальной энтальпии смеси. Исходя из положения о постоянстве адиабатической температуры горения, можно вычислить НКП в зависимости от начальной температуры смеси [5]. Известно, что при постоянном объеме адиабатическая температура обедненных смесей определяется как

$$T_{ad} = T_0 + \frac{H_u}{(\alpha l_0 + 1)\bar{c}_v},$$

где  $T_0$  – начальная температура смеси, К;  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $l_0$  – теоретическое количество воздуха (кг), необходимое для сгорания 1 кг топлива;  $\bar{c}_v$  – средняя массовая теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К).

Таким образом, приняв температуру конца сжатия в двигателе с принудительным воспламенением  $T_0 \cong 500$  К, получим на пределе

обеднения для данного типа двигателя (при  $\alpha_{НКП} = 1,25$ ) адиабатическую температуру  $T_{ad\,min} = 2391$  К.

Преобразовав формулу для адиабатической температуры к виду

$$\alpha_{НКП} = \frac{1}{l_0} \left[ 1 - \frac{H_u}{\bar{c}_v(T_{ad\,min} - T_0)} \right],$$

получим зависимость для определения степени обеднения смеси (коэффициент избытка воздуха), при которой будет достигаться найденная адиабатическая температура для различных начальных температур смеси.

Зависимость НКП горения от начальной температуры смеси приведена ниже:

$T_0$ , К.....	500	600	700	800	900	1000
$\alpha_{НКП}$ .....	1,25	1,32	1,41	1,50	1,60	1,72

Для использования в ДВС различных альтернативных топлив, в том числе и низкосортных, а также смесей бедного состава, в работе [6] предлагается метод повышения температуры конца сжатия путем так называемого сверхадиабатического сжатия. Это связано с экономией расхода топлива и улучшением экологических параметров двигателя при работе на обедненных смесях.

Авторы базируются на идее уменьшать количество топливно-воздушного заряда в цилиндре ДВС на малых нагрузках путем снижения его плотности, то есть повышая начальную температуру смеси при атмосферном давлении на впуске, вместо снижения давления в цилиндре за счет прикрытия дроссельной заслонки при температуре смеси, равной температуре окружающей среды [7]. Предварительный подогрев позволяет существенно расширить область использования бедных смесей при устойчивой работе двигателя.

Это не единственный способ интенсифицировать химические реакции горения в бедных смесях. Имеются данные по применению для этих



**Параметры двигателя с искровым зажиганием ( $D_{из}$ ) и HCCI-двигателя при  $D_{ц}/S_{п} = 80 / 80$  мм;  $\varepsilon = 9,5$ ;  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup>**

Параметры	$D_{из}$	Номера рабочих точек HCCI-двигателя (см. рис. 3)					
		1	2	3	4	5	6
$\alpha$	1,0	5,0	4,75	3,75	2,75	1,3	2,5
EGR, %	0	0	23	50	52	31	0
$\varphi_{ср}$ , °ПКВ	60	17	18	17	22	12	6
$p_{max}$ , МПа	3,42	3,17	2,77	2,24	2,28	5,42	5,05
$(dp/d\varphi)_{max}$ , МПа/°ПКВ	0,09	0,21	0,16	0,14	0,12	0,80	1,29
$T_{max}$ , К	2929	1362	1272	1295	1444	2418	1985
$N_{г1}$ , кВт	19,4	5,10	4,14	3,37	4,33	12,5	9,78
$\eta_i$	0,389	0,511	0,511	0,506	0,496	0,470	0,49
$g_p$ , г/(кВт·ч)	206	157	157	158	161	170	163
$g_{цикл}$ , мг	26,6	5,3	4,3	3,6	4,6	14,1	10,7

целей источников активных частиц, например, плазматронов [8].

Перспективным методом организации рабочего процесса поршневых двигателей является процесс с самовоспламенением от сжатия гомогенного заряда (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition). Следует отметить, что HCCI-процесс может быть осуществлен на различных видах топлива: дизельном, бензине, диметилэфире, природном газе при обеспечении соответствующего регулирования начала воспламенения [9]. Как показано в работе [7], двигатель с самовоспламенением гомогенного заряда сохраняет работоспособность при степени рециркуляции EGR отработавших газов до 55 % и коэффициенте избытка воздуха около 5 (рис. 3). Используя программу расчета рабочего цикла HCCI-двигателя [10] были проанализированы точки, через которые проходят линии, ограничивающие поле рабочих режимов (таблица). Для сопоставления приведен расчет классического рабочего процесса.

Из приведенной таблицы видно, что HCCI-двигатель развивает максимальную мощность, составляющую около 64 % (точка 5) от мощности двигателя с искровым зажиганием.

Как указывалось ранее, это расплата за возможность высокоэффективно использовать энергетический потенциал топлива и иметь низкую токсичность отработавших газов. На всех режимных точках HCCI-двигатель

имеет индикаторный КПД выше, чем у двигателя с искровым зажиганием на номинальном режиме, и, соответственно, более низкий индикаторный расход топлива. Причиной тому – предельно малая продолжительность тепловыделения. Однако следствием этого является на 59 % более высокое максимальное давление цикла на номинальном режиме (точка 5), высокие давления на средних (точка 6) и даже малых нагрузках (точка 1) и, что особенно важно, предельно высокая скорость его нарастания. Именно эта

скорость обуславливает ограничение поля возможных режимов работы при уменьшении коэффициента избытка воздуха. Характерным для HCCI-двигателя является уровень максимальной температуры цикла, которая значительно ниже, чем в двигателе с принудительным зажиганием. Это и определяет ультранизкие концентрации оксидов азота в отработавших газах HCCI-двигателя.

Как видно из приведенных данных, двигатель с самовоспламенением от сжатия допускает достаточно сильное разбавление свежего заряда отработавшими газами. Цикловая подача топлива на режимной точке 3 в 7,4 раза меньше цикловой подачи в двигателе с искровым зажиганием при работе на стехиометрической смеси. Следовательно, HCCI-двигатель оказывается работоспособным на очень бедных топливовоздушных смесях, лежащих далеко за стандартными концентрационными пределами воспламенения. Это открывает возможность использования в качестве моторного топлива газов, содержащих малый процент горючих веществ и ранее не рассматривавшихся как энергоносители, особенно если речь идет о стационарных ДВС, в которых удельные показатели, например, по мощности, не являются определяющими.

## Литература

1. Карасев Г.К., Доровский А.Я. Некоторые сведения о шахтном метане // Экологические системы ([http://www.shestopalov.org/sh\\_hp/arc12.htm](http://www.shestopalov.org/sh_hp/arc12.htm)). – 2006. – № 1.
2. Lloids S.F., Weinberg F.J. // Nature. – 1974. – Vol. 251. – P. 48.
3. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / А.Д. Блинов, П.А. Голубев, Ю.Е. Драган и др.; под ред. В.С. Папонова и А.М. Минаева. – М.: НИЦ «Инженер», 2000. – 332 с.
4. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 428 с.
5. Макаров А.П. Совершенствование параметров рабочего процесса биогазовой модификации малоразмерного двигателя. – Дисс. на соиск. канд. техн. наук. – М.: РУДН, 2002.
6. Николаев В.М., Шмелев В.М. О сжигании бедных смесей в ДВС со сверхадиабатическим сжатием. – Материалы X научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей». – Владимир, 2005.
7. Ramos J.I. Internal Combustion Engine Modeling. HPB, New York, 1984. – P. 422.
8. Гармай А.С., Гальченко В.П. Конвертирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с использованием плазмо-электро-химических технологий для работы на природном и синтез-газе. – Тезисы докладов международной конференции «Образование через науку», М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 55-56.
9. Zhili Chen, Mitsuru Konno, Mitsuharu Oguma, Tadanori Yanai. Experimental Study of CI Natural-Gas/DME Homogeneous Charge Engine / SAE Technical Paper Series, 01 № 0329, 2000.
10. Эль-Гхобаши Эль-Хагар М.М. Разработка методов управления рабочим процессом двигателя с самовоспламенением гомогенного заряда. – Дисс. на соиск. канд. техн. наук. – М.: РУДН, 2004.

## Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания на речных судах

В.И. Карагузов,

профессор Омского государственного технического университета, д.т.н.

Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания имеют ряд преимуществ перед двигателями внутреннего сгорания: более высокий КПД и меньшее потребление топлива, лучшие экологические показатели, возможность использования разных видов топлива, меньшие затраты. Расчетные исследования показали, что на речных судах Российской Федерации такие двигатели могут составить конкуренцию дизельным двигателям.

**Ключевые слова:** магнитокалорический, двигатель внутреннего сгорания, двигатель внешнего сгорания, речные суда.

## Magnetocaloric engines of external combustion on river courts as alternative to diesel engines

V.I. Karagusov

Magnetocaloric engines of external combustion have a number of advantages before internal combustion engines: higher efficiency and smaller consumption of fuel, the best ecological indicators, possibility of use of different kinds of fuel, smaller expenses. Settlement researches have shown, that on river courts of the Russian Federation such engines can make a competition to diesel engines.

**Keywords:** magnetocaloric, internal combustion engine, engine of external combustion, river vessels.

Все современные транспортные средства оснащаются двигателями внутреннего сгорания (ДВС) за исключением судов с атомными силовыми установками и электромобилей. Подавляющее боль-

шинство речных судов оснащено дизельными ДВС, которым присущи экономичность, надежность, сравнительная простота эксплуатации. С другой стороны они сложны по конструкции, содержат множество деталей, многие из которых изнашиваются, следовательно, требуют ремонта или замены. Как и у всех двигателей внутреннего сгорания в них происходит неполное сгорание топлива, расходуется дорогостоящее моторное масло, выбрасываются экологически вредные продукты в атмосферу.

Двигатели внешнего сгорания обладают рядом преимуществ перед ДВС: более полным сгоранием топлива, меньшим загрязнением окружающей среды, возможностью работать на нескольких видах топлива.

В настоящее время стало возможным создание магнитокалорических систем, работающих не только по обратному термодинамическому циклу (системы охлаждения), но и по прямому (тепловые двигатели). В таких двигателях преобразование тепловой энергии в механическую работу происходит под действием магнитокалорического эффекта (изменение температуры магнитного рабочего тела при изменении внешнего магнитного поля или намагниченности магнитного рабочего тела при изменении его температуры). Этот эффект проявляется в ферромагнитных или антиферромагнитных материалах вблизи их температур магнитных фазовых переходов.

При охлаждении магнитного материала до температуры магнитного фазового перехода его намагниченность увеличивается, и он сильнее притягивается магнитами. При нагреве магнитного материала его намагниченность уменьшается, и он слабее притягивается магнитами вплоть до практически полного исчезновения магнитного

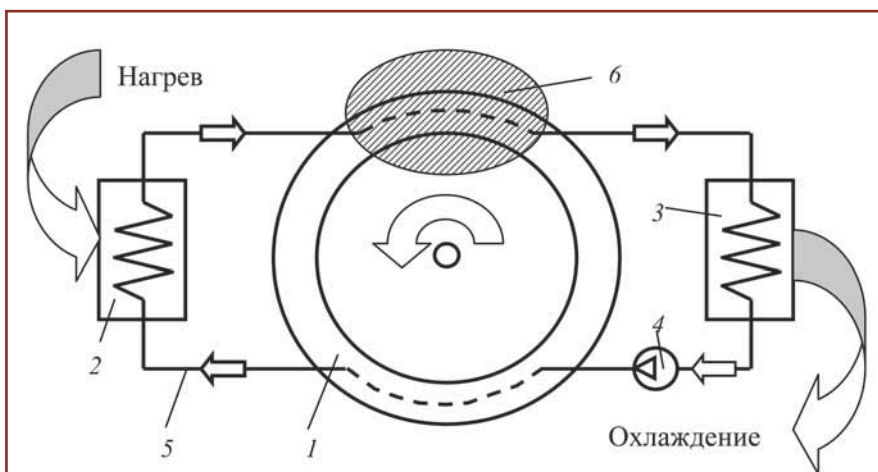


Рис. 1. Схема магнитокалорического двигателя Стейерта:

1 – ротор из магнитного материала; 2 – теплообменник нагрева; 3 – теплообменник охлаждения; 4 – жидкостный насос; 5 – циркуляционный контур; 6 – зона сильного магнитного поля

Таблица 1

**Технические характеристики магнитокалорических двигателей с КПД 60...95 %**

Двигатель	Температура нагрева теплоносителя в теплообменнике, °С	$n$ , мин <sup>-1</sup>	Размеры ротора, мм	Мощность на валу, кВт
Для наземного транспорта	150	180	2000×2000×500	750
Для электростанции	90	120	2000×2000×1000	1630

**Примечание.** Температура охлаждения теплоносителя после теплообменника составляет 25 °С.

взаимодействия. Таким образом, периодически нагревая и охлаждая магнитный материал, можно заставить его притягиваться или не притягиваться к магнитам, а, следовательно, перемещаться в пространстве и совершать механическую работу.

Впервые идея такого двигателя (рис. 1) была предложена американским исследователем Стейертом в 1978 г. [1]. В последующие годы в России, США, Франции, Японии и Китае были созданы демонстрационные и экспериментальные образцы магнитокалорических двигателей

(МКД), на практике подтвердившие правильность идеи.

Работает МКД следующим образом. В циркуляционном контуре 5 насосом 4 прокачивается жидкий теплоноситель в направлении, показанном стрелками. В теплообменнике нагрева 2 теплоноситель нагревается за счет теплоты сгорания топлива. Далее теплоноситель поступает в часть 6 ротора 1 из магнитного материала. Эта часть находится в сильном магнитном поле и в результате нагрева теряет свои магнитные свойства (уменьшается намагниченность), а также не

взаимодействует с магнитным полем. Часть ротора 1 справа от зоны 6 холоднее части слева, поэтому ее магнитные свойства сильнее, и она будет сильнее притягиваться магнитным полем. В результате ротор 1 будет поворачиваться против часовой стрелки. Вращение будет непрерывным, если часть ротора справа от зоны 6 всегда будет холоднее, чем часть ротора слева от этой зоны. Это реализуется при помощи теплообменника 3, который охлаждается окружающим воздухом или заборной водой.

Описанный двигатель не требует специального стартера, он запускается после воспламенения топлива и включения насоса 4. Увеличить мощность МКД (практически без увеличения габаритов и массы) и исключить постоянно работающий насос можно путем использования схемы многозаходного двигателя (рис. 2).

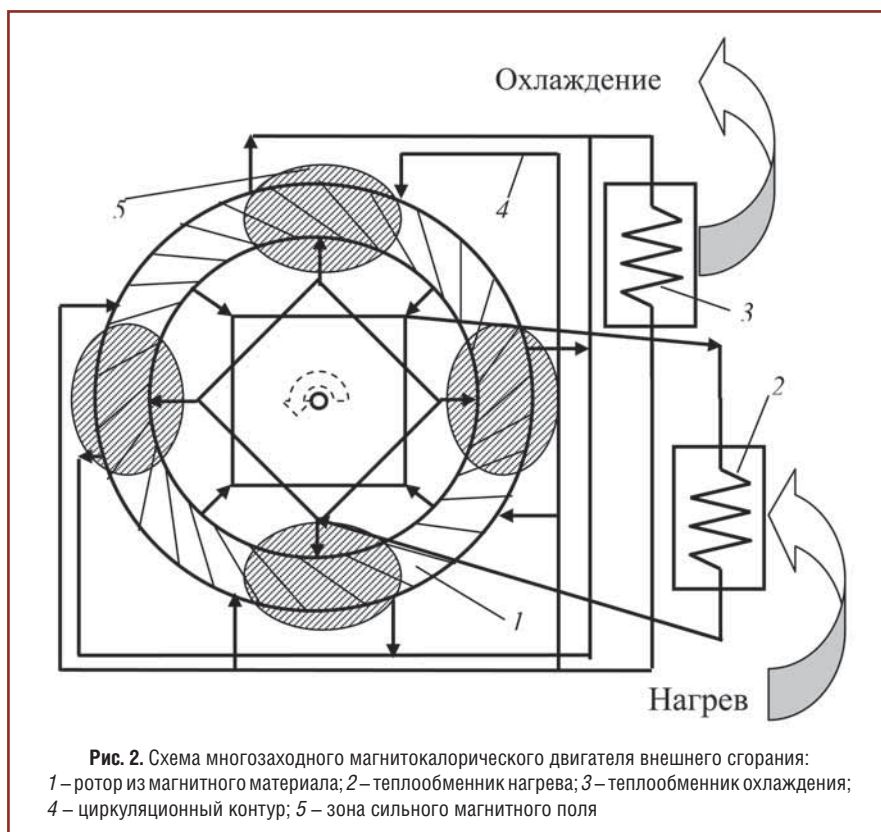
Эта схема имеет два существенных отличия от приведенной на рис. 1:

- каналы в роторе 1 выполнены наклонно, как в турбонасосе, что позволяет прокачивать теплоноситель без внешнего жидкостного насоса;

- ротор 1 имеет не одну, а четыре (может быть и больше) зоны 5 сильного магнитного поля, что позволяет с того же ротора снимать вчетверо большую мощность; соответственно увеличивается число коммуникационных трубопроводов циркуляционного контура.

Первые оценки МКД внешнего сгорания были сделаны американским исследователем Д.Соломоном в 1989 г. [2]. Он рассмотрел две конструкции таких двигателей в соответствии со схемой на рис. 1 для мощного наземного транспорта и для электростанций средней мощности. Их технические характеристики приведены в табл. 1.

МКД имеют очень высокие характеристики, тем не менее они не





нашли практического применения. Это связано с тем, что при воздушном охлаждении получить на входе в ротор температуру 25 °С можно при температуре окружающего воздуха 5...10 °С (из-за неидеальности теплообмена в охлаждающем теплообменнике). При более высоких температурах такие характеристики, как мощность и КПД, значительно уменьшаются, что связано с ухудшением магнитных свойств материалов ротора при повышении температуры.

Так как практически единственный материал, используемый для роторов МКД внешнего сгорания, – это редкоземельный металл гадолиний (Gd), его сплавы и

соединения, имеющие температуры магнитного фазового перехода 19...21 °С [3], то оптимальная температура теплоносителя на входе в ротор составляет 15...25 °С. Если температура ниже оптимальной, то это легко компенсируется уменьшением интенсивности теплообмена (ухудшить теплообмен намного легче, чем улучшить) или при помощи системы термостатирования, как это делается в двигателях внутреннего сгорания. При температурах выше оптимальной невозможно достигнуть высоких КПД и мощности МКД.

Следовательно, в настоящее время применение МКД внешнего сгорания в наземном транспорте и на электростанциях нецелесооб-

разно (исключение могут составить только районы Крайнего Севера или Антарктиды).

Совершенно иная ситуация возникает при использовании МКД на водном транспорте. В период навигации на реках Российской Федерации температура воды выше 25 °С поднимается только на южных участках некоторых судоходных рек. На подавляющем большинстве речных маршрутов температура воды ниже. Как известно, водяное охлаждение намного эффективнее воздушного, и при прочих равных условиях можно получить разность температур между забортной водой и теплоносителем на входе в ротор 1...3 °С.

Таблица 2

**Эксплуатационно-технические характеристики серийных речных судов, находящихся в эксплуатации в Обь-Иртышском бассейне**

Характеристика	Суда				
	1	2	3	4	5
	Беломорский-23	СТ-314	Чернышевский	РТ-722	РТ-771
Проект судна	1000/800	912М	646	1741А	1741А
Тип судна	Сухогрузный	Сухогрузный	Пассажирский	Буксир-толкач	Буксир-толкач
Главный двигатель	8NVD36А	6 ЧНСР 18/22	6NVD48	6 ЧНСР 18/22-315	6NVD26А-3
Номинальная мощность главного двигателя, л.с./кВт	400/295	225/165	400/295	315/230	370/270
Расход топлива, кг/ч	132	77	145	110	120
Габариты главного двигателя, мм	4485×2462×1520	3400×1700×870	4870×2769×1305	3400×1700×870	3625×1732×990

**Примечание.** Суда имеют два главных двигателя, КПД которых составляет 45...55 %.

Таблица 3

**Характеристики магнитокалорических двигателей внешнего сгорания**

Характеристики	Суда (см. табл. 2)				
	1	2	3	4	5
Номинальная мощность, л.с./кВт	400/295	225/165	400/295	315/230	370/270
Размеры ротора, мм	1000×1000×80	550×550×80	1000×1000×80	800×800×80	900×900×80
Габариты двигателя без теплообменных аппаратов и коммуникаций, мм	1200×1200×500	750×750×500	1200×1200×500	1000×1000×500	1100×1100×500ё
Расход топлива судном с двумя МКД внешнего сгорания, кг/ч	90	52	98	75	80

**Примечание.** Номинальная частота вращения вала 180 мин<sup>-1</sup>, температура нагретого теплоносителя на входе в ротор 150 °С, а охлажденного 25 °С.

Рассмотрим характеристики МКД внешнего сгорания на конкретных примерах (табл. 2). Для судов, приведенных в табл. 2, в соответствии со схемой (см. рис. 2) рассчитаны характеристики МКД внешнего сгорания (табл. 3). Следует отметить, что характеристики приводятся по средним расчетным значениям. Реальные характеристики МКД внешнего сгорания могут отличаться на 10...20 %.

Как видно из табл. 2 и 3, МКД внешнего сгорания имеют целый ряд преимуществ в сравнении с дизельными. Они имеют меньшие габаритные характеристики, более высокий КПД (70...80 %), что сказывается на расходе топлива, а также меньшую трудоемкость их изготовления. МКД внешнего сгорания содержат в сотни раз меньше деталей и узлов, их ремонтные и регламентные работы сводятся к замене подшипников, проверке на герметичность циркуляционного контура и устранению течей.

Таким образом, применение МКД внешнего сгорания на речных судах позволяет уменьшить как первоначальные затраты, так и эксплуатационные расходы. Наибольший экономический эффект может быть достигнут при использовании в качестве топлива природного газа, который стоит значительно дешевле дизельного топлива.

Основной узел МКД внешнего сгорания – ротор – выполняется в виде обода с системой каналов для эффективного теплообмена с теплоносителем. Для уменьшения перетечек теплоносителя внутри двигателя точность изготовления ротора должна быть достаточно высокой: осевые и радиальные биения не должны превышать нескольких микрометров. Соответствующие требования предъявляются к подшипникам и некоторым корпусным деталям.

Уплотнения между ротором и коллекторами выполняются бесконтактными щелевыми для исключения трения и износа как ротора, так и коллекторов.

Слабое место МКД внешнего сгорания – теплообменники нагрева, в которых теплоноситель нагревается открытым пламенем от горелок. Для того, чтобы ресурс этих теплообменников мог достичь сотен тысяч часов, их необходимо изготавливать из нержавеющей жаропрочных сталей, а теплообменники, контактирующие с морской водой, – из титановых сплавов.

К теплоносителю циркуляционного контура предъявляется целый ряд специфических требований: высокая температура кипения (более 220 °С), низкая температура замерзания (менее –80 °С), низкие вязкость в широком диапазоне температур и химическая активность к конструкционным материалам двигателя, длительная стабильность свойств. Большое влияние на характеристики двигателя имеют теплопроводность и теплоемкость теплоносителя. В качестве теплоносителя может использоваться целый ряд жидкостей, таких как гликолевый эфир, борсодержащие полиэферы и кремнеорганические жидкости.

С точки зрения эксплуатации МКД внешнего сгорания имеют ряд особенностей. Первая связана с внешним сгоранием топлива, отличающимся по технологии от процессов внутреннего сгорания. С другой стороны, процессы внешнего сгорания хорошо отработаны и автоматизированы в различных областях техники, например, в котельных и на электростанциях. Внешнее сгорание топлива, несмотря на ряд преимуществ, имеет и недостаток, связанный с инерционностью тепловых процессов, что приводит к замедленной реакции

мощности на изменение подачи топлива в сравнении с дизельными двигателями. При движении судна этот недостаток практически незаметен, но при маневрировании следует учитывать инерционность двигателя и использовать редукторы или вариаторы.

Вторая особенность МКД внешнего сгорания – сравнительно низкая частота вращения выходного вала. Эта особенность скорее положительная, чем отрицательная, хотя и требует применения других редукторов, чем для дизельных двигателей.

Третья особенность уже отмечалась – это значительное сокращение ремонтных и регламентных работ.

Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания экономически выгодны как по первоначальным, так и по эксплуатационным затратам, экологически безопасны, допускают использование различных видов топлива. В настоящее время магнитокалорические двигатели внешнего сгорания имеют только одну область рационального применения – на судах типа «река» и «река-море» на территории Российской Федерации.

## Литература

1. **Steyert W.A.** Stirling-cycle rotation magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature // J. Appl. Phys. – 1978. – № 49 (3). – P. 1216-1226.
2. **Solomon D.** Thermomagnetic mechanical heat engines // J. Appl. Phys. – 1989. – № 65 (9). – P. 3687-3693.
3. **Карагусов В.И., Карагузова Е.Е.** Создание баз данных теплофизических свойств редкоземельных материалов // Вестник Международной академии холода. – 2000. – № 3. – С. 32-33.

## Комплексная очистка природного газа для получения СПГ

**Г.С. Широкова,**

технический директор ООО «Газсертэк»,

**М.В. Елистратов,**

главный специалист ООО «Газсертэк», к.т.н.

В России становится перспективным производство сжиженного природного газа (СПГ) для газоснабжения населения и в качестве автомобильного топлива, которое отличается относительно невысокой производительностью установок по производству СПГ, их расположением вблизи магистральных газопроводов (МГ) природного газа с его использованием в качестве сырьевого газа. В настоящее время отсутствуют технические решения по комплексной очистке газа из МГ перед сжижением. Для подготовки газа предлагается комплекс взаимосвязанных технологических процессов, включающих сепарацию, рекуперативный теплообмен, очистку газа от ртути, сернистых соединений, кислорода, диоксида углерода, осушку газа, которые используются в установках по очистке природного газа для получения СПГ.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, сжижение, подготовка газа, очистка от ртути, очистка от сернистых соединений, очистка от кислорода, очистка от диоксида углерода, осушка.

## Complex natural gas treatment for LNG production

**G.S. Shirokova, M.V. Yelistratov**

LNG production for natural gas supply to small residential places and as motor fuel becomes prospective in Russia. Use of small scale facilities located near main gas pipelines and use of pipeline natural gas as feed gas will be typical. At present, there is an absence of ready technical solutions for complex gas pre-treatment prior to liquefaction. A complex of interdependent processes including separation, recuperative heat exchange, mercury removal, desulfurization, oxygen removal, carbon dioxide removal, and dehydration is offered for use in gas treatment units.

**Keywords:** liquefied natural gas (LNG), liquefaction, gas treatment, mercury removal, desulfurization, oxygen removal, carbon dioxide removal, dehydration.

**В** России вопрос получения СПГ с каждым годом становится все более актуальным как перспективное направление переработки и транспортировки природного газа. Наиболее масштабное производство СПГ предлагается при разработке шельфовых газовых и нефтяных

месторождений Крайнего Севера и Дальнего Востока. При утилизации попутного нефтяного газа на промыслах, значительно удаленных от газотранспортной системы или в случае ограничения доступа к ней, также рассматривается возможность производства СПГ. Газификация

значительной части малых населенных пунктов с использованием СПГ оценена как экономически более эффективная в сравнении с газопроводным способом транспортировки газа. Кроме того, в течение многих лет продолжают программы по перспективному использованию СПГ на автотранспорте.

Производство СПГ при его использовании для газоснабжения населения и в качестве автомобильного топлива в российских условиях отличается относительно невысокой производительностью установок, их расположением вблизи магистральных газопроводов природного газа и его использованием в качестве сырьевого газа. В ближайшее десятилетие потребность в малотоннажных установках производства СПГ может исчисляться десятками с производительностью по сырьевому газу на уровне 2...40 тыс. м<sup>3</sup>/ч (17...336 млн м<sup>3</sup>/год при режиме работы установки 8,4 тыс. ч/год).

Блочно-комплектные установки сжижения природного газа предлагаются различными компаниями. К газу, предназначенному для сжижения, предъявляются более жесткие требования по содержанию примесей в сравнении с требованиями к магистральному газу по ОСТ 51.40-93 или к газу для промышленного потребления по ГОСТ 5542-87. При этом установка подготовки газа к сжижению в большинстве случаев не включается компаниями-производителями в комплект поставки оборудования для сжижения газа, и обеспечение требуемой спецификации сжижаемого газа становится дополнительной задачей для заказчика. В настоящее время в России технических решений по комплексным установкам подготовки природного газа из МГ к сжижению пока еще недостаточно. Практически отсутствуют публикации, в которых была бы проанализирована эта задача в отношении исходных данных и путей решения.

Российские нормативные документы, относящиеся к производству и использованию СПГ, не являются полными и согласованными по

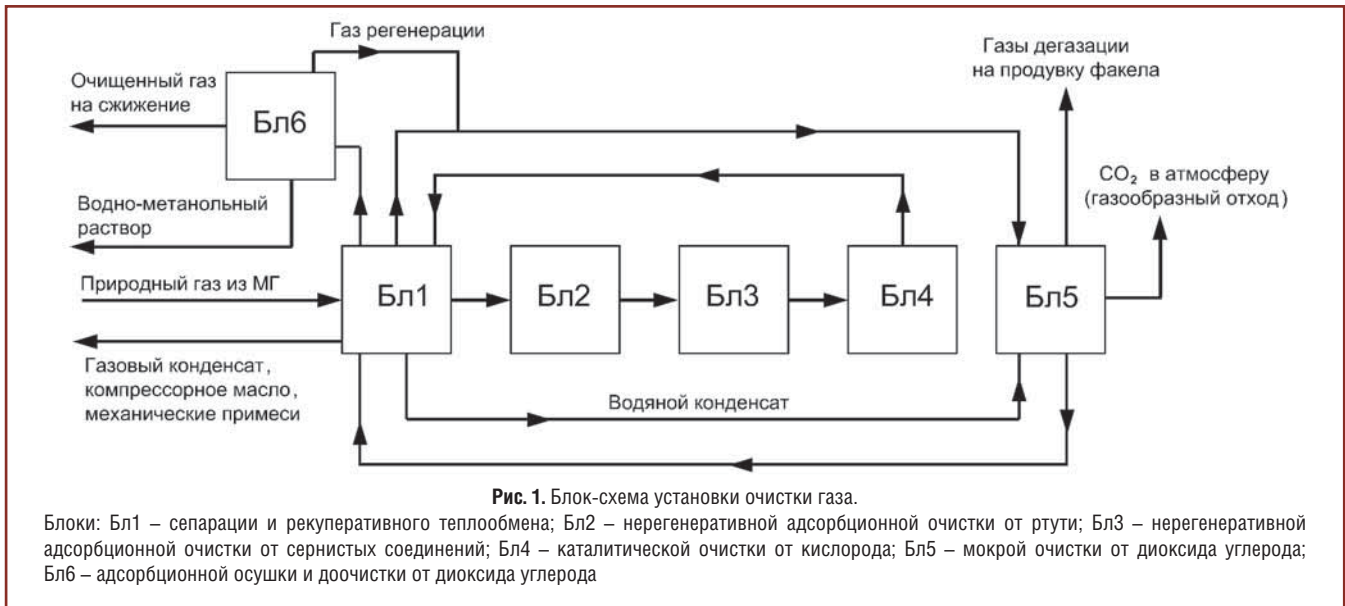


Рис. 1. Блок-схема установки очистки газа.

Блоки: Бл1 – сепарации и рекуперативного теплообмена; Бл2 – нерегенеративной адсорбционной очистки от ртути; Бл3 – нерегенеративной адсорбционной очистки от сернистых соединений; Бл4 – каталитической очистки от кислорода; Бл5 – мокрой очистки от диоксида углерода; Бл6 – адсорбционной осушки и доочистки от диоксида углерода

требованиям к качеству СПГ и глубине очистки газа перед сжижением, что также вносит вклад в отсутствие единых четких требований к глубине очистки газа перед сжижением.

Рассмотрим российские условия подготовки природного газа, соответствующего качеству магистрального газа, для получения СПГ. В основном для магистрального газа характерны давление 3,3...7,5 МПа, температура от -5 до 20 °С. По своему качеству газ должен соответствовать требованиям ОСТ 51.40-93 «Газы горючие природные, поставляемые и транспортируемые по магистральным газопроводам. Технические условия». Возможное содержание удаляемых компонентов в сырьевом газе и типичное требуемое содержание в подготовленном газе представлено в табл. 1.

Технологические процессы, используемые в установке подготовки сырьевого газа, в основном относятся к процессам тонкой очистки, которые должны рассматриваться как комплекс взаимосвязанных технических решений. Для подготовки природного газа к сжижению были выбраны процессы и разработана блок-схема установки (рис. 1).

В Бл1 осуществляется сепарация сырьевого газа и газа, подготовленного для осушки, а также рекуперация теплоты газовых потоков (рис. 2).

В транспортируемом магистральном газе обычно присутствуют механические примеси (продукты коррозии трубопровода) и компрессорное масло, в котором по равновесию растворяются тяжелые углеводородные компоненты газа, вследствие чего вся жидкость или ее углеводородная часть, как правило, представляет собой загрязненную мехпримесями смесь компрессорного масла и газового конденсата. Также в газе может содержаться жидкий концентрированный гликоль, унесенный из установок подготовки газа. Поэтому на ее входе предусмотрена тонкая механическая сепарация сырьевого газа.

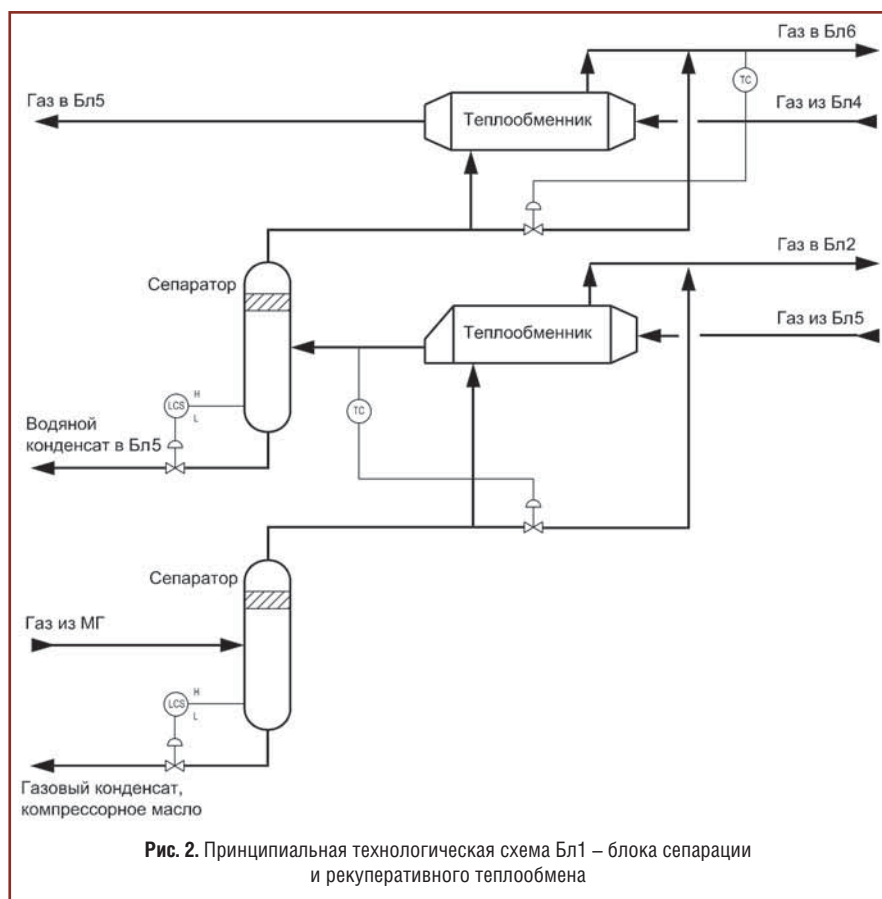
Рекуперация теплоты в теплообменниках имеет двойное назначение в каждом из двух теплообменников Бл1. Повышение температуры

отсепарированного сырьевого газа, подаваемого последовательно в Бл2 и Бл3, обеспечивает благоприятные условия для адсорбции, то есть пониженную относительную влажность газа и недонасыщение газа тяжелыми углеводородами и гликолями при рабочих условиях. Одновременно охлаждается газ из блока мокрой очистки Бл5, который насыщен водой при температуре 35...45 °С. За счет охлаждения этого газа на 15...25 °С с последующей сепарацией сконденсированной воды полное влагосодержание газа, поступающего на осушку в Бл6, снижается на 50...70 %, что обеспечивает улучшение технико-экономических показателей блока осушки за счет уменьшения требуемого объема адсорбента, массы аппаратов и затрат на регенерацию в Бл6.

Таблица 1

Примеси	Максимальное содержание	
	в газе из МГ	в сжижаемом газе
Сероводород, ppm	14	2...5
Меркаптановая сера, мг/м <sup>3</sup>	36	10...30
Сера в составе серооксида углерода, мг/м <sup>3</sup>	50 *	10...30
Диоксид углерода, ppm	40 000 **	20...200
Кислород, ppm	10 000	20...200
Вода, ppm	136 ***	0,1...1
Ртуть, г/м <sup>3</sup>	40 000 ****	10

Примечания: \* не нормируется ОСТ 51.40-93; \*\* расчетное значение по низшей теплоте сгорания газа; \*\*\* расчетное значение, соответствующее точке росы по влаге при температуре -3 °С и давлении 4,0 МПа; \*\*\*\* примерное максимальное паровое содержание ртути в газе европейских МГ.



Отделенная сконденсированная вода возвращается в блок мокрой очистки Бл5. Отсепарированный газ насыщен водой при температуре сепарации, и перед подачей на адсорбционную осушку и очистку в Бл6 этот газ нагревают с целью защиты адсорбента от капельной влаги. Нагрев газа проводят на 7...12 °С с одновременным охлаждением газа, поступающего из Бл4

каталитической очистки от кислорода на мокрую очистку в Бл5. Снижение температуры газа, подаваемого в Бл5, осуществляется без использования воздушного охлаждения и улучшает условия процесса мокрой очистки газа.

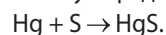
В Бл2 осуществляется очистка газа от ртути, в Бл3 – тонкая очистка газа от сернистых компонентов –

сероводорода, меркаптанов и в некоторых случаях от серооксида углерода (рис. 3).

Ртуть вызывает коррозию, повышает хрупкость алюминиевых сплавов, применяемых в теплообменном оборудовании сжижения газа, отравляет платиновые, палладиевые, родиевые и другие катализаторы, используемые для очистки газа от кислорода. Поэтому очистку газа от ртути наиболее целесообразно проводить первой в последовательности процессов очистки.

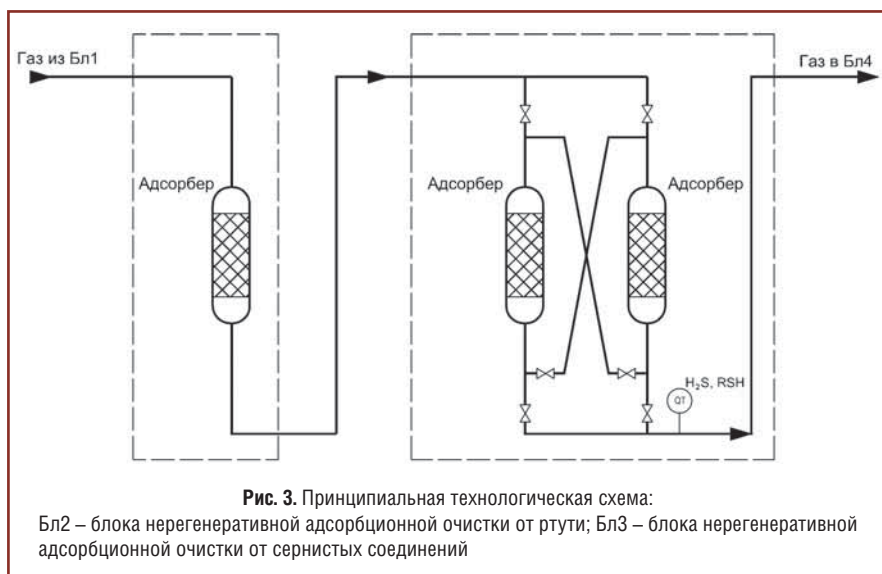
При малой производительности установок и относительно низком содержании ртути в газе, что характерно для случаев очистки газа из МГ, традиционно применяют нерегенеративную очистку, при которой ртуть поглощается адсорбентом с последующим ее химическим взаимодействием со специально подобранными импрегнированными в адсорбенте составляющими, селективно химически активными по отношению к ртути. После насыщения адсорбента ртутью его заменяют.

В качестве адсорбента может быть использован гранулированный активированный уголь, импрегнированный серой – например, уголь марки HGR производства компании Calgon Carbon. В таком случае очистка от ртути происходит за счет необратимой реакции ртути с серой с образованием сульфида ртути:



Так как активным веществом для удаления ртути является сера, то содержание в газе сернистых соединений практически не влияет на емкость адсорбента по ртути.

Массовая доля серы в свежем адсорбенте HGR составляет не менее 10 %, и в условиях сухого и чистого углеводородного газа (без высокомолекулярных и полярных примесей) массовая емкость адсорбента HGR по ртути составляет до 20 %. Практика показывает, что из-за присутствия в очищаемом газе в паровом виде тяжелых углеводородов, воды и других примесей целесообразно ориентироваться на массовую емкость адсорбента по ртути не более 2...3 %.



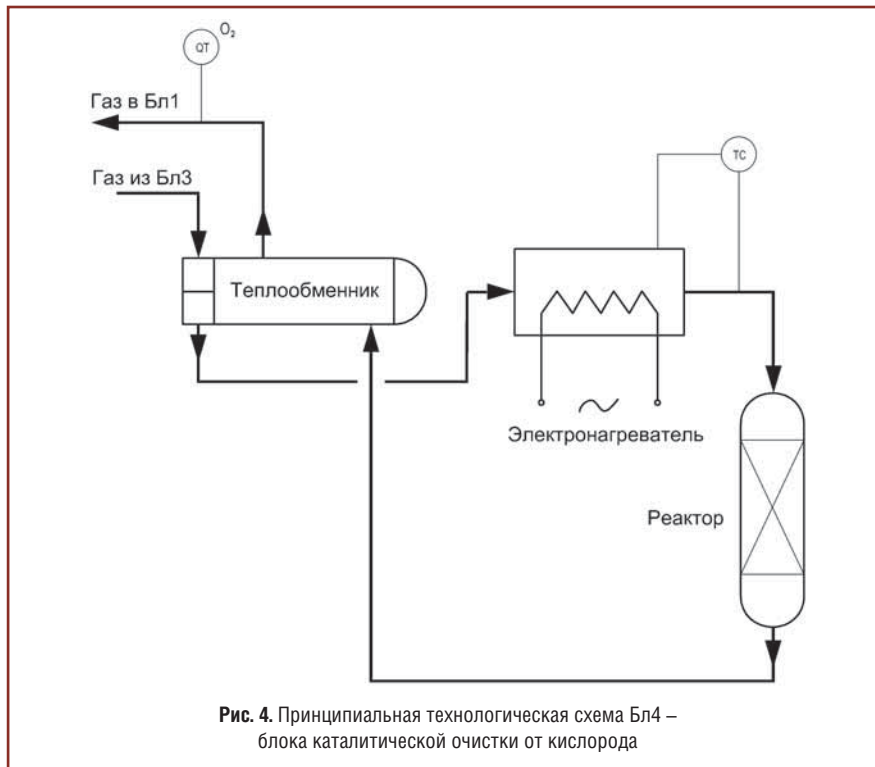
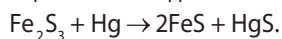


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема Бл4 – блока каталитической очистки от кислорода

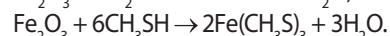
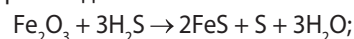
Также для нерегенеративной очистки от ртути используют адсорбенты на основе оксида алюминия, импрегнированного сульфидами металлов (железо, медь, цинк). Примерами адсорбентов такого типа являются CMG 271 и CMG 273 производства компании Axens, PURASPEC 1163, 5158 и 5159 производства компании Johnson Matthey. По показателям работы эти адсорбенты сопоставимы с активированным углем. В адсорбентах этого типа происходит необратимая реакция ртути с сульфидом металла с образованием сульфида ртути и другой формы сульфида металла. Например, в случае сульфида железа реакция имеет вид:



В Бл3 осуществляется тонкая очистка газа от сернистых компонентов (сероводород, меркаптаны и в некоторых случаях серооксид углерода) в процессе нерегенеративной адсорбции. Обычно используют двухадсорберную схему с переключаемой последовательностью аппаратов. В такой схеме адсорберы включены последовательно, и вторым по ходу газа работает тот аппарат, в который загружен свежий адсорбент. Это обеспечивает как возможность

замены адсорбента в первом по ходу газа адсорбере (при полной отработке материала) без прерывания очистки, так и наиболее полное использование емкости адсорбента по извлекаемым компонентам.

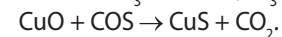
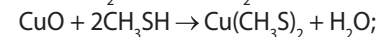
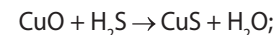
Для очистки газа только от сероводорода и легких меркаптанов возможно применение твердого поглотителя марки Sulfatreat Select HC, в котором происходят необратимые реакции этих веществ с оксидами железа в составе адсорбента с образованием элементарной серы, сульфида и меркаптида железа:



Аналогичные по свойствам адсорбенты с оксидами металлов (железо, марганец, цинк) предлагаются и другими производителями (Merichem, Unicat Catalyst Technologies, Johnson Matthey).

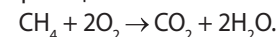
При необходимости очистки газа дополнительно от серооксида углерода в паре адсорберов может быть применен материал для поглощения всех сернистых компонентов, подлежащих удалению. Примером такого адсорбента является активированный уголь SOLCARB C3 (производства компании Calgon Carbon),

импрегнированный оксидами меди, образующими сульфид и меркапид меди в реакциях с сернистыми компонентами:



Очистка газа от кислорода осуществляется в Бл4 (рис. 4).

В данном случае целесообразно применение наиболее простого, хотя и не самого энергетически выгодного, прямого окисления углеводородов газа кислородом, содержащимся в газе, до диоксида углерода и воды при температуре 300...320 °С в насыпном слое катализатора. Для метана эта реакция записывается как

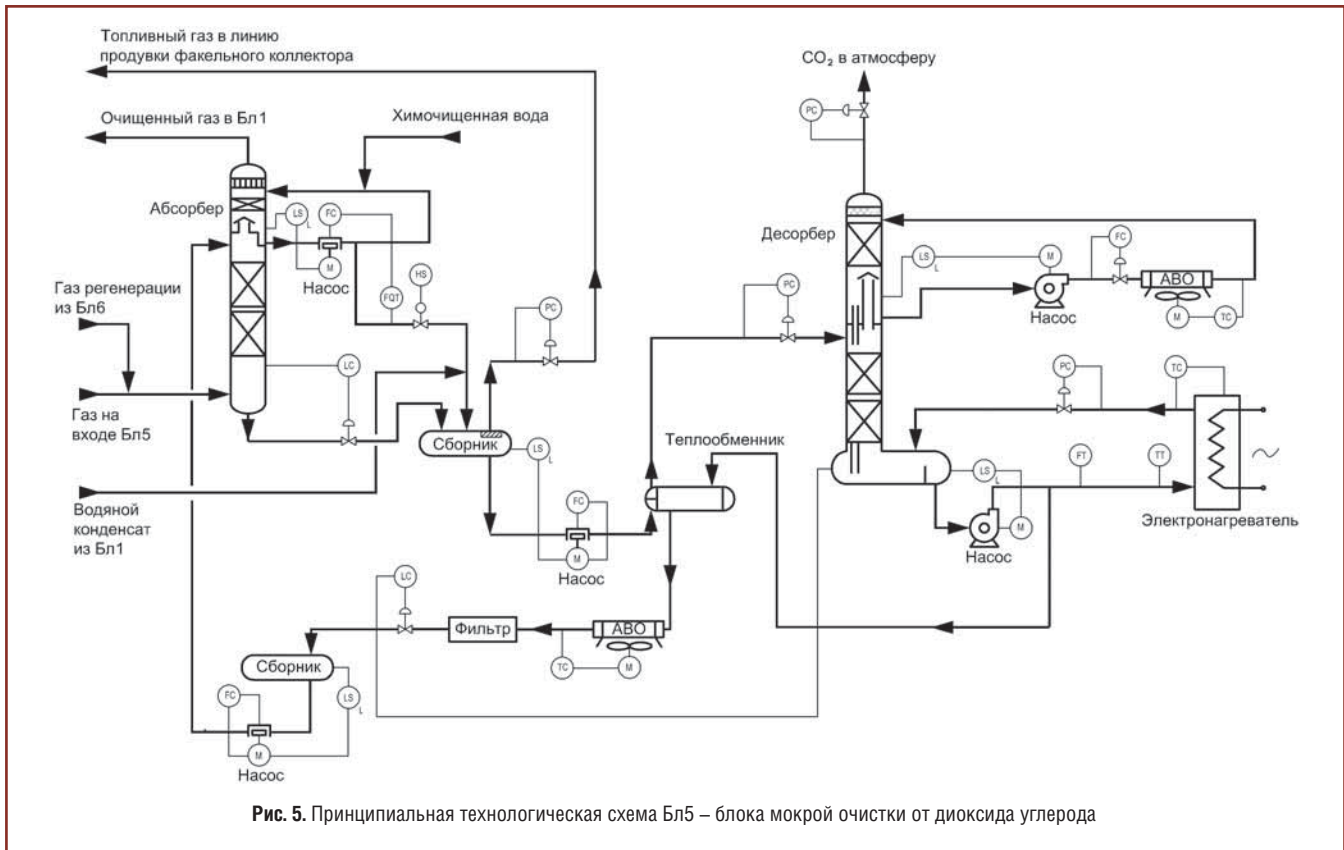


В реакторе может быть использован палладиевый катализатор OR-35 производства компании Unicat Catalyst Technologies или аналогичные палладиевые или платиновые катализаторы производства BASF или Johnson Matthey. Обычно гарантированный срок службы катализатора составляет 3 года при условии отсутствия в газе сернистых компонентов, которые, негативно воздействуя на катализатор, снижают срок его службы.

Для получения требуемой температуры газа в представленной схеме использован электрический нагрев газа с рекуперацией тепла газа.

Для мокрой очистки газа от диоксида углерода могут быть использованы аминовый или щелочной способы. Для большинства возможных случаев очистки газа из МГ характерны отсутствие возможностей по утилизации стоков щелочной очистки газа и высокие затраты на щелочь и воду, вследствие чего аминовый способ оказывается более предпочтительным (рис. 5).

По совокупности технико-экономических и эксплуатационных показателей применение раствора ДЭА является предпочтительным для маломощных установок подготовки газа. Для очистки газа в условиях центральных и южных регионов России перед сжижением рациональным является использование очистки газа в



Бл5 с применением ДЭА до остаточного содержания  $\text{CO}_2$  40...100 ppm (в зависимости от периода года) с доочисткой газа в адсорбционном процессе в Бл6 до требуемого более

низкого содержания  $\text{CO}_2$  (например, 20 ppm).  
В представленной схеме Бл5 использован способ охлаждения парогазовой смеси (ПГС) в десорбере за счет рециркуляции и охлаждения

жидкости с целью сброса извлеченного  $\text{CO}_2$  в газообразном виде в атмосферу непосредственно с верха десорбера.

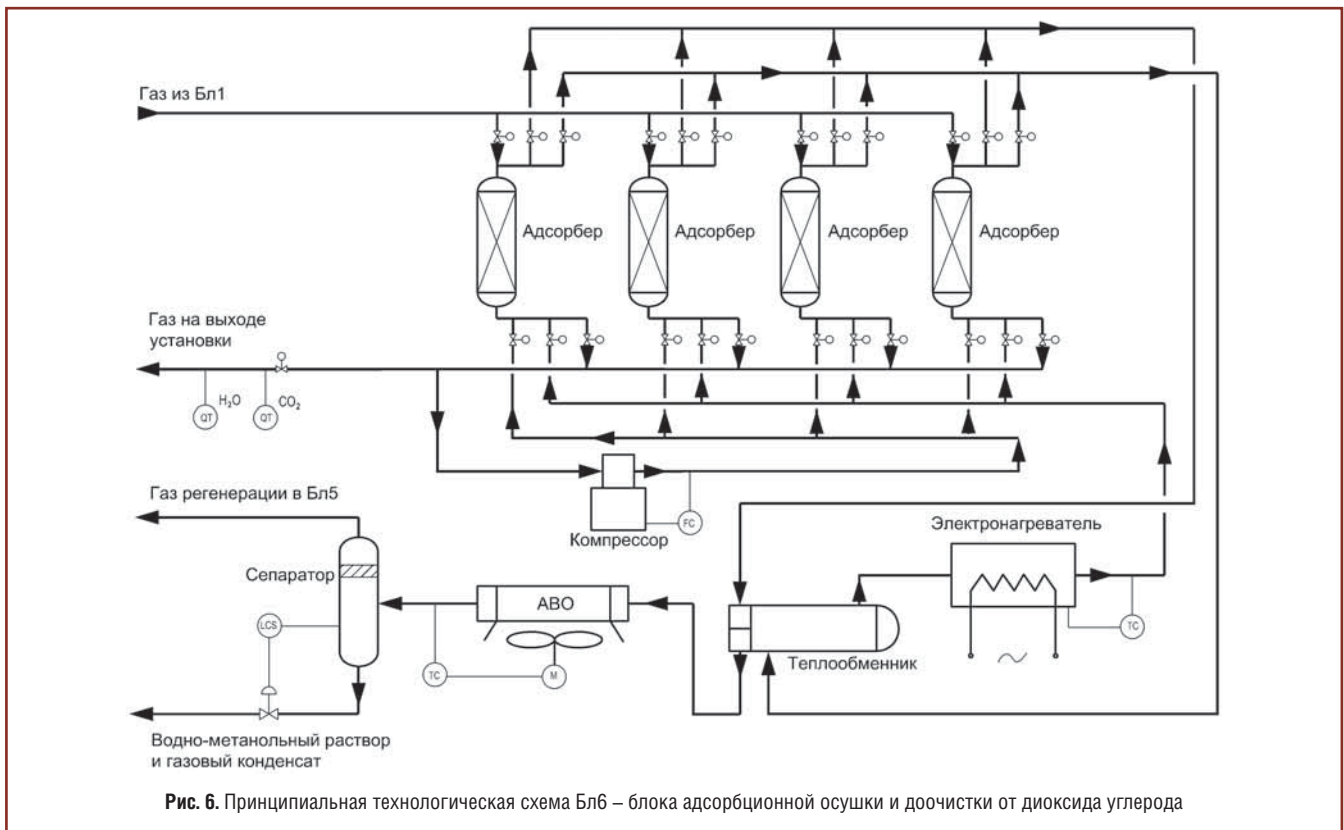


Таблица 2

Материал	Удельный расход, кг/млн м <sup>3</sup>
Активированный уголь HGR SOLCARB C3	3 1700
Катализатор OR-35	12
Цеолит NaX-БКО	23

На входе блока осушки газ всегда имеет более высокое влагосодержание по отношению к сырьевому газу. Вода образуется в результате реакций очистки газа от сернистых компонентов и от кислорода, а на выходе процесса мокрой очистки газ близок к насыщению водой. Глубокая осушка газа и доочистка от CO<sub>2</sub> осуществляются в Блб в регенеративном адсорбционном процессе (рис. 6).

В качестве адсорбента может быть использован цеолит NaX-БКО российской компании «РеалСорб» или специализированные цеолиты других производителей (BASF, UOP и др.). Обычно гарантированный срок службы цеолитов в подобных процессах осушки и очистки газа составляет 3 года.

Возможно упрощение схемы установки за счет удаления CO<sub>2</sub> из газа полностью в Блб с исключением Бл5 и компрессора газа регенерации в

Блб в случае, если допустимо полное выведение газа регенерации Блб из установки (например, для использования в качестве топливного газа на собственные нужды).

Чтобы дать представление о потреблении твердых расходных материалов для установки очистки газа, на которую подают природный газ из МГ с максимальным содержанием всех удаляемых компонентов (см. табл. 1) и процессы которой построены в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 1, в табл. 2 приведены их примерные удельные расходы.

При выборе процессов установки очистки газа необходимо учитывать возможное наличие в сырьевом газе других компонентов. Например, содержание метанола не нормируется для магистрального и подаваемого на сжижение газа, а также товарного СПГ. В российских МГ содержание в

паровом виде метанола в газе во многих случаях составляет 40...200 мг/м<sup>3</sup>, и при таком содержании метанол незначительно влияет на процессы и основные показатели работы установки очистки газа. При этом метанол практически полностью удаляется из газа в процессах очистки. Метанол будет содержаться в рециркулирующем растворе амина и рециркулирующей через верхнюю секцию десорбера воде вследствие его накопления в контурах до своего равновесного состояния. Часть поглощенного из газа метанола будет сбрасываться в атмосферу с верха регенератора в Бл5 в потоке газообразного CO<sub>2</sub>, остальная часть будет выводиться из установки в жидких отходах Блб.

Реализация представленных технических решений позволяет подготовить природный газ из МГ к сжижению в соответствии с требованиями производителей оборудования для получения СПГ на малотоннажных установках.

Комплексное техническое решение и его модификации защищены патентом РФ на полезную модель № 100919 «Установка подготовки магистрального природного газа к сжижению (варианты)».

## Вниманию подписчиков и читателей!

Редакция журнала «Транспорт на альтернативном топливе» предлагает журналы за 2008-2009 гг. по следующим ценам:

- один журнал – 200 руб.;
- подписка за год – 1000 руб.;
- подписка за 2 года – 1700 руб.

Заявки принимаются по тел.: **(495) 363-94-17**

или по e-mail: **transport.2@ngvrus.ru**





## Использование рапсового масла в топливах для дизелей

**С.Н. Девянин,**

профессор МГАУ им. В.П. Горячкина, д.т.н.,

**В.А. Марков,**

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

**Л.И. Быковская,**

аспирантка МГАУ им. В.П. Горячкина,

**В.В. Маркова,**

аспирантка МГАУ им. В.П. Горячкина

Проведен анализ возможности использования растительного масла в качестве топлива для дизелей. Показана целесообразность применения рапсового масла или метилового эфира рапсового масла для топливных целей в России в виде биодобавки к нефтяному топливу. Применение биодобавок на основе рапсового масла позволяет улучшить экологические характеристики дизеля.

**Ключевые слова:** биотопливо, дизель, топливо для дизеля, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла, смесевое биотопливо.

## Analysis of the possibility of using rapeseed oil in the fuel for diesel engines

**S.N. Devianin, V.A. Markov, L.I. Bykovskaya, V.V. Markova**

The analysis of the possibility of using vegetable oil as fuel for diesel engines. Rapeseed oil or rapeseed oil methyl ester should be used as a fuel for diesel engines in Russia, but only as bioadditives for fuel from oil. The use of bioadditives based on rapeseed oil can improve the environmental performance of diesel.

**Keywords:** biofuels, diesel engine, fuel for diesel engines, rapeseed oil, rapeseed oil methyl ester, biofuel mixture.

**В**опрос поиска топлив, альтернативных нефтяным, возник в связи с истощением нефтяных запасов и ростом дефицита нефти, которые приводят к увеличению цен на топливо, а значит и на производимую и перевозимую продукцию. Альтернативное топливо для дизелей, чтобы стать достойной заменой нефтяному, должно обладать физико-химическими свойствами, близкими к дизельному. В этом случае переход на новое топливо произойдет постепенно, без значительных изменений в конструкции дизелей, а значит без

существенных капиталовложений и достаточно быстро.

Вместе с тем выбор альтернативного топлива должен учитывать его запасы на ближайшее столетие, экологичность, энергоемкость, агрессивность и т.д. В настоящее время, когда улучшение экономических и экологических показателей дизелей при их работе на дизельном топливе нефтяного происхождения для обеспечения экологических норм требует огромных затрат и поиск альтернативного топлива становится все более актуальным, появляется необходимость

создания такого альтернативного топлива, которое отвечало бы оптимальным требованиям и в первую очередь по экологии.

Недостаток ископаемых энергоресурсов и экологическая безопасность являются основными проблемами мобильных машин. С каждым годом эти проблемы обостряются, и их решение пытаются найти в возобновляемых энергоресурсах. Активность внедрения биотоплива в развитых странах Европы, Америки и Азии обострила проблемы, связанные с его производством и использованием:

- противоречие с обеспеченностью продовольствием;
- обеспечение сырьевыми ресурсами;
- стоимость биотоплива в сравнении с нефтяным;
- эффективность использования в ДВС;
- законодательное обеспечение применения биотоплив;
- надежность работы техники и др.

В качестве сырьевой базы для обеспечения топливом дизелей рассматриваются следующие источники:

- нефть (дизельное топливо);
- растительное масло (масло, эфиры масла);
- природный газ (диметиловый эфир, синтетические топлива);
- биомасса (синтетические топлива);
- производственные и бытовые отходы (синтетические топлива);
- животные жиры (эфиры жиров) и др.

Если в развитых зарубежных странах, где наиболее остро ощущается энергетический голод, уже давно эксплуатируется техника на биотопливе и с каждым годом объемы его производства растут, то в России дальше экспериментальных испытаний дело не продвинулось. И хотя в 2005 г. появился ГОСТ 52368–2005 на дизельное топливо, допускающий применение до 5 % эфира рапсового масла (PM), отечественные производители пока разрешения на применение эфира на своей технике не дают.

Европа ориентируется на использование в качестве энергоносителя

рапсового масла, что обусловлено следующими причинами:

- высокой урожайностью маслосемян – до 40 ц/га;
- содержанием масла в семенах – до 50 %;
- соответствием переработанного рапсового масла требованиям эксплуатируемых сейчас дизелей;
- востребованностью жмыха для животноводства;
- повышением урожайности зерновых на 10-20 % при предварительном посеве рапса на тех же площадях.

Следует отметить, что при производстве рапсового масла около 60 % от переработанного урожая семян составляет рапсовый жмых, который представляет собой ценный белковый продукт. В настоящее время он используется только в качестве кормовой добавки в животноводстве и птицеводстве. Технологии его переработки и использования в качестве продуктов питания еще не разработаны. Широкое распространение этой культуры для топливных целей позволяет существенно увеличить также и производство калорийных продуктов питания для решения продовольственной проблемы.

В дизелях применяют как рапсовое масло (стандарты EN 590:2004, DIN 51605), так и метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ), отвечающего требованиям стандарта DIN EN 14 214 (ASTM D6751). Техника эксплуатируется на чистых РМ или МЭРМ, а также в смесях с дизельным топливом. Производители техники оговаривают модификации двигателей, на которых допускается использование альтернативных биотоплив. Система производства биодизеля и топливозаправок уже хорошо развита [1].

Россия пока находится в самом начале пути и вопрос технологии использования биотоплива в дизелях не решен. На некоторых предприятиях России проводятся экспериментальные работы по использованию РМ в дизелях, причем стараются обеспечить работу на одном только масле, что не оправданно по многим причинам.

Эффективная работа дизеля на топливе с другими физико-химическими свойствами, которыми обладают

растительные масла в отличие от нефтяного дизельного топлива (ДТ), не может быть обеспечена во всем диапазоне рабочих режимов без существенной переделки двигателя. Существующие дизели на ДТ дорабатывались производителями по мощностным и экономическим показателям. Для этого топлива подобраны конструктивные параметры топливной аппаратуры, форма камеры сгорания, наддув, газообмен и т.д. Поэтому применение только масла в качестве топлива приводит к ухудшению мощностных и экономических показателей.

Ухудшение процесса смесеобразования при работе дизеля только на масле приводит к затягиванию сгорания, увеличению температуры отработавших газов, перегреву двигателя, повышению тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы, выпускных клапанов и турбокомпрессора. Это снижает ресурс двигателя. Решение этих проблем требует изменений конструкции двигателя или использования растительного масла в виде смеси с ДТ.

Кроме конструктивных проблем, существует и вопрос обеспечения сырьевыми ресурсами. Если рассмотреть условия производства рапса в России, то простые расчеты показывают следующее. Посевные площади в РФ составляют около 120 млн га и, естественно, все их ежегодно задействовать под рапс нельзя. Но если даже на всех площадях включить рапс в севооборот один раз в 4 года при средней урожайности в РФ до 1,5 т/га, то можно получать ежегодно валовой сбор рапса около 45 млн т, а после отжима – около 15 млн т рапсового масла. Ежегодное потребление дизельного топлива в РФ приближается к 70 млн т. Таким образом, доля производимого РМ или МЭРМ может составлять около 20...30 % от производимого количества дизельного топлива.

Использование перспективных сортов рапса позволяет поднять урожайность семян на 70 % и содержания масла в них на 7 %, что может увеличить производство рапсового масла до 80 % и повысить соотношение РМ или МЭРМ и дизельного топлива до 50:50. Следовательно, разрабатывать массовый дизель для работы на

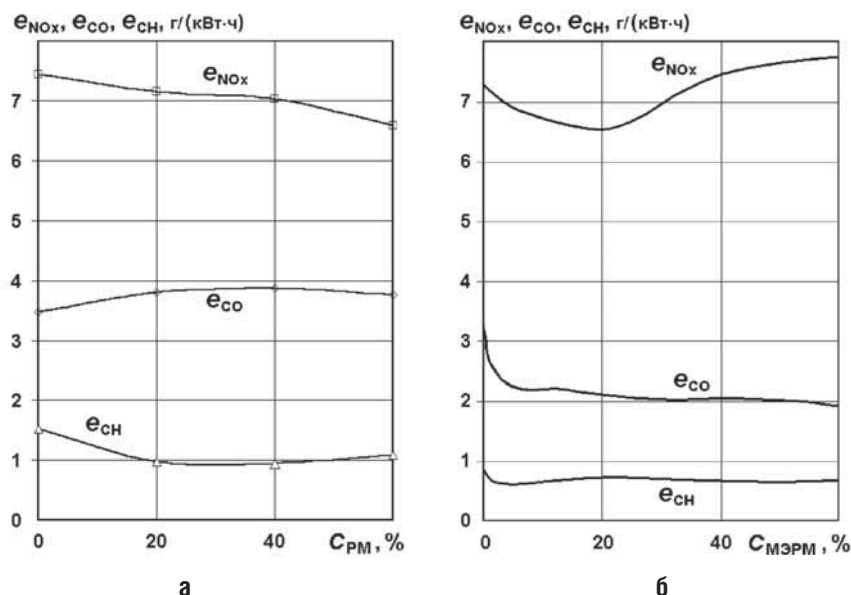
одном РМ или МЭРМ нецелесообразно. Необходимо искать компромисс в использовании топлива в виде смеси.

Стоимость топлива из рапсового масла – один из барьеров, сдерживающих его применение, в том числе и в России. В Европе доля его стоимости в цене на биодизель составляет около 60 %. Поэтому для расширения использования биодизеля важно снизить затраты на производство РМ. Среди основных факторов, позволяющих уменьшить его цену, следует отметить следующие: повышение урожайности, снижение потерь при уборке и хранении, расширение сферы использования рапсового жмыха, снижение энергозатрат при отжиме масла и увеличение общего производства рапса.

Анализ затрат производства рапсового масла показывает, что уже при урожайности 1 т/га стоимость рапсового масла с учетом реализации жмыха становится соизмеримой с ценой на дизельное топливо (23...26 руб./кг). Дальнейшее повышение урожайности приводит к увеличению прибыли производителя в случае замещения дизельного топлива маслом. При использовании МЭРМ экономическую выгоду можно получать уже при урожайности, превышающей 2...2,5 т/га. При этом анализ не учитывает экологического эффекта от использования биодобавок к топливу.

Испытания отечественных дизелей показывают, что добавка рапсового масла к дизельному топливу до 50 % без дополнительной регулировки обеспечивает их работу без снижения мощности и эффективного КПД. Выбросы нормируемых токсичных компонентов зависят от концентрации рапсового масла в топливе. Для дизелей различных марок влияние концентрации рапсового масла на токсичные составляющие в отработавших газах различно и зависит от конструкции дизеля, организации процессов смесеобразования и сгорания, режима работы и т.д. Однако для всех дизелей существенно снижается дымность при добавке растительного масла в топливо [1].

Для дизеля Д-245 [2] добавка рапсового масла к топливу до 25...40 % приводит к некоторому увеличению



**Рис. 1.** Влияние биодобавки в топливе на экологические показатели дизеля Д-245, усредненные по Правилам ЕЭК ООН № 49 ( $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH}$  – удельные выбросы оксидов азота, оксида углерода и углеводородов;  $C_{PM}$ ,  $C_{MDEPM}$  – доля РМ и МЭРМ в топливе): а – добавка РМ; б – добавка МЭРМ

мощности и крутящего момента дизеля. Повышение удельного расхода топлива пропорционально уменьшению его теплотворной способности при добавлении масла, имеющего меньшую энергоёмкость, чем дизельное топливо. Снижение дымности наиболее существенно на режиме максимального крутящего момента и эффективность снижения выше при добавке масла до 40 %.

Добавки МЭРМ оказывают аналогичное влияние на мощностные, экономические и экологические показатели дизеля [3] и приводят к снижению дымности отработавших газов на полной нагрузке. Наибольший эффект снижения наблюдается при добавке МЭРМ до 20...40 %. Уменьшение дымности при добавке МЭРМ и РМ объясняется повышением содержания кислорода в топливе, причем концентрация кислорода больше в тяжелых фракциях, которые догорают в последнюю очередь в пристеночных зонах камеры сгорания с недостатком кислорода.

По представленным графикам токсичных составляющих (рисунок), усредненных по области рабочих режимов дизеля (Правила ЕЭК ООН № 49), видно, что при добавке РМ только содержание монооксида углерода СО увеличивается, по остальным отмечается снижение вредных выбросов.

При использовании в качестве биодобавки МЭРМ выбросы монооксида углерода СО существенно уменьшаются уже при добавке метилового эфира в топливо до 5 %, и дальнейшее увеличение МЭРМ мало сказывается на снижении СО. Выбросы углеводородов СН практически не изменяются при добавке МЭРМ до 60 %. Более сложный характер изменения выбросов оксидов азота  $NO_x$ . Минимальные выбросы обеспечиваются при добавке МЭРМ 15...25 % и становятся больше, чем при работе на дизельном топливе, при добавке более 40 %.

Следует отметить, что полученный эффект от добавки РМ или МЭРМ в топливо достигнут без доводки процессов в дизеле, которые оптимизированы для работы на дизельном топливе. Биодобавка в дизельное топливо меняет его физико-химические характеристики и качество протекания процессов, при этом их оптимизация нарушается. При доведении процессов дизеля для работы на смеси с заданной концентрацией РМ или МЭРМ показатели могут быть еще более улучшены.

В заключении можно отметить следующее:

■ Рапсовое масло или его эфир как энергоноситель следует рассматривать в виде смеси с дизельным топливом как биодобавку, улучшающую

экологические характеристики дизеля.

■ Ресурсы по производству рапсового масла позволяют заместить до 50 % нефтяной составляющей в топливе для дизелей.

■ РМ и МЭРМ могут добавляться к ДТ (до 30 %) без дополнительной регулировки дизеля с сохранением его мощности и КПД, что позволяет внедрять эту технологию без переделки существующих дизелей.

■ Использование РМ и МЭРМ в качестве добавок к нефтяному топливу приводит к улучшению экологических характеристик дизеля практически по всем составляющим во всем диапазоне рабочих режимов дизеля.

## Литература

1. **Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: Изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. – 427 с.
2. **Марков В.А., Коршунов Д.А., Девянин С.Н.** Работа дизелей на растительных маслах // Грузовик &. – 2006. – № 7 – С. 33-46.
3. **Марков В.А., Зенин А.А., Девянин С.Н., Черных В.Н.** Метиловый эфир рапсового масла – новое топливо для отечественных дизелей // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 4. – С. 8-11.

## Комплексная схема производства биодизельного топлива

**В.Н. Селюков,**  
генеральный директор ОАО «Кировгипрогаз»,  
**В.А. Матанцев,**  
главный технолог ООО «НИПИ БИОТИН»

В данной статье рассматриваются вопросы производства биодизельного топлива, где в реакции этерификации одним из компонентов является метиловый спирт, получаемый непосредственно из природного газа с использованием давления газа в трубопроводе, что дает возможность снизить себестоимость получаемого биодизельного топлива.

**Ключевые слова:** производство биодизельного топлива, производство метанола, прямое окисление метана.

## Integrated Biodiesel Process Flow Diagram

V.N. Selukov, V.A. Matantsev

The matters of complex solution of biodiesel production are under examination in this article. The main element of esterification reaction is methylic alcohol prepared directly on the site from the natural gas using gas pressure in pipeline, what affords opportunity to reduce biodiesel production costs.

**Keywords:** production of biodiesel with production of methanol by direct oxidation of methane.

**Р**асширение использования биодизеля в США и странах Евросоюза происходит достаточно быстро на фоне все большего понимания необходимости замены дизельного топлива, производимого из нефти, альтернативным топливом.

Для получения биодизеля используют любые виды растительных масел – подсолнечное, рапсовое, льняное и др. Для России и европейских стран лучше всего подходит в качестве сырья рапс, так как рапсовый биодизель холодоустойчив. Кроме этого рапс, как культура, знаком нашим сельхозпроизводителям, может возделываться на очень больших территориях, а при грамотном

севообороте стать базовой культурой целых регионов Российской Федерации, поскольку, кроме получения биодизеля, эта культура может обеспечить устойчивое кормопроизводство (рапсовый шрот).

Сам процесс получения биодизеля достаточно прост. Нужно уменьшить вязкость рапсового масла, которую придает ему глицерин, связанный с эфирами масла. Задача заключается в удалении глицерина и замене его на спирт.

При использовании метилового спирта в результате реакции образуется метиловый эфир жирных кислот (биодизельное топливо). Этот процесс называется трансэтерификацией.

Из 1 т растительного масла и 111 кг метанола (в присутствии 12 кг катализатора – гидрата оксида натрия) получается приблизительно 970 кг (1100 л) биодизеля и 153 кг первичного глицерина. Применяемый в реакции трансэтерификации метиловый спирт – сильнодействующее ядовитое вещество, при хранении, транспортировании и применении которого требуются соблюдение особых мер безопасности и достаточно дорогостоящие мероприятия. Для снижения себестоимости получения биодизеля предлагается заменить привозной метанол на метанол собственного изготовления, то есть получаемый непосредственно на заводе по производству биодизеля из природного газа методом прямого окисления метана (рисунок).

По предлагаемой схеме сырьем для производства биодизеля являются рапсовое масло и природный газ. Это дает возможность сократить расходы по транспортировке и хранению метанола и как следствие снизить себестоимость биодизеля на 17 %.

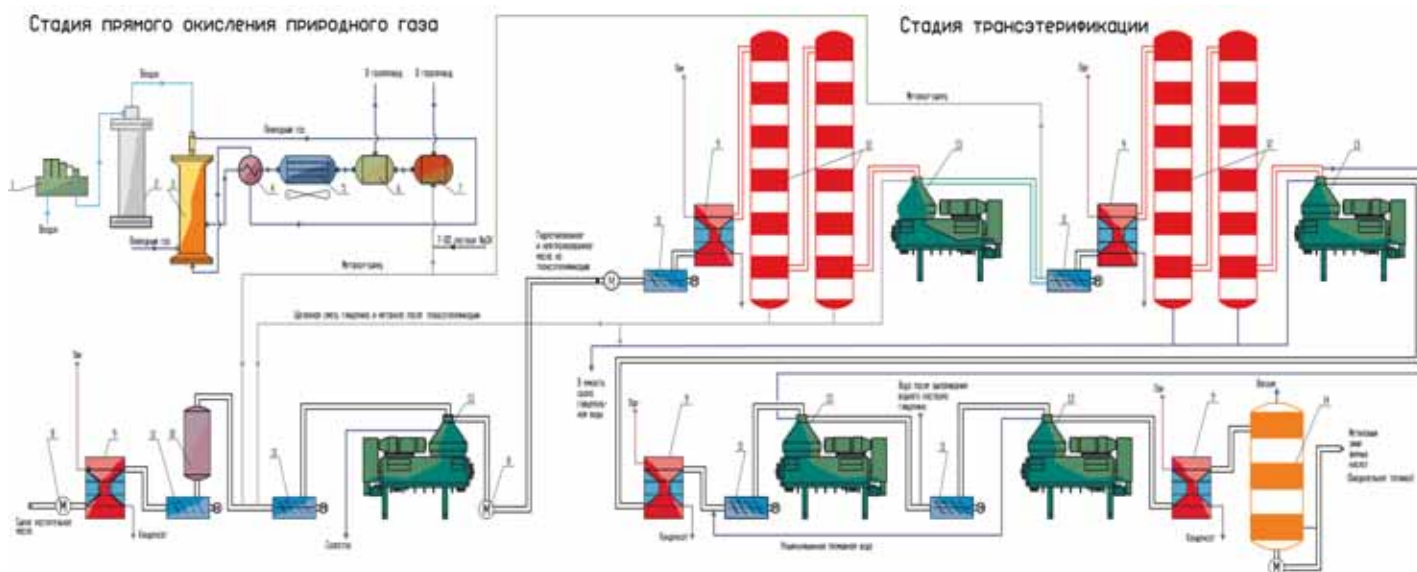
Биодизельное топливо представляет собой метиловые эфиры растительных масел (как правило, рапсового), обладающих свойствами, близкими к стандартному дизельному топливу.

Сравнительные характеристики дизельного и биодизельного топлив в соответствии с европейскими стандартами приведены в таблице.

Процесс получения биодизеля из рапсового масла и природного газа имеет несколько стадий.

### Стадия прямого окисления природного газа

Атмосферный воздух поступает во всасывающую линию компрессора, сжимается до давления 10,8 МПа, проходит фильтр для очистки от масла и далее направляется в смеситель. При температуре 320...350 °С и давлении 10 МПа в реакторе происходит



Производство биодизельного топлива из растительного масла:

1 – компрессор; 2 – фильтр; 3, 12 – реактор; 4 – теплообменник; 5 – аппарат воздушного охлаждения; 6, 13 – сепаратор; 7 – сборник; 8 – насос; 9 – подогреватель; 10 – емкость выдерживания; 11 – смеситель; 14 – колонна

образование метанола и ряда других органических соединений. После реактора реакционная газовая смесь, охлаждаемая до 100 °С, проходит трубное пространство рекуперационного теплообменника и поступает в аппарат воздушного охлаждения, где происходит охлаждение газов до 30...40 °С и конденсация из них метанольного продукта.

Далее в сепараторе выделяется жидкая фаза, которая поступает в сборник. Газовая смесь после сепаратора под давлением отводится в магистральный газопровод и смешивается с природным газом. Из

сборника метанольный продукт при давлении 0,4...0,6 МПа направляется на трансэтерификацию. В процессе окисления природного газа образуется также уксусная кислота. Для ее нейтрализации в линию метанольного продукта после сборника подается 7-10%-ный раствор гидрата оксида натрия.

### Стадия трансэтерификации

На стадии трансэтерификации происходит смешивание масла с метанолом и катализатором (гидрат оксида натрия). Избыток метанола

вводится для обеспечения полной конверсии триглицеридов в эфиры. По завершении двухстадийной реакции метанол из смеси удаляют путем сепарирования и восстановления для повторного использования. После удаления метанола в смеси присутствуют два основных компонента – метиловый эфир и глицерин. Глицерин отделяется от метиловых эфиров и используется в производстве мыла и фармацевтической промышленности. Метиловый эфир жирных кислот собирается в сборник, а затем – на склад.

Получение метанольного продукта неполным окислением природного газа непосредственно в производстве биодизеля, кроме улучшения технико-экономических показателей получения биодизеля, расширяет возможности внутреннего газового рынка.

При кооперации строительства биодизельных производств в tandemе с ГРС магистральных трубопроводных систем появляется дополнительная возможность использовать давление газа в магистральном трубопроводе и обеспечивать на местах машинно-тракторный парк сельхозпроизводителей моторным топливом.

Показатель	Дизельное топливо	Биодизельное топливо
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	860-900	883
Температура вспышки, °С	Более 101	Более 160*
Максимальная влажность, мг/кг	500	200
Кислотное число, мгОН/г	0,500	0,150
Содержание, %		
Общий глицерин	0,250	0,125
Свободный глицерин	0,020	0,002
Метанол	0,300	Менее 0,005
Фосфор, мг/кг	10	Менее 2

\* При введении присадок температура вспышки остается такой же.

## Оценка эффективности применения синтетических жидких топлив на транспортных самолетах

**В.В. Разносчиков,**  
старший научный сотрудник ЦИАМ им. П.И.Баранова, доцент, к.т.н.,  
**М.Л. Яновская,**  
младший научный сотрудник ЦИАМ им. П.И. Баранова

В статье приводятся результаты системно-химмотологического анализа возможности перевода авиации на новые синтетические жидкие топлива из ненефтяного сырья (природный газ, уголь, биомасса). Инструментом анализа является имитационная модель системы летательный аппарат – силовая установка – топливо, объектом исследования – транспортные самолеты среднего и тяжелого классов. Представлены результаты анализа транспортной эффективности и экологических показателей этих самолетов и даны рекомендации о целесообразности перевода транспортной авиации на синтетические топлива.

**Ключевые слова:** синтетическое жидкое топливо, химмотология.

## Efficiency of transport aircrafts on synthetic liquid fuels

**V.V. Raznoschikov, M. L. Yanovskaya**

There are presented the results of systematic chemmotological analysis of a capability of aircraft on new synthetic liquid fuel produced from unpetroleum raw materials (natural gas, coal, biomass). The tool of analysis is simulation model of system «Aircraft – Jet engine – Fuel» and objects of research are transport aircrafts of middle and heavy classes. The results of analysis are the fuel efficiency and ecological parameters of aircrafts and the recommendations for expediency of using synthetic fuel at transport aviation.

**Keyword:** synthetic liquid fuel, chemmotology.

**В** настоящее время переход с нефтяных топлив на синтезированные из других видов сырья, разработка прогрессивной технологии производства синтетических топлив и их рациональное применение в авиатехнике становятся весьма актуальными задачами.

Перевод авиации на альтернативные топлива является шагом революционного характера и позволяет существенно улучшить тех-

нико-экономические и экологические показатели авиатехники.

За рубежом созданы опытно-промышленные образцы синтетического реактивного топлива из природного газа, угля и биомассы, соответствующие требованиям спецификации ASTM D7566-09 на синтетическое жидкое топливо (СЖТ). В 2007 г. в Ванкувере (Канада) на Генеральной ассамблее IATA авиакомпания приняла решение в ближайшие 10 лет

добиться 10%-ной доли использования СЖТ на авиалиниях. ВВС США планируют к 2014 г. сертифицировать СЖТ для всего парка летательных аппаратов (ЛА), а к 2016 г. удовлетворить потребности ВВС в топливе за счет смесей топлива JP-8 с синтетическим топливом 50:50. Крупнейшая в Европе компания Airbus планирует к 2020 г. осуществлять эксплуатацию 30 % самолетов на СЖТ.

В России созданы первые опытные образцы углеводородных авиатоплив из биомассы и природного газа [1, 2] и выявлены их свойства. Требуется определить летно-технические характеристики (ЛТХ) самолетов, которые будут использовать такие топлива. При этом решение о переводе авиации на СЖТ требует технико-экономического обоснования, которое на предварительном этапе может дать инженерный анализ системы летательный аппарат – силовая установка – топливо (ЛА-СУ-Т).

Между элементами этой системы существуют сложные взаимно направленные связи (рис. 1). Поэтому при создании ЛА нового типа или модернизации существующего необходимо учитывать требования, предъявляемые каждым из элементов к другим элементам и к системе в целом.

### Имитационная модель системы ЛА-СУ-Т

Отчетливо выражена многодисциплинарность системы ЛА-СУ-Т и необходимость учета факторов, зависящих от применяемого топлива и влияющих на технический облик и ЛТХ системы, приводят к необходимости применения имитационной модели (ИМ) (рис. 2).

Имитационное моделирование представляет собой метод проведения на ЭВМ численных экспериментов с математическими моделями (ММ), описывающими поведение



Рис. 1. Принципиальная схема системы ЛА – топливо – эксплуатация

сложной системы в течение заданного или формируемого периода времени. Поведение компонентов сложной системы и их взаимодействие в ИМ, как правило, описываются набором алгоритмов, реализуемых на некотором языке моделирования. Имитируя реальные ситуации на модели, исследователь получает возможность оценить эффективность системы, сравнить варианты структурных схем, определить степень влияния параметров системы и начальных

условий на показатель эффективности и т.п. [3].

Переход на новое топливо может изменить не только ЛТХ, но и существенно повлиять на процесс эксплуатации самолета. На предварительном этапе оценки возможности использования топлива достаточно учесть его элементный состав, плотность  $\rho$ , низшую массовую теплоту сгорания  $H_u$  и давление насыщенных паров  $p_{н.п.}$ . Так как топливные емкости ЛА имеют фиксированный объем,

плотность топлива определяет его массу и, соответственно, влияет на ЛТХ. Последние, в свою очередь, наиболее сильно зависят от аэродинамических и объемно-массовых параметров ЛА и тягово-экономических характеристик СУ. Влияние топлива на рабочий процесс и параметры СУ (тягу  $P$  и удельный расход топлива  $C_{уд}$ ) обусловлено, в основном, тепловой сгорания топлива и теплофизическими свойствами продуктов его сгорания в воздухе. При этом топливо в значительной мере определяет облик двигателя и особенности его конструкции. Эффективность СУ существенно зависит от эксергетических возможностей топлива, то есть от возможности увеличить работу цикла двигателя.

Поскольку ЛТХ ЛА зависят, главным образом, от компоновки и аэродинамических характеристик планера и параметров СУ, можно значительно упростить проблему формализации системы ЛА – топливо – эксплуатация и перейти к системе ЛА–СУ–Т. Применяемая ИМ должна позволять рассчитывать не только тягово-экономические и габаритно-массовые характеристики СУ, но и геометрические, аэродинамические, объемно-массовые характеристики и траекторные параметры движения ЛА по типовым программам (профилям) полета, а также влияние на них свойств используемого топлива [4, 5].

В состав ИМ системы ЛА–СУ–Т входят:

- ММ ЛА для расчета геометрических, аэродинамических, объемно-массовых и летно-технических характеристик ЛА;
- ММ СУ для стендового режима и расчета высотно-скоростных (ВСХ), дроссельных (ДХ) и габаритно-массовых (ГМХ) характеристик двигателей различных схем;
- ММ топлива для расчета его свойств;

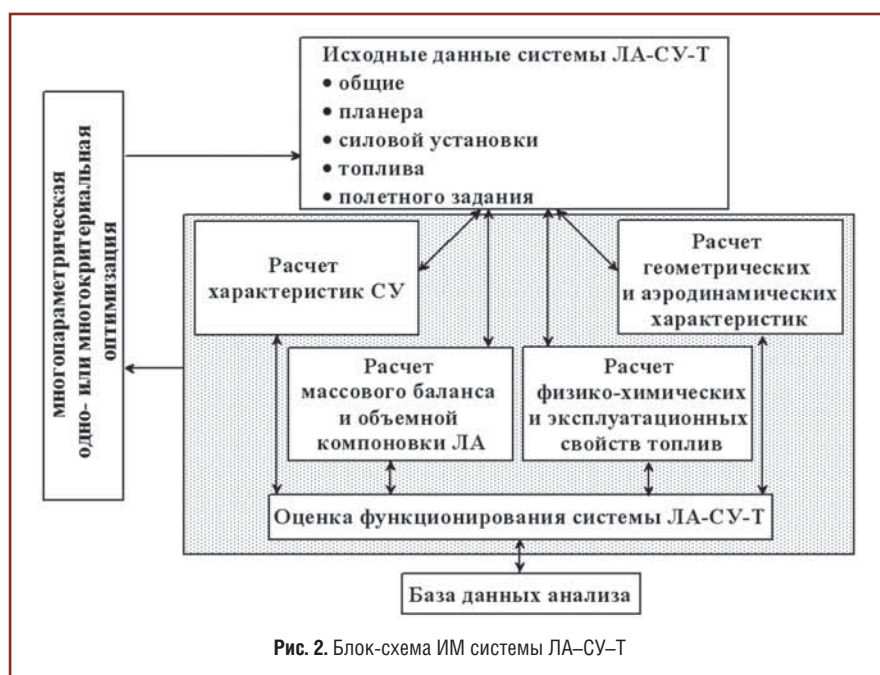


Рис. 2. Блок-схема ИМ системы ЛА–СУ–Т

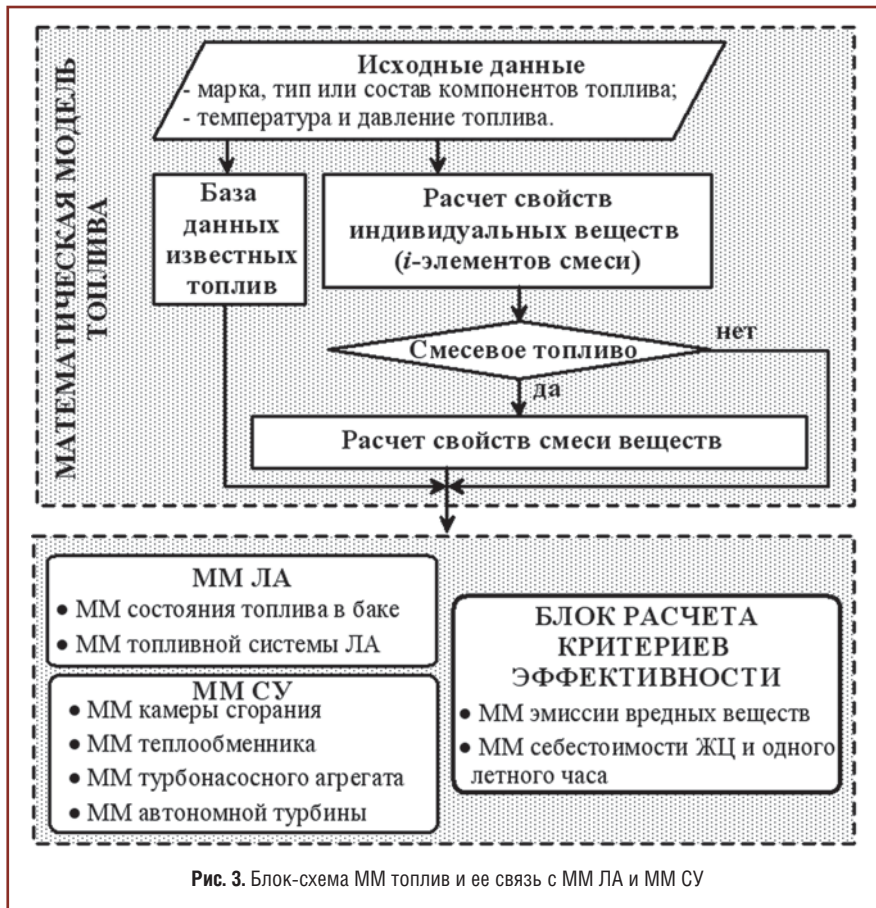


Рис. 3. Блок-схема ММ топлив и ее связь с ММ ЛА и ММ СУ

■ блок расчета критериев эффективности (КЭ) системы ЛА–СУ–Т.

Интегрированные в состав ИМ математические модели новых топлив, экономические и экологические показатели значительно расширяют возможности исследования влияния топливных факторов на параметры и эффективность системы ЛА–СУ–Т. В частности, имеется возможность проводить расчетно-теоретические исследования по обоснованию состава новых перспективных топлив, оптимизированных как по самолетным критериям (транспортная эффективность, дальность полета, взлетная масса), так и по критериям стоимости жизненного цикла (ЖЦ) ЛА, стоимости одного летного часа, эмиссии вредных веществ и др.

Таким образом, в ИМ имеет место сопряжение самолетных, двигательных и топливных аспектов проектирования. При необходимости можно организовать взаимодействие с

пакетами многопараметрической оптимизации, которые позволяют оптимизировать любые из названных параметров и их характеристики с целью формирования оптимального технического облика системы ЛА–СУ–Т по выбранному КЭ.

ММ топлива (рис. 3), построенная по результатам анализа и обобщения наиболее достоверных опубликованных методик расчета свойств веществ, позволяет производить расчет

теплофизических (теплота сгорания  $H_u$ , плотность, давление насыщенных паров, энтальпия, теплоемкость, теплота испарения, сила поверхностного натяжения) и транспортных (вязкость, теплопроводность и др.) свойств как индивидуальных веществ (водород  $H_2$ , алканы  $C_nH_{2n+2}$  и т.п.), так и топлив (керосины, СЖТ, авиационное сконденсированное топливо АСКТ, СПГ).

При расчете дальности полета и других ЛТХ самолета интегрируется система дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих движение центра масс ЛА в траекторной системе координат. Исходными данными для расчета ЛТХ служат полученные на предыдущих этапах расчета аэродинамические и объемно-массовые характеристики ЛА, высотнo-скоростные и габаритно-массовые характеристики СУ.

Расчет КЭ системы ЛА–СУ–Т осуществляется после решения задач динамики полета для ряда полетных заданий с использованием инженерных методик расчета стоимости жизненного цикла и одного летного часа (с учетом известной или прогнозируемой стоимости топлива). Кроме этого, рассчитываются транспортная эффективность ЛА, эмиссия  $CO_2$  за полет и т.д.

Отметим, что ИМ имеет открытую архитектуру, что позволяет вместо рассчитанных внутренних характеристик СУ и ЛА использовать внешние данные и характеристики, полученные

Таблица 1

Показатель	ТС-1	Топливо СБТ	Топливо СГТ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	775,0	749,0	738,0
Массовая доля водорода	0,141	0,155	0,152
Теплота сгорания, МДж/кг	42,8	44,3	44,1
массовая	33170,0	33180,7	32545,8
объемная			

Таблица 2

Характеристики	Ил-76ТД	Ан-124 «Руслан»
Максимальная взлетная масса, т	190,0	392,0
Максимальная масса полезной нагрузки, т	50,0	120,0



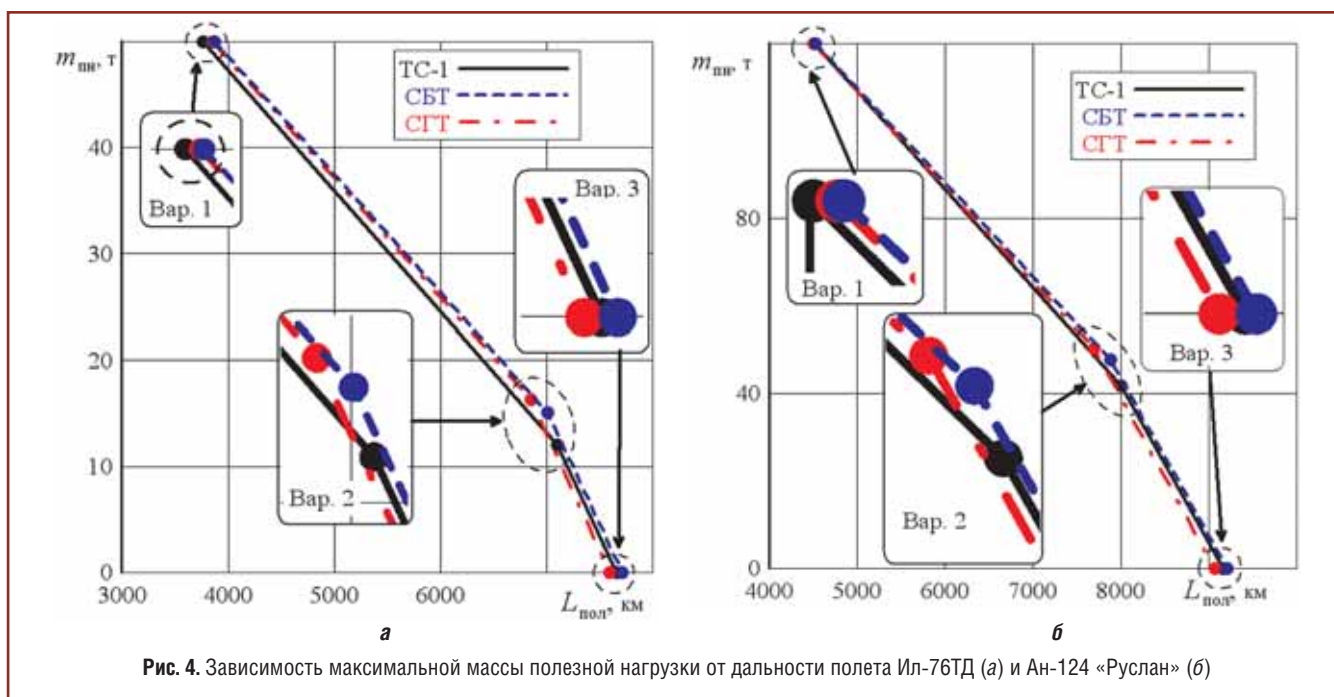


Рис. 4. Зависимость максимальной массы полезной нагрузки от дальности полета Ил-76ТД (а) и Ан-124 «Руслан» (б)

экспериментально или расчетом по другим программам. Благодаря такой архитектуре используемая технология системного анализа является платформой для дальнейшего развития исследований в области ЛА, СУ и топлив нового поколения.

### Постановка задачи и результаты исследования

Рассмотрим два типа транспортных самолетов: средний Ил-76ТД с

двигателями Д-30КП-2 [6] и тяжелый Ан-124 «Руслан» с двигателями Д-18Т [7]. Исследуем их ЛТХ на трех видах топлива: авиакеросине ТС-1, синтетическом жидком топливе из биомассы (СБТ) [1] и синтетическом жидком топливе из природного газа (СГТ) [2]. Основные характеристики этих топлив приведены в табл. 1.

Траектории полета самолетов приняты одинаковыми и соответствующими рекомендациям по

практической аэродинамике самолетов. Профиль полета представляет собой участок разгона – набора высоты, участок крейсерского полета на высоте 6 км с числом  $M=0,6$  и участок снижения и посадки. Для расчета ЛТХ каждого самолета используются более 1500 данных, приведенных в технической документации на самолеты и двигатели [6, 7].

Расчет дальности полета самолетов проводился для трех вариантов

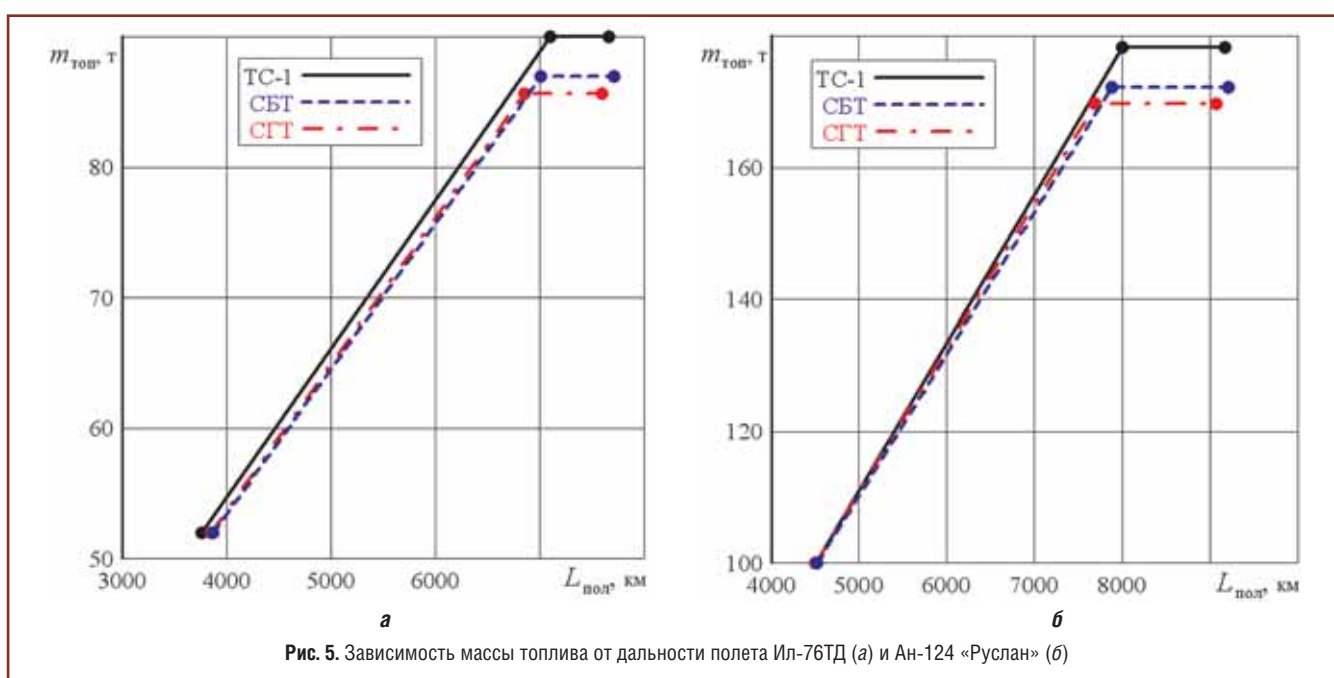
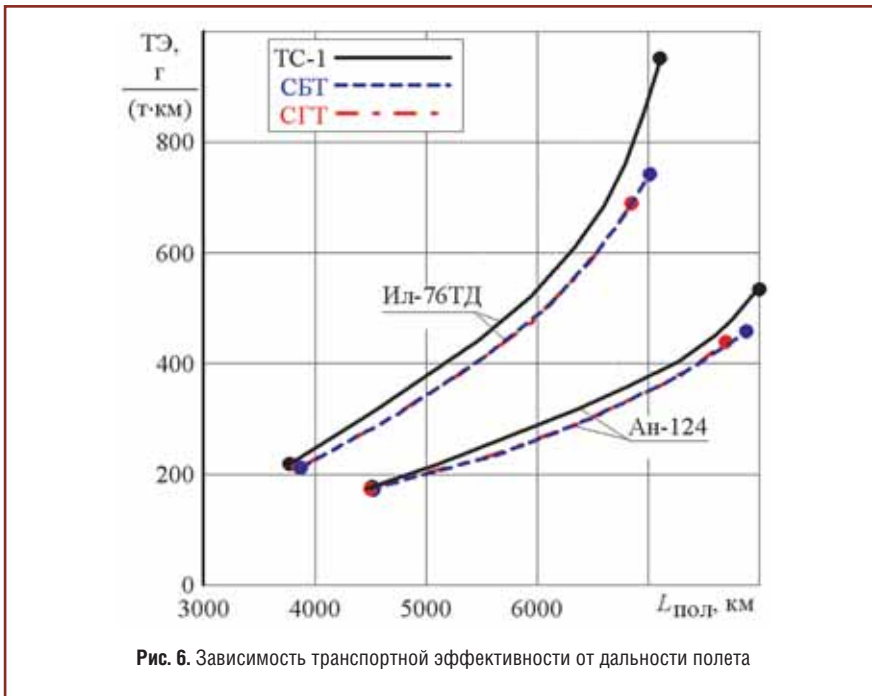


Рис. 5. Зависимость массы топлива от дальности полета Ил-76ТД (а) и Ан-124 «Руслан» (б)



полезной нагрузки. Вариант 1 связан с ограничением по максимальной полезной нагрузке при максимальной взлетной массе.

Вариант 2 определялся максимальной взлетной массой при максимальной заправке топливом.

Вариант 3 – перегоночный, характеризуется максимальной заправкой топливом и отсутствием полезной нагрузки. Основные массовые харак-

теристики самолетов представлены в табл. 2.

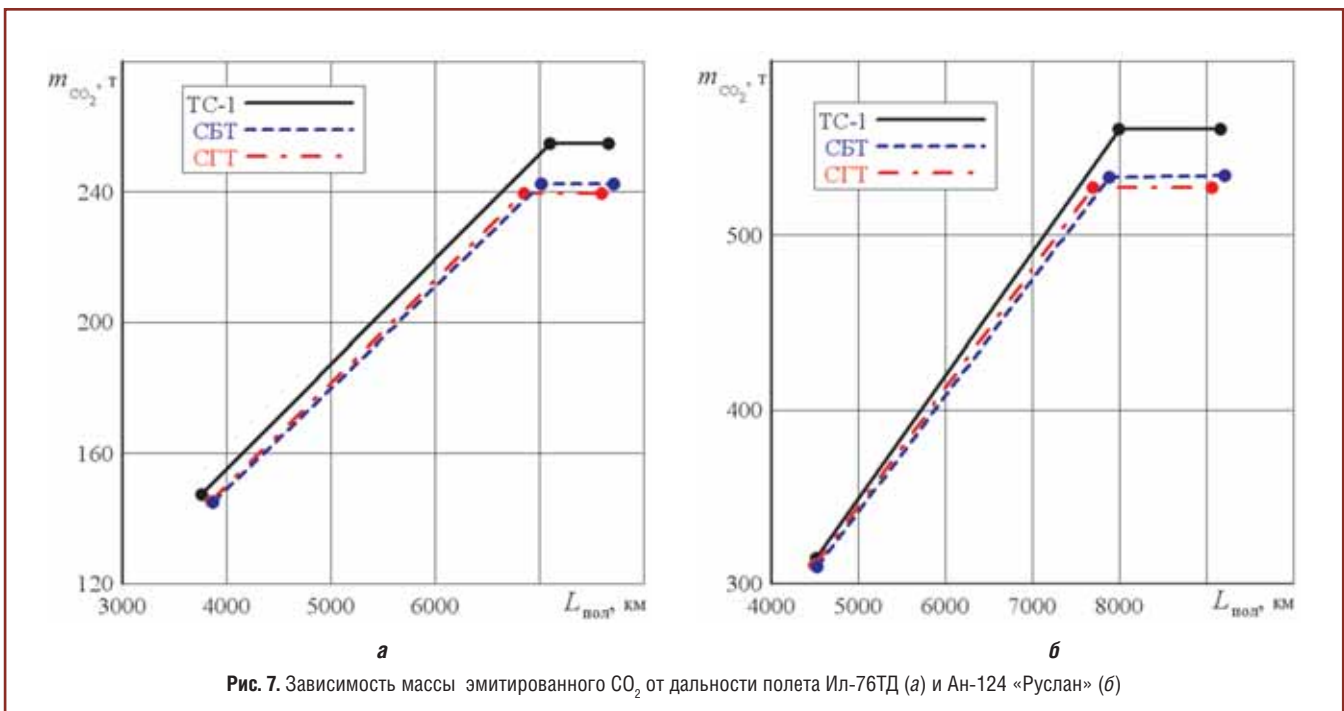
Таким образом, определялись предельные зависимости полезной нагрузки от дальности полета самолетов для разных топлив (рис. 4).

В варианте 1 более высокая, по сравнению с TC-1, массовая теплота сгорания СБТ и СГТ позволяет увеличить дальность полета при фиксированной массе полезной нагрузки

соответственно на 2,8 и 2,2 % за счет более экономичной работы двигателей. В варианте 2 самолеты на СБТ и СГТ проигрывают в дальности полета: самолет Ил-76 на СБТ – на 1,2 %, а на СГТ – на 3,5 %, самолет Ан-124 на СГТ – на 3,8 %, а на СБТ – на 1,5 % в сравнении с полетом на TC-1. Однако при этом увеличивается масса полезной нагрузки за счет уменьшения массы топлива вследствие меньшей плотности при фиксированном объеме топливных баков (рис. 5).

Удельный расход топлива двигателей на синтетических топливах уменьшается в среднем на 2 % за счет более высокой теплоты сгорания. Кроме этого, объемная теплота сгорания СБТ выше, чем у керосина, на 0,4 %, а у СГТ ниже на 1,8 %. Эти обстоятельства объясняют более высокую дальность полета на синтетических топливах на всех режимах полезной нагрузки между вариантами 1 и 2. Меньшая объемная теплота сгорания СГТ приводит к уменьшению дальности полета только при максимальной заправке самолета топливом (варианты 2 и 3).

Транспортная эффективность (ТЭ) самолетов (отношение расхода



топлива в граммах к производству массы полезной нагрузки на дальность полета, т·км) на СЖТ выше, чем на ТС-1. На рис. 6 показаны точки, связывающие варианты 1 и 2. Линия графика для варианта 3 не приводится, так как при нулевой полезной нагрузке транспортная эффективность самолетов стремится к бесконечности. Наибольшее улучшение транспортной эффективности наблюдается на режимах коммерческих нагрузок при полных заправках топливом самолета Ил-76ТД в среднем на 25 %, а самолета Ан-124 – на 15 %.

Выбросы CO<sub>2</sub> зависят от расхода топлива и от количества углерода в нем. На типичных режимах полета, то есть с полной или частичной полезной нагрузкой (близко к варианту 2), СЖТ позволяют уменьшить выбросы CO<sub>2</sub> на 2...5 % (рис. 7).

Таким образом, в результате анализа системы ЛА-СУ-Т установлено, что транспортные самолеты,

работающие на синтетических жидких топливах из газа и биосырья, имеют более высокие летно-технические характеристики и транспортную эффективность в сравнении с использованием авиакеросина ТС-1.

Из-за меньшего содержания углерода в составе СБТ и СГТ в сравнении с ТС-1 и меньших расходов топлива за полет выбросы CO<sub>2</sub> сни-

жаются, что позволит уменьшить вредное влияние авиационного транспорта на окружающую среду. Совершенствование технологии производства из ненефтяного сырья синтетических жидких топлив для авиационных ГТД следует рассматривать как одно из приоритетных направлений инновационного развития России.

### Литература

1. Федоров Е.П., Французова Н.А. и др. Разработка синтетического реактивного топлива из биосырья // Прямоточные ВРД и химмотология. ЦИАМ, №. 1340. – 2010. – С. 107-116.
2. Серeda А.В., Лысенко С.В. и др. Результаты исследований качества образца авиационного синтетического жидкого топлива // Прямоточные ВРД и химмотология. ЦИАМ, №. 1340. – 2010. – С. 147-152.
3. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2006. – С. 454.
4. Братухин А.Г., Луковников А.В., Разносчиков В.В. и др. Оценка эффективности пассажирских самолетов на сжиженном природном газе // Авиационная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 8-16.
5. Разносчиков В.В. Системный анализ использования топлива в авиационных силовых установках // Полет. – 2008. – № 4. – С. 28-33.
6. Веб-ресурс Авиационного комплекса им. С.В.Ильюшина – <http://www.ilyushin.org/>
7. Веб-ресурс Авиационного научно-технического комплекса им. О.К.Антонова – <http://www.antonov.com/>

# БАЛСИТИ

## Автомобильные газовые баллоны



ООО «Балсити» является единственным производителем в России, изготавливающим баллоны для СУГ, сертифицированные по Международным Правилам ЕЭК ООН № 67-01. На предприятии внедрена и действует система менеджмента качества в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2008 (ISO 9001-2008)

В настоящее время серийно изготавливаются:

- цилиндрические баллоны емкостью от 30 до 220 л,
- тороидальные баллоны емкостью от 42 до 94 л,
- блоки цилиндрических баллонов различной емкости (спаренные баллоны).

Широкое разнообразие типов и объемов выпускаемых баллонов позволяет оснастить ими автомобили любой марки.

ООО «Балсити» является эксклюзивным поставщиком баллонов на конвейер Горьковского автозавода ГАЗ.

Тел. +7 (495) 955-43-77  
Факс +7 (495) 783-84-92  
E-mail: [balcity@balcity.ru](mailto:balcity@balcity.ru)  
Сайт: [www.balcity.ru](http://www.balcity.ru)



## Рязань: перспективы применения природного газа на транспорте

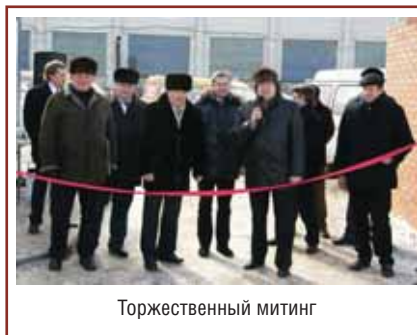
**24** февраля 2011 г. в г. Рязани прошло совещание по вопросам расширения использования природного газа в качестве моторного топлива. На совещание были приглашены руководители различных российских, областных и городских структур: первый заместитель министра транспорта и автомобильных дорог Рязанской обл. Юрий Почтарев, первый заместитель председателя правления АКБ «ИнтрастБанк» Владимир Добрынин, технический директор ОАО «Компрессор» Валерий Абрамов, генеральный директор ОАО «Автогаз» Александр Седых, исполнительный директор Национальной газомоторной ассоциации Виктор Стативко, главный архитектор Рязанской области Вячеслав Макаров, генеральный директор ООО «Газпром Межрегионгаз Рязань» Леонид Кретов, заместитель руководителя Приокского управления Ростехнадзора Александр Ивлев, генеральный директор ООО «РариТЭК» Рафаэль Батыршин, директор центра «Использование газа» ООО «Газпром ВНИИГАЗ» Вячеслав Семенюга. Вели совещание глава администрации Рязани Виталий Артёмов и заместитель начальника департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа – начальник Управления по газификации и использованию газа ОАО «Газпром» Валерий Матюшечкин.



В зале Мэрии

Подобные совещания уже не раз проводились как на городском, так и на областном уровнях. Это принесло свои плоды: за последние 10 лет объем реализации природного газа автомобильному транспорту в Рязанской обл. вырос в 10 раз и в 2010 г. превысил 10,9 млн м<sup>3</sup>, по

спросу на КПГ она вышла на 11-е место в России. Справедливости ради следует напомнить, что по итогам 2009 г. в области было реализовано 12,3 млн м<sup>3</sup> метана. Падение объясняется последствиями кризисных явлений и массовым уходом «Газелей» с рынка пассажирских перевозок. Эти микроавтобусы пока еще работают на линиях, но их становится все меньше и меньше.



Торжественный митинг

Тем не менее, все выступавшие на совещании подчеркивали перспективность рязанского рынка моторного топлива для ускоренного и расширенного внедрения метана. Объективные трудности не были обойдены молчанием. В первую очередь речь шла о малочисленности АГНКС в области – сейчас их всего пять. Вторая проблема – высокая дополнительная стоимость газовой версии автобусов большого и особо большого классов. Сегодня она может достигать 1-1,5 млн руб. Третья проблема – свертывание программы Минрегиона России по поставке техники в муниципалитеты. Эта программа проработала всего два года, и газовая техника не успела в нее войти. Сейчас имеет смысл выйти на Правительство России с предложением о возобновлении программы в части газобаллонной техники для муниципальных нужд.

Участники совещания отметили последовательную позицию государства в отношении газомоторного топлива. С одной стороны принимаются концепции и стратегии, всячески приветствующие расширение использования природного газа в качестве моторного топлива, а с другой стороны – технический регламент «О безопасности колесных транс-

портных средств» усложняет процесс перевода автотранспорта на газовое топливо, чем дестимулирует владельцев автотранспорта, желающих перейти на использование метана. С одной стороны речь идет о развитии мер стимулирования метанизации транспорта, а с другой стороны – тот же регламент предоставляет исключительные маркетинговые преимущества зарубежным компаниям и препятствует развитию отечественного производства газобаллонных автомобилей и оборудования. Не являются ли подобные решения причинами того, что в России производят всего 3-4 модели метановых автомобилей, или того, что в Рязани «умерло» производство газовой аппаратуры. При этом решения, затрагивающие интересы многих отраслей промышленности, принимаются кулуарно и без учета мнения специалистов тех самых отраслей.

Участники совещания предложили возобновить работу межотраслевого органа в виде областной комиссии или рабочей группы, которая координировала бы деятельность участников областного рынка КПГ. Было предложено начать в области работы по сжижению природного газа и его использованию в качестве моторного топлива. Отмечена



Заправка Mercedes E-200 NGT

необходимость закупки газобаллонных автомобилей заводского изготовления. При этом мэр Рязани Виталий Артёмов подчеркнул, что городу нужны сотни газовых машин и автобусов, но комфортный механизм их приобретения отсутствует. Было высказано предложение о необходимости активизировать участие компании «Газпром нефть» в работе по развитию газозаправочной сети на базе существующих АЗС.

После окончания совещания гости участвовали в церемонии открытия новой АГНКС ООО «Трансторгинвест».

МЕТАИнфо

## Основные факторы, влияющие на стоимость владения газобаллонным автомобилем с подчиненной системой управления

**П.Г. Теремякин,**  
руководитель проектов ООО «НПП ЭЛКАР»

Одним из самых важных стимулов использования сжиженного углеводородного газа (СУГ) в качестве моторного топлива является его низкая цена в сравнении с ценой на бензин. Однако эффект от низкой цены на газ при эксплуатации автомобиля достигается лишь в случае корректного применения газобаллонного оборудования. В статье рассматриваются некоторые факторы, влияющие на стоимость владения газобаллонным автомобилем «Газель», оснащенный новой подчиненной системой управления на базе контроллера Микрайдер (MikrideR™). Приводятся результаты испытаний двигателя и автомобиля при работе на бензине и газовом топливе.

**Ключевые слова:** сжиженный углеводородный газ, ресурс, токсичность выбросов, состав смеси, угол опережения зажигания, установочный комплект газобаллонного оборудования (ГБО).

## The main factors affects on the operation cost of LPG car equipped with Slave-Control-System

**P.G. Teremyakin**

One of the most important motivating factor of using LPG as an automotive fuel is its lower price compare to petrol fuel. However the cost-efficiency of using LPG can be obtained only in case of proper use of LPG equipment. The article reviews some aspects having influence on operation cost of LPG car «Gazel» equipped with the new Mikrider™ Slave-System. The results of engine and car testing at petrol and LPG fuel using are appended.

**Keywords:** Liquefied Petroleum Gas (LPG), resource, exhaust emission, Air/Fuel ratio, Ignition timing, LPG set kit.

Применение СУГ в качестве моторного топлива на автомобильном транспорте обусловлено, прежде всего, его технологическими преимуществами перед другими альтернативными топливами и

низкой ценой в сравнении с ценой на бензин, даже несмотря на затраты по оборудованию автомобиля дополнительной системой питания газом. Все остальные факторы, влияющие на конечную стоимость

владения двухтопливным транспортным средством, имеют для владельца второстепенное значение. Однако это справедливо лишь при корректном выборе системы и ее грамотной установке и наладке. В противном случае могут возникнуть дополнительные затраты [1] вследствие следующих причин:

- увеличенного эксплуатационного расхода газа и неустойчивой работы непрогретого двигателя на бензине;

- снижения ресурса деталей (седло-клапан газораспределительного механизма, катализатор и т.д.) с необходимостью последующего ремонта деталей двигателя;

- технического обслуживания и ремонта на специализированных станциях технического обслуживания (СТО), особенно из-за использования узлов ГБО низкого качества или с характеристиками, не соответствующими данному двигателю автомобиля;

- более серьезного урона при ДТП с последствиями утечки газа (увеличенный риск возгорания);

- оформления разрешительных документов в ГИБДД и необходимости переосвидетельствования баллонов;

- более затратных и опасных последствий заправки некачественным сжиженным газом (вплоть до необходимости опорожнения баллонов и ремонта/замены элементов системы подачи газа);

- особых требований хранения автомобиля с ГБО;

- необходимости систематического периодического контроля герметичности газовых соединений при эксплуатации автомобиля, риска внезапного автоматического переключения с газа на бензин при неисправности системы подачи газа в сложной дорожной ситуации (при обгоне), в условиях малого запаса бензина в баке и удаленности от ближайшей АЗС и т.п.

Последнюю группу факторов, определяющих дополнительные затраты, трудно оценить в денежном эквиваленте.

Рассмотрим наиболее очевидные из них, существенно влияющие на конечную стоимость владения газобаллонным автомобилем (ГБА), на примере ГБА «Газель» с двигателем УМЗ-4216 экологического класса 3.

Увеличенный расход сжиженного газа может возникнуть при некорректной установке ГБО, его неверной настройке или вследствие неграмотного вмешательства в работу всей системы управления двигателем. При движении прогретого автомобиля по европейскому ездовому испытательному циклу Правил 83-05 ЕЭК ООН (городской и загородный) указанный автомобиль потребляет около 15 л бензина Аи-92 на 100 км (затраты при цене 24 руб. за 1 л бензина – 3,60 руб./км). При правильной установке ГБО без внесения изменений в систему управления зажиганием расход сжиженного газа в тех же условиях цикла составляет около 18 л на 100 км (затраты при цене 15,60 руб. за 1 л сжиженного газа – 2,81 руб./км). С учетом сезонности и расхода бензина на холодный пуск и прогрев двигателя средний расход топлива на 100 км пробега составит около 18 л бензина или 21 л газа. Затраты составят соответственно 4,32 руб./км и 3,28 руб./км. Если же газовая система установлена или настроена неверно, то расход может достигать 28 л газа (4,37 руб./км), в этом случае затраты на газ уже превышают затраты на бензин.

В случае оптимизации характеристик зажигания газозооной смеси расход газа автомобилем «Газель» экологического класса 3 (с λ-регулированием и каталитическим нейтрализатором) снижается примерно на 3 % (затраты на газ будут уже 3,18 руб./км) при незначительном увеличении выбросов вредных веществ с ОГ. При этом

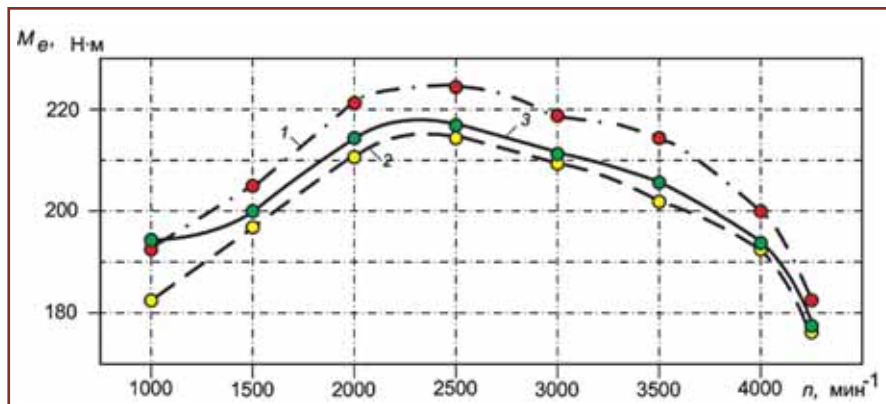


Рис. 1. Внешние скоростные характеристики двигателя УМЗ-4216 при его работе на бензине (1), сжиженном газе и с «бензиновыми» регулировками УОЗ (2), сжиженном газе и оптимальных УОЗ (3)

несколько улучшаются динамические и скоростные показатели автомобиля (рис. 1). В случае оптимизации зажигания крутящий момент двигателя (кривая 3) увеличивается на 1...5 % в сравнении с питанием газом с «бензиновыми» оптимальными углами опережения зажигания (кривая 2), приближаясь к значениям при питании бензином на малой и средней частоте вращения коленчатого вала. Кроме того, снижается риск перегрева и выхода из строя катализатора.

Средняя цена дооборудования автомобиля «Газель» системой питания сжиженным газом составляет примерно 24 тыс. руб. Обычно предполагается, что она окупается в течение первого года эксплуатации автомобиля: при среднем пробеге в 40 тыс. км/год амортизация этих затрат с учетом гарантийного обслуживания с заменой газовых фильтров (4 тыс. руб.) составит 0,7 руб./км.

Таким образом, в первый год эксплуатации после оборудования автомобиля системой подачи газа при затратах на газовое топливо 3,98 руб./км экономия составит:  $4,32 - (3,28 + 0,7) = 0,34$  руб./км. В последующие два года с учетом стоимости расходных фильтров и технического обслуживания системы подачи газа (около 12 тыс. руб./год) экономия составит:  $4,32 - (3,28 + 0,3) = 0,74$  руб./км. Напомним, что это

– оптимистический прогноз в случае грамотной установки ГБО на автомобиль и отсутствия проблем как с самим ГБО, так и с последствиями его применения.

Возможные негативные проблемы, которые возникают при применении СУГ, – интенсивный износ или даже прогар клапанов двигателя с последующей необходимостью ремонта головки блока цилиндров, выход из строя дорогостоящего каталитического нейтрализатора. В этом случае убытки с учетом вынужденного простоя автомобиля могут исчисляться не одним десятком тысяч рублей. Именно по этой причине перед установкой ГБО необходимо иметь уверенность, что двигатель, на который устанавливается газовое оборудование, не имеет конструктивных «газовых противопоказаний», а регулировки систем питания и зажигания при работе на газе оптимальны. Подтвердить это можно лишь объективными результатами ресурсных испытаний двигателя в условиях конкретных регулировок систем питания и зажигания, что и должен сделать производитель автомобиля (двигателя), или производитель (установщик) ГБО. Производители ГБО, заботящиеся о своей репутации на рынке, доводят информацию до дилеров и клиентов о марках автомобилей с наблюдающимися повреждениями клапанов, нейтрализаторов

и т.п. в результате эксплуатации на газе и предупреждают о возникающих проблемах со страховыми компаниями.

В настоящий момент автозаводы ГАЗ и УАЗ осуществляют сборку автомобилей с конкретным ГБО мелкими партиями на своих конвейерах, обеспечивая их гарантийную поддержку. Существуют отдельные установщики ГБО, которые по согласованию с производителем двигателя берут на себя решение проблем в случае его повреждения по причине применения комплекта ГБО, но это скорее рекламный ход. К тому же убедить установщика, что причиной повреждения двигателя является его эксплуатация именно на газе, достаточно сложно. В подавляющем большинстве случаев после установки ГБО на новый автомобиль гарантия на него автоматически снимается. И этот аспект нельзя не учитывать при принятии решения об установке ГБО на новый автомобиль, к тому же, если он обладает сравнительно низкой эксплуатационной надежностью.

Причинами выбора конкретного установочного комплекта ГБО в рамках отведенного бюджета чаще всего являются воздействие рекламы (часто агрессивной) или чье-либо авторитетное мнение. Реже – личный опыт, традиция использования однажды выбранного бренда или глубокий анализ отзывов по результатам эксплуатации. В любом случае пользователь пытается найти компромисс между низкой ценой комплекта и его надежностью. При этом отправной точкой чаще всего является цена самого автомобиля к моменту установки на него ГБО.

Рассмотрим ценовые предложения на комплект ГБО, отвечающий ныне принятым в Европе и РФ требованиям (Правилам № 115 ЕЭК ООН), для установки на автомобиль «Газель», находящийся в эксплуатации. Весь диапазон цен – от 16 тыс. до 36 тыс. руб. – можно условно разделить

на три интервала: от 16 тыс. до 22 тыс. руб. (системы от Agis, Tamona, Lovato, Elpigas и др.), от 20 тыс. до 28 тыс. руб. (BRC, OMVL, EMER и др.) и от 26 тыс. до 36 тыс. руб. (Prins, Landi Renzo и др.). Варианты с ценой ниже 12 тыс. руб. вызывают подозрения в низком качестве, его несоответствия действующему законодательству или «серой» схеме ввоза комплекта в РФ и далее не рассматриваются.

Продавцы (установщики) дешевых (16-22 тыс. руб.) комплектов предлагают оборудование, которое за эти деньги худо-бедно функционирует год, а затем, в большинстве случаев, начинается перманентный ремонт ГБО и автомобиля, бесконечные мытарства пользователя по СТО или походы к народным умельцам. К тому же гарантия на такой комплект предоставляется чаще всего на год эксплуатации. Отказ по причине использования некачественного газа, как гарантийный случай, установщиком не рассматривается. И все это на фоне неэкономичного расходования газа транспортным средством и постоянными проблемами, возникающими при эксплуатации автомобиля. В результате сэкономленные средства при покупке комплекта оборачиваются многократной переплатой при эксплуатации и ремонте. Однако покупателя привлекает простота и ремонтпригодность комплекта в гаражных условиях, например, газовых дозаторов, подобно привлекательности карбюраторной системы дозирования в начальный период развития систем впрыска: как и карбюратор простые газовые форсунки можно разобрать и продуть-промыть в чистом поле.

Продавцы (установщики) дорогих комплектов, как правило, предлагают качественные изделия голландских и итальянских фирм, но фактически тот же сервис. Утешает то, что частота общения с сервисом потенциально ниже, чем в первом случае. Однако, если не повезет, то ремонт

этого оборудования может вылиться в копеечку, а тратить средства на «Газель», как на дорогую иномарку, поднимется рука не у каждого.

Переходим к «золотой середине»: комплекту по цене от 20 тыс. до 28 тыс. руб. В этом ценовом диапазоне находятся системы известных, в основном итальянских, производителей ГБО, давно обосновавшихся на нашем рынке и положительно себя зарекомендовавших в эксплуатации, с достаточно развитой торговой сетью запасными частями. Однако большинство этих комплектов не имеет функции коррекции угла опережения зажигания. Для ее реализации предлагается дополнительное устройство (так называемый вариант) с проводами и разъемами для подключения, что сделает дороже весь комплект дополнительно на 600-3500 руб., снизив надежность всей системы. Причем его необходимо подключить в проводку, а перед этим ввести «нужную» характеристику коррекции, что требует обращения к специалистам и дополнительных средств. Но и в этом случае про необходимую коррекцию могут знать только те, кто может ее получить из результатов испытаний двигателя данной модели при его питании газом. В основном это могут себе позволить лишь крупные производители ГБО, обладающие соответствующей испытательной базой и финансовыми возможностями. Что уж говорить о нюансах управления современным двигателем, связанных со спецификой конкретной модели, о которых знают лишь отдельные заводские специалисты, занимающиеся его исследованиями.

Существует и другой способ «оптимизации»: внесение изменений в программное обеспечение базовой системы, несанкционированное производителем автомобилей, направленное на максимально возможную экономию топлива в ущерб экологии и надежности. Такие услуги

предлагают многочисленные «тюнеры». Однако их действия, в большинстве случаев, находятся в противоречии с интересами производителя и общества в целом – автомобиль после такого вмешательства перестает соответствовать экологическим требованиям.

Подводя итог, можно констатировать, что для реальной экономии от использования газа в качестве моторного топлива для автомобиля «Газель» (комплектация Евро-3,4) с двигателем с искровым зажиганием, на нем должен применяться комплект ГБО, который должен обладать следующими качествами:

- стоить не дороже 20-24 тыс. руб., включая установку на автомобиль, при существующей цене на сжиженный газ;

- иметь все функции для оптимального, надежного управления рабочим процессом двигателя при его работе на газе;

- быть изначально откалиброванным на заводском уровне, под данную модель двигателя и автомобиля;

- легко диагностироваться на станциях технического обслуживания имеющимся диагностическим оборудованием;

- отвечать требованиям действующего законодательства.

Такой комплект был предложен рынку российской фирмой «НПП ЭЛКАР», известной на протяжении почти 20 лет своими электронными



Рис. 2. Контроллер Микрайдер подчиненной системы управления двигателем с искровым зажиганием



Рис. 3. Установочный LPG-комплект газобаллонного оборудования (без баллона) на базе контроллера Микрайдер для автомобиля «Газель»

системами для серийных бензиновых двигателей автомобилей ВАЗ, ГАЗ, УАЗ, ЗАЗ. Комплект сформирован на базе разработанного контроллера газовой подчиненной системы, который получил название Микрайдер (MikrideR™) (рис. 2). Его появлению предшествовал опыт, накопленный специалистами ООО «НПП ЭЛКАР» в ходе работ по серийному базовому изделию – двухтопливному блоку управления Микас 12 для поставки на заводские автомобильные сборочные конвейеры [2]. Однако планируемый объем потребления таких блоков заводами в ближайшей перспективе сравнительно небольшой, а их подготовка к производству и адаптация очень затратны. В этой ситуации производство не может быть рентабельным. Тем не менее, было найдено приемлемое решение: освоить выпуск похожего блока для подчиненной системы управления. Микрайдер имеет тот же корпус, разъем и большую часть номенклатуры электронных компонентов, что и Микас 12, поэтому освоение его выпуска поможет снизить издержки производства, а значит и цену одного и другого изделия.

С учетом того, что контроллер является составной частью установочного комплекта ГБО, был проведен всесторонний анализ основных газовых узлов наиболее надежных производителей для последующего использования в установочном комплекте с блоком Микрайдер. Изучались, прежде всего, компоненты, влияющие на технические показатели двигателя и их стабильность в эксплуатации при работе на газе: газовый редуктор-испаритель, газовая рампа, газовые форсунки, датчики давления и температуры газа и т.п. При этом проводились прямые консультации с производителями изделий и собственные исследования.

Комплект ориентирован, прежде всего, на владельцев бюджетных автомобилей ВАЗ, ГАЗ, УАЗ, а сам контроллер запрограммирован на функционирование в составе определенной марки автомобиля (рис. 3). В этом случае при установке комплекта минимизируется сам процесс «свободного творчества» установщика, сокращаются трудозатраты при сборке и настройке, гарантируются заявленные показатели автомобиля при эксплуатации.



Отличительная особенность контроллера Микрайдер заключается в оригинальных аппаратно-программных решениях, благодаря которым он отвечает современным требованиям бортовой диагностики при оптимальном управлении рабочим процессом двигателя, включая момент зажигания газозооной смеси. Кроме этого, контроллер обеспечивает управление штатным указателем уровня топлива комбинации приборов, на который выводится информация о запасе бензина в баке или газа в баллоне, результаты информационного обмена с базовым блоком или с панелью приборов автомобиля по CAN-шине и др.

Программное обеспечение контроллера разработано на базе собственных исследований работы двигателей на газовом топливе и с применением современных методов моделирования. Для оценки адекватности моделей проводились всесторонние испытания как собственно контроллера, так и всей системы в составе двигателя и автомобиля с использованием современной экспериментальной базы: стенов с беговыми барабанами и газоаналитическим комплексом, холодильной камеры для испытаний автомобилей и двигателей, моторных стенов с набором измерительной аппаратуры, стенов по испытаниям топливной аппаратуры и т.п. Для регистрации параметров в ходе эксплуатационных испытаний автомобиля применялся разработанный в «НПП ЭЛКАР» универсальный аппаратно-программный модуль



Рис. 4. Универсальный программно-аппаратный Bluetooth-модуль регистрации и хранения параметров управления



Рис. 5. Диагностический сканер Аскан

сбора данных (рис. 4). Его особенность заключается в возможности записывать и хранить в своей памяти множество параметров управления в ходе продолжительной эксплуатации автомобиля, которые затем можно анализировать с помощью соответствующих компьютерных программ, что позволяет оперативно определять условия и причины неудовлетворительной работы двигателя. Это – прообраз будущих бортовых систем хранения данных, аналогичных самолетным самописцам.

Еще одна особенность контроллера – это возможность диагностики с помощью широко известного диагностического сканера АСКАН с соответствующим программным модулем (рис. 5). Сканер подключается к штатной автомобильной диагностической колодке. Это позволяет одним прибором диагностировать как базовый блок, так и блок подчиненной системы управления, что снижает затраты на обслуживание, так как для этих целей не требуются дополнительные аппаратные средства и программное обеспечение для персонального компьютера, традиционно используемые установщиками ГБО.

Особое внимание в комплекте уделяется качеству электрических соединений элементов. Широко известно, что в большинстве бюджетных установочных комплектов в угоду универсальности предлагается жгут проводов – полуфабрикат, предусматривающий подключение к автомобильной проводке на скрутках, при этом целостность штатного бензинового жгута нарушается. В состав

комплекта с контроллером Микрайдер входит законченный жгут проводов с электрическими соединителями, ориентированный на конкретную модель автомобиля с качественной заводской заделкой проводников и подробной инструкцией по подключению. Все это обеспечивает надежность электрических соединений элементов системы, снижает вероятность отказов в эксплуатации.

Если говорить об особенности комплекта на базе контроллера Микрайдер, то в нем отражен идеологический подход разработчика: это законченное готовое серийное изделие, не допускающее свободных трактовок по монтажу и настройке для объекта повышенной опасности, каким является современный автомобиль. Именно такой подход к переоборудованию автомобиля должен превалировать на рынке установочных комплектов ГБО в будущем.

Таким образом, с целью обеспечения реальной максимальной выгоды для владельца автомобиля и всего общества от применения газа в качестве моторного топлива необходимо осуществлять качественное оборудование автомобилей газовой системой на промышленном, заводском уровне. Лишь в этом случае можно добиться значительного снижения итоговой стоимости владения газобаллонным автомобилем, что в свою очередь будет стимулировать применение газа на транспорте.

## Литература

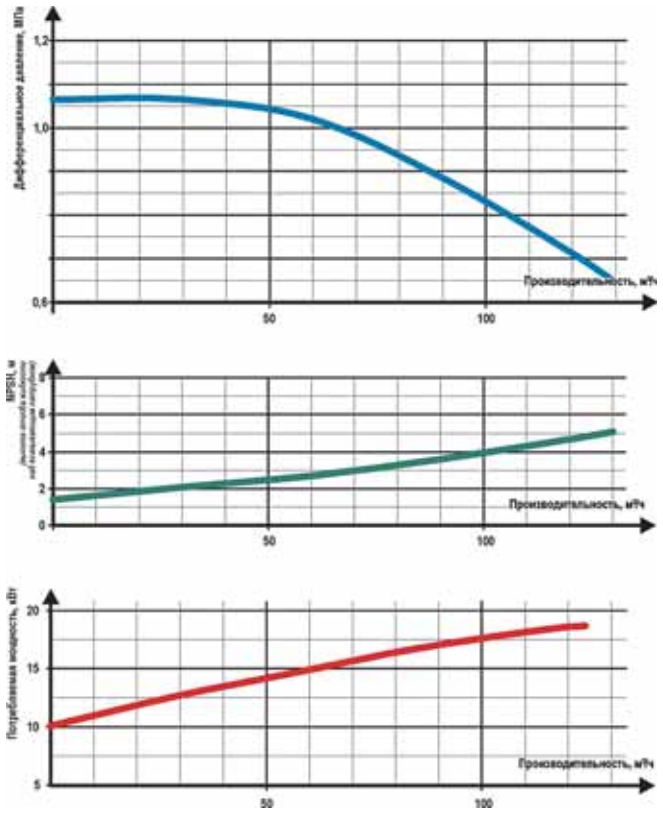
1. **Шишков В.А.** Причины повышенного расхода газового топлива в процессе эксплуатации автомобиля с электронной системой управления двигателем с искровым зажиганием // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010 г. – № 2 (14). – С. 14-19.
2. **Теремякин П.Г., Латыпов А.И., Бутнев А.Б.** Особенности конструкции газобаллонного автомобиля для серийного заводского производства // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010 г. – № 2 (14). – С. 63-70.

# Высокопроизводительные насосные агрегаты серии NZ фирмы FAS (Германия)

Рост сбыта сжиженного углеводородного газа приобрел характер устойчивой тенденции, не претерпевшей значительных изменений даже в условиях финансового кризиса. Для успешной работы на перспективном рынке нужны новые технические решения, одним из которых стала новая серия высокопроизводительных насосов серии NZ.

Насосные агрегаты серии NZ, предназначенные для использования в производительных системах транспортировки сжиженного газа, являются логичным продолжением политики компании FAS по совершенствованию продукции. В новых агрегатах основное внимание уделено таким параметрам, как стабильная производительность, экономичность эксплуатации, надежность работы, экологические характеристики. Инженерам фирмы FAS удалось добиться, помимо вышеперечисленного, значительного уменьшения массы и габаритов оборудования.

Основные усилия разработчики сосредоточили на оптимизации гидравлических контуров. Новые технические решения позволили снизить уровни шума и вибраций и обеспечить стабильную производительность в широком диапазоне дифференциальных давлений. На приведенных диаграммах для агрегата NZ 60-7-20 видно, что увеличение производительности с 50 до 100 м³/ч снижает дифференциальное давление менее чем на 0,2 МПа, а потребляемая мощность возрастает всего на 27 %. Опыт эксплуатации новых насосных агрегатов серии FAS NZ на объектах таких крупных компаний, как ОАО



«Газпром», ОАО «Лукойл», ОАО «Роснефть», ОАО «Татнефть» и др., уже свидетельствует о достаточно значительном экономическом выигрыше, обеспеченном традиционно высоким немецким качеством исполнения и применением передовых технических решений.

## Высокопроизводительные насосные агрегаты серии FAS NZ

- ◆ Широкий ассортиментный ряд моделей производительностью 18, 40, 60, 80, 100, 150, 200 и 260 куб.м/час
- ◆ 30%-е снижение энергопотребления
- ◆ Стабильная работа в большом диапазоне дифференциальных давлений
- ◆ 35%-е снижение веса и размеров
- ◆ Уникальные соотношения «цена-качество» и «цена-производительность»

До 260 куб.м/час



**FAS**  
Flüssiggas-Anlagen



узнайте подробнее 

**WWW.FAS.SU**      **(495) 647 0577 • (812) 335 4950**



## Нормирование влагосодержания КПГ с учетом региональных климатических условий

**Л.А. Гнедова**,  
старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
**К.А. Гриценко**,  
научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
**Н.А. Лапушкин**,  
начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.,  
**В.Б. Перетряхина**,  
старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
**И.В. Федотов**,  
старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

Рассмотрены вопросы оптимального уровня и нормирования содержания влаги в сжатом природном газе в зависимости от региональных климатических условий. Предложено при отрицательных температурах нормировать влагосодержание КПГ по температуре точки росы над гидратами.

**Ключевые слова:** сжатый природный газ (КПГ), нормирование осушки КПГ, температура точки росы над гидратами.

## Rate setting moisture of compressed natural gas in accordance with content regional climatic conditions

**L.A. Gnedova, K.A. Gritsenko,  
N.A. Lapushkin, V.B. Peretryakhina, I.V. Fedotov**

Questions of choice optimum level gas dewatering and rate setting moisture CNG in dependence climatic regional term are considered. It is offered used hydrates dew point for rate setting moisture CNG at negative temperature.

**Keywords:** compressed natural gas, rate setting moisture of CNG, hydrates dew point.

Экономический и экологический эффекты от применения КПГ в качестве моторного топлива давно доказаны. Для обеспечения работоспособности транспорта, использующего КПГ, во избежание коррозии и появления ледяных пробок в газовой аппаратуре двигателей необходимо проводить подготовку газа, обеспечивая его осушку. Уровень осушки КПГ, составляющий  $9 \text{ мг/м}^3$ , что соответствует температуре точки росы по воде ( $\text{ТТР}_в$ )  $-30^\circ\text{C}$ ,

определен межгосударственным стандартом ГОСТ 27577-2000, принятым Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации стран СНГ. Для некоторых регионов стран СНГ, в том числе РФ, с достаточно теплым климатом этот уровень осушки является избыточным [1], что приводит к неоправданному перерасходу энергии, а для районов Крайнего Севера – недостаточным, в связи с чем выбор оптимального уровня влажности КПГ по

климатическим зонам является актуальной задачей.

В Германии стандартом на КПГ DIN 51624 установлен предельный уровень влажности  $40 \text{ мг/кг}$  ( $\sim 32 \text{ мг/м}^3$ ), что соответствует  $\text{ТТР}_в -11^\circ\text{C}$  при давлении 20 МПа. В Европейском стандарте ISO 15403 part 2 предельный уровень влажности установлен на уровне  $30 \text{ мг/м}^3$ , что соответствует  $\text{ТТР}_в -13^\circ\text{C}$  при 20 МПа. Стандартами ЕЭК ООН № 110 концентрация водяных паров для осушенных газов ограничивается также величиной  $32 \text{ мг/м}^3$ . В Италии нормируется минимальная температура точки росы КПГ по влаге при 20 МПа. Она принята равной  $-5^\circ\text{C}$ , что соответствует влагосодержанию  $\sim 45 \text{ мг/м}^3$ . Стандартом США на КПГ SAE J1616:1994 нормируется минимальная температура точки росы КПГ по влаге при 20 МПа. Она должна быть на 10 F ( $5,6^\circ\text{C}$ ) ниже среднемесячной температуры.

Таким образом, нормы на температуры точки росы КПГ устанавливаются ниже низших климатических температур эксплуатации газомоторной техники. Это позволяет избежать выделения влаги в элементах газоиспользующей техники и обеспечивает нормальную эксплуатацию газобаллонного автотранспорта. В некоторых южных странах нет требований по доосушке природного газа, подаваемого на АГНКС из магистрального газопровода. При этом для защиты металлических цилиндров и корпусов баллонов 1 кг газа должен содержать не менее 1 мг компрессорного масла. Регламентировано также максимальное объемное содержание: сульфидов –  $23 \text{ мг/м}^3$ , диоксида углерода – 4 %, водорода – 0,1 % и кислорода – 1 %.

Попытка выработки методического подхода к выбору оптимального уровня влажности КПГ в зависимости от региональных климатических условий была предпринята в работе [1]. Авторы проводили расчеты влагосодержания ПГ по методике, разработанной Гухманом Л.М. [2] и применявшейся в ОАО «Газпром» для расчетов степени осушки КПГ. При этом принималось, что в условиях низких температур (близких к  $-30^\circ\text{C}$ ), когда возможно выпадение влаги из КПГ, она

будет выпадать не в жидкой фазе, а в виде кристаллов льда.

На территории Украины самая низкая среднемесячная температура наблюдается в Сумской обл. ( $-7,7^{\circ}\text{C}$ ) и при расчетах была принята равной  $-10^{\circ}\text{C}$  [1]. Авторы приходят к выводу, что для Украины нет необходимости применять параметры осушки КПГ на АГНКС, выработанные в том числе и для условий севера Сибири, и рекомендуют принять для АГНКС Украины влагосодержание КПГ на уровне  $32\text{ мг/м}^3$ , что соответствует температуре точки росы надо льдом  $\text{ТТР}_л -10^{\circ}\text{C}$ , и ввести эти значения в нормативные документы.

Как видно из рис. 1 [3], влага выпадает с последующим образованием гидратов. Однако все расчеты авторами выполнены исходя из определения равновесного влагосодержания воды в КПГ именно надо льдом. При принятых  $9\text{ мг/м}^3$  точка росы надо льдом в баллоне составит  $-26^{\circ}\text{C}$ , а над гидратом  $\text{ТТР}_г$  будет не менее  $-22^{\circ}\text{C}$  [3]. В работе [4] отмечается, что в случае адсорбционной осушки ПГ в начале технологического процесса возможна еще большая разность между точкой росы по воде и по гидрату, достигающая на практике  $10...15^{\circ}\text{C}$  (то есть  $\text{ТТР}_г$  будет  $-15...-20^{\circ}\text{C}$ ). В качестве примера приводится проект морского газопровода по дну Черного моря, где разница между точкой росы по воде и по гидрату достигает  $15^{\circ}\text{C}$ .

Гидраты метана могут образовываться в газобаллонной аппаратуре и в тракте газоподводящей аппаратуры двигателей автомобилей, а также в баллонах и трактах технологического оборудования АГНКС при наличии капельной влаги при относительно невысоких давлениях (например, при давлениях выше  $2,5\text{ МПа}$  и температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ), и устойчиво существовать в диапазоне рабочих давлений и температур (область стабильного существования гидрата метана).

При понижении давления или при повышении температуры гидрат переходит из области стабильности I в область II возможного разложения гидрата метана на лед и газ, и далее в область III возможного разложения гидрата метана на газ и переохлажденную воду.



Особенности процесса разложения гидрата метана, а также время протекания этих процессов рассмотрены в [3]. Если газовая фаза после сброса давления оказывается сильно недонасыщенной по влаге, то возможно некоторое время сочетание сублимации и плавления: гидрат с поверхности разлагается на газ и пленку воды, которая одновременно испаряется. При низких температурах переохлажденная вода кристаллизуется на поверхности гидратной частицы прежде, чем гидрат успеет разложиться. Образовавшееся ледяное покрытие вызывает так называемый эффект «консервации гидрата», время разложения которого может измеряться десятками часов [3].

Рассмотренные данные свидетельствуют о необходимости проведения расчетов влагосодержания и  $\text{ТТР}_г$  для оценки баланса влаги в КПГ, при производстве которого применяется в основном адсорбционная осушка, особенно применительно к работе в районах с холодным климатом.

Методика расчета равновесного влагосодержания природного газа надо льдом и гидратами [5] предусматривает использование корректирующих множителей. Равновесное влагосодержание надо льдом  $W_л$  и над гидратами  $W_г$  при отрицательных температурах ниже, чем влагосодержание  $W_0$  над переохлажденной водой, поскольку гексагональный лед и

гидраты являются термодинамически более стабильной фазой, чем жидкая вода. Для расчета равновесного влагосодержания надо льдом и гидратами величину влагосодержания  $W_0$  умножают на корректирующий множитель  $K_л$  и  $K_г$  соответственно, то есть  $W_л = K_л W_0$ , а  $W_г = K_г W_0$ .

Для выбора методики расчета равновесного влагосодержания КПГ необходимо оценить точность существующих методик расчета влагосодержания и их применимость для определения  $W$  природного газа в условиях низких температур с компонентным составом, характерным для северных месторождений.

Анализ точности применяемых методик (в том числе нормативных документов) по расчетам влагосодержания и точки росы природного газа выполнен в работе [6]. В частности, результаты расчетов влагосодержания по значениям  $\text{ТТР}_в$ , характерным для подготовленного российского ПГ, по корреляции ISO 18453 имеют высокую погрешность: для ПГ с  $\text{ТТР}_в = -10^{\circ}\text{C}$  при давлении  $4\text{ МПа}$  она составляет около  $40\%$ , а для газа с  $\text{ТТР}_в = -20^{\circ}\text{C}$  при том же давлении превышает  $100\%$ .

Таким образом, погрешность пересчетов формально может превышать рассчитываемую величину. Недостатком международного стандарта является и то, что он распространяется на природные газы, «технически свободные от гликолей

и метанола». Такое ограничение не позволяет корректно применять методику взаимного пересчета  $TTR_B$  и  $W$  для российского природного газа (в ПГ, транспортируемом по магистральным газопроводам ОАО «Газпром», в зависимости от времени года содержание метанола может варьироваться от 20 до 130 мг/м<sup>3</sup>).

Методику расчета влагосодержания по ГОСТ 20060 с использованием расчетных коэффициентов для природного газа российских месторождений при применении отечественной технологии осушки ПГ, рассчитанной на температуру вплоть до  $-40^\circ\text{C}$ , можно считать приемлемой для определения равновесного влагосодержания КПГ.

Рассчитав влагосодержание  $W_0$  по ГОСТ 20060 и вычислив корректирующий множитель  $K_f$  по методике [5], можно определить, что равновесная влажность над гидратом  $W_f = 0,009 \text{ г/м}^3$  установится при  $TTR_f = -21,2^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета количества влаги  $G$ , которое выделится из КПГ и превратится в гидраты в процессе заправки при температурах окружающей среды  $-45^\circ\text{C}$ ,  $-35^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-25^\circ\text{C}$ ,  $-22^\circ\text{C}$ , и графики динамики их уноса с расходуемым КПГ. Для каждой температуры окружающей среды приводятся две кривые: когда испаряется и уносится 100 % влаги, которое теоретически может испариться и довести влагосодержание газа до равновесного (насыщенного) состояния при понижающемся давлении, а также для случая, когда из-за малой скорости разложения гидратов испарится 50 % возможного количества.

Таким образом, при температурах окружающей среды ниже  $-21,2^\circ\text{C}$  при каждой заправке из КПГ, имеющего влажность, соответствующую требованиям ГОСТ 27577, в баллонах будет выделяться влага в виде гидратов.

Негативные последствия, вызываемые влагой, проявляются в виде коррозии, которая протекает более активно при наличии в газе кислых компонентов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), а также в возможном обмерзании редукторов и других элементов газоиспользующего оборудования.

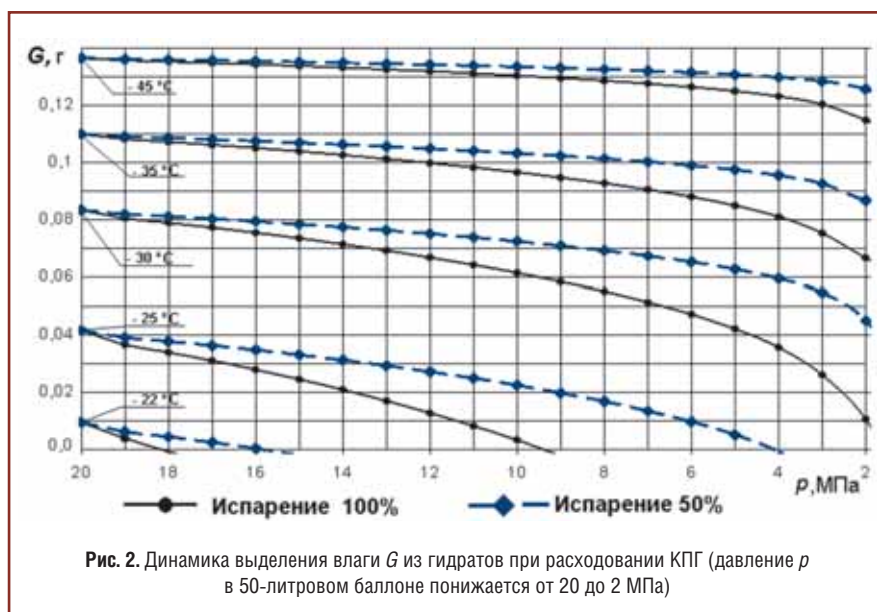


Рис. 2. Динамика выделения влаги  $G$  из гидратов при расходе КПГ (давление  $p$  в 50-литровом баллоне понижается от 20 до 2 МПа)

Скорость коррозии при низких температурах сильно снижается. При проведении грубых оценок принято считать, что скорость окислительных процессов снижается в 2 раза при понижении температуры на  $10^\circ\text{C}$ . В сравнении со скоростью коррозии в нормальных условиях при  $20^\circ\text{C}$  скорость коррозии при температуре  $-40^\circ\text{C}$  снизится в 26...64 раза.

Замесяц работы при температурах ниже  $-40^\circ\text{C}$ , что является характерным для наиболее холодных районов Крайнего Севера, коррозионное воздействие на стенки баллонов будет эквивалентно воздействию коррозии при  $20^\circ\text{C}$  в течение  $\approx 0,5$  сут.

Таким образом, основным негативным воздействием выделения влаги при работе в условиях низких температур следует считать возможное обмерзание редукторов, запорных элементов газоиспользующего оборудования (кранов, электромагнитных клапанов) и забиванию гидратами фильтрующих элементов и других узких мест тракта газоподачи.

При нормировании влагосодержания КПГ представляется целесообразным для обеспечения работоспособности газоиспользующей техники при плюсовых среднемесячных температурах окружающей среды ( $T_{oc}$ ) принимать  $TTR_B$  на  $5^\circ\text{C}$  ниже  $T_{oc}$ , а при отрицательных температурах точки росы необходимо нормировать по гидратам  $TTR_f$  и держать на  $5^\circ\text{C}$

ниже  $T_{oc}$ . Это будет соответствовать величине  $TTR_B$ , которое будет на 13...15  $^\circ\text{C}$  ниже  $T_{oc}$ .

## Литература

1. Крушневич Т.К., Пятничко А.И., Крушневич В.Т. Особенности осушки природного газа на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5. – С. 46-47.
2. Гухман Л.М. Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту. – Л.: Недра, 1980. – 161 с.
3. Истомин В.А., Нестеров А.Н., Чувиллин Е.М., Квон В.Г., Решетников А.М. Разложение гидратов различных газов при температурах ниже 273 К // Газохимия. – 2008. – № 3(2). – С.30-44.
4. Сбор и промысловая подготовка газа на северных месторождениях России / А.И. Гриценко, В.А. Истомин, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов. – М.: Недра, 1999. – 473 с.
5. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В.А. Истомин, В.Г. Квон. – М.: ИРЦ Газпром, 2004. – 507 с.
6. Истомин В.А., Смирнов В.В., Бахметьев П.И., Донских Б.Д., Крашениников С.В., Макинский А.А. Анализ нормативных документов по расчетам влагосодержания и точки росы природного газа // Газовая промышленность. – 2008. – № 12. – С. 22-26.

## Междугородная газонаполнительная компрессорная станция и система заправки транспортных средств КПГ

**Я.С. Мкртычан,**

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

Предлагается газозаправочная станция нового типа, защищенная патентом РФ, отличающаяся от известных тем, что объем соединительного газопровода вмещает не менее половины суточной производительности компрессорных установок и размещен вместе с газораздаточными колонками вне территории станции в непосредственной близости к автодорогам и местам базирования транспортных средств.

Применение предлагаемой станции позволяет снизить капитальные вложения, уменьшить эксплуатационные затраты, сократить сроки строительства и численность обслуживающего персонала.

**Ключевые слова:** АГНКС, соединительный газопровод, компримированный природный газ (КПГ).

## The intercity natural gas dual-fuel filling station and the filling system of natural gas vehicles with compressed natural gas

**J.S. Mkrtychian**

In this paper a new type of NGV-refueling compressor station, which is patented in Russian Federation, is presented. The proposed station is different from the known ones with the fact that its gas interconnection is made for such operating pressure, diameter and length, that provide the capacity, enough for containing, at least half the daily performance (throughput) of compressor units and is placed together with gas dispensers outside the station in close proximity to highways and location of vehicles.

Application of the proposed station can reduce capital expenditures, decrease operating costs, and diminish construction time and number of staff.

**Keywords:** natural gas vehicle refueling filling station (NGV – refueling filling station), connecting pipeline, compressed natural gas (CNG).

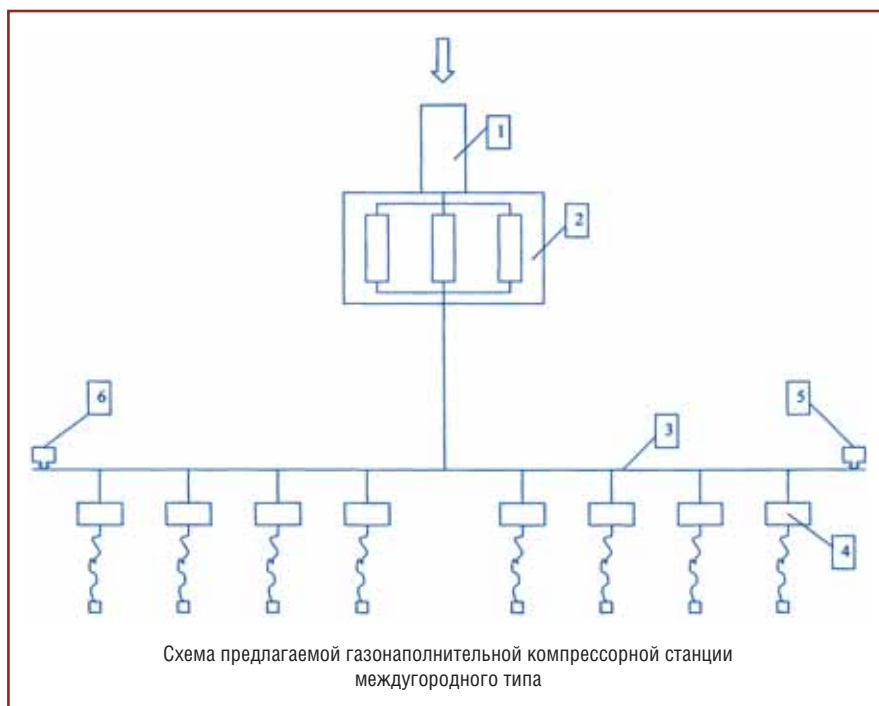
Известные автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) включают устройство отбора газа из магистрального газопровода, несколько компрессорных установок, размещаемых в производственном помещении станции с системой

осушки газа, аккумуляторы для хранения компримированного осушенного газа, выполненные в виде подземных сосудов или газобаллонных установок большого объема, сообщенных трубопроводами с компрессорной группой и газораздаточными колонками для заправки газом автомобилей, размещенных под навесом [1].

Сооружение таких станций проблематично по следующим причинам. Станции занимают площадь застройки от 0,5 до 1,0 га и требуют выделения земельного участка с учетом зон безопасности до 2,0 га. Кроме того, наличие в составе станции аккумуляторов большой вместимости от 2 до 5 м<sup>3</sup> и высокого давления (до 25,0 МПа) представляет определенную опасность. С учетом больших размеров необходимых под строительство земельных участков и повышенной опасности таких станций их сооружение чрезвычайно дорого и небезопасно.

Известные станции, независимо от конструктивного исполнения их аккумуляторов (сосуды, баллоны, змеевик), имеют ограниченную и недостаточную газоместимость. По существу такие аккумуляторы выполняют роль компенсаторов пульсирующего потока газа, поступающего от компрессоров, и способны самостоятельно (при остановке компрессоров) обеспечить газом лишь несколько автомобилей.

Другим не менее важным общим недостатком таких станций является завышенная, практически в 2 раза, производительность и мощность их компрессорных установок. Это объясняется разным спросом газа автомобилями по сменам суток и незначительным объемом аккумуляторов, неспособных вместить газ, подаваемый компрессорами в случае их круглосуточной работы и отсутствии запроса со стороны автомобилей.



Перечисленные недостатки приводят к повышению установленной мощности компрессоров, стоимости станций, увеличению сроков их сооружения и эксплуатационных затрат.

В основе предлагаемого решения лежит достижение круглосуточной, практически непрерывной, работы компрессоров станции за счет соответствующего объема газопровода, соединяющего компрессорную группу с газораздаточными колонками и позволяющего аккумулировать количество газа, достаточного для заправки проектного числа автомобилей в течение суток [2].

Исходя из того, что традиционные станции при проектной загрузке автомобилями работают в течение суток не более 12 ч, объем такого газопровода по газовместимости при максимальном давлении газа должен составлять не менее половины круглосуточной производительности компрессорных установок.

Расчеты показывают, что такой газопровод высокого давления (до 32 МПа) для обеспечения необходимой безопасности должен быть

небольшого диаметра (50-60 мм) и значительной протяженности, то есть многокилометровым и, следовательно, вынесен за пределы станции вместе с газораздаточными колонками, которые целесообразно размещать преимущественно вдоль автодорог, особенно междугородных, и в непосредственной близости к местам базирования транспортных средств.

На рисунке в качестве одного из вариантов изображена схема предлагаемой газонаполнительной компрессорной станции междугородного типа.

Станция содержит подводящий газопровод 1, компрессорные установки 2, размещенные в производственном помещении, и соединительный газопровод высокого давления 3, сообщенный с компрессорными установками 2 и газораздаточными колонками 4. Если соединительный газопровод 3 выполнен разомкнутым, то его оснащают на начальном и конечном участках отсекающими устройствами 5 и 6, предотвращающими утечки газа. Соединительный газопровод 3 и газораздаточные колонки 4

размещены вне территории компрессорной станции в непосредственной близости к автодороге и к местам базирования транспортных средств.

Рассмотрим пример эффективного построения предлагаемой станции между городами, удаленными друг от друга на расстояние 150 км, при необходимости обеспечения ежесуточной заправки 1 тыс. мощных трейлеров и автобусов с объемом заправки 170 м<sup>3</sup> газа и расстоянии между газозаправками 10 км. Предпроектные проработки и расчеты такой станции показали, что в сравнении с построением системы индивидуальных станций традиционного типа стоимость снижается как минимум в 3 раза, сроки строительства в 2 раза, число обслуживающего персонала в 10 раз, размер отводимой под строительство земли в 5 раз, эксплуатационные затраты не менее чем в 3 раза.

Технология производства и заправки баллонов автомобилей и других транспортных средств компримированным природным газом на предлагаемой станции от применения в ее составе длинномерного соединительного газопровода с газозовместимостью, достаточной для заправки проектного числа автомобилей в течение суток, изменений не претерпела и осталась фактически традиционной.

## Литература

1. Мкртычан Я.С., Ровнер Г.М. Автомобильные газозаправочные комплексы, М.: Газойл пресс, 2001. – 208 с.
2. Самсонов Р.О., Мкртычан Я.С., Котов П.Б. Газонаполнительная компрессорная система для заправки баллонов транспортных средств компримированным природным газом, патент РФ № 2374554 с приоритетом от 3 июня 2008 г.

## Калибровка электронной системы управления двигателем с искровым зажиганием, работающим на газовом топливе

**В.А. Шишков,**

начальник технического отдела ООО «Рекар»,  
доцент Самарского государственного аэрокосмического университета  
им. С.П. Королева, к.т.н.

Рассмотрены адаптация и калибровка четырех вариантов электронной системы управления ДВС с искровым зажиганием, работающим на газовом топливе. На основании исследований, проведенных автором, даны рекомендации по адаптации и калибровке электронной системы управления как двухтопливного, так и однотопливного газового ДВС на различных режимах его работы.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания (ДВС), калибровка, впрыск газового топлива, искровое зажигание, алгоритм, электронная система управления.

## Calibration of an electronic control system of the engine with spark ignition, working on gas fuel

**V.A. Shishkov**

The adaptation and calibration of four variants of an electronic control system the engine of internal combustion with spark ignition working on gas fuel is considered. The recommendations for adaptation and calibration of an electronic control system both two-fuel, and one-fuel gas the engine of internal combustion on various modes of his work are given.

**Keywords:** the engine of internal combustion, calibration, direct injection of gas fuel, spark ignition, algorithm, electronic control system.

*Окончание. Начало в № 1 (19) 2011 г.  
The end. The beginning in № 1(19) 2011*

**К**алибровка электронной системы управления двигателем (ЭСУД) осуществляется для достижения соответствующих законодательных норм по токсичности отработавших газов, испарениям углеводородов, а также для получения соответствующих

ездовых качеств автомобиля при установленных заводом-изготовителем условиях эксплуатации. Калибровка ЭСУД на газовом топливе зависит от типа электронной системы управления ГБО и алгоритма управления двигателем. В основном применяют четыре типа систем управления. Описание калибровки газовой системы с электронным управлением,

отдельным контроллером и получением управляющих сигналов от бензинового контроллера, а также автономной системы электронного управления двигателем для однотопливных газовых автомобилей приведено в первой части в предыдущем номере журнала [1].

Рассмотрим калибровку систем третьего и четвертого типов.

### Независимые бензиновая и газовая системы электронного управления ДВС с подачей топлива только одного вида

Калибровка данной системы электронного управления ДВС практически совпадает со всеми работами, описанными для второго варианта системы управления. Отметим только некоторые особенности при проведении данных работ.

■ При использовании в качестве топлива бензина и природного газа пуск и прогрев ДВС можно выполнять на любом виде топлива как для холодного, так и для прогретого двигателя.

■ Для исключения скачка мощности и крутящего момента переключение с одного на другой вид топлива желательно выполнять на режиме холостого хода при отпущенной педали акселератора. При переключении на повышенных режимах необходимо проводить калибровку режимов работы ДВС на обоих видах топлив таким образом, чтобы в точке переключения соблюдались условия примерного равенства  $N_f = N_g$  и  $M_f = M_g$ . В таком случае из-за потерь мощности и крутящего момента частота вращения коленчатого вала при работе на газе будет немного выше, чем при работе на бензине  $n_f > n_g$ .

■ Переключение с одного вида топлива на другое необходимо выполнять при частичных нагрузках, при которых возможно соблюдение условия идентичности мощности и крутящего момента.



■ На мощностных режимах из-за потерь при работе на газе не рекомендуется переключение с одного вида топлива на другое из-за появления скачка мощности и крутящего момента, что приведет к динамическому толчку автомобиля. Для предотвращения толчка в алгоритме переключения необходимо использовать противотолчковую функцию с плавным изменением режима работы двигателя при переключении с одного вида топлива на другое.

■ Для данной системы нет необходимости соблюдать условие равенства коэффициентов обучения при работе на бензине и газе, так как коррекция топливopодачи при работе ДВС на разных топливах независимая.

■ При полной выработке газового топлива из баллона необходимо проводить калибровку автоматического переключения на бензин по минимальному среднему уровню сигнала с датчика давления газа в рампе форсунок или в баллоне, при котором еще возможна устойчивая работа ДВС и достаточно его мощности и крутящего момента для нормального передвижения автомобиля. Необходимо помнить, что колебания давления в газовой рампе форсунок во время работы двигателя могут быть значительными. Поэтому в алгоритме управления двигателем должна быть предусмотрена функция распознавания среднего минимального давления в течение выбранного промежутка времени. Это необходимо для исключения ложных срабатываний системы переключения с газа на бензин при выработке газового топлива. При наличии датчика давления газа в баллоне или до магистрального клапана переключение с газа на бензин целесообразнее выполнять по минимальному выбранному уровню сигнала с этого датчика, так как уровень пульсаций давления значительно ниже, чем в газовой рампе форсунок.

### Зависимые бензиновая и газовая системы электронного управления ДВС с одновременной подачей топлив двух видов [2]

Рассмотрим особенности алгоритма управления и калибровки данной ЭСУД.

■ Необходимо определить режимы для одновременной подачи топлив двух видов с точки зрения соблюдения норм токсичности отработавших газов, получения максимальной мощности и крутящего момента или повышения экономичности эксплуатации двигателя и автомобиля.

■ Режимы, на которых подается один из видов топлив, необходимо калибровать по технологии однотопливного автомобиля для второй схемы управления.

■ Калибровку режимов с одновременной подачей двух видов топлив необходимо осуществить с соблюдением следующих особенностей:

1. Для выполнения норм токсичности отработавших газов доля бензина должна быть минимальна и выбрана с учетом возможности бензиновых электромагнитных форсунок, а именно минимального количества бензина при минимальной ширине импульса впрыска в линейном диапазоне ее расходной характеристики.

2. Для получения максимальной мощности и крутящего момента доля бензина в общей массе впрыскиваемого топлива должна быть оптимальной с точки зрения минимальных затрат на суммарное количество использованного топлива. При этом необходимо получить значения мощности и крутящего момента наиболее близкие к значениям при работе на бензине. При отсутствии наддува в случае впуска топливовоздушной смеси невозможно получить при одновременной подаче бензина и газа такие же параметры по мощности и

крутящему моменту, как при работе на бензине. Это связано со снижением наполнения цилиндров воздухом при впрыске во впускную трубу газового топлива. Снижение мощности и крутящего момента в этом случае можно оценить следующим образом:

$$N_d = N_6 (1 - 1/L_r + (1/L_r) G_{ц6} / (G_{ц6} + G_{цr}))$$
$$M_d = M_6 (1 - 1/L_r + (1/L_r) G_{ц6} / (G_{ц6} + G_{цr})),$$

где  $N_d$  и  $N_6$  – мощность ДВС при одновременной подаче двух видов топлив и при работе на бензине соответственно;  $M_d$  и  $M_6$  – крутящий момент ДВС при одновременной подаче двух видов топлив и при работе на бензине соответственно;  $L_r$  – коэффициент объемной стехиометрии при работе ДВС на газовом виде топлива;  $G_{ц6}$  и  $G_{цr}$  – массовая цикловая подача бензина и газа соответственно при одновременной подаче обоих видов топлив.

Если степень сжатия в цилиндрах для двухтопливного автомобиля будет увеличена в сравнении с базовым бензиновым вариантом двигателя, то потеря мощности и крутящего момента при работе на газе практически можно избежать.

На мощностных режимах рекомендуется полный переход работы ДВС на бензин с отключением газовой подачи. Это позволит получить идентичную мощность и защитить катколлектор или нейтрализатор от повышенных температур.

3. При снижении расчетной доли одного из топлив ниже минимальной в линейном диапазоне расходной характеристики электромагнитной форсунки должно осуществляться переключение на один вид топлива.

Снизить минимальный расход можно двумя путями: электромагнитные форсунки как для бензина, так и для газа необходимо выбирать с максимальным линейным диапазоном или устанавливать по две форсунки на цилиндр с уменьшенной в 2 раза расходной характеристикой.

При этом их управление должно быть независимым.

4. Фаза впрыска бензина при его подаче во впускной трубопровод должна заканчиваться до момента начала открытия впускного клапана соответствующего цилиндра, а фаза начала впрыска газового топлива должна начинаться после закрытия выпускного клапана в процессе такта впуска топливовоздушной смеси.

5. Количество долей для цикловой одновременной подачи двух видов топлив вычисляется по количеству воздуха, поступившего в цилиндр ДВС, при этом оно должно соответствовать стехиометрическому соотношению.

6. Пуск и прогрев ДВС должны осуществляться при таком доле-вом цикловом соотношении обоих видов топлив, при котором время его прогрева минимально. Это условие соблюдается из-за того, что замер токсичности отработавших

газов для норм Евро-3 и выше начинается с момента пуска двигателя. Холодный пуск при температурах ДВС ниже 0 °С выполняются только на газовом виде топлива (касается природного газа), пуск перегретого ДВС – на бензине. Это позволит улучшить наполнение цилиндров топливовоздушной смесью и охладить систему впуска за счет теплоты испарения бензина.

7. Для движения автомобиля на экономичных режимах с минимальным расходом топлива рекомендуется выполнить переключение для работы ДВС только на газовом виде топлива.

8. При выработке одного из видов топлив (газ из баллона или бензин из бака), которая контролируется соответствующими датчиками давления газа в баллоне или датчиками уровня бензина в баке, диспетчер работы алгоритма управления ДВС блокирует все функции для одновременной подачи двух видов топлив. ДВС работает на имеющемся в автомобиле виде топлива.

При калибровочных работах необходимо выбрать минимальное количество оставшегося топлива для конкретного типа автомобиля и двигателя для включения этой блокировки.

## Литература

1. **Шишков В.А.** Калибровка электронной системы управления двигателем с искровым зажиганием, работающим на газовом топливе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 1. – С. 63-68.

2. **Шишков В.А.** Возможности систем одновременной подачи газового и жидкого топлив в ДВС с искровым зажиганием // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 2. – С. 22-28.



## 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 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).**

Материалы статей должны быть представлены по электронной почте в программе WinWord. Объем статьи – не более 14 400 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, таблицы и графические рисунки должны быть выполнены в программе Word в формате doc, rtf. Фотографии (не менее 300 dpi, СМУК) – в формате jpg, jpeg, tiff, pdf. Отдельно необходимо представить список подписанных подписей. Не следует форматировать текст самостоятельно.

При пересылке материалов по e-mail следует сопровождать 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).

## Становление мировой индустрии СПГ

**Е.Б. Федорова,**

доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, к.т.н.

В статье рассматриваются этапы становления мировой индустрии сжиженного природного газа (СПГ), начиная с научных экспериментов XVIII в. Начало развитию этой отрасли положили такие именитые ученые, как Майкл Фарадей, Томас Эндрюс, Карл фон Линде, Джеймс Джоуль, Уильям Томсон, Джеймс Дьюар и другие. Промышленное внедрение технологий сжижения природного газа стало возможным только в первой половине XX в. В 30-50-х гг. XX в. велись работы по использованию СПГ в качестве топлива, были построены первые заводы для покрытия пиковых нагрузок газопотребления. Открытие крупных месторождений природного газа в Африке и необходимость транспортировать газ на большие расстояния через океан послужили импульсом к развитию крупнотоннажного производства СПГ.

**Ключевые слова:** СПГ, использование СПГ в качестве топлива, заводы для покрытия пиковых нагрузок, крупнотоннажные заводы СПГ, танкеры СПГ.

## Formation of the global LNG industry

**E.B. Fedorova**

The stages of becoming the global industry of liquefied natural gas (LNG), starting with the scientific experiments of the XVIII century, considered in this article. Initiated the development of this industry have put such famous scientists as Michael Faraday, Thomas Andrews, Karl von Linde, James Joule and William Thomson, Sir James Dewar and others. Commercial introduction of natural gas liquefaction technology has been possible only in the first half of the twentieth century. In the 30 - 50 years of the twentieth century, work was conducted on the using LNG as a fuel, the first «peak-shaving» plants were built. The discovery of large natural gas fields in Africa and the need to transport gas over long distances across the ocean served as an impetus to the development of large-scale production of LNG – «based-load plants».

**Keywords:** LNG, LNG as a fuel, «peak-shaving» plants, based-load plants, LNG carriers.

Начиная с XVII в. химикам было известно, что температура вещества может определять его агрегатное состояние: газ, жидкость или твердое тело. Позже ученые выяснили, что объем газа при охлаждении уменьшается, так как замедляется движение его молекул и они занимают меньше места. Кроме того, сжатие газа или принудительное сближение молекул уменьшают его объем. В конце концов

через охлаждение и сжатие объем газа может быть уменьшен настолько, что его молекулы преодолевают силы взаимного отталкивания и вступают в контакт. Иными словами, газ превращается в жидкость. Сжатие и охлаждение вскоре стали неразлучными инструментами ученых в попытках по сжижению газов.

Первым ученым, превратившим в жидкость вещество, которое обычно

существует в виде газа, был Гаспар Монж (1746-1818), французский математик, который получил жидкий диоксид серы в 1784 г. Затем только в 1823 г. Майкл Фарадей (1791-1867) получил жидкий хлор. Фарадей нагнетал давление внутри изогнутой стеклянной трубки, наполненной газообразным хлором и одним концом погруженной в стакан с измельченным льдом. Под давлением газ превращался в жидкий хлор при охлаждении льдом в конце трубки. Фарадей тем же способом получил сжиженный углекислый газ, сероводород и бромистый водород. Более десяти лет спустя, после реализации других исследований, Фарадей вернулся к сжижению газа. В 1830-х гг. он впервые получил жидкий метан – основной элемент природного газа. К тому времени были разработаны более эффективные средства охлаждения. Но, несмотря на комбинированное воздействие охлаждения и сжатия, Фарадей был не в состоянии превратить в жидкость некоторые газы, такие как кислород и водород, которые он называл «постоянными» газами.

Только в конце 1840-х гг. ирландский ученый в области физической химии Томас Эндрюс (1813-1885) предположил, что каждый газ имеет точную температуру, которую он назвал критической температурой, выше которой газ не может быть переведен в жидкое состояние даже под большим давлением. Эндрюс пришел к этому выводу, наблюдая поведение под давлением жидкого диоксида углерода. Концепция критической температуры Эндрюса вскоре привела к прорыву в сжижении так называемых «постоянных» газов. Для достижения низких температур, достаточных для перевода этих газов в жидкое состояние, двое ученых независимо друг от друга пришли к идее использования «каскадного» процесса, при котором температуру снижают шаг за шагом. Суть этого метода заключается в том, что один сжиженный газ используется для охлаждения второго с более низкой критической температурой; а затем второй газ в сжиженном состоянии используется для охлаждения

третьего с еще более низкой критической температурой и так далее.

В 1877 г. французский физик Луи Поль Кайете (1832-1913) добился сжижения трех «постоянных» газов – кислорода, азота и оксида углерода – с помощью каскадного процесса. Примерно в то же время швейцарский физик Рауль-Пьер Пикте (1846-1929) получил жидкий кислород с помощью методов, очень похожих на методы Кайете. Вопрос о том, кто это сделал первым, очень активно обсуждался, хотя Кайете продемонстрировал результат первым.

Хотя большинство газов было получено в сжиженном состоянии к концу XIX в., коммерческое производство их было невозможно. Изменил такое положение немецкий химик Карл фон Линде (1842-1934) в 1895 г., когда изобрел непрерывный процесс для производства большого количества жидкого воздуха (в основном азота и кислорода). Фон Линде стал профессором Высшего технического училища в Мюнхене, где заинтересовался низкотемпературными исследованиями. В 1876 г. он разработал первый бытовой холодильник. Британский инженер-химик Уильям Хэмпсон (1859-1926) изобрел похожий метод сжижения примерно в то же время.

В промышленном процессе сжижения Карла фон Линде используется эффект Джоуля–Томсона, названный по имени его первооткрывателей – Джеймса Джоуля (1818-1889) и Уильяма Томсона (1824-1907). Эти ученые в 1853 г. открыли, что сжатый газ в условиях теплоизоляции охлаждается при расширении. В процессе Карла фон Линде, который до сих пор является основой всего современного производства сжиженных газов, сжимаемый воздух охлаждается и сжимается, а затем подвергается расширению, при котором охлаждается еще больше. Холодный воздух постоянно рециркулирует, чтобы охлаждать поток входящего сжатого воздуха. Из-за кумулятивного эффекта охлаждения воздух постепенно становится достаточно холодным для сжижения. Процесс фон Линде сразу же стал коммерчески успешным и заложил

основу для современной индустрии сжижения воздуха. В 1902 г. молодой французский инженер Жорж Клод (1870-1960) усовершенствовал процесс сжижения воздуха и производства кислорода, что позволило значительно повысить эффективность производства по сравнению с технологиями, применявшимися в то время. Так были основаны две очень крупные компании – Linde в Германии и Air Liquide во Франции [1].

Между тем водород упорно сопротивлялся попыткам всех исследователей перевести его в жидкое состояние вплоть до 1898 г., когда шотландский химик и физик Джеймс Дьюар (1842-1923) применил процесс Линде в более эффективном оборудовании. Дьюар использовал жидкий воздух для предварительного охлаждения сжатого водорода. Это позволило снизить его температуру настолько, что стало возможным при расширении получить жидкий водород. (Некоторые газы, такие как водород, имеют очень низкие температуры инверсии, и если газ расширяется выше этой температуры, то становится теплее, а не холоднее). Годом позже, в 1899 г., Дьюару удалось получить водород и в твердом состоянии.

Джеймс Дьюар, профессор университетов Лондона и Кембриджа, заинтересовался областью чрезвычайно низких температур в 70-е гг. XIX в., когда впервые в мире стали получать в жидком виде так называемые «постоянные» газы. В 1891 г. Дьюар получил жидкий кислород в большом

количестве и изучил его магнитные свойства. В следующем году он изобрел «сосуд Дьюара» – предка всем известного сегодня термоса, который поддерживает температуру жидкости путем изоляции ее от окружающей среды. Сосуд Дьюара – это стеклянная колба с двойными стенками, покрытыми серебром, и вакуумной прослойкой между ними.

Ближе к концу века Уильям Рамзай (1852-1916) и его коллеги обнаружили новое семейство элементов, названных инертными или неактивными газами. Эти газы, включающие аргон, гелий и неон, бросили еще один вызов ученым, работающим в области сжижения газов. Дьюар подошел очень близко к сжижению гелия, но его образец газа содержал некоторое количество неона, который заморозил и заблокировал клапаны на оборудовании. Несколько лет спустя, в 1908 г., Хайке Камерлинг-Оннес (1853-1926) добился получения жидкого гелия с использованием метода, похожего на метод Дьюара. Сжатый гелий предварительно охлаждался жидким водородом перед прохождением через дроссель, где проходит заключительная стадия охлаждения, как и в процессе Линде.

При сжижении природного газа используются столь же низкие температуры и те же процессы, какие применяются в индустрии технических газов. Но только СПГ является тем продуктом, ради которого строятся крупнейшие производственные объекты и который дает крупнейшие годовые объемы продаж.



Рис. 1. Сухогруз Methane Pioneer, перестроенный в танкер для перевозки СПГ [7]

Первое упоминание о сжиженном природном газе в качестве топлива связано с именем Годфри Л. Кэбота (США), который в 1914 г. запатентовал речную баржу, работающую на СПГ. Была ли построена эта баржа – неизвестно, история умалчивает. Интересно другое: компания, которую он основал – Godfrey L. Cabot, Inc., – позже была переименована в Cabot Corporation, а ее подразделение Cabot LNG построило в 1971 г. регазификационный терминал в Бостоне, первый приемный терминал в США [2]. Другое упоминание о техническом воплощении низкотемпературного метода получения СПГ относится к 1912 г. Тогда начались работы по проектированию завода сжижения природного газа, который был построен в Западной Вирджинии (США) в 1917 г. Правда, тогда основной целью строительства завода было извлечение гелия из гелиеносного природного газа [3]. Прежде, чем индустрия СПГ встала на ноги, прошло еще несколько десятилетий.

Первый завод, выпускающий СПГ в промышленных масштабах, был построен в г. Кливленде (США, штат Огайо) в 1941 г. на основе экспериментов, проводившихся в 1937 г. Производительность его была около 30 тыс. т/год. Главной целью строительства завода было получение СПГ и создание резервных запасов природного газа для покрытия пиковых нагрузок газопотребления. Сжиженный газ хранился в изотермических цистернах при атмосферном давлении в течение всего периода низкого спроса на газ, занимая объем в 600 раз меньший, чем обычный газ. В момент резкого возрастания потребления газа СПГ регазифицировали и подавали в газопроводную сеть. В Соединенных Штатах оценили все преимущества такой схемы газоснабжения, и небольшие установки сжижения начали строить по всей стране. В 2008 г. в США насчитывалось 100 установок хранения СПГ для покрытия пиковых нагрузок газопотребления [4]. Здесь природный газ хранится в сжиженном состоянии, а затем преобразуется обратно в газ и поставляется

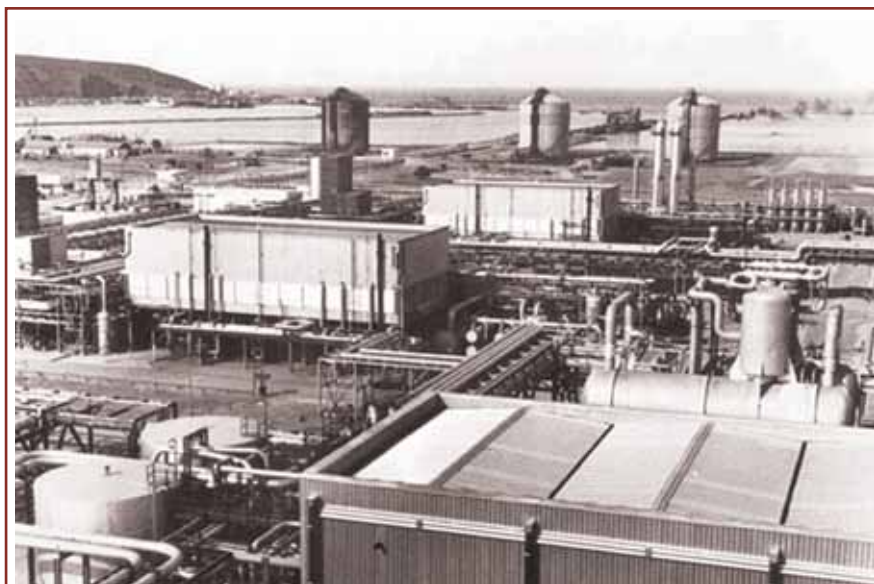


Рис. 2. Первый в мире завод СПГ в Арзеве, Алжир (1964 г.)

по трубопроводу потребителям. Существует два типа установок для покрытия пиковых нагрузок – с сжижителем газа и без него (так называемые спутниковые).

История завода в Кливленде связана также с крупнейшей аварией в индустрии СПГ, которая временно приостановила развитие этой индустрии. Однако она послужила катализатором для создания норм безопасности, которые с тех пор сделали ее одной из самых безопасных отраслей энергетики.

Прошло несколько лет, прежде чем были построены новые установки для получения СПГ и был сделан вывод, что эта технология может быть использована для транспортировки газа на очень большие расстояния.

Период с 1914 по 1955 г. ознаменован рождением инженерных решений в области коммерческих перевозок, использования и хранения СПГ [5]. В 1942 г. в Лондоне для работы на жидком метане были переделаны три грузовика с грузоподъемностью 1 т и несколько одноэтажных автобусов. Все технические испытания оказались успешными, но транспорт не использовался из-за отсутствия в Великобритании собственных источников жидкого метана.

В Норвегии в 40-х гг. XX в. Ойвинд Лоренцен разрабатывает конструкцию танкера-метановоза вместимостью

17 тыс. т. В течение 1954-1955 гг. морскими инженерами Великобритании проводится экспертиза проекта корабля для перевозок метана вместимостью около 14 тыс. т. В начале 50-х гг. прошлого века в США появляются планы поставки природного газа речными баржами от Мексиканского залива вверх по рекам Миссисипи и Иллинойс в Чикаго. В 1951 г. компанией Union Stockyard and Transit (Чикаго) начинается строительство барж для перевозки СПГ. В качестве эксперимента одну речную баржу перестроили в метановоз с пятью танками общей вместимостью 5 тыс. м<sup>3</sup>. В качестве изоляционного материала для внутренней облицовки танков было использовано пробковое дерево толщиной около 30 см. Высокая стоимость пробкового дерева побудила инженеров к разработкам новых видов изоляционных материалов, способных держать низкие температуры.

В 1954 г. к Union Stockyard and Transit присоединяется компания Continental Oil, и они образуют компанию Constock Liquid Methane: ее цель состоит в разработке океанских танкеров для сжиженного природного газа. Предварительные расчеты показали, что капитальные вложения в танкеры-метановозы будут вдвое больше, чем в обычные нефтяные танкеры. Но очевидны и преимущества: СПГ занимает объем в 600 раз мень-

ший, чем тот же газ при нормальных условиях.

В 1959 г. состоялось историческое путешествие танкера Methane Pioneer. В феврале груз в 2 тыс. т СПГ из Луизианы транспортируется через Атлантический океан и доставляется в Великобританию на приемный терминал Канви в устье Темзы. Methane Pioneer был перестроен из сухогруза в прототип СПГ-танкера вместимостью 39 тыс. баррелей (рис. 1). Безопасное пересечение океана с этим уникальным грузом, впервые перевозимым по морю, знаменует собой завершение этапа становления коммерческих перевозок СПГ. Methane Pioneer впоследствии осуществил семь дополнительных рейсов с грузом СПГ на остров Канви [6].

После первых успешных рейсов танкера Methane Pioneer в компании British Gas разрабатывались планы реализации коммерческого проекта импорта СПГ из Венесуэлы на приемный терминал о. Канви. Однако прежде, чем коммерческие соглашения были подписаны, обнаружили гигантские месторождения природного газа в Ливии и Алжире, которые находились в два раза ближе к Англии, чем Венесуэла.

В 1956 г. во французской Сахаре были обнаружены большие запасы природного газа. Основное месторождение в Hassi R'Mel являлось одним из крупнейших в мире. Его извлекаемые запасы оценивались в 1 трлн м<sup>3</sup> газа. Встал вопрос о том, как газ, не

пользующийся тогда спросом на африканском континенте, может быть доставлен во Францию или Великобританию, где интенсивно велись работы по расширению области применения природного газа и замене угля на этот экологически чистый вид топлива. Компания Gaz de France (GdF) просчитывает варианты поставки газа из Африки в Европу по трубопроводу или танкерами в сжиженном состоянии. Окончательное решение принимается в пользу СПГ. В 1960 г. начинается строительство завода по сжижению газа в г. Арзев (Алжир). Для подачи природного газа с месторождения на завод был построен 500-километровый газопровод. В Париже для управления заводом в Арзеве создается компания Compagnie Algerienne de Methane Liquide (CAMEL). Около двух третей его продукции предназначено для экспорта в Великобританию. Франция планирует аналогичные поставки СПГ. Проекты поставок СПГ из CAMEL также рассматриваются в Западной Германии и Италии. Завод в Арзеве становится первым производителем СПГ, откуда начинаются регулярные коммерческие поставки СПГ в Европу танкерами-газовозами.

К 1964 г. Великобритания окончательно сформировала планы регулярных поставок СПГ из Алжира морским путем. Долгосрочный 15-летний контракт с французской газодобывающей компанией обеспечивал более десятой части общей потребности городов Великобритании в природном



Рис. 4. Второй завод СПГ на Аляске, порт Никиски, Кенай (1969 г.)

газе. Перевозки СПГ должны были осуществляться двумя специально построенными танкерами, каждый из которых мог вместить около 12 тыс. т. Предварительная оценка стоимости их строительства из-за инновационного дизайна была очень высокой – около 3,5 млн фунтов каждый. Ожидалось, что при скорости в 17 узлов два танкера смогут совершать 56-58 рейсов в год по маршруту протяженностью более 2,5 тыс. км между алжирским портом погрузки в Арзеве и приемным терминалом на о. Канви в Великобритании.

1964 г. считается началом мировых экспортных поставок СПГ. 27 сентября 1964 г. президент Алжира Бен Белла официально открыл завод по сжижению газа в Арзеве (рис. 2). Начальная производительность завода – 1,5 млрд. м<sup>3</sup>/год. В Великобританию рейсы с СПГ на борту осуществляют метановозы Methane Princess и Methane Progress, каждый из которых вмещает 30 тыс. м<sup>3</sup> СПГ (рис. 3). Проекты танкеров разработала компания Conch International Methane (бывшая Constock Liquid Methane). Постройка каждого танкера в результате обошлась в 4,8 млн фунтов стерлингов. В первые пять месяцев службы на линии Арзев – Великобритания Methane Princess и Methane Progress выполнили 11 рейсов. С 1964 г. построенные французами СПГ-танкеры будут ежегодно перевозить в Европу 335 тыс. т СПГ. Танкер Methane Princess закончил свою службу и был разобран в 1986 г., а Methane Progress – в 1997 г. После длительного периода тщательных проверок в 1964 г. спускается на воду метановоз Findon. В свой первый рейс в Арзев он берет на борт 63 т жидкого этилена – это первая перевозка



Рис. 3. Первые коммерческие СПГ-танкеры Methane Princess и Methane Progress

морем подобного груза. На обратном пути он доставляет 125 т СПГ на приемный терминал о. Канви. Этот танкер впоследствии осуществит еще два подобных рейса.

Во Францию, на приемный терминал Гавра СПГ доставляется из Арзева танкером-метановозом Jules Verne. Его семь цилиндрических танков из нержавеющей стали вмещают 25 тыс. м<sup>3</sup> СПГ. Jules Verne совершал около 30 рейсов в год между Алжиром и Францией. Приемный терминал Гавра проработал до 1988 г. В этот период французские инженеры начинают работать над конструкцией более крупных и экономичных СПГ-танкеров вместимостью до 100 тыс. м<sup>3</sup> СПГ.

Второй завод по сжижению газа был построен в другом полушарии, в г. Кенай на Аляске (рис. 4).



Рис. 5. Танкер СПГ Polar Alaska

В 1967 г. Аляска становится первым контрактным поставщиком СПГ в Японию. Поставки должны были начаться в 1969 г. после завершения строительства объектов в порту Никиски. В марте компании Marathon Oil и Phillips Petroleum подписали 15-летний контракт на поставки СПГ с японскими импортерами Терсо и Токуо Gas. Проект предусматривал строительство завода по сжижению природного газа мощностью до 1,8 млн м<sup>3</sup>/год, три резервуара для хранения, каждый из которых вмещал 35 тыс. м<sup>3</sup>, шесть погрузочных насосов и 400-метровый док в заливе Кука. Для перевозок СПГ должны были использоваться два танкера, разработанных французской компанией Gaz Transport и построенных в Швеции. Каждый имел шесть танков общей вместимостью 70 тыс. м<sup>3</sup> СПГ, что эквивалентно 42,5 млн м<sup>3</sup> газа.

Из-за уникальных погодных условий на Аляске, где приливы в заливе Кука достигают 10 м, а битый лед представляет серьезную опасность, для укрепления корпусов использовались специальные стали, а для предотвращения замерзания водяного балласта на борту было установлено отопление. Конструкция грузовых танков, как утверждалось, совершенно отличалась по дизайну от существовавших в то время на судах СПГ.

Впервые была применена мембранная концепция, которая заключалась в том, что внутренние оболочки танков были изготовлены из очень тонких металлических листов, сформированных из полос инвара (35%-ной никелевой стали), которые придавали оболочке танка одновременно проч-

ность и гибкость в рабочем интервале температур.

Завод СПГ в порту Никиски, находящийся под управлением компании Phillips, был официально открыт в августе 1969 г. В это время один из двух построенных в Швеции низкотемпературных танкеров Polar Alaska (рис. 5) завершил ходовые испытания и находился на пути в порт Никиски.

Планы расширения французского импорта СПГ потребовали строительства нового завода в Алжире. В 1968 г. начинается строительство второго алжирского завода по сжижению газа в г. Скикда. Условия французского контракта включали строительство трубопровода из Hassi R'Mel на завод сжижения в Скикде и два или три танкера СПГ для выполнения поставок газа на приемный терминал в Фосе, недалеко от Марселя.

В 1969 г. первая пробная партия СПГ покидает новый завод Еххон в Марса-эль-Брега в Ливии (рис. 6), направляясь в Испанию и отмечая таким образом вступление Ливии во все еще эксклюзивные ряды экспортеров СПГ. Метановый танкер «Аристотель» (переименованный Methane Pioneer) транспортирует первый груз СПГ в Барселону. Для доставки СПГ из Ливии в Испанию и Италию компания Еххон строит четыре танкера вместимостью 250 тыс. баррелей каждый: Esso Vregea, Porto Venere, Liquiria и Laieta (рис. 7).

В этом же году японские импортеры СПГ рассматривают новые пути поставок газа в Японию. Тогда впервые среди потенциальных поставщиков СПГ упоминается российский о. Сахалин. Повторно к этому вопросу вернуться только через 22 года, в 1991 г. Реализация проекта СПГ на Сахалине станет возможной только после того, как в 2000 г. компания Shell объявит о своем намерении инвестировать средства в строительство завода по сжижению газа в п. Пригородное.

В декабре 1969 г. создается компания Brunei LNG. Место для четвертого в мире завода СПГ было выбрано в Лумуте. Бруней стал первым азиатским экспортером сжиженного природного газа. Именно здесь американская компания Air Products and Chemicals, Inc. (APCI) внедрила первые версии процесса СЗ-МСR и свои спирально-витые алюминиевые теплообменники. С тех пор APCI вплоть до конца 90-х гг. прошлого века обладала монополией в области теплообменников и процессов сжижения. Кроме завода для сжижения, были заложены семь танкеров СПГ. Первая партия



Рис. 6. Завод СПГ Марса-эль-Брега в Ливии (1970 г.)



Рис. 7. СПГ-танкер Laieta

СПГ с завода в Брунее была отгружена в Японию в декабре 1972 г.

Вслед за заводом в Брунее заводы СПГ строятся один за другим. Параллельно развивается сеть приемных терминалов СПГ в странах-импортерах. Приемные терминалы строятся вблизи морских портов. Узлы разгрузки СПГ-танкеров так же, как и загрузки на заводах СПГ, располагаются на вынесенных в море причалах. Как и завод по производству СПГ приемный терминал должен иметь изотермические резервуары для хранения сжиженного газа, откуда в дальнейшем СПГ перекачивается на регазификацию и в потребительскую сеть.

В 1972 г. начинают работать первые три технологические линии второго алжирского завода Skikda. Позже, в 1978 г., добавилась новая четвертая линия, а в 1981 г. – еще две. Поставки газа идут, главным образом, в Европу.

В 1977 г. запускаются первые две линии завода Bontang в Индонезии и начинаются экспортные поставки СПГ в Японию. Завод Bontang в Восточном Калимантане производительностью 0,5 млрд ft<sup>3</sup>/сут перерабатывает газ с месторождения Huffco's Badak, открытого в 1972 г. Последующие две линии строятся в 1983 г. – по одной в 1989, 1993, 1997 гг. и последняя в 1999 г. В настоящее время завод Bontang является крупнейшим в мире.

Его годовая производительность составляет 22,59 млн т/год.

На Ближнем Востоке в том же 1977 г. начинают работать первые две технологические линии завода СПГ Das Island вблизи морского нефтяного терминала на острове Дас в Абу-Даби. Для снабжения завода природным газом строится сеть газопроводов, аккумулирующая обширные запасы газа ближневосточного региона. Продукция завода предназначена для Японии.

Год спустя, в октябре, свою первую продукцию выпускает второй завод по производству СПГ в Индонезии – Arun. Две технологических линии в провинции Ачех (Северная Суматра) питаются газом с месторождения Arun, открытого в 1971 г. и принадлежащего компании Mobil. Мощности

завода были увеличены на две линии в 1984 г., и еще две линии введены в 1986 г. В этом же году запускают первую очередь – шесть линий – третьего алжирского завода СПГ Bethioua недалеко от Арзева. Вторая очередь этого завода была построена в 1981 г.

В 80-е гг. прошлого века в список экспортеров СПГ добавляются Малайзия и Австралия. 29 января 1983 г. с завода Bintulu I в Малайзии, использующего технологию Shell, отправляется первый груз СПГ в Японию. На завод газ поступает из бассейна Центральной Луконии и оффшорного месторождения Sarawak. В 1989 г. строятся первые три технологические линии на австралийском North West Shelf (Shell), к которым в 2004 г. была добавлена четвертая.

В 90-е годы строятся новые заводы: Bintulu II (Малайзия, 1995 г.); Qatargas (Катар, 1996 г.); Atlantic LNG (Тринидад, 1999 г.); Ras Laffan (RasGas) (Катар, 1999 г.); Bonny Island (Нигерия, 1999 г.); Oman LNG (Оман, 2000 г.).

В начале XXI в. к странам-экспортерам СПГ присоединяются Египет (2004 г.), Экваториальная Гвинея (2007 г.), Норвегия (2007 г.), Россия (2009 г.), Йемен (2009 г.) [8] и Перу (2010 г.) [9].

В настоящее время мировая индустрия СПГ насчитывает свыше 30 действующих крупнотоннажных заводов, нацеленных на экспортные поставки природного газа [10]. В течение нескольких ближайших лет будут запущены еще пять заводов – в Австралии (два), Анголе, Папуа Новая Гвинея и Катаре.

## Литература

1. Gas, Liquefaction Of.: <http://www.bookrags.com/research/gas-liquefaction-of-wsd/>
2. The History of LNG.: <http://www.streamrgn.com/servlet/ContentServer?gndpage=3-140-0&centralassetname=3-140-Articulo-HistoriaGNL&centralassettype=Articulo>
3. Акулов Л.А. Установки и системы низкотемпературной техники. Ожижение природного газа и утилизация холода сжиженного природного газа при регазификации. – СПб.: СПбГУ-НИПТ, 2006. – 175 с.
4. The History of LNG In The U.S.: <http://www.lngfacts.org/About-LNG/History.asp>
5. Fundamentals of The Global LNG Industry 2004. ©The Petroleum Economist Ltd., 2004. – CD-ROM.
6. Brief History of LNG.: [http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/LNG\\_introduction\\_06.php](http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/LNG_introduction_06.php)
7. <http://www.photoship.co.uk>
8. Yemen LNG, Yemen.: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/yemen-lng/>
9. Peru LNG Project, Peru.: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/peru-lng/>
10. World's LNG Liquefaction Plants and Regasification Terminals. As of December 2010.: <http://www.globallnginfo.com>



**Авторы статей в журнале № 2 (20) 2011 г.**

**Акимов Виктор Сергеевич**, студент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, р.т. (499) 263-69-18

**Афанасьева Ирина Викторовна**, аспирантка РУДН, р.т. (495) 952-67-87

**Бахмутов Сергей Васильевич**, профессор МГТУ «МАМИ», адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, д.т.н., р.т. (495) 223-05-23, доб. 12-94

**Благушко Ян Викторович**, аспирант МАМИ, р.т. (495) 223-05-23, доб. 10-04

**Быковская Лариса Игоревна**, аспирантка кафедры «Тракторы и автомобили» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина (МГАУ им. В.П. Горячкина), р.т. (499) 977-23-77

**Гнедова Людмила Анатольевна**, старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 355-90-51

**Гриченко Кирилл Александрович**, научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 8 916 681-99-61

**Гусаков Сергей Валентинович**, зав. кафедрой Российского университета дружбы народов (РУДН), профессор, д.т.н., м.т. 8 903 562-62-22, р.т. (495) 952-67-87

**Девянин Сергей Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина (МГАУ им. В.П. Горячкина), м.т. 8 917 519-63-94

**Елистратов Максим Вячеславович**, к.т.н., главный специалист ООО «Газсертец», 107497, Москва, Иркутская, д. 11/17, б/ц «Бэлрайс», кор. 1, 3, тел. (495) 641-2790, факс (495) 641-2791, e-mail: myelistratov@gazsertec.ru

**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

**Карагусов Владимир Иванович**, профессор Омского государственного технического университета, д.т.н., e-mail: karvi@mail.ru, тел. 8-913-971-3715

**Корнев Богдан Александрович**, магистр техники и технологий, аспирант РУДН, р.т. 952-62-47

**Куликов Илья Александрович**, инженер МАМИ, р.т. (495) 223-05-23, доб. 12-04

**Лапушкин Николай Александрович**, начальник лаборатории ТО АГНКС ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н., р.т. (495) 355-90-51, м.т. 8 916 854-40-57

**Маликов Олег Викторович**, аспирант МАМИ, р.т. (495) 223-05-23, доб. 10-04

**Марков Владимир Анатольевич**, профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), д.т.н., м.т. 8 917 584-49-54, р.т. (499) 263 69 18

**Маркова Вера Владимировна**, аспирантка кафедры «Тракторы и автомобили» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина (МГАУ им. В.П. Горячкина), р.т. (499) 977-23-77

**Матяцев Валерий Александрович**, главный технолог ООО «НИПИ БИОТИН» Тел. (8332) 64-35-85, e-mail: zymus@mail.ru

**Мельник Иван Сергеевич**, магистр техники и технологий, аспирант РУДН, р.т. 952-62-47

**Мкртчян Яков Сергеевич**, гл. научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», профессор, д.т.н., р.т. (495) 355-98-47, м.т. 8 916 860-22-13

**Мурад Хассан**, аспирант РУДН, р.т. (495) 952-67-87

**Николаенко Андрей Владимирович**, ректор Московского государственного технического университета «МАМИ», к.з.н., адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, р.т. (495) 223-05-23, доб. 10-21

**Патрахальцев Николай Николаевич**, профессор РУДН, д.т.н., р.т. 952-62-47, д.т. 680-16-88, м.т. 8-915-278-54-06, e-mail: nikpatrah@mail.ru

**Пронин Евгений Николаевич**, заместитель начальника Управления – начальник отдела использования газа в качестве моторного топлива ОАО «Газпром»; руководитель исследовательской группы 5.3 Международного газового союза, Президент НГА, ул. Наметкина, д. 16, Москва, В-420, ГСП-7, р.т. 719-14-81, e-mail: E.Pronin@adm.gazprom.ru

**Перетряхина Вера Борисовна**, старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», р.т. (495) 355-90-51, м.т. 8 915 118-57-42

**Разносчиков Владимир Валентинович**, старший научный сотрудник, ЦИАМ им. П.И. Баранова, к.т.н., доцент, e-mail: raznoschikov@mail.ru

**Санчес Леонардо Владимир Альвар**, профессор Университета г. Кито (Эквадор), к.т.н.

**Селифонов Валерий Викторович**, профессор МГТУ «МАМИ», адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, к.т.н., р.т. (495) 223-05-23, доб. 12-67

**Селюков Владимир Николаевич**, генеральный директор ОАО «Кировгипрогаз» Тел. (8332) 64-39-89, e-mail: kirovgiprogaz@mail.ru

**Стремяков Андрей Васильевич**, аспирант кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, р.т. (499) 263-69-18

**Теремьякин Павел Геннадиевич**, руководитель проектов ООО «НПП ЭЛКАР», тел./факс: +7 (495) 734-93-41, e-mail: paul.teremyakin@elcar.ru

**Федорова Елена Борисовна**, доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, к.т.н., р.т. (499) 135-72-60, м.т.: 8-985-155-00-18

**Федотов Игорь Владимирович**, старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н., р.т. 355-90-51

**Филонов Андрей Игоревич**, ассистент МГТУ «МАМИ», м.т.: 8 (916) 456 73 16, тел.: (495) 223 05 23, доб. 12-04, адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, e-mail: filonov@mami.ru

**Широква Галина Сергеевна**, технический директор ООО «Газсертец», 107497, Москва, Иркутская, д. 11/17, б/ц «Бэлрайс», кор. 1, 3, тел. (495) 641-2790, факс (495) 641-2791, e-mail: gshirokova@gazsertec.ru

**Шишков Владимир Александрович**, начальник технического отдела ООО «Рекар», к.т.н., доцент Самарского Государственного Аэрокосмического Университета им. С.П. Королева, д.т. +7 (8484) 35-29-07, м.т. +7 927 784 71 57, e-mail: Vladimir-Shishkov@yandex.ru

**Шумовский Владимир Алексеевич**, студент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, р.т. (499) 263-69-18

**Яновская Мария Леонидовна**, младший научный сотрудник ЦИАМ им. П.И. Баранова, e-mail: maria\_yanovskaya@mail.ru

**Contributors to journal issue No. 2 (20) 2011**

**Afanasieva Irina V.**, Post-graduate of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), office phone: +7 (495) 952-67-87

**Akimov Viktor S.**, student of «Piston Engines» department of the Bauman Moscow State Technical University, office phone: +7 (499) 263-69-18

**Bachmutov Sergey V.**, the professor of the Moscow state technical university (MAMI), Dr.Sci.Tech., office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-94)

**Blagushko Yan V.**, Post-graduate of the Moscow state technical university (MAMI), office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-04)

**Bykovskaja Labisa I.**, Post-graduate of «Tractors and Automobiles» department of the Moscow State University for Agriculture and Engineering n.a. V.P. Goryachkin, office phone: +7 (499) 977-23-77

**Devyanin Sergey N.**, D. Sc. (Eng.), professor, head of «Tractors and Automobiles» department of the Moscow State University for Agriculture and Engineering n.a. V.P. Goryachkin, m.t. +7 917 519-63-94

**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

**Fedorova Elena B.**, senior lecturer of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Cand. Tech. Sci, office phone: +7 (499) 135-72-60, m.t.: +7 985-155-00-18

**Fedotov Igor V.**, Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFs, office phone: +7 (495) 355-90-51

**Filonov Andrey I.**, Moscow state technical university (MAMI), e-mail: filonov@mami.ru

**Gnedova Lyudmila A.**, Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFs, (495) 355-90-51

**Gritsenko Kirill A.**, Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFs, 8 916 681-99-61

**Gusakov Sergey V.**, Head of Department of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), professor, Ph.D., m.t. 8 903 562-62-22

**Karagusov Vladimir I.**, professor of Omsk State Technical University, E-mail: karvi@mail.ru, ph. 8-913-971-3715, Dr.

**Kornev Bogdan A.**, masters of technique and technologies, doctoral students (RUF), office phone: +7 (495) 952-62-47

**Kulikov Ilya A.**, engineer of Moscow state technical university (MAMI), office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-04)

**Lapushkin Nikolay A.**, Head of the Laboratory of Process Equipment of AGCFs, 355-90-51, 8 916 854-40-57

**Malikov Oleg V.**, Post-graduate of the Moscow state technical university (MAMI), office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-04)

**Markov Vladimir A.**, Ph.D. Engin, professor of «Heat Physics» department of the Bauman Moscow State Technical University, phone: +7 917 584-49-54

**Markova Vera V.**, Post-graduate of «Tractors and Automobiles» department of the Moscow State University for Agriculture and Engineering n.a. V.P. Goryachkin

**Matantsev Valery A.**, Chief Process Engineer of LLC NIPI BIOTIN, phone: (7-8332) 64-35-85, E-mail: zymus@mail.ru

**Melnik Ivan S.**, masters of technique and technologies, doctoral students (RUF), office phone: +7 (495) 952-62-47

**Mkrtychian Yakov S.**, Ph.D, Chief Scientist of Gazprom VNIIGAZ, office phone: +7 (495) 355-98-47, +7 916 860-22-13

**Murad Hassan**, Post-graduate of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), office phone: +7 (495) 952-67-87

**Nikolaenko Andrey V.**, Rector of the Moscow State Technical University «МАМИ», Ph.D, office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-01)

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

**Peretryakhina Vera B.**, Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFs, phone: +7 (495) 355-90-51, +7 915 118-57-42

**Pronin Evgeny N.**, Deputy Head of Directorate, JSC Gazprom, office phone: phone: +7 (495) 719-14-81, e-mail: E.Pronin@adm.gazprom.ru

**Raznoschikov Vladimir V.**, Ph.D, Senior Research Scientist, CIAM named after P.I. Baranov E-mail: raznoschikov@mail.ru

**Sanchez Leonardo Vladimir Alvear**, Ph.D., professor of University of Kito, Ecuador

**Selifonov Valery V.**, the professor of the Moscow state technical university (MAMI), Ph.D., phone: +7 (495) 223-05-23 (12-67)

**Selyukov Vladimir N.**, General Director of OJSC Kirovgiprogaz, phone: (7-8332) 64-39-89, e-mail: kirovgiprogaz@mail.ru

**Shirokova Galina S.**, technical director, LLC Gazsertec, Russia, 107497, Moscow, Irkutskaya, 11/17, building 1, 3, Tel.: +7 (495) 641-2790, fax: +7 (495) 6412791, e-mail: gshirokova@gazsertec.ru

**Shishkov Vladimir A.**, of department of Limited Liability Company «Рекар», candidate of technical science, the senior lecturer of Korolev S.P. Samara State Space University. The Russian Federation, Samara region, Tolyatti, Stepana Razina street, 58-43, phone: +7 (8482) 35-29-07, +79277847157, e-mail: Vladimir-Shishkov@yandex.ru

**Shumovskiy Vladimir A.**, student of «Piston Engines» department of the Bauman Moscow State Technical University, phone: +7 (499) 263-69-18

**Stremyakov Andrey V.**, Post-graduate of «Heat Physics» department of the Bauman Moscow State Technical University, phone: +7 (499) 263-69-18

**Teremyakin Pavel G.**, project manager ELCAR Co. Ltd, m.t. +7 916-014-07-35, tel./fax: +7 (495) 734-93-41, e-mail: paul.teremyakin@elcar.ru

**Yanovskaya Maria L.**, Research Scientist, CIAM named after P.I. Baranov. E-mail: maria\_yanovskaya@mail.ru

**Yelistratov Maksim V.**, candidate of engineering sciences, process engineer, LLC Gazsertec, Russia, 107497, Moscow, Irkutskaya, 11/17, building 1, 3, tel.: +7 (495) 641-2790, fax: +7 (495) 6412791, e-mail: myelistratov@gazsertec.ru