



# ТРАНСПОРТ

## НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

ЖУРНАЛ № 3 (21) 2011

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

НАЦИОНАЛЬНАЯ ГАЗОМОТОРНАЯ АССОЦИАЦИЯ



АФФИЛИРОВАНА  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ ГАЗОВЫМ  
СОЮЗОМ



**СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА, БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕБОРУДОВАНИЯ  
И ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОБАЛЛОННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**



*Пост контроля, аккумуляции и сброса газа НО - 160*

*(элемент СИСТЕМЫ. СЕРТИФИЦИРОВАН.)*

*г. Саратов СТИЦ "САРЫЧ" (8452) 40-22-58, asarithev@mail.ru*

*ООО "ТЕХНОГАСС", (8452) 40-61-63, www.technogass.ru.*

*г. Набережные Челны, ООО "РАРИТЕК", (8552) 77-89-55, www.raritek.ru.*

РЕКЛАМА

**Методы транспортировки водорода**

**Газомоторные рынки Башкирии и Якутии**

**Магнитокалорические установки на речных судах**

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, 321-62-81.  
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 01.04.2011 г.  
Подписано в печать 27.05.2011 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 ООО «ТЕХНОГАСС»

## В НОМЕРЕ:

Белоруссия: Восстановим сотрудничество!.....	3
<b>В.А. Лукшо, А.В. Козлов, А.С. Теренченко</b> Оценка показателей природного газа как моторного топлива в полном жизненном цикле .....	4
<b>В.М. Фомин, Р.Р. Хакимов, Д.В. Шевченко</b> Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле .....	10
<b>А.С. Хачиян, В.Е. Кузнецов, И.Г. Шишлов, А.В. Вакуленко, Д.М. Карпов</b> Гидроприводная форсунка для газодизеля с внутренним смесеобразованием .....	14
<b>М.А. Цуладзе</b> Альтернативное моторное топливо – что в перспективе?.....	17
<b>О.К. Алексеева, С.И. Козлов, В.Н. Фатеев</b> Транспортировка водорода .....	18
<b>В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Нагорнов, В.С. Акимов</b> Биодизельные топлива из различных сырьевых ресурсов .....	25
<b>В.В. Лозовецкий, А.А. Шадрин, Ю.А. Маркова, И.В. Статкевич</b> Производство альтернативных видов топлива из растительных отходов .....	32
<b>В.И. Карагусов</b> Комбинированная магнитокалорическая силовая установка на речных судах .....	37
<b>В.В. Добрынин, А.С. Измestьев, Р.Ю. Шипков</b> Использование КПГ в Республике Саха (Якутия) .....	40
<b>Т.А. Бакиев</b> Развитие газомоторного рынка в Республике Башкортостан .....	43
<b>Б.П. Загородских, Ю.А. Коцарь, В.В. Володин, И.Д. Нигматулин, И.М. Коростышевский</b> Устойчивость трактора РТМ-160 при работе в газодизельном цикле .....	45
Новости из-за рубежа .....	47
<b>В.И. Ерохов, А.В. Николаенко</b> Экономическая эффективность применения электропривода наземного транспортного средства.....	48
<b>С.В. Чмыхалова</b> Ресурсно-экологическая оценка автомобильного транспорта крупных городов .....	55
<b>В.А. Шишков</b> Расчет элементов системы газовой подачи для ДВС с искровым зажиганием.....	61
<b>А.И. Цаплин, С.В. Бочкарев</b> Моделирование теплообмена при подаче СПГ в двигатель .....	66
<b>Е.Б. Федорова</b> Развитие технологий крупнотоннажного производства СПГ .....	70
СССР: Газовые автомобили в Великой Отечественной войне.....	75
Международная газовая выставка Gas Show 2011 года в Варшаве.....	77
Авторы статей в журнале № 3 (21) 2011 г.....	79

**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 MGТУ, 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 MGТУ, 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, 321-62-81

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

www.ngvrus.ru

Order number

Passed for press on 01.04.2011

Endorsed to be printed on 27.05.2011

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>V.A. Luksho, A.V. Kozlov, A.S. Terenchenko</b> Total life cycle assessment of natural gas as motor fuel .....	4
<b>V.M. Fomin, R.R. Khakimov, D.V. Shevchenko</b> About a role of hydrogen as chemical reagent in the kinetic mechanism of formation of carbon in a diesel engine .....	10
<b>A.S. Khachian, V.E. Kuznetsov, I.G. Shishlov, A.V. Vakulenko, D.M. Karpov</b> Hydraulically driven gas nozzle for dual fuel internal mixing diesel .....	14
<b>O.K. Alexeeva, S.I. Kozlov, V.N. Fateev</b> Hydrogen transportation .....	18
<b>V.A. Markov, S.N. Devyanin, S.A. Nagornov, V.S. Akimov</b> Fuels produced from various raw material sources .....	25
<b>V.V. Lozovetsky, A.A. Shadrin, Ju.A. Markova, I.V. Statkevich</b> Production alternative fuels from plant waste .....	32
<b>V.I. Karagusov</b> Combined magnetocaloric power-plant on river vessels .....	37
<b>V.V. Dobrynin, A.S. Izmestiev, R.Y. Shipkov</b> Use of compressed natural gas in the Republic of Sakha (Yakutia) .....	40
<b>T.A. Bakiev</b> The development of gas engine market in Republic of Bashkortostan .....	43
<b>B.P. Zagorodskiykh, Y.A. Kotsar, V.V. Volodin, I.D. Nigmatulin, I.M. Korostyshevsky</b> Stability determination of RTM-160 tractor vehicle, converted to gas-diesel usage with a gas fuel .....	45
News from abroad .....	47
<b>V.I. Erokhov, A.V. Nikolaenko</b> Economic efficiency of application of an electric drive of a ground vehicle .....	48
<b>S.V. Chmykhalova</b> Environmental and ecological properties of city motor transport .....	55
<b>V.A. Shishkov</b> Account of elements of system of gas submission for the engine of internal combustion with spark ignition .....	61
<b>A.I. Tsaplin, S.V. Bochkarev</b> Simulation of heat transfer for liquefied natural gas engine .....	66
<b>E.B. Fedorova</b> Development of LNG Large-Scale Production Technologies .....	70
Contributors to journal issue No. 3 (21) 2011 .....	79

## Белоруссия: Восстановим сотрудничество!

В Минске состоялось совещание «Потенциал сотрудничества Беларусь – Россия в области использования природного газа в качестве моторного топлива». Совещание проведено по инициативе компании ОАО «Белтрансгаз» при поддержке российского энергетического концерна ОАО «Газпром».

Совещание открыл генеральный директор ОАО «Белтрансгаз» Владимир Майоров. Он и его коллеги рассказали о рынке КПП в Беларуси за последние годы. Этот рынок в целом сохранился. И нужно поблагодарить белорусских газовиков за то, что они сохранили национальную сеть АГНКС. Однако существенного развития пока нет. Скорее наоборот: нужно принимать меры для дальнейшего роста. Потенциал для такого развития есть – отметили белорусские коллеги.

Рассказывает Василий Елесеенков, начальник отдела по эксплуатации АГНКС Белтрансгаза: «Численность парка газобаллонных автомобилей Беларуси сократилась с 5,5 тыс. в 2004 г. до 4,4 тыс. в 2010 г. 25 АГНКС ОАО «Белтрансгаз», расположенные в 18 населенных пунктах республики, реализовали в 2010 г. 17,5 млн м<sup>3</sup> КПП. Всего сеть АГНКС при средней загрузке 13,9 % от проектных мощностей осуществила 375 тыс. заправок, эффект от замещения традиционных нефтепродуктов составил практически 13 тыс. т. Средний объем одной заправки в 2010 г. составил 46,55 м<sup>3</sup>. Увеличилось число заправок тран-

зитного транспорта: в 2009 г. были заправлены 1132 транзитные машины, а в 2010 г. – 1623. Для повышения эффективности сети АГНКС к ней добавлены 11 передвижных автогазозаправщиков (ПАГЗ), которые, кроме заправки автомобилей, используются при выполнении ремонтных и аварийно-восстановительных работ на газопроводах, чтобы обеспечить бесперебойное газоснабжение».

Одним из механизмов восстановления и дальнейшего развития газомоторного рынка Беларуси должно стать возобновление ее широкомасштабного сотрудничества с сопредельными странами в области использования газа в качестве моторного топлива. Такое сотрудничество, в частности, может развиваться в рамках международного проекта «Голубой коридор». Через Беларусь проходят многие международные транспортные пути, по которым перевозят миллионы тонн грузов. Белорусские дальнбойщики активно работают в Европе, Украине, России, странах Балтии. Переход на использование газовых магистральных тягачей принесет ощутимые экологические и экономические результаты.

Российская сторона была представлена сотрудниками администрации ОАО «Газпром», дочерних и зависимых обществ, других организаций Группы «Газпром». Россияне рассказали о состоянии рынка газомоторного топлива, перспективах заводского выпуска газобаллонных автомобилей, метановых автопробегах, малотоннажном производстве и использовании СПГ, новейших разработках. В работе совещания с российской стороны принимали участие не только газовики. Представители компании «Газтехлизинг» рассказали об опыте финансирования строительства АГНКС с применением механизма финансового лизинга. Автостроители КАМАЗа представили свою продукцию: газовые машины различного назначения. Кстати, сотрудничество МАЗа и КАМАЗа в области производства газобаллонных автомобилей имеет очень хорошие перспективы. Не следует забывать о потенциале Беларуси как страны-изготовителя газовой топливной аппаратуры.

Развитие национальной газозаправочной сети с участием зарубежных инвесторов из России, Германии, Австрии и других стран – один из путей интеграции Беларуси в европейские и глобальные процессы многостороннего сотрудничества в рамках ЕЭК ООН, МГС, ЕДК, ведущих международных газомоторных ассоциаций. Состоявшееся в Минске рабочее совещание – только первый шаг к восстановлению тесного взаимодействия с белорусской газомоторной отраслью.

*Е.Н. Пронин*



В зале совещания

## Оценка показателей природного газа как моторного топлива в полном жизненном цикле

**В.А. Лукшо,**  
заведующий отделом ФГУП «НАМИ», к.т.н.,  
**А.В. Козлов,**  
главный научный сотрудник ФГУП «НАМИ», д.т.н.,  
**А.С. Теренченко,**  
заведующий лабораторией ФГУП «НАМИ», к.т.н.

Статья посвящена оценке показателей природного газа в полном жизненном цикле (ПЖЦ). Разработана математическая модель ПЖЦ природного газа на основе анализа требований международных стандартов по оценке экологической безопасности продукции, существующих методик оценки показателей силовых установок и топлив в полном жизненном цикле. Модель описывает материальные и энергетические потоки в ПЖЦ природного газа. Разработана методика расчета ущерба, наносимого окружающей среде, приведены результаты расчетного исследования.

**Ключевые слова:** природный газ (ПГ), моторные топлива, математическая модель, полный жизненный цикл.

## Total life cycle assessment of natural gas as motor fuel

**V.A. Luksho, A.V. Kozlov, A.S. Terenchenko**

Article is devoted to the total life cycle assessment of natural gas as a motor fuel. The mathematical model of natural gas total life cycle on the basis of international standards requirements according to ecological safety in the total life cycle, existing techniques of engines and fuels assessment in total life cycle is developed. The model describes material and energy flows in the natural gas life cycle. The environmental damage assessment procedure for the natural gas total life cycle is developed. Results of computation research are described.

**Keywords:** natural gas, motor fuels, the mathematical model, the total life cycle.

В современных условиях выбор перспективных видов топлив, совершенствование конструкции силовых установок и улучшение их экологических показателей должны опираться на оценку полного жизненного цикла. Для более полного учета негативного воздействия на окружающую среду целесообразно проводить такую оценку, учитывая все стадии жизненного цикла: добычу сырья, получение топлив, их транспортировку и распределение, а также использование в силовых установках. Для оценки показателей (расход сырья и энергии, выброс вредных веществ) в полном жизненном цикле, а также для интегральной оценки негативного воздействия на окружающую среду в ПЖЦ необходимо создание математических моделей и методик расчета.

В настоящее время природный газ рассматривают как одно из наиболее перспективных альтернативных топлив для транспортных и стационарных силовых установок с двигателями внутреннего сгорания [1, 2]. Это обусловлено достаточно большими разведанными запасами природного газа, а также возможностью существенного сокращения вредных выбросов при его сжигании в двигателях в сравнении с использованием топлив нефтяного происхождения.

На основе анализа требований международных стандартов по оценке экологической безопасности продукции в ПЖЦ (ГОСТ Р ИСО 14040-14043), а также существующих методик оценки показателей силовых установок и топлив в полном жизненном цикле [3-5] разработана математическая модель, описывающая материальные и энергетические потоки в жизненном цикле природного газа, и методика расчета ущерба, наносимого окружающей среде в ПЖЦ ПГ.

Так как стадии жизненного цикла и единичные процессы существенно отличаются друг от друга по своей физической природе, то целесообразно изложение материала построить в соответствии с основными стадиями жизненного цикла и подробно рассмотреть особенности моделирования каждой из них.

На основании анализа технологий получения и использования природного газа выделены наиболее значимые единичные процессы в его жизненном цикле, которые включены в математическую модель (табл. 1).

Перечисленные в табл. 1 единичные процессы можно объединить в стадии жизненного цикла (табл. 2).

Любой единичный процесс, стадию жизненного цикла или ПЖЦ в целом можно схематически представить в виде «черного ящика» (рис. 1).

Процесс имеет «Вход», то есть входные потоки веществ (материалов, сырья) и энергии, и «Выход», то есть выходные потоки веществ (материалов) и энергии. При

Таблица 1

**Единичные процессы в ПЖЦ ПГ**

Процессы	Обозначение
Добыча ПГ	RE
Переработка ПГ	PR
Транспортировка и распределение ПГ	TD
Компримирование ПГ	CM
Получение нефтяных топлив	PF
Получение электроэнергии	EG
Использование ПГ	US

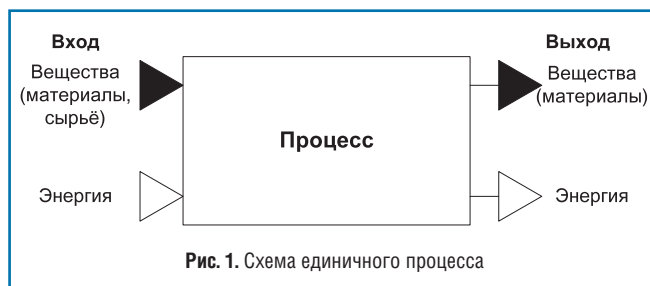


Рис. 1. Схема единичного процесса

Процессы добычи и переработки топлива связаны с физическими и химическими преобразованиями сырья. Для осуществления таких процессов затрачивается энергия, которую частично получают путем сжигания сырья, в данной модели – сырого природного газа и так называемых вспомогательных топлив (например, мазута, дизельного топлива, угля и т.п.). Энергетическую эффективность преобразования топлива оценивают величиной КПД процесса  $\eta$ . Для оценки вклада различных топлив в энергетический баланс каждого процесса используют относительный расход  $g_i$ , где  $i$  – вид топлива. В свою очередь каждый вид топлива может быть использован в различных силовых установках. Доля  $i$ -го топлива, сжигаемого в  $j$ -й силовой установке, обозначена как  $c_{ij}$ .

Для каждого типа энергетической установки задается  $e_{ij,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вредного вещества при сжигании  $i$ -го топлива в  $j$ -й энергетической установке. Кроме того, при переработке и транспортировке топлив возможны дополнительные выбросы вредных веществ, которые могут быть связаны с особенностями технологических процессов. Для стадии получения природного газа (см. табл. 2) это могут быть выбросы метана и неметановых углеводородов вследствие различных утечек в технологических цепочках.

Таблица 2

**Стадии ПЖЦ ПГ**

Стадия	Единичный процесс	Обозначение
Получение ПГ	Добыча ПГ	NGP
	Переработка ПГ	
	Транспортировка и распределение ПГ	
	Компримирование ПГ	
Вспомогательные процессы	Получение нефтяных топлив	APR
	Получение электроэнергии	
Использование ПГ	Использование ПГ	NGU

моделировании любого процесса должны соблюдаться законы сохранения массы и энергии:

$$M^{in} = M^{out} ;$$

$$E^{in} = E^{out} ,$$

где  $M$  – поток массы веществ (материалы, сырье);  $E$  – поток энергии, включая энергию, вносимую или выносимую с топливом или сырьем для его получения, а также затраты энергии на процесс и потери энергии в окружающую среду; индексы:  $in$  – входной поток;  $out$  – выходной поток.

Эти законы должны соблюдаться на любом уровне иерархии процессов – от единичных до жизненного цикла в целом. Для каждого единичного процесса, стадии и жизненного цикла в целом рассчитываются показатели:

- входного потока веществ (материалы, сырье);
- входного потока энергии;
- выходного потока веществ (материалы);
- выходного потока энергии.

Прежде чем перейти непосредственно к описанию математической модели, необходимо сделать некоторые вводные замечания.

**Математическая модель стадии получения природного газа (NGP)**

С точки зрения математического моделирования процессы, входящие в стадию получения ПГ, имеют сходство, поэтому рассмотрим модель процесса добычи природного газа, остальные процессы стадии получения ПГ описываются аналогично.

**Процесс добычи ПГ (RE)**

Входные потоки

1. Добываемый ПГ:

$$M_{RE}^{in} = (1 + g_{RE} (\frac{1}{\eta_{RE}} - 1)) M_{RE}^{out} ,$$

где  $M_{RE}^{in}$  – масса добываемого ПГ, необходимого для осуществления ПЖЦ, кг;  $g_{RE}$  – относительный расход ПГ на процесс;  $\eta_{RE}$  – КПД процесса;  $M_{RE}^{out}$  – масса ПГ на выходе из стадии добычи природного газа, кг.

## 2. Вспомогательные топлива:

$$M_{RE,i}^{in} = \left(\frac{1}{\eta_{RE}} - 1\right) g_{RE,i} \frac{Hu_{ПГ}}{Hu_i} M_{RE}^{out};$$

$$M_{RE,\Sigma i}^{in} = \sum_i M_{RE,i}^{in},$$

где  $M_{RE,i}^{in}$  – масса  $i$ -го вспомогательного топлива, необходимого для осуществления процесса, кг;  $g_{RE,i}$  – относительный расход  $i$ -го вспомогательного топлива в рассматриваемом процессе;  $Hu_{ПГ}$  – низшая теплота сгорания ПГ, МДж/кг;  $Hu_i$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го вспомогательного топлива, МДж/кг;  $M_{RE,\Sigma i}^{in}$  – суммарная масса вспомогательных топлив, кг.

В качестве вспомогательных топлив для осуществления процесса добычи ПГ используются мазут, дизельное топливо, бензин, природный газ.

## 3. Тепловая энергия:

$$E_{RE}^{in} = Hu_{ПГ} M_{RE}^{in};$$

$$E_{RE,i}^{in} = Hu_i M_{RE,i}^{in};$$

$$E_{RE,\Sigma i}^{in} = E_{RE}^{in} + \sum_i E_{RE,i}^{in},$$

где  $E_{RE}^{in}$  – затраты тепловой энергии ПГ, МДж;  $E_{RE,i}^{in}$  – затраты тепловой энергии  $i$ -го вспомогательного топлива, МДж;  $E_{RE,\Sigma i}^{in}$  – суммарные затраты тепловой энергии, МДж.

## 4. Электроэнергия:

$$E_{EN,RE}^{in} = \left(\frac{1}{\eta_{RE}} - 1\right) g_{EN,RE} Hu_{ПГ} M_{RE}^{out},$$

где  $E_{EN,RE}^{in}$  – затраты электроэнергии на процесс, МДж;  $g_{EN,RE}$  – относительный расход электроэнергии на процесс.

### Выходные потоки

#### 1. Выбросы вредных веществ:

##### а) метан:

$$M_{RE,CH_4}^{out} = E_{RE}^{in} \sum_j c_{ПГ,j} e_{ПГ,j,CH_4} + \sum_i \sum_j E_{RE,i}^{in} c_{i,j} e_{i,j,CH_4} +$$

$$+ (e_{RE,CH_4} + e_{RE,CH_4,утечки}) Hu_{ПГ} M_{RE}^{out},$$

где  $M_{RE,CH_4}^{out}$  – выброс метана при осуществлении процесса, кг;  $c_{ПГ,j}$  – доля ПГ, сжигаемого на  $j$ -й энергетической установке;  $e_{ПГ,j,CH_4}$  – удельный выброс метана при использовании ПГ на  $j$ -й вспомогательной энергоустановке, кг/МДж;  $c_{i,j}$  – доля  $i$ -го вспомогательного топлива на  $j$ -й энергетической установке;  $e_{i,j,CH_4}$  – удельный выброс метана при использовании  $i$ -го вспомогательного топлива на  $j$ -й вспомогательной энергоустановке, кг/МДж;  $e_{RE,CH_4}$ ,  $e_{RE,CH_4,утечки}$  – удельный выброс метана, обусловленный особенностями технологического процесса и утечками соответственно, кг/МДж;

##### б) остальные вредные вещества:

$$M_{RE,k}^{out} = E_{RE}^{in} \sum_j c_{ПГ,j} e_{ПГ,j,k} + \sum_i \sum_j E_{RE,i}^{in} c_{i,j} e_{i,j,k} +$$

$$+ e_{RE,k} Hu_{ПГ} M_{RE}^{out},$$

где  $M_{RE,k}^{out}$  – выброс  $k$ -го вредного вещества, кг;  $e_{ПГ,j,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вещества при использовании ПГ на  $j$ -й вспомогательной энергоустановке, кг/МДж;  $e_{i,j,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вредного вещества при использовании  $i$ -го вспомогательного топлива на  $j$ -й вспомогательной энергоустановке, кг/МДж;  $e_{RE,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вещества, обусловленный особенностями технологического процесса, кг/МДж;

в) все вредные вещества суммарно:

$$M_{RE,\Sigma k}^{out} = M_{RE,CH_4}^{out} + \sum_k M_{RE,k}^{out}.$$

## 2. ПГ:

$$M_{RE}^{out} = M_{PR}^{in},$$

где  $M_{PR}^{in}$  – масса ПГ, поступающего из процесса добычи в процесс переработки ПГ, кг.

Природный газ после процесса добычи ПГ поступает полностью в процесс переработки ПГ.

## 3. Тепловая энергия:

$$E_{RE}^{out} = E_{RE}^{in} + \sum_i E_{RE,i}^{in} + E_{EN,RE}^{in}.$$

## Стадия получения природного газа в целом (NGP)

### Входные потоки

#### 1. ПГ:

$$M_{NGP}^{in} = M_{RE}^{in}.$$

#### 2. Вспомогательные топлива:

$$M_{NGP,i}^{in} = M_{RE,i}^{in} + M_{PR,i}^{in} + M_{TD,i}^{in} + M_{CM,i}^{in};$$

$$M_{NGP,\Sigma i}^{in} = \sum_i M_{NGP,i}^{in},$$

где  $M_{NGP,\Sigma i}^{in}$  – суммарная масса вспомогательных топлив, кг.

#### 3. Тепловая энергия:

$$E_{NGP,i}^{in} = E_{RE,i}^{in} + E_{PR,i}^{in} + E_{TD,i}^{in} + E_{CM,i}^{in};$$

$$E_{NGP,\Sigma i}^{in} = \sum_i E_{NGP,i}^{in},$$

где  $E_{RE,i}^{in}$ ,  $E_{PR,i}^{in}$ ,  $E_{TD,i}^{in}$ ,  $E_{CM,i}^{in}$  – входные потоки тепловой энергии для различных процессов (обозначения в соответствии с табл. 1), МДж;  $E_{NGP,\Sigma i}^{in}$  – суммарная тепловая энергия, МДж.

#### 4. Электроэнергия:

$$E_{EN,NGP}^{in} = E_{EN,RE}^{in} + E_{EN,PR}^{in} + E_{EN,TD}^{in} + E_{EN,CM}^{in},$$

где  $E_{EN,RE}^{in}$ ,  $E_{EN,PR}^{in}$ ,  $E_{EN,TD}^{in}$ ,  $E_{EN,CM}^{in}$  – входные потоки электрической энергии для различных процессов (см. табл. 1), МДж.

### Выходные потоки

#### 1. ПГ:

$$M_{NGP}^{out} = M_{US}^{in} + M_{PF}^{in} + M_{EG}^{in},$$

где  $M_{US}^{in}$ ,  $M_{PF}^{in}$ ,  $M_{EG}^{in}$  – потоки ПГ в процессы использования ПГ, получения нефтяных топлив и электроэнергии соответственно, кг.

2. Вредные вещества (в том числе метан):

$$M_{NGP,k}^{out} = M_{RE,k}^{out} + M_{PR,k}^{out} + M_{TD,k}^{out} + M_{CM,k}^{out};$$

$$M_{NGP,\Sigma k}^{out} = \sum_k M_{NGP,k}^{out},$$

где  $M_{RE,k}^{out}$ ,  $M_{PR,k}^{out}$ ,  $M_{TD,k}^{out}$ ,  $M_{CM,k}^{out}$  – выходные потоки  $k$ -го вредного вещества от единичных процессов (см. табл. 1), кг;  $M_{NGP,\Sigma k}^{out}$  – суммарная масса вредных веществ, кг.

3. Тепловая энергия:

$$E_{NGP}^{out} = E_{RE}^{out} + E_{PR}^{out} + E_{TD}^{out} + E_{CM}^{out},$$

где  $E_{RE}^{out}$ ,  $E_{PR}^{out}$ ,  $E_{TD}^{out}$ ,  $E_{CM}^{out}$  – выходные потоки тепловой энергии от различных процессов (см. табл. 1), МДж.

### Математическая модель стадии вспомогательных процессов (APR)

Процесс получения вспомогательных нефтяных топлив (PF)

Входные потоки

1. Сырье:

$$M_{PF}^{in} = \sum_i \sum_n (M_{n,i}^{in} g_{PF,i,l}),$$

где  $M_{n,i}^{in}$  – масса полученного  $i$ -го вспомогательного топлива, используемого в  $n$ -м единичном процессе, кг;  $g_{PF,i,l}$  – удельный расход  $l$ -го сырьевого материала для получения 1 кг  $i$ -го вспомогательного топлива, кг/кг.

2. Энергия:

$$E_{PF}^{in} = \sum_n \sum_i E_{n,i}^{in} + E_{EN_{PF}}^{in},$$

где  $E_{n,i}^{in}$  – тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании  $i$ -го вспомогательного топлива в  $n$ -м единичном процессе, МДж;  $E_{EN_{PF}}^{in}$  – расход электроэнергии на получение вспомогательных топлив, МДж.

$$E_{n,i}^{in} = M_{n,i}^{in} Hu_i;$$

$$E_{EN_{PF}}^{in} = \sum_n \sum_i (M_{n,i}^{in} g_{EN_{PF},i}),$$

где  $g_{EN_{PF},i}$  – удельный расход электроэнергии на получение 1 кг  $i$ -го вспомогательного топлива, МДж/кг.

Выходные потоки

1. Вспомогательные топлива:

$$M_{PF}^{out} = \sum_n \sum_i M_{n,i}^{in}.$$

2. Вредные вещества:

$$M_{PF,k}^{out} = \sum_n \sum_i (M_{n,i}^{in} e_{PF,i,k});$$

$$M_{PF,\Sigma k}^{out} = \sum_k M_{PF,k}^{out},$$

где  $e_{PF,i,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вредного вещества при получении 1 кг  $i$ -го вспомогательного топлива, кг/кг;  $M_{PF,\Sigma k}^{out}$  – суммарная масса вредных веществ, кг.

3. Тепловая энергия:

$$E_{PF}^{out} = E_{EN_{PF}}^{in} + \sum_n \sum_i E_{n,i}^{in}.$$

Процесс получения электроэнергии (EG)

Входные потоки

1. Сырье:

$$M_{EG,l}^{in} = \sum_n (E_{EG,n}^{in} g_{EG,l});$$

$$M_{EG,\Sigma l}^{in} = \sum_l M_{EG,l}^{in},$$

где  $E_{EG,n}^{in}$  – количество электроэнергии, используемой в  $n$ -м единичном процессе, МДж;  $g_{EG,l}$  – удельный расход  $l$ -го сырья на получение 1 МДж электроэнергии, кг/МДж;  $M_{EG,\Sigma l}^{in}$  – суммарный расход сырья, кг.

2. Тепловая энергия:

$$E_{EG,\Sigma l}^{in} = \sum_l M_{EG,l}^{in} Hu_l,$$

где  $Hu_l$  – низшая теплота сгорания  $l$ -го сырья, МДж/кг.

Выходные потоки

1. Вредные вещества:

$$M_{EG,k}^{out} = \sum_n (E_{EG,n}^{in} e_{EG,k});$$

$$M_{EG,\Sigma k}^{out} = \sum_k M_{EG,k}^{out},$$

где  $M_{EG,k}^{out}$  – выброс  $k$ -го вредного вещества при получении электроэнергии, кг;  $E_{EG,n}^{in}$  – электроэнергия, поступающая в  $n$ -й единичный процесс, МДж;  $e_{EG,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вредного вещества при получении 1 МДж электроэнергии, кг/МДж;  $M_{EG,\Sigma k}^{out}$  – суммарный выброс вредных веществ, кг.

2. Электроэнергия:

$$E_{EG,\Sigma n}^{out} = \sum_n E_{EG,n}^{in}.$$

Стадия вспомогательных процессов в целом (APR)

Входные потоки

1. Сырье:

$$M_{APR,l}^{in} = M_{PF,l}^{in} + M_{EG,l}^{in};$$

$$M_{APR,\Sigma l}^{in} = \sum_l M_{APR,l}^{in},$$

где  $M_{APR,l}^{in}$  – расход  $l$ -го сырья, кг;  $M_{APR,\Sigma l}^{in}$  – суммарный расход сырья, кг.

2. Энергия:

$$E_{APR}^{in} = E_{PF}^{in} + E_{EG}^{in}.$$

Выходные потоки

1. Топливо:

$$M_{APR,i}^{out} = M_{RE,i}^{in} + M_{PR,i}^{in} + M_{TD,i}^{in} + M_{CM,i}^{in};$$

$$M_{APR,\Sigma i}^{out} = \sum_i M_{APR,i}^{out},$$



где  $M_{RE,i}^{in}$ ,  $M_{PR,i}^{in}$ ,  $M_{TD,i}^{in}$ ,  $M_{CM,i}^{in}$  – потоки  $i$ -х топлив между единичными процессами (см. табл. 1);  $M_{APR,\Sigma i}^{out}$  – суммарный поток топлив, кг.

2. Вредные вещества:

$$M_{APR,k}^{out} = M_{PF,k}^{out} + M_{EG,k}^{out};$$

$$M_{APR,\Sigma k}^{out} = \sum_k M_{APR,k}^{out},$$

где  $M_{APR,\Sigma k}^{out}$  – суммарная масса вредных веществ, кг.

3. Тепловая энергия:

$$E_{APR}^{out} = E_{PF}^{out} + E_{EG}^{out}.$$

## Математическая модель стадии использования ПГ (NGU)

Стадия использования ПГ включает один процесс, в связи с чем входные и выходные потоки для стадии и для процесса использования ПГ будут идентичными.

*Входные потоки*

1. Топливо (ПГ):

$$M_{NGU}^{in} = W g_{US},$$

где  $W$  – работа двигателя, кВт·ч;  $g_{US}$  – удельный расход ПГ на 1 кВт·ч работы силовой установки, кг/кВт·ч.

2. Энергия:

$$E_{NGU}^{in} = M_{NGU}^{in} H_{u,ПГ}.$$

*Выходные потоки*

1. Вредные вещества:

$$M_{NGU,k}^{out} = W e_{US,k};$$

$$M_{NGU,\Sigma k}^{out} = \sum_k M_{NGU,k}^{out},$$

где  $M_{NGU,k}^{out}$  – выброс  $k$ -го вредного вещества при работе силовой установки, кг;  $e_{US,k}$  – удельный выброс  $k$ -го вредного вещества на 1 кВт·ч работы силовой установки, кг/кВт·ч;  $M_{NGU,\Sigma k}^{out}$  – суммарный поток вредных веществ, кг.

2. Энергия:

$$E_{NGU}^{out} = E_{NGU}^{in}.$$

## Математическая модель полного жизненного цикла природного газа

*Входные потоки*

1. Сырье:

$$M_{ПЖЦ}^{in} = \sum_i M_{NGP,i}^{in} + M_{NGP,ПГ}^{in} + \sum_l M_{APR,l}^{in}.$$

2. Энергия:

$$E_{ПЖЦ}^{in} = \sum_i E_{NGP,i}^{in} + E_{APR}^{in} - E_{APR,ПГ}^{in},$$

где  $E_{APR,ПГ}^{in}$  – поток энергии ПГ от стадии получения на стадию вспомогательных процессов, МДж.

*Выходные потоки*

1. Вредные вещества:

$$M_{ПЖЦ}^{out} = \sum_k (M_{NGP,k}^{out} + M_{APR,k}^{out} + M_{NGU,k}^{out}).$$

2. Энергия:

$$E_{ПЖЦ}^{out} = E_{NGP}^{out} + E_{APR}^{out} + E_{NGU}^{out}.$$

## Методика оценки негативного воздействия природного газа на окружающую среду в полном жизненном цикле

Ущерб при реализации ПЖЦ природного газа оценивают по результатам расчета материальных потоков в жизненном цикле по представленной модели. Полученные значения выбросов вредных веществ используют для определения ущерба, который оценивают на основе «Временной методики определения предотвращенного экологического ущерба» [6], утвержденной Государственным комитетом РФ по охране окружающей среды в 1999 г. В соответствии с этой методикой ущерб от загрязнения атмосферного воздуха ( $Y_{air}$ ) рассчитывают по формуле:

$$Y_{air} = y_{air} \sigma f M_{air},$$

где  $y_{air}$  – нормативная константа, переводящая условную оценку выбросов в денежную, руб./усл. т (в ценах 2011 г.  $y_{air} = 53$  руб./усл. т);  $\sigma$  – показатель опасности загрязнения атмосферы над различными территориями;  $f$  – поправка, учитывающая характер рассеивания выбросов вредных веществ в атмосфере;  $M_{air}$  – приведенная масса выброса вредных веществ, усл. т/год.

В соответствии с [6] все выбросы вредных веществ в атмосферу по их относительной агрессивности приводятся к диоксиду серы  $SO_2$ . Приведенная масса годового выброса загрязнений в атмосферу определяется по формуле

$$M_{air} = \sum_{k=1}^N A_k m_{air,k},$$

где  $A_k$  – показатель относительной агрессивности  $k$ -го вещества, усл. т/т;  $m_{air,k}$  – масса годового выброса  $k$ -го вредного вещества в атмосферу, т/год;  $N$  – общее число вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Для оценки ущерба от выброса парниковых газов используют так называемый потенциал к возникновению парникового эффекта [7, 8]. В качестве единицы измерения используют выброс 1 кг диоксида углерода, к которому приводят все остальные выбросы, связанные с парниковым эффектом. Результат расчетов показывает потенциал, выраженный в эквивалентном выбросе – кг  $CO_2$ .

Ущерб от глобального потепления  $Y_{GWP}$  можно определить по следующей зависимости:

$$Y_{GWP} = \gamma_{CO_2} \sum_k GWP_k m_{air,k},$$

**Основные результаты оценки ПЖЦ моторных топлив**

Показатель	Дизельное топливо	Бензин	Природный газ
Расход невозобновляемых ресурсов, г/кВт•ч	264,9	408,9	240,8
Расход энергии, МДж/кВт•ч	13,4	21,0	13,6
Суммарный выброс вредных веществ (без CO <sub>2</sub> ), г/кВт•ч	12,0	37,5	10,9
Выброс CO <sub>2</sub> , г/кВт•ч	865,6	1207,8	644,6
Ущерб от загрязнения окружающей среды, руб./кВт•ч	0,85	1,30	0,39

где  $\gamma_{CO_2}$  – ущерб от выброса в атмосферу 1 т CO<sub>2</sub> (140 руб./усл. т в ценах 2011 г.);  $GWP_k$  – потенциал образования парникового эффекта для k-го вредного вещества.

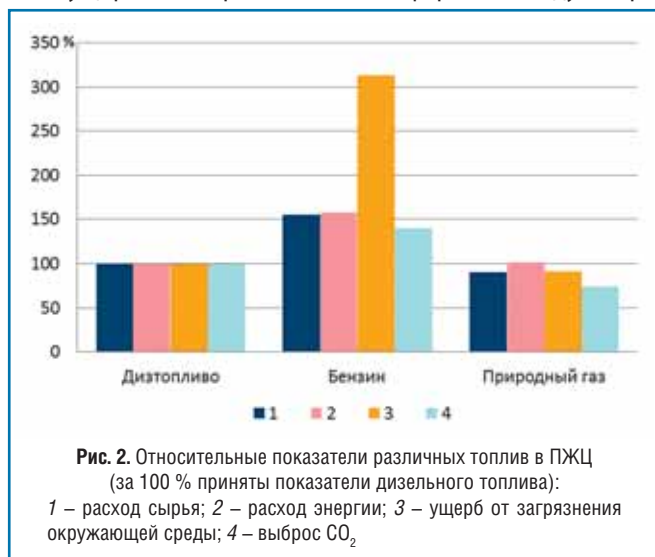
Для иллюстрации применения разработанной математической модели ПЖЦ природного газа проведены расчеты для трех видов топлива: дизельного топлива, бензина и природного газа (табл. 3, рис. 2). При этом принято, что все топлива используются в силовых установках автомобилей полной массой более 3,5 т, удовлетворяющих требованиям норм на уровне вредных выбросов Евро-3.

Таким образом, разработанная математическая модель полного жизненного цикла природного газа как топлива учитывает процессы его добычи, переработки, транспортировки и распределения, компримирования и использования, а также вспомогательные процессы получения нефтяных топлив и электроэнергии для осуществления ПЖЦ ПГ. Математическая модель позволяет рассчитывать материальные и энергетические потоки в жизненном цикле природного газа, определять расход природных ресурсов, энергии, выброс вредных веществ в окружающую среду. Разработанная методика оценивает ущерб от загрязнения атмосферного воздуха при

реализации ПЖЦ ПГ в денежном выражении выбросами вредных веществ (например, CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>2</sub>, PM и др.), а также парниковых газов (в частности, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и др.). Предварительные результаты расчетов ПЖЦ природного газа, дизельного топлива и бензина при их использовании в современных силовых установках автомобилей полной массой более 3,5 т показали, что природный газ наиболее перспективен.

**Литература**

- Вершков Л.В., Грошев В.Л., Гаврилов В.В. и др.** Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. – М.: Госкомэкологии РФ, 1999. – 68 с.
- Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф.** Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. – М.: НАМИ, 2001. – 248 с.
- Корнилов Г.С.** Эколога-экономическая оценка автомобильных дизелей в полном жизненном цикле // Авто-тракторное электрооборудование. – 2004. – № 10. – С. 27-32.
- Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А.** Работа дизелей на нетрадиционных топливах. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
- Лукшо В.А.** Альтернативные топлива для автотранспорта // Проблемы конструкции двигателей и экология: Сб. науч. тр. НАМИ. – М.: НАМИ, 1999. – С. 137-150.
- Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.
- Mayerhofer P., Krewitt W., Friderich R.** Extension of the Accounting Framework. Final Report. – Stuttgart: IER, 1997. – 348 p.
- Кутенев В.Ф., Козлов А.В., Теренченко А.С.** Сопоставительный анализ отечественной и европейской методик оценки ущерба от загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – № 5. – С. 46-51.



**Рис. 2.** Относительные показатели различных топлив в ПЖЦ (за 100 % приняты показатели дизельного топлива): 1 – расход сырья; 2 – расход энергии; 3 – ущерб от загрязнения окружающей среды; 4 – выброс CO<sub>2</sub>

## Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле

**В.М. Фомин**, профессор РУДН, д.т.н.,  
**Р.Р. Хакимов**, аспирант РУДН,  
**Д.В. Шевченко**, аспирант РУДН

Обсуждается актуальная проблема современной автомобильной промышленности – снижение выбросов частиц сажи дизелями. Рассматривается альтернативный вариант метода снижения эмиссии частиц на основе применения добавки к рабочему телу двигателя водородного реагента. Обосновывается ряд научных положений о роли водорода как химического реагента в актах образования и выгорания частиц, правомерность которых подтверждена результатами экспериментальной апробации.

**Ключевые слова:** водород, химический реагент, дизель, частицы сажи, кинетический механизм образования частиц, выгорание дисперсного углерода, эмиссия сажи.

## About a role of hydrogen as chemical reagent in the kinetic mechanism of formation of carbon in a diesel engine

**V.M. Fomin, R.R. Khakimov, D.V. Shevchenko**

The actual problem of modern motor industry – decrease in emissions of particles of soot by diesel engines is discussed. The alternative variant of a method of decrease in issue of particles on the basis of application of the additive to a working body of the engine of a hydrogen reagent is considered. As chemical reagent a number of scientific regulations about of a role of hydrogen proves in certificates of formation and burning out of particles which legitimacy is confirmed by results of experimental approbation.

**Keywords:** hydrogen, a chemical reagent, a diesel engine, particles of soot, the kinetic mechanism of formation of particles, burning out of disperse carbon, issue of soot.

Дисперсные частицы относятся к наиболее опасным компонентам дизельного выхлопа, что обуславливает актуальность поиска эффективных средств снижения их эмиссии. В составе дизельных частиц идентифицировано более 1000 веществ [1]. В наиболее общем виде материал дизельных частиц подразделяется на четыре фракции: углеродную, органическую, фракцию сульфатов и нитратов, а также фракцию неорганических примесей. В связи с тем, что основная доля частиц приходится на углеродную фракцию (33...90 % в диапазоне рабочих нагрузок дизеля) [1], исследованию их образования уделяется наибольшее внимание.

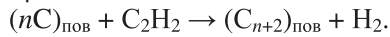
Известен ряд химических средств (присадки к топливу), способствующих снижению эмиссии углеродной фракции частиц (сажа) [2, 3]. Особое место среди наиболее эффективных средств химического воздействия на процессы сажевыделения занимает водород. Многочисленные эксперименты [2-5] подтверждают существенное снижение содержания сажевых частиц в продуктах сгорания дизеля за счет применения добавки водорода к рабочему телу. При этом причина снижения сажевыделения и детальный механизм воздействия водорода на этот процесс до настоящего времени не имеют научных объяснений.

Для установления возможного характера проявления водородом свойств в химических реакциях образования дисперсного углерода воспользуемся уже известными положениями, которые с той или иной степенью достоверности описывают кинетику этих актов. В механизме сажеобразования можно выделить два самостоятельных процесса: образование твердой конденсированной углеродной фазы при горении углеводородов и гетерогенное горение углеродной частицы. В связи с этим комплекс факторов воздействия на процессы сажевыделения условно можно разделить на две группы: факторы, препятствующие образованию сажевых частиц, и факторы, инициирующие их выгорание.

Общую схему образования сажевых частиц можно представить в виде отдельных этапов с индивидуальными кинетическими механизмами [1]. На первом этапе происходит термическое разложение сложного углеводородного топлива на низкомолекулярные компоненты. Второй этап сопровождается термическим разложением индивидуальных углеводородов с образованием ацетилена в качестве основного сырья для последующих процессов образования сажи, которые протекают по кинетической схеме реакций крекинга индивидуальных углеводородов. Третий этап соответствует термическому взрывному разложению ацетилена с образованием углеводородных радикалов – химических зародышей будущих сажевых частиц. Четвертый этап характеризуется науглероживанием радикала и образованием физического зародыша частицы. Пятый сопровождается гетерогенным поверхностным ростом частицы до характерных размеров, определяемых временем пребывания и степенью перенасыщения системы физическими зародышами.

Подобный механизм образования сажи раскрывает ряд возможностей для воздействия водорода на него. Как отмечалось выше, кинетический механизм поверхностного роста частицы сопровождается разложением молекулы ацетилена, являющегося донором зародышей

углеродных частиц, и захватыванием углеродных атомов поверхностью:



Выражение для скорости поверхностного роста имеет вид

$$w = 2 \cdot 10^4 p_{C_2H_2} S \exp\left(\frac{-28000}{RT}\right),$$

где  $p_{C_2H_2}$  – парциальное давление ацетиленов;  $S$  – суммарная площадь поверхности сажевых частиц, которая при известном массовом содержании сажи  $N$  в цилиндре дизеля и средней удельной площади поверхности частиц  $S_{уд}$  может быть определена как  $S = NS_{уд}$ ;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура газовой среды реагирования.

Влияние водородного реагента на данной стадии может проявиться в снижении интенсивности поверхностного роста сажевой частицы (эффект водородного торможения, впервые установленный профессором А.Лангмюром). Это проявление обусловлено активированной адсорбцией сажевой частицей молекул водорода, препятствующей ее контакту с окружающей средой реагирования.

Результирующая скорость поверхностного роста частиц сажи в присутствии водородного реагента может быть записана в следующем виде:

$$w = 2 \cdot 10^4 \left(1 - k p_{H_2} \frac{b}{1+b}\right) p_{C_2H_2} S \exp\left(\frac{-28000}{RT}\right),$$

где  $k = 0,7$ ;  $b = 25$  – постоянные коэффициенты Лангмюра;  $p_{H_2}$  – парциальное давление водорода.

Снижение интенсивности поверхностного роста сажевых частиц в присутствии водорода создает благоприятные условия для их быстрого выгорания в течение рабочего цикла дизеля. Заметим, что среди известных химических средств практически не существуют таких, которые в своем составе содержали бы водород и проявляли подобный механизм. На следующей стадии рабочего цикла дизеля воздействие водорода на результирующее сажевыделение может проявиться в иницировании выгорания сажи.

Горение сажи – это сложный многостадийный гетерогенный процесс химического реагирования в основном на внешней поверхности углеродистой частицы. Этот процесс определяется как кинетикой химических реакций, так и встречной диффузией окислителя и продуктов реакций. Химический механизм взаимодействия углеродной частицы с окислителем включает гетерогенные реакции окисления, идущие на поверхности частицы, и гомогенные реакции догорания CO и H<sub>2</sub>, идущие в ее пограничном объеме. Для детального рассмотрения этого механизма воспользуемся известными положениями теории катализа [6, 7]. Считая реакцию окисления сажи реакцией первого порядка по кислороду, скорость выгорания частиц можно выразить как

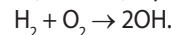
$$w_0 = X_{O_2} \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{\beta}},$$

где  $X_{O_2}$  – концентрация кислорода;  $k_1$  – константа скорости реакции на поверхности частицы;  $\beta$  – диффузионный член.

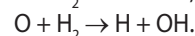
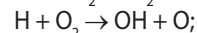
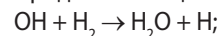
Для условий рабочего цикла дизеля химический критерий Нуссельта для основных реакций окисления сажи не выходит за границу кинетической области [1]. Следовательно выгорание сажи в дизеле происходит в кинетической области, и диффузионным сопротивлением процессу можно пренебречь. Физически это объясняется очень малыми размерами частиц дизельной сажи, при которых массообмен не лимитирует процесс горения. Поэтому для скорости выгорания сажи в цилиндре дизеля приведенное выше выражение упрощается:

$$w_0 = X_{O_2} k_1. \quad (1)$$

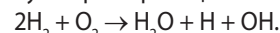
Добавленный к рабочему телу водород в высокотемпературной фазе рабочего цикла дизеля обнаруживает способность генерировать активные частицы [6]. В соответствии с современной теорией сгорания [7] эта способность водорода проявляется в уникальной кинетике протекания процессов разветвления и цепноокисления H<sub>2</sub> в смеси с O<sub>2</sub>. Реакция иницирования имеет вид



Продолжение цепи этой реакции:



Суммарная реакция



При реализации цепочного механизма окисления водорода образуется H<sub>2</sub>O и регенерируются активные центры реакции – переносчики цепи O, при этом возникают еще два переносчика цепи H и OH, каждый из которых может начать новое звено с образованием еще большего числа активных центров.

В присутствии активных центров реакция окисления частиц (1) реализуется, как каталитическая. Константы скоростей нормальной  $k_1$  и каталитической  $k_{1к}$  реакций отличаются величинами энергии активации  $E$  и  $E_k$  и предэкспоненциальными множителями  $C$  и  $C_k$  в уравнении Аррениуса:

$$k_1 = C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad k_{1к} = C_k \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right).$$

Отношение между константами скоростей окисления сажи каталитической и нормальной реакций обозначим  $\chi$ , тогда:

$$\chi = \frac{C_k}{C} \exp\left(-\frac{E - E_k}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $E - E_k = \Delta E$  – разность энергий активации нормальной и каталитической реакций.

Очевидно, что скорость окисления углерода при его катализе на активных центрах возрастает по мере роста относительного количества водорода  $\delta$ , введенного в реагирующую среду, и его способности генерировать активные частицы (показатель эффективности  $\nu$ ). Следовательно, отношение  $(C/C_k)$  может быть заменено на комплекс  $(\delta\nu)$ . Тогда выражение (2) может быть переписано в следующем виде:

$$\chi = \delta \nu \exp\left(-\frac{E - E_k}{RT}\right),$$

откуда:

$$\Delta E = RT \ln \left( \frac{\chi}{\delta v} \right). \quad (3)$$

Таким образом, эффективность реакционного воздействия водорода при гетерогенном катализе сажевой частицы может быть оценена величиной  $\Delta E$ , характеризующей снижение энергии активации процесса. Со снижением энергии активации ( $E - E_k$ ) окисления (выгорание) сажи наблюдается более интенсивный рост скорости реакции, который обуславливается не только относительным содержанием в реагирующей среде водородного реагента, но и, в первую очередь, его способностью генерировать активные частицы – центры зарождения окислительных реакций. Отметим, что только подобный цепочный механизм может объяснить уникальную способность небольших доз водородного реагента столь эффективно [4, 5] инициировать выгорание сажевых частиц.

По итогам проведенного анализа можно сделать вывод, что присадку водородного реагента к рабочему телу дизеля можно рассматривать как эффективное многофункциональное средство снижения результирующего сажевыделения. В низкотемпературной фазе рабочего цикла водород противодействует образованию зародышей сажи (эффект водородного торможения), а в последующей высокотемпературной фазе он катализирует процесс ее ускоренного выгорания.

Рассмотренные свойства водородного реагента расширяют наши представления о его роли в кинетическом механизме результирующего сажевыделения, обуславливая возможность разработки алгоритма расчета эмиссии сажевых частиц в дизеле, работающем на смесевом водородосодержащем топливе.

В качестве примера рассмотрим алгоритм расчета результирующего сажевыделения в двигателе в присутствии водородного реагента с использованием известной модели H.Hiroyasu [8]. В данной модели текущая скорость образования массы частиц сажи при сгорании дизельного топлива описывается уравнением

$$\left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{об} = A_f m_f p^{0.5} \exp \left( -\frac{E_f}{RT} \right),$$

а скорость их выгорания уравнением

$$\left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{выг} = A_s m_s X_{O_2} p^{1.8} \exp \left( -\frac{E_s}{RT} \right),$$

где  $m_s$  – масса сажи;  $m_f$  – масса топлива;  $A_f, A_s$  – предэкспоненциальные множители для процессов образования и выгорания частиц;  $E_f, E_s$  – энергия активации для этих же процессов соответственно;  $p$  – давление в цилиндре.

Скорость изменения результирующей массы частиц  $m_s$  в цилиндре рассчитывается как разность скоростей двух конкурирующих процессов – образования и выгорания:

$$\frac{dm_s}{dt} = \left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{об} - \left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{выг}$$

Отличительная особенность данной модели (как, впрочем, и большинства других известных моделей) заключается в том, что важнейшим фактором, определяющим

интенсивность выгорания частиц, является энергия активации. Этот показатель ( $E_s$ ) входит в качестве показателя степени экспоненты, что и обуславливает его доминирующую значимость при расчете результирующего сажевыделения.

Показатель степени при давлении для процесса выгорания частиц превышает аналогичный показатель в 3,6 раза для процесса их образования. Из этого следует, что в активной стадии сгорания, когда давление в цилиндре высокое, инициированием выгорания частиц за счет снижения энергии активации и сокращения длительности этого процесса можно обеспечить условия для наиболее интенсивного снижения результирующего сажевыделения дизеля.

С учетом рассмотренных свойств водородного реагента текущее образование частиц при сгорании водородно-дизельного топлива может быть описано как

$$\left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{об} = K_{H_2} A_f m_f p^{0.5} \exp \left( -\frac{E_f}{RT} \right),$$

а акты их выгорания:

$$\left( \frac{dm_s}{dt} \right)_{выг} = A_s m_s X_{O_2} p^{1.8} \exp \left( -\frac{E_s - \Delta E}{RT} \right),$$

где  $K_{H_2}$  – коэффициент, учитывающий снижение суммарной скорости поверхностного роста частиц сажи вследствие водородного торможения;  $\Delta E$  – снижение энергии активации выгорания сажевых частиц при гетерогенном катализе их выгорания.

Значения  $K_{H_2}$  и  $\Delta E$  могут быть установлены в процессе идентификации модели. Аналогичным образом могут быть реконструированы и многие другие известные модели расчета сажевыделения в дизелях, работающих на смесевых водородосодержащих топливах.

Отметим, что водород как химический реагент является на сегодняшний день единственным и наиболее эффективным химическим инструментом, способным не только активно воздействовать на процессы результирующего сажевыделения, но и в совокупности оптимизировать кинетические показатели сгорания в дизеле. В результате проявления рассмотренных свойств этого реагента энергия активации основной массы топливно-воздушной смеси, характеризующая ее реакционную способность, снижается, что связано с уменьшением ее участия в суммарной химической реакции самозарождения, требующей больших энергий активации [7]. Следовательно водородный реагент может быть также использован как эффективное средство для оптимального управления экологическими и экономическими показателями рабочего цикла в целом.

Для предварительной проверки этих положений в лаборатории моторных испытаний кафедры эксплуатации автотранспортных средств РУДН проведен эксперимент на моторном стенде с дизелем типа Д-144 (рис. 1), который оснащался реактором конверсии метанола для генерирования водородосодержащего реагента (12,5 %  $H_2$  + 87,5 % CO по массе).

Конструкция реактора разработана на основе известных технологий [2, 3]. Для определения состава отработавших



Рис. 1. Испытательный стенд

газов стенд оборудован газоаналитической аппаратурой, входящей в состав стандартного мотор-тестера модели VISA-4000 (Италия).

Результаты испытаний подтвердили прогнозируемые анализом положения о характере влияния водородного реагента на процессы сажевыделения в дизеле. По мере повышения относительного содержания водородосодержащих продуктов конверсии метанола (ПКМ) в смесевом топливе эмиссия сажи  $S$  с ОГ снижается при одновременном снижении выхода оксидов азота  $NO_x$ . При этом концентрация монооксида углерода  $CO$  в ОГ несколько возрастает, что объясняется содержанием в продуктах конверсии этого газового компонента, который при неполном сгорании в камере сгорания двигателя обуславливает дополнительный фон  $CO$  в составе ОГ на выходе дизеля. Оптимальное содержание ПКМ в смесевом топливе, при котором обеспечивается наибольшее снижение эмиссии сажи, составляет 10 % (по водороду 1,25 %).

При оптимальном содержании ПКМ в смесевом топливе ( $\delta_{ПКМ} = 10\%$ ) снижение содержания сажи в ОГ наблюдается во всем диапазоне изменения нагрузочных режимов дизеля (рис. 2). На номинальном режиме содержание сажи в ОГ

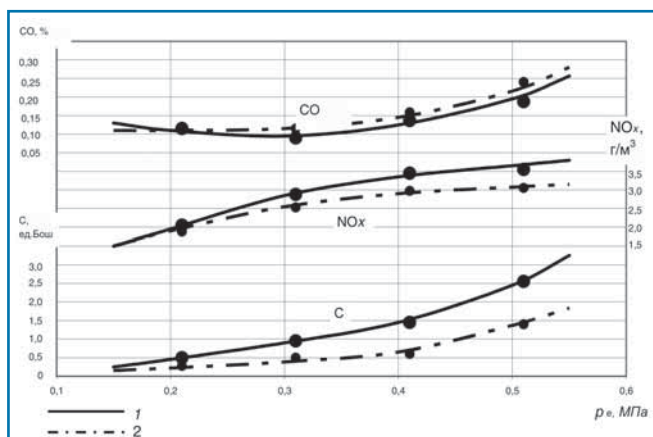


Рис. 2. Экологические показатели дизеля по нагрузочной характеристике ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ):  
1 – при работе на дизельном топливе (ДТ); 2 – при работе на водородно-дизельном топливе (10 % ПКМ + 90 % ДТ)

уменьшается с 3,2 до 1,8 ед. Бош, то есть на 45 %, при снижении  $NO_x$  на 16 %.

С большой степенью достоверности можно предположить, что влияние водорода как химического (каталитического) реагента [7] может проявиться и в реакциях окисления других компонентов дизельных частиц, имеющих схожую с сажей химическую структуру (органическая фракция). Однако это предположение требует более детальной экспериментальной проверки.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что применение водородосодержащих добавок в дизелях в качестве химического реагента обуславливает возможность решения актуальной проблемы – снижения выбросов сажевых частиц. Подобное мероприятие не связано с необходимостью изменения базовой конструкции дизеля, а благодаря своей простоте и минимальным экономическим затратам на реализацию представляется весьма перспективным на отечественном транспорте в ближайшее время.

Заметим, что на сегодняшний день детально отработаны технологии получения водородного реагента в бортовых конверсионных системах из его жидких носителей – этанола, метанола, моторного топлива и др. [2, 3]. При этом обеспечиваются условия высокой эксплуатационной безопасности в сравнении, например, с баллонным способом бортового хранения водорода. Это обстоятельство стимулирует дальнейшее развитие исследований в данном направлении.

## Литература

1. Perez J.M., Lipari F., Seizinger D.E. Cooperative development of analytical methods for diesel emission and particulates // SAE Paper. – 1984. – № 840413. – P. 22.
2. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла дизеля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – № 6. – С. 34-38.
3. Fomin V.M. and Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases) // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2009. – Vol. 43. – № 5. – P. 834-840.
4. Матиевский Д.Д., Вагнер В.А. Осуществление присадок водорода к топливу и их влияние на показатели работы двигателя // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 53-56.
5. Серебренников В.А., Батулин С.А., Румянцев В.В. Опыт применения присадок пароводородной смеси в транспортном дизеле // Двигателестроение. – 1982. – № 2. – С. 41-44.
6. О выходе атомарного водорода в процессе горения метано- и водородных воздушных смесей / Л.А. Гуссак, О.Б. Рябинов, Г.Г. Политенкова, Г.А. Фурман // Изв. АН СССР, сер. Химическая. – 1974. – № 2. – С. 479-481.
7. Тавгер М.Д., Груздев В.Н., Талантов А.В. Влияние активных частиц на процессы горения // Электрофизика горения. – 1979. – С. 45-48.
8. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions (Part 1: Combustion modeling) // Bulletin of the JSME. – 1983. – № 26. – P. 569-575.

## Гидроприводная форсунка для газодизеля с внутренним смесеобразованием

**А.С. Хачиян,**  
профессор МАДИ, к.т.н.,  
**В.Е. Кузнецов,**  
старший научный сотрудник МАДИ,  
**И.Г. Шишлов,**  
старший научный сотрудник МАДИ, к.т.н.,  
**А.В. Вакуленко,**  
инженер МАДИ,  
**Д.М. Карпов,**  
аспирант МАДИ

Разработана и изготовлена газовая форсунка с гидроприводом от дизельного топлива, подаваемого из аккумулятора топливной системы, используемая для минимизации запальной порции дизельного топлива. Определены расходные характеристики при различных подъемах иглы. Разработана методика и программа расчетного исследования гидроприводной газовой форсунки, позволившая уточнить в процессе конструирования ее определяющие размеры. Установлена длительность подачи природного газа на режимах полной и частичных нагрузок двигателя при различных давлениях на входе в форсунку. Показана возможность снижения давления до 4 МПа. Выявлена необходимость применения буферного компрессора для дальнейшего увеличения выработки газа из баллонов.

**Ключевые слова:** газодизель, природный газ, внутреннее смесеобразование, гидроприводная газовая форсунка (ГГФ).

## Hydraulically driven gas nozzle for dual fuel internal mixing diesel

**A.S. Khachian, V.E. Kuznetsov, I.G. Shishlov, A.V. Vakulenko, D.M. Karpov**

It is impossible to ensure high economy at light loads of dual fuel diesel engine with external mixture formation because of incomplete combustion of poor air natural gas mixtures. Use of internal mixture formation would make it possible to get good ignitable mixture due to local differences in gas air strength. Gas nozzle is driven by diesel fuel supplied from accumulator of the system used to minimize fuel ignition portion. Gas nozzle has been fabricated and tested to determine gas flow characteristic in respect to injection duration. Computer modeling was used to help in nozzle design. Calculations made possible to find duration of gas injection at full and light loads in case of different gas supply pressure. It has been shown that gas supply pressure equal to 4 MPa may be used for all operating conditions. To further decrease of the gas supply pressure it may be necessary to use boosting compressor to keep high pressure at nozzle inlet.

**Keywords:** dual fuel diesel engine, natural gas, internal mixture formation, gas nozzle, injection, computer modeling.

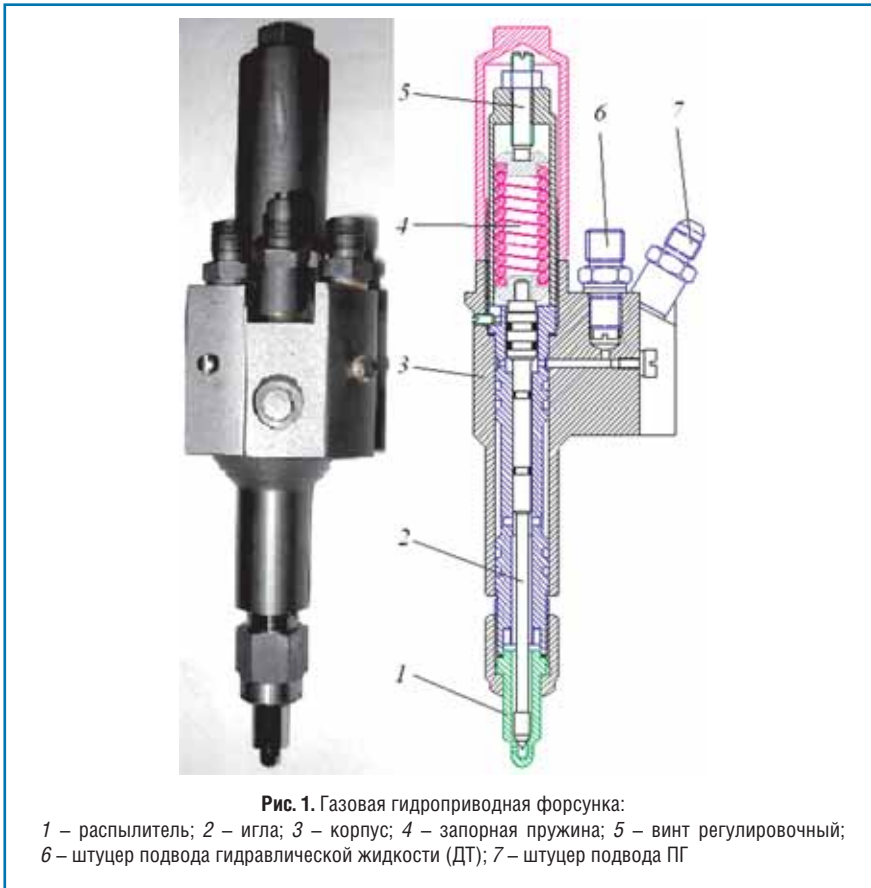
При разработке газодизеля с внешним смесеобразованием не удастся обеспечить приемлемую экономичность на режимах малых нагрузок из-за высокой неполноты сгорания природного газа при больших избытках воздуха. Применение внутреннего смесеобразования позволит использовать легковоспламеняемую газозвудушную смесь за счет обеспечения локальной неоднородности смеси.

Опыты, выполненные на газодизеле с внешним приготовлением газозвудушной смеси и минимизированной подачей запальной порции дизельного топлива (ДТ), обнаружили недостаточную экономичность на малых нагрузках (при больших избытках воздуха). Связано это с неполнотой сгорания бедных газозвудушных смесей. Для создания более благоприятных локальных условий горения решено использовать внутреннее смесеобразование.

Для подачи природного газа (ПГ) в цилиндр двигателя была разработана гидроприводная газовая форсунка (рис. 1). В качестве гидропривода выбрана аккумуляторная топливная система (АТС) типа Common Rail, применение которой позволяет воспламенять газозвудушную смесь от минимизированной мелко распыленной запальной порции ДТ, подаваемой с помощью электрогидравлических форсунок (ЭГФ) базового дизеля.

Для исследований подачи ПГ через ГГФ при использовании АТС в качестве гидропривода разработана математическая модель и создана программа расчета (рис. 2), предусматривающая возможность введения матрицы значений текущего давления в цилиндре, которые рассчитываются по программе расчета действительного цикла газового двигателя с внутренним смесеобразованием, что обеспечивает повышение точности расчета цикловой подачи природного газа ( $G_{тц}$ ).

Уточнение параметров и проверка адекватности математической модели производились с применением расходных характеристик, которые были получены при испытании ГГФ на специально созданной безмоторной установке (рис. 3). Для снятия расходных характеристик на безмоторной установке разработана электронная



система управления гидроприводом ГГФ, позволяющая в ручном режиме менять длительность и частоту управляющего импульса и задавать

необходимое число циклов срабатываний ГГФ.

Методика определения расходных характеристик заключалась в

измерении массы ПГ, поступившей в мерную емкость за фиксированное число циклов срабатывания ГГФ. Масса ПГ, поступившая в мерную емкость за время замера, рассчитывалась по уравнению

$$\Delta m = \frac{V_6}{R} \left( \frac{p_2}{T_2 z_2} - \frac{p_1}{T_1 z_1} \right),$$

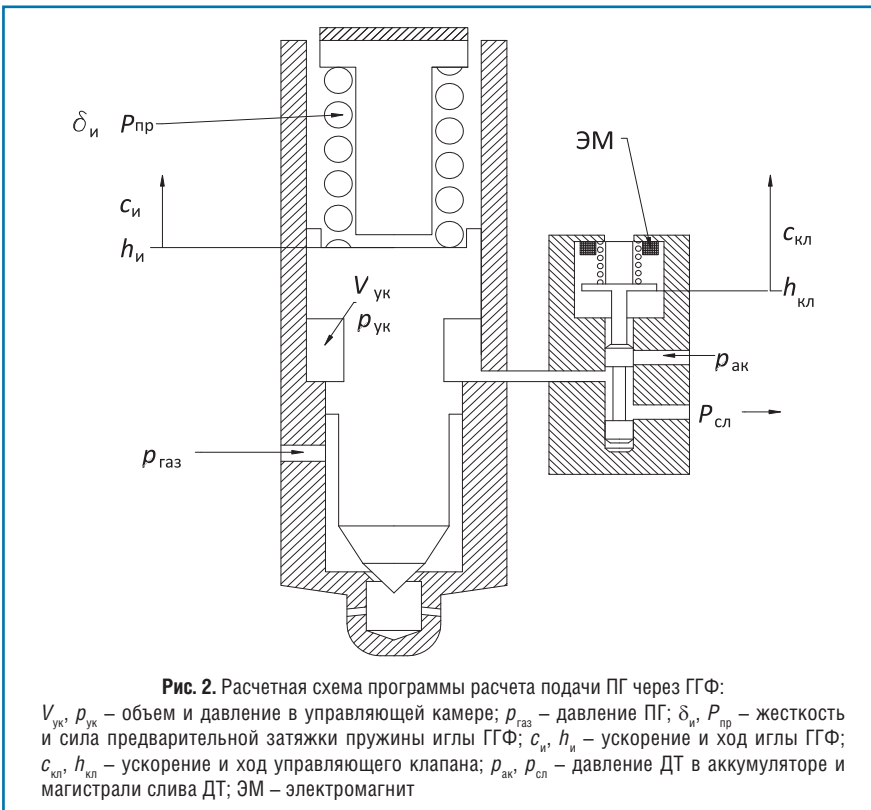
где  $V_6$  – объем мерного баллона;  $p_1$  и  $p_2$  – абсолютные давления в мерном баллоне до и после замера;  $T_1$  и  $T_2$  – температуры в мерном баллоне до и после замера;  $z_1$  и  $z_2$  – коэффициенты сжимаемости, соответствующие состоянию газа в мерном баллоне до и после замера;  $R$  – газовая постоянная.

Следует отметить, что представленный для примера график расхода ПГ (рис. 3) построен в функции длительности управляющего импульса ( $\tau$ ), подаваемого на электромагнит гидравлического клапана управления, а не реального времени истечения ПГ из форсунки. Расходные характеристики получены для максимального подъема иглы ГГФ  $h_{и} = 0,4$  мм при давлении в гидравлическом аккумуляторе  $p_{ак} = 10$  МПа и давлении ПГ на входе в ГГФ  $p_{впр} = 8$  МПа. Можно отметить удовлетворительное совпадение опытной и расчетной характеристик.

Расчетные исследования подачи ПГ через ГГФ проводились для варианта, в котором воспламенение газозвушной смеси осуществляется от малой мелкораспыленной порции ДТ, подаваемой АТС типа Common Rail. В этом случае ПГ можно начинать подавать в цилиндр двигателя сразу после закрытия впускного клапана с меньшим давлением  $p_{впр}'$ , что позволит повысить степень выработки ПГ из баллонов.

Анализ полученных расчетных дифференциальных характеристик подачи ПГ показал следующее:

- подача ПГ начинается и заканчивается с некоторым смещением относительно роста давления ДТ в управляющей камере ГГФ, что, очевидно, связано с инерционностью подвижных деталей ГГФ, а также наличием запорной пружины иглы, сила предварительного сжатия которой преодолевается при достижении определенного давления ДТ в управляющей камере;





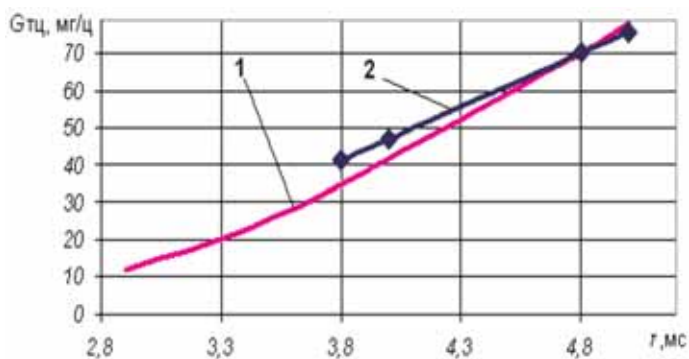


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная расходные характеристики ГГФ: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная характеристика

- для компенсации уменьшения цикловой подачи при снижении давления ПГ на входе в ГГФ  $p_{впр}$  и при уменьшении максимального подъема иглы  $h_u$  (цель – снижение инерционности подвижных деталей) необходимо увеличивать длительность впрыскивания;

- для создания благоприятных локальных зон горения бедной газозвоздушной смеси, особенно на режимах холостого хода и малых нагрузок, подачу ПГ целесообразно завершать как можно ближе к углу начала воспламенения запальной порции ДТ. Так результаты расчетов параметров цикла газодизельного двигателя для режима холостого хода ( $n=750 \text{ мин}^{-1}$ ) показали, что оптимальный угол воспламенения газозвоздушной смеси, соответствующий углу начала воспламенения запальной порции ДТ, равен  $14^\circ$  до ВМТ ( $166^\circ$  ПКВ от начала сжатия). Следовательно, в данном случае

подача ПГ должна начинаться за  $30^\circ$  до ВМТ (рис. 4, характеристика 3);

- нецелесообразно снижать минимальное давление ПГ на входе

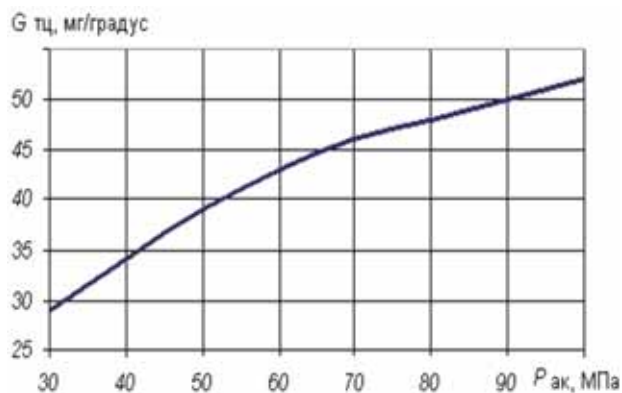


Рис. 5. Расчетная зависимость цикловой подачи ПГ ( $p_{впр}=8 \text{ МПа}$ ) от давления ДТ в аккумуляторе

в ГГФ ( $p_{впр}$  ниже 4 МПа, так как в этом случае на режиме холостого хода окончание подачи ПГ невозможно приблизить к углу оптимального начала

показали, что снижение давления ПГ на входе в ГГФ ведет к уменьшению диапазона регулирования подачи ПГ.

Таким образом, результаты расчета подачи ПГ позволили выбрать основные размеры ГГФ и, в частности, эквивалентное проходное сечение распылителя, а также величину хода иглы.

Для получения необходимых цикловых подач ПГ, обеспечивающих стабильную работу двигателя во всем диапазоне режимов, может оказаться целесообразным применение комбинированного управления ГГФ: изменения длительности управляющего импульса в сочетании с регулированием давления ДТ в аккумуляторе.

Так как минимальное давление ПГ на входе в ГГФ ( $p_{впр}$ ) снижать ниже 4 МПа нецелесообразно, то для достаточно глубокой выработки запаса ПГ из баллонов необходим буферный дожимной компрессор.

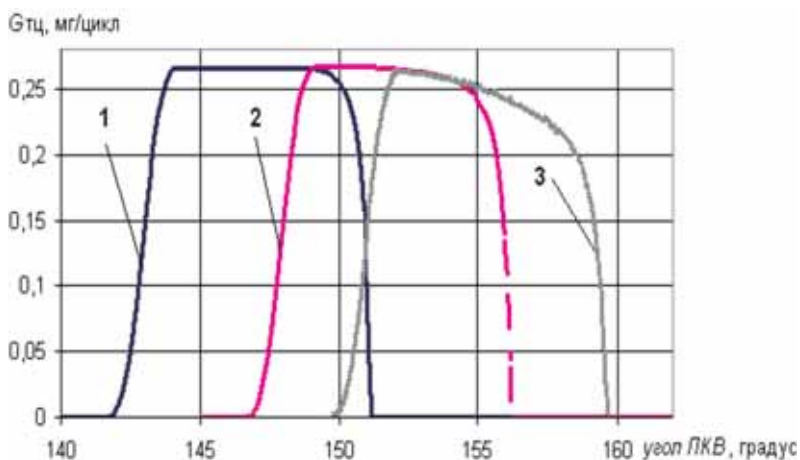


Рис. 4. Расчетные дифференциальные характеристики подачи ПГ на частоте вращения  $750 \text{ мин}^{-1}$  (холостой ход) при давлении ПГ  $p_{впр} = 4 \text{ МПа}$ : 1 – начало открытия УК  $140^\circ$  ПКВ от НМТ; 2 – начало открытия УК  $150^\circ$  от НМТ ПКВ; 3 – начало открытия УК  $150^\circ$  ПКВ от НМТ

## Альтернативное моторное топливо – что в перспективе?



**М.А. Цуладзе,**  
генеральный директор ООО «АЗС-ЭКСПО»

Альтернативное моторное топливо – важное тематическое направление выставки «Автокомплекс» (Автозаправочный комплекс. Автотехсервис. Гараж и паркинг). Его актуальность бесспорна. Усилия государственных структур и крупнейших автомобильных концернов в настоящее время мобилизованы на создание прорывных технологий и достижение конечных результатов.

**Р**азвитие мировой экономики вносит свои коррективы. В частности, возникший дефицит продуктов питания резко охладил интерес к биотопливу. Конечно, для Бразилии и некоторых других стран, видимо, резкого снижения в использовании этого альтернативного моторного топлива вряд ли стоит ожидать, но для Европы, Америки, России биотопливо в обозримом будущем приоритетным не станет.

Водородное топливо – весьма специфическое направление относительно его применения в автомобилях и вряд ли получит широкое распространение в глобальном масштабе. Более продвинутыми и перспективными

являются гибридные и электрические автомобили. Крупнейшие автоконцерны Renault, Mercedes и др. заявляют о том, что начнут продажи серийных электромобилей. Даже малоизвестная турецкая фирма Etox тоже собирается начать поставки своих моделей. О начале испытаний электромобиля заявил и АВТОВАЗ.

Не берусь дальше углубляться в перспективы развития альтернативных видов моторного топлива. Предоставляю это специалистам. Я только приглашаю к разговору на эту важную тему. Как представителю фирмы-организатора выставки «Автокомплекс», ведущей тематикой которой является автозаправочное оборудование, мне интересно знать, какова готовность удовлетворить запросы рынка на заправочное оборудование в будущем.

Конечно, в условиях России бензин, дизельное топливо и газ есть и будут основными видами моторного топлива. Наша выставка предоставляет весь спектр самого современного оборудования и технологий для этих видов топлива. Газ как альтернативное моторное топливо, безусловно, имеет очень большие перспективы расширения его применения на

транспорте, но рост цен на бензин, дизель и газ напрягает весь мир, и электромобили очень скоро могут занять ценовую и экологическую ниши на рынке автомобилей. Медленно, но настойчиво они будут завоевывать свое место. А как и где они будут заправляться, ремонтироваться, диагностироваться? Не будет ли ситуация развиваться наподобие гаражно-парковочной инфраструктуры? Когда машин – изобилие, а ставить их некуда?

Конечно, число электрических автомобилей будет расти медленно, но через 2-3 года в Москве их будет наверняка несколько тысяч. А сколько понадобится заправок?

В интервью телекомпании РБК представитель фирмы «Рольф им-



порт» заявил, что решается вопрос по созданию в Москве первой станции ускоренной зарядки электромобилей этой фирмы. А какое количество таких станций будет оптимальным? Должны ли они быть автономными или достаточно создать отдельный терминал на существующих автозаправочных комплексах?

Приглашаю к разговору на эту тему специалистов, инвесторов и всех желающих.

Дирекция выставки «Автокомплекс-2011» предлагает развернуть дискуссию на заданную тему и способствовать широкой демонстрации на предстоящей 1-3 ноября выставке «Автокомплекс-2011» соответствующего оборудования и технологий.



## Транспортировка водорода

**О.К. Алексеева,**

начальник отдела Института водородной энергетики и плазменных технологий

НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.,

**С.И. Козлов,**

главный научный сотрудник

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.,

**В.Н. Фатеев,**

зам. директора по научно-организационной работе

НИЦ «Курчатовский институт», профессор, д.х.н.

В статье подробно рассказано об основных методах транспортировки водорода, используемых в настоящее время, – в газообразном состоянии по трубопроводным системам или с помощью специального наземного транспорта, а также в криогенных цистернах в сжиженном виде. Анализируются возможности использования действующей сети газопроводов природного газа, подчеркивается необходимость проведения комплексных НИОКР по исследованию материалов современных трубопроводов. Кратко рассмотрены перспективы транспортировки водорода в связанном виде в твердых или жидких носителях. Проанализированы достоинства и недостатки основных способов транспортировки водорода, существующие проблемы и пути их решения.

**Ключевые слова:** водород, методы транспортировки, трубопроводы, носители, жидкий водород, топливо.

## Hydrogen transportation

**O.K. Alexeeva, S.I. Kozlov, V.N. Fateev**

For large-scale hydrogen use as alternative fuel problems of hydrogen transportation to the points of use must be solved. Hydrogen can be transported as compressed gaseous hydrogen or liquid hydrogen and also as «bound» hydrogen in carriers. The paper describes in detail main current transportation technologies – gaseous hydrogen via pipelines or using special trucks, liquid hydrogen in cryogenic tanks. The potential of using existing natural gas pipelines is analyzed; the need for modern pipeline material complex research is emphasized. Prospects of hydrogen transportation in solid or liquid carriers are briefly outlined. Disadvantages and advantages of main transportation methods, existing problems and ways to solve them have been analyzed.

**Keywords:** hydrogen, transportation technologies, pipelines, carriers, liquid hydrogen, fuel.

Водород и водородосодержащие смеси рассматриваются как перспективное топливо для транспорта. Для широкомасштабного применения водорода необходимо решить проблемы, связанные с его транспортировкой.

Водород можно транспортировать к месту его использования в газообразном или жидком состояниях (рис. 1), а также с помощью твердых или жидких носителей, которые содержат водород в связанном виде [1]. Носителями могут служить гидриды металлов, наноструктуры, жидкие углеводороды и другие богатые водородом соединения. К носителям не относят природный газ, этанол, метанол и др., считающиеся сырьем для производства водорода. В настоящее время водород в основном транспортируется в газообразном состоянии по трубопроводным системам или с помощью трейлеров, оснащенных специальными трубами-контейнерами под давлением, а также в сжиженном виде в криогенных автомобильных и железнодорожных цистернах [1-5]. У каждого из этих вариантов есть свой рациональный диапазон применения.

### Транспортировка газообразного водорода

Крупнейшие производители водорода в США Air Products, Praxair, Air Liquide, BOC Group, коллективно управляющие 80 заводами по производству водорода, большую часть его поставляют потребителям по трубопроводной системе, хотя доступ к ней ограничен несколькими регионами (Калифорния, Техас, Луизиана, Индиана) [6]. Там, где нет доступа к трубопроводу, используются специальные транспортные средства.

### Транспортировка газообразного водорода по трубопроводам

Существуют несколько вариантов трубопроводной транспортировки газообразного водорода:

- по специальным водородным трубопроводам;
- по существующим трубопроводам природного газа.

*Специальные водородные трубопроводы.* Создание специальных трубопроводных систем для транспортировки водорода не является новой проблемой. Городские газопроводы начали эксплуатироваться еще в 1830 г., при этом содержание водорода в перекачиваемом газе достигало 55 % и каких-либо особых проблем это не вызвало. Ревизия старых водородных сетей, эксплуатируемых в течение 30 лет, показала отсутствие в них значительных коррозионных повреждений [7].

Первый магистральный водородный трубопровод был введен в действие в 1938 г. в Германии (табл. 1). Этот трубопровод эксплуатируется более полувека без каких-либо аварий [8]. В настоящее время в мире имеется около 16 тыс. км водородных трубопроводов. Самый длинный, 400 км, связывает Антверпен и Нормандию [2]. В США, Германии, Англии, Франции и других странах эксплуатируются водородные трубопроводы длиной 200...300 км под давлением 0,5...3 МПа и выше [8-10].

Необходимо отметить, что за все годы работы водородных трубопроводных систем в Северной Америке и



Европе не наблюдалось проблем, связанных с водородным охрупчиванием и безопасностью [11]. Однако капитальные вложения, необходимые для создания трубопровода, делают этот метод наиболее дорогим и целесообразным лишь при регулярном и значительном потреблении водорода, когда строительство газопровода окупится в приемлемые сроки.

Рациональное давление для магистральной транспортировки водорода с учетом его физико-химических свойств составляет 7...14 МПа [12], например, в США водородные трубопроводы работают под давлением 3,5...10 МПа [5].

Распределительные сети имеют меньший диаметр труб и работают под низким давлением (в США  $p = 0,03...1,4$  МПа [5]). Однако для заправочных станций и энергоустановок требуются более высокие давления на входе, поэтому давление в распределительных сетях, по-видимому, должно быть выше, чем в линиях распределения природного газа – 1,4...2,8 МПа [5].

В трубопроводах низкого давления (0,1 МПа и ниже) скорость газа составляет 10 м/с, а в магистральных (6...8 МПа) – в два раза больше [8,12]. При одинаковых диаметрах трубы и перепаде давления скорость потока водорода почти в три раза выше, чем у метана. Удельная стоимость транспортировки водорода снижается с увеличением дальности. Так, при увеличении расстояния с 8 до 100 км стоимость снижается на порядок.

Стоимость новых водородных газопроводов весьма высока, причем трудозатраты и затраты на материалы составляют примерно 70 % от стоимости строительства. Поэтому актуальными задачами сегодняшнего дня являются создание новых металлических, неметаллических и композитных материалов, а также разработка технологий нанесения тонких барьерных покрытий на поверхность труб.

Внутреннее покрытие предназначено для уменьшения поверхностной концентрации водорода на стали.

Таблица 1

**Действующие водородные трубопроводы [9]**

Компания	Место нахождения	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /сут.	Длина, км	Диаметр, м	Давление, МПа	Годы ввода
Praxair	Техас	2830	–	0,2	–	1970-е
	Нью-Джерси	170	–		–	
	Индиана	140	–		–	
Air Products	Техас Луизиана	1130 850	200	0,1...0,3	0,34...5,52	1970-е
ChemischeWerk Huls	Германия	2830	220	0,1...0,3	2,48	1938
ICI, Teeside	Англия	566	16	–	5,17	1970-е
Air Liquide	Франция, Бельгия	480	340	0,1	10,14	1980-е
Shell Canada	Scotford, AB	2490	9	0,8	0,45	2002



Рис. 2. Схема многослойной пластиковой трубы (а) Fiberspax LinePipe, LLC и этап намотки волокна (б) [14]

Исследования диффузии водорода в многослойной трубе, внутреннее покрытие которой создано на основе армированного полиамида, а трубная сталь и внешнее покрытие – на основе полиуретана, показали, что существующие полимерные и стекловолоконные материалы не могут повысить срок службы трубопроводов более чем на 10 лет [13].

Армированные пластиковые трубопроводы – перспективная альтернатива стальным трубопроводам по техническим характеристикам и стоимости. Обычно они состоят из внутренней непроницаемой барьерной трубы или лайнера 1, защитного 2 и промежуточного 3 покрытий, композитных слоев 4 из стекло- или углеродных волокон, внешнего барьерного слоя 5 и защитного покрытия 6 (рис. 2).

Такие трубы обладают высокой прочностью на сжатие, выдерживают продольные деформации, что упрощает их доставку. Они могут быть намотаны на катушки большого диаметра (рис. 3). В многослойную конструкцию могут быть включены сенсоры с дистанционным управлением для мониторинга технического состояния в реальном времени.

Для изготовления лайнеров могут применяться такие полимерные материалы как полиэтилен, полиамид, дифтористый поливинилиден. Водородопроницаемость этих материалов определяет объем утечек водорода из трубопровода. Однако большинство испытаний проводится на пленках, и результаты могут не распространяться на реальные лайнеры.

Сравнение результатов измерений проницаемости образцов полиэтилена высокого давления, применяемого в

трубах и лайнерах емкостей для хранения водорода под высоким давлением в диапазоне температур 10...60 °С [15], с опубликованными данными для пленок показало, что проницаемость последних несколько выше при всех температурах, то есть можно считать, что потери водорода из таких трубопроводов будут малы – менее 0,1 % от передаваемого объема.

Суммарные капиталовложения для такого трубопровода из полиэтилена примерно такие же, как и для трубопровода из 16-дюймовых стальных труб [16].

*Существующие трубопроводы природного газа.* При транспортировке природного газа через каждые 100...120 км расходуется примерно 0,3 % объема перекачиваемого природного газа на компрессорных станциях для поддержки движения. Оценим энергозатраты на транспортировку водорода и природного газа при их передаче потребителю по одному и тому же трубопроводу с учетом вязкостей водорода и метана при равных потоках энергий [17].

Необходимая для перекачки мощность  $N$  (Вт)

$$N = V_0 \Delta p = \frac{\pi}{4} D^2 v \Delta p = \frac{\pi}{4} D^2 v \frac{1}{2} \rho v^2 \xi, \quad (1)$$

где  $V_0$  – объемный поток, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta p$  – перепад давления, Па;  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $v$  – скорость газа, м/с;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi = \frac{0,312}{Re^n}$  – коэффициент сопротивления;

$Re = \rho v D / \mu$  – число Рейнольдса;  $n = 0,25$  – для турбулентного течения газа в трубе;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

Поток энергии по трубопроводу (Дж/кг)

$$Q = V_0 \rho H_V, \quad (2)$$

где  $H_V$  – высшая теплота сгорания транспортируемого газа.

Из (1), (2) получим отношение мощностей (энергопотребления), необходимых для перекачки водорода и метана:

$$\frac{N_{H_2}}{N_{CH_4}} = \left( \frac{\mu_{H_2}}{\mu_{CH_4}} \right)^n \left( \frac{\rho_{CH_4}}{\rho_{H_2}} \right)^2 \left( \frac{H_{V_{CH_4}}}{H_{V_{H_2}}} \right)^{3-n}.$$

Из-за низкой плотности водорода скорость потока должна быть увеличена примерно в три раза. Хотя рост сопротивления потоку частично компенсируется различием



Рис. 3. Пластиковый трубопровод Fiberspax LinePipe, LLC [14]

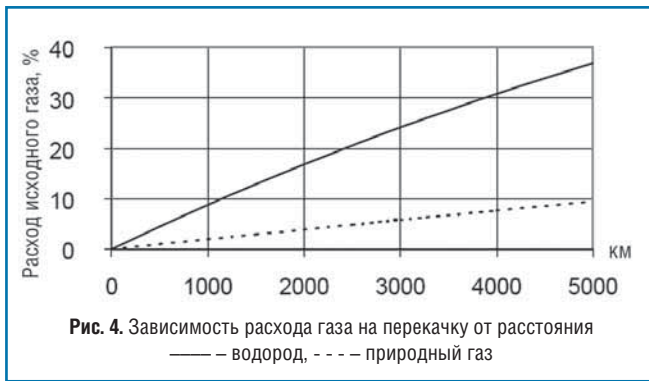


Рис. 4. Зависимость расхода газа на перекачку от расстояния  
— водород, - - - природный газ

в вязкости, для передачи по трубопроводу равного количества энергии в виде водорода требуется примерно в 4,6 раза больше энергии, чем для природного газа (рис. 4) [17], и при транспортировке на расстояние 2,5...4 тыс. км будет передано только 80...70 % исходного водорода.

Использование действующей сети газопроводов природного газа для транспортировки водорода является существенной составляющей будущей водородной экономики. В настоящее время единая система газоснабжения (ЕСГ) ОАО «Газпром» располагает значительно большей энергопередающей мощностью, чем сети электропередачи, и в принципе подготовлена к приему водорода и его смесей с другими горючими газами. ЕСГ – крупнейшая в мире система транспортировки газа – представляет собой уникальный технологический комплекс, включающий объекты добычи, переработки, транспортировки, хранения и распределения газа. ЕСГ обеспечивает непрерывный цикл поставки газа от скважины до конечного потребителя.

В состав ЕСГ входят более 160 тыс. км магистральных газопроводов, 215 линейных компрессорных станций общей мощностью газоперекачивающих агрегатов в 42 тыс. МВт, 25 подземных хранилищ газа (ПХГ). Благодаря централизованному управлению, большой разветвленности и наличию параллельных маршрутов транспортировки ЕСГ обладает большим запасом надежности и способна обеспечивать бесперебойные поставки газа даже при пиковых сезонных нагрузках [18]. Кроме того, распределительные газопроводы ОАО «Газпром» подходят к 79750 населенным пунктам России (~514,2 тыс. км). Таким образом, большинство условий, необходимых для транспортировки водорода, к настоящему времени уже создано. Однако в настоящее время ЕСГ загружена полностью и, по-видимому, использование существующей сети газопроводов реально только в переходный к водородной экономике период, но для использования смеси водорода и природного газа необходимо будет создание недорогих и эффективных технологий разделения газов и очистки водорода [5].

Экспериментальные исследования возможности транспортировки водорода с использованием стальных трубопроводов для природного газа [19] показали, что потери водорода из системы в 3-3,5 раза больше по объему потерь природного газа, но поскольку теплота сгорания водорода примерно в 3 раза больше, то энергетические потери примерно одинаковы. Интересно отметить, что за

6 мес. эксперимента случаев самовоспламенения при его утечке через арматуру не было, и материалы трубопроводов и уплотнений изменений не претерпели.

Тем не менее вопрос о возможном водородном охрупчивании стальных конструкций остается в центре внимания [1, 20-22]. Существующая инфраструктура природного газа в таком виде, как она есть, может оказаться непригодной для транспортировки и распределения водорода в силу использования недостаточно качественного металла в этих системах. Для окончательных выводов о пригодности существующих газотранспортных систем для перекачки водорода необходимо проведение комплексных НИОКР по исследованию материалов современных газопроводов. Выполнение таких НИОКР особенно актуально с учетом того, что передача энергии по газопроводу в виде водорода на расстояния 2...3 тыс. км в 2-4 раза экономичнее передачи энергии по линиям электропередач. Перекачка водорода по трубопроводному транспорту обладает еще и тем преимуществом, что водород можно накапливать и хранить в подземных и наземных хранилищах под давлением и доставлять потребителям в нужное время в нужном количестве.

#### Транспортировка газообразного водорода наземным транспортом

Газообразный водород обычно транспортируется в стальных цилиндрических контейнерах под давлением до 20 МПа [8, 12]. Такие емкости доставляют к месту потребления водорода на автомобильных или железнодорожных платформах. Канадская фирма FIBA Canning Inc. [23] предлагает различные трейлеры с цилиндрами, на которых возможна перевозка примерно от 100 до 700 кг водорода при давлениях 16...24 МПа. Стоимость перевозки сжатого водорода грузовиками достаточно высока – немного меньше, чем по трубопроводу, из-за низкой плотности водорода.

Трейлеры для перевозки водорода под давлением эффективны для удовлетворения потребностей мелких потребителей, и высокая стоимость доставки может компенсироваться отсутствием потерь [2]. В настоящее время доставка газообразного водорода на трейлерах – самый простой способ, особенно в тех районах, где нет трубопроводов [6]. Он также удобен для доставки на заправочные автостанции, когда трейлеры с водородом остаются на местах, и при этом не требуется постоянно действующая инфраструктура для хранения газообразного водорода.

В последнее время некоторые исследователи рассматривают также вариант доставки на грузовиках (трейлерах) «холодного газа». Например, предлагают перевозить газообразный водород при 35 МПа и 90 К в композитных трубах-контейнерах на трейлерах [24]. Это позволит увеличить вместимость и в то же время снизить затраты на сжижение. Способ перспективен для доставки водорода на заправочные станции.

#### Транспортировка жидкого водорода

Создание криогенных комплексов сжижения водорода, его длительного хранения и транспортировки по железным и шоссейным дорогам началось в 60-е годы



Рис. 5. Автомобильная цистерна ОАО «Криогенмаш» ЦТВ-45/1,0 на вакуумных испытаниях [27]

прошлого века в связи с использованием жидкого водорода в качестве топлива для ракетно-космических систем [25].

Сжижение водорода весьма энергоемкий процесс и, следовательно, дорогой, но транспортные расходы для жидкого водорода минимальны [1, 2]. Технология перевозки водорода автотранспортом, включая меры безопасности, достаточно разработана. В СССР были созданы автомобильные цистерны ТРЖВ-20 (емкость 20 м<sup>3</sup>) и ТРЖВ-24 (24 м<sup>3</sup>) для транспортировки жидкого водорода на большие расстояния [12]. В настоящее время ОАО «Криогенмаш» под заказ выпускает автомобильные цистерны емкостью 25 и 45 м<sup>3</sup> для транспортировки жидкого водорода (рис. 5, табл. 2) [26, 27].

Цистерна оборудована сложными системами заправки и выдачи жидкого водорода, удовлетворяющими отечественным и европейским требованиям по безопасности и включающими комплекс предохранительных клапанов, разрывных мембран, магистралей продувки чистым газом азотом или вакуумирования перед заправкой водородом. Кроме того, цистерна оборудована и эффективными волногасителями.

При транспортировке жидкого водорода в автоцистернах неизбежны потери, вызванные непрерывным испарением водорода и обусловленные выполнением технологических операций. При однократном захолаживании автоцистерны теряется до 15 % водорода от объема емкости, причем захолаживание производится не менее 2 раз в год. Потери от несовершенства вакуумной теплоизоляции цистерны составляют 0,5%/сут. от ее объема. С учетом того, что из цистерны отбирается не весь водород

Таблица 2

### Основные технические характеристики цистерны ЦТВ 45/1,0 [9]

Емкость, м <sup>3</sup>	45
Рабочее давление, МПа	1,0
Масса хранимого водорода, кг	2740
Потери водорода от испарения, кг/ч (%/сут.)	1,375 (1,0)
Масса изделия, кг	21760
Габаритные размеры, мм	15700×2500×3700

(некоторое количество жидкого водорода остается для охлаждения), то для цистерны емкостью 4,5 т потери составляют около 8,2 т/год. При каждой заправке автоцистерны имеются потери, связанные с испарением первой порции водорода. По оценкам это ~ 4 %, то есть при емкости 4,5 т они составляют ~ 180 кг. Потери на создание перепада давления между установкой сжижения и емкостью составляют примерно 1,5 % [12].

Цистерны для жидкого водорода изготавливают либо цилиндрическими, либо сферическими. Крупные емкости обычно делают сферическими для снижения потерь на испарение.

Автоцистернами жидкий водород перевозят на расстояния более 1,6 тыс. км.

Специалисты компании BMW создали несколько моделей-прототипов автомобилей на жидком водородном топливе, хранящемся в специальных баллонах, в которых потери массы водорода на испарение снижены до 1,5%/сут. [28]. Компания BMW считает сжиженный водород самым удобным видом топлива для перспективных автомобилей [29].

Железнодорожный транспорт для перевозки жидкого водорода используют довольно ограниченно. В криогенных железнодорожных цистернах потери водорода примерно такие же, как и в автоцистернах. В настоящее время ОАО «Криогенмаш» предлагает заказчикам железнодорожные цистерны для водорода емкостью 100 м<sup>3</sup>. Цистерны укомплектованы арматурным шкафом и устройствами, обеспечивающими безопасность перевозок [26].

До настоящего времени опыт транспортировки жидкого водорода на большие расстояния морскими танкерами в мире отсутствует. Лишь в рамках космической программы NASA жидкий водород для заправки ракет-носителей перевозился на специальной барже на расстояние около 100 км. Однако США, Япония, Южная Корея и другие страны имеют большой опыт перевозки в танкерах сжиженного природного газа. Этот опыт, безусловно, будет использован при создании морских танкеров для перевозки жидкого водорода.

В отечественной космической отрасли накоплен значительный опыт создания больших криогенных комплексов. В ОАО «Криогенмаш» были созданы криогенные средства транспортировки жидкого водорода на значительные расстояния, комплексы для стенов наземной отработки двигателей ракет-носителей и разгонных блоков и их заправки на стартовых позициях. Это опыт может послужить базой для развития одного из направлений отечественной водородной энергетики [26].

### Транспортировка водорода с помощью носителей

Транспортировка с помощью носителей при использовании существующей инфраструктуры позволила бы избежать многих проблем, связанных с доставкой водорода в газообразном или жидком видах, и снизить затраты [1].

Носители должны удовлетворять следующим требованиям [5]:

- сохранять фазовое состояние в заданном диапазоне температур и давлений;
- обеспечивать высокую объемную и массовую плотности по водороду;
- обеспечивать простую разгрузку водорода;
- быть экологически безопасными.

В качестве эффективных носителей водорода рассматриваются водородоемкие химические соединения, например, аммиак и углеводороды. Из них водород получают посредством химических реакций. Так, при нормальной температуре аммиак сжижается при давлении 1,0 МПа и его можно транспортировать по трубам и хранить в жидком виде (температура сжижения аммиака –239,76 К, критическая температура 405 К). Водород из аммиака получают посредством его каталитического разложения при температуре 527...627 К и атмосферном давлении:



Для получения 1 кг водорода необходимо 5,65 кг аммиака.

Преимущества хранения и транспортировки водорода в форме аммиака и углеводородов на дальние расстояния, в том числе по трубопроводам, состоят в возможности

высокой плотности водорода (до 100 кг/м<sup>3</sup>). Однако в этих формах хранения водорода среда хранения используется, в основном, однократно. При выделении водорода также выделяется экологически безопасный продукт (например, азот в случае аммиака). Носители не надо возвращать на новую заправку, но побочный продукт должен быть безвредным и практически не иметь цены.

Существуют и «перезаряжаемые» носители, содержащие водород, которые транспортируют на топливную станцию, где из них выделяют водород, а затем возвращают для новой заправки. К таким носителям относятся, например, гидриды металлов. При использовании в качестве носителей гидридов металлов целесообразно применять одинаковые гидриды в отдающей и принимающей водород системе, тогда теплота, выделяемая принимающей системой, может быть использована для выделения водорода из системы доставки.

В качестве возможных носителей водорода, кроме традиционных аммиака, жидких углеводородов, гидридов металлов, в последнее время рассматривают и новые материалы – водородные клатраты, наноструктуры. Однако основные результаты их изучения относятся к

Таблица 3

**Основные способы транспортировки водорода**

Способ транспортировки	Достоинства	Недостатки
<b>Газообразный водород по трубопроводам</b>		
Трубопроводный транспорт	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Наибольшая рентабельность для больших объемов водорода</li> <li>• Отсутствие термодинамических ограничений для снижения затрат на транспортировку</li> <li>• Низкое энергопотребление</li> <li>• Безопасность транспортировки</li> <li>• Безопасность для окружающей среды</li> <li>• Использование существующих трубопроводных систем для природного газа и нефти</li> <li>• Накапливание и хранение в ПХГ под давлением и подача по газопроводам потребителям в нужное время в нужном количестве</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Большие капиталовложения в строительство специальных трубопроводов</li> <li>• Очень высокая стоимость транспортировки при малых объемах</li> <li>• Сложная и дорогая процедура получения разрешений на землеотвод, строительство и т.п.</li> <li>• Необходимость комплексных НИОКР по исследованию водородостойкости существующих трубных сталей, особенностей ПХГ, созданию новых материалов, арматуры, компрессоров и др.</li> </ul>
Контейнерные перевозки	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Отсутствие потерь водорода</li> <li>• Не требуется создания инфраструктуры хранения на месте потребления</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Целесообразность только для мелких потребителей</li> <li>• Высокая стоимость транспортировки</li> </ul>
<b>Жидкий водород</b>		
Криогенные цистерны	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая энергетическая плотность и небольшой объем</li> <li>• Относительная дешевизна и эффективность криогенных цистерн</li> <li>• Минимизация необходимости компримирования в местах потребления</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Большое энергопотребление и высокая стоимость</li> <li>• Невозможность снижения стоимости при длительном использовании</li> <li>• Сложность обращения с криогенными жидкостями</li> </ul>
<b>Водород в связанном состоянии</b>		
Носители	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Минимальная стоимость транспортировки в перспективе</li> <li>• Использование существующей инфраструктуры</li> <li>• Умеренные давления и температуры в системе доставки</li> <li>• Возможность снижения стоимости хранения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сложность применения на местах из-за необходимости трансформации для разгрузки</li> <li>• Повышенное энергопотребление</li> <li>• Возможность попадания примесей в газообразный водород</li> <li>• Наличие холостого пробега носителя на перезарядку</li> <li>• Необходимость проведения комплексных НИОКР, в том числе по обеспечению безопасности и влиянию на окружающую среду</li> </ul>



возможности хранения водорода [30], а технологических решений использования их для транспортировки водорода пока нет.

### Сравнительный анализ существующих методов транспортировки водорода

Достоинства и недостатки основных способов транспортировки водорода сведены в табл. 3 [1, 5, 31].

По-видимому, в период развития водородной энергетики будут использоваться в разной степени все рассмотренные способы транспортировки водорода. Комбинация этих способов может быть использована на разных этапах развития рынка в зависимости от способов производства водорода.

Трейлеры со специальными контейнерами под давлением могут быть использованы на начальном этапе перехода к водородной экономике, потому что потребности в водороде будут относительно небольшими, а этот способ позволяет избежать потерь водорода при транспортировке.

Доставка водорода в криогенных автоцистернах является наиболее экономичной для средних по объему потребителей. Возможна транспортировка относительно больших количеств водорода (больше, чем для трейлеров с контейнерами под давлением) и доставка водорода во все географические зоны.

Трубопроводные системы наиболее целесообразны для транспортировки водорода в районы с высокими

потребностями в нем по мере того, как все больше производственных мощностей будет подключаться к сети.

Экономическая целесообразность всегда будет диктовать предпочтительный способ доставки. Например, газораспределительные линии сложнее создать в городских районах. Сценарий доставки может быть таким: передача по трубопроводу от центрального завода к терминалу, от которого доставка будет продолжена на трейлере в трубах, в криогенных цистернах или на грузовом транспорте в носителях.

При выборе способов транспортировки водорода необходимо учитывать и аспекты безопасности [32, 33]. Один из ключевых моментов относится к возможному нарушению энергоснабжения больших масс населения. Техногенные катастрофы и системные аварии могут быть вызваны природными явлениями (например, ураганом, землетрясением, цунами), ошибочными действиями персонала, террористическими актами. В связи с этим использование последних достижений науки и техники (прочные пластиковые трубы, сенсоры с дистанционным управлением и др.) для создания новых подземных трубопроводов представляется особенно целесообразным. Потребуется разработка программ патрулирования трубопроводов (возможно, отличная от существующей для природного газа), правил обеспечения безопасности при земляных работах и др. Транспортировка водорода по подземным трубопроводам предпочтительна и с точки зрения безопасности населения (в том числе и при угрозе терроризма).

## Литература

1. **Козлов С.И., Фатеев В.Н.** Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 520 с.
2. **Simbeck D.D., Chang E.** «Hydrogen supply: Cost estimates for hydrogen pathways. Scoping analysis» SFA Pacific Jul. Mountain View, CA 2002.
3. **Joseph T.** Hydrogen Fuel Air Products and Chemicals, Inc. Allentown, PA NGV TF Washington D.C. August 4, 2005.
4. A review of potential hydrogen production and delivery costs H2NET Hydrogen Energy Systems 2002 [www.h2net.org.uk/Events/Systems\\_2002/Systems\\_2002.htm](http://www.h2net.org.uk/Events/Systems_2002/Systems_2002.htm)
5. FreedomCAR & Fuel partnership. Hydrogen Delivery Technologies Roadmap 5 November 2005.
6. [http://transpowerusa.com/zero\\_emission\\_solutions/hydrogen\\_delivery\\_systems.html](http://transpowerusa.com/zero_emission_solutions/hydrogen_delivery_systems.html)
7. H.G. Tissen Ber. Komforschungslage. 1974. Bd.1093.
8. **Wurster R. and Zittel W.** Hydrogen Energy. Published at the Workshop on Energy technologies to reduce CO2 emissions in Europe: prospects, competition, synergy, Energieonderzoek Centrum Nederland ECN, Petten, April 11-12, 1994.
9. **Leighty B., Hirata M., O'Hashi K., Benoit J.** IRHTDF. ASM Materials Solutions Conference and Expo 18-20 October 04, Columbus, OH. [www.leightyfoundation.org/files/hydrogen\\_trans\\_facility\\_s04.pdf](http://www.leightyfoundation.org/files/hydrogen_trans_facility_s04.pdf)
10. **Wurster R.** Hydrogen Road Vehicles and their Refuelling Infrastructure Strategic Considerations And The European Situation in Regulations & Standards H2IT Associazione italiana idrogeno e celle a combustibile 16 April 2004 [http://www.hyweb.de/Knowledge/article/H2-RS\\_Infrastructure\\_H2IT-Seminar\\_LBST\\_RWurster\\_16APR2004.pdf](http://www.hyweb.de/Knowledge/article/H2-RS_Infrastructure_H2IT-Seminar_LBST_RWurster_16APR2004.pdf)
11. **Ogden J., Dennis E., Steinbugler M., Strohhahn J.** Hydrogen Energy Systems Studies. Final Report. Princeton University. 1995.
12. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справ. изд. Под ред. Д.Ю. Гамбург, Н.Ф. Дубровкина. – М., Химия, 1989. – 672 с.
13. Composite agency. Analysis&simulation expertise. Mar.2008 Polyamide Relining of a High Strength Steel Pipeline. [http://www.composite-agency.com/messages/Polyamide\\_Relining\\_Steel\\_Pipeline\\_Hydrogen.pdf](http://www.composite-agency.com/messages/Polyamide_Relining_Steel_Pipeline_Hydrogen.pdf)
14. **Smith B., Frame B., Eberle C., Anovitz L., Armstrong T.** Fiber-Reinforced Polymer Pipelines for Hydrogen Delivery Pipelines for Hydrogen Delivery. Oak Ridge, Tennessee. May 16, 2007 DOE Hydrogen Program Review.
15. **Smith B., Frame B., Anovitz L., Armstrong T.** Fiber-Reinforced Polymer Pipelines for Hydrogen Delivery. FY 2007 Annual Progress Report DOE Hydrogen Program III.E.3. – P. 319.
16. **Mintz M., Ringer M.** H2 Delivery analysis. 2005 DOE Hydrogen Program Review. May 25, 2005.
17. **Eliasson B., Bossel U.** The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? [http://www.woodgas.com/hydrogen\\_economy.pdf](http://www.woodgas.com/hydrogen_economy.pdf)
18. <http://www.gazprom.ru/articles/article12687.shtml>
19. **Jasionovski W.J. et al.** Gas distribution equipment in hydrogen service. Int.J. Hydrogen Energy 5 (1980) 323-336.
20. **Нечаев Ю.С.** Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс-коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 11 (55). – С. 108-117.
21. **Sofronis P., Robertson I.M., Johnson D.D.** FY 2010 Annual Progress Report DOE Hydrogen Program III.10 Hydrogen Embrittlement of Pipeline Steels: Fundamentals, Experiments, Modeling 296-301.
22. **Dadfarina M., Novak P., Ahn D.C., Liu J.B., Sofronis P., Johnson D.D., Robertson I.M.** Recent Advances in the Study of Structural Materials Compatibility with Hydrogen, Advanced Materials. – 2010. – v. 22. – P. 1128-1135.
23. FIBA Canning Inc. Canada sales@fibacanning.com
24. **Mintz M., Elgowain A.** Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis. FY 2010 Annual Progress Report DOE Hydrogen Program III.1. – P. 255-258.
25. **Архаров А.М., Кунис И.Д.** Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 251 с.
26. ОАО Криогенмаш. Водородное оборудование. <http://www.cryogenmash.ru/>
27. **Кузьменко И.Ф., Румянцев Ю.Н., Сайдадь Г.И.** Современные тенденции в конструировании и изготовлении резервуаров для хранения и транспортировки жидкого водорода // Технические Газы. – 2008. – № 1. – С. 53-58.
28. **Schlapbach L., Züttel A.** // Nature 414. – 2001. – 15 November. – P. 353.
29. Водородная энергетика для автомобильного транспорта Российской Федерации. ООО Инновационно-исследовательский центр «Стирлинг технологии» – <http://www.stirling.ru/>
30. **Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н.** Системы хранения водорода // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5(11). – С. 72-79.
31. FY 2010 Annual Progress Report III. Hydrogen Delivery [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_progress10.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress10.html)
32. **Фортос В.Е., Макаров А.А., Митрова Т.А.** Глобальная безопасность энергетическая: проблемы и пути решения // Вестник российской академии наук. – 2007. – Том 77, № 2. – С. 99-114.
33. **Коробцев С.В., Фатеев В.Н., Самсонов Р.О., Козлов С.И.** Безопасность водородной энергетики // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 5(5). – С. 68-72.

## Биодизельные топлива из различных сырьевых ресурсов

**В.А. Марков,**

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

**С.Н. Девянин,**

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

**С.А. Нагорнов,**

профессор ГНУ «ВИИТиН» (г. Тамбов), д.т.н.,

**В.С. Акимов,**

студент МГТУ им. Н.Э. Баумана

В статье проведен анализ физико-химических свойств биодизельных топлив, полученных из различных сырьевых ресурсов. Представлены результаты определения фракционного состава этих топлив. Проведены расчетные исследования показателей дизеля Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла различного состава.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, биодизельное топливо, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир подсолнечного масла.

## Fuels produced from various raw material sources

**V.A. Markov, S.N. Devyanin, S.A. Nagornov, V.S. Akimov**

An analysis for physical and chemical properties of fuels produced from various raw material sources is conducted in this article. The results for determining the fraction composition of the fuels are presented. An experimental study of diesel engine Д-245.12С running on mixtures of diesel fuel and rapeseed oil methyl ester with various percentage of the components is carried out.

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, biodiesel fuel, rapeseed oil methyl ester, sunflower oil methyl ester.

Несмотря на имеющиеся в периодической печати пессимистические прогнозы [1,2] производство биодизельных топлив на основе растительных масел продолжает расширяться. Так, по данным работы [3] в 2005 г. объем производства биодизельного топлива в странах Евросоюза составил около 3,5 млн т (рис. 1), в 2009 г. его выпуск достиг 12 млн т, а в 2011 г. планируется произвести уже около 18 млн т этого топлива.

Еще сравнительно недавно биодизельное топливо в Европе получали

почти исключительно из рапсового масла. В 2001 г. на долю метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) приходилось около 84 % биодизельного топлива, 13 % составлял метиловый эфир подсолнечного масла (МЭПМ), по 1 % – на сложные эфиры соевого, пальмового и остальных масел [4]. К 2010 г. сырьевая база для производства биодизельных топлив в странах Евросоюза заметно расширилась. Доля рапсового масла, получаемая из рапса, выращиваемого в этих странах как сырьё для выпуска моторных

топлив, сократилась до 63 % [3], но при этом возросла до 13 % доля импортируемых растительных масел (в том числе – рапсового). Заметную долю сырьевых ресурсов составили животные жиры (9 %) и фритюрные растительные масла (5 %). Причем основную часть фритюрных масел составило подсолнечное масло.

В условиях Российской Федерации весьма привлекательным представляется использование для производства биодизельного топлива подсолнечного масла. Если в мировом производстве растительных масел ведущее место занимают соевое и рапсовое масла, то в России – подсолнечное [5]. Объем его производства превышает 80 % общего объема производства растительных масел. Дополнительный интерес оно вызывает еще и потому, что производство биодизельного топлива может быть организовано из отработанного фритюрного подсолнечного масла, широко применяемого в пищевой промышленности и системе общественного питания.

В качестве топлива для дизелей используют различные топлива, получаемые из растительных масел – рапсового, соевого, подсолнечного, пальмового, кокосового, кукурузного, льняного и др. Применяют смеси растительных масел с нефтяными и альтернативными топливами, эмульсии растительных масел с водой, спиртами и другими альтернативными топливами, сложные эфиры растительных масел [4].

Для централизованного снабжения топливом автотранспорта больших городов в большей степени пригодны сложные эфиры растительных масел – метиловые, этиловые и бутиловые, получаемые путем обработки растительных масел спиртами соответственно метанолом, этанолом и бутанолом [4]. Причем, сложные эфиры можно получить из различных растительных масел – рапсового, соевого, пальмового, подсолнечного и

др. Эти эфиры не могут быть описаны простой химической формулой, поскольку являются смесями эфиров различных жирных кислот, входящих в состав растительных масел. Физико-химические свойства этих эфиров в большей степени приближены к свойствам нефтяного дизельного топлива (ДТ). В первую очередь следует отметить пониженную вязкость указанных эфиров, а также их

повышенное цетановое число, которое обычно превосходит цетановое число нефтяного дизельного топлива.

Наибольшее практическое применение в качестве дизельного топлива получили метиловые эфиры (МЭ) растительных масел, которые часто называют биодизельным топливом (табл. 1, 2).

Биодизельные топлива, предназначенные для использования в дизель-

ных двигателях, должны за минимальный период сформировать в камере сгорания топливно-воздушную смесь, обеспечивающую ее легкое воспламенение, плавное и достаточно полное сгорание с минимальным содержанием сажи, токсичных и канцерогенных веществ в отработавших газах (ОГ). Не допускается образование осадков в топливоподающей системе и нагаротложений на деталях двигателя.

Таблица 1

**Состав сложных метиловых эфиров растительных масел [6]**

Эфиры жирных кислот	Формула кислоты	Метиловые эфиры растительных масел				
		Соевый	Рапсовый	Пальмовый	Пальмоядровый	Кокосовый
Каприловый	$C_8H_{16}O_2$	–	–	–	3,3	6,0
Каприновый	$C_{10}H_{20}O_2$	–	–	–	3,0	4,9
Лауриновый	$C_{12}H_{24}O_2$	–	–	0,3	50,8	52,4
Миристиновый	$C_{14}H_{28}O_2$	0,4	–	1,1	15,0	16,9
Пальмитиновый	$C_{16}H_{32}O_2$	10,6	4,5	48,8	8,0	8,6
Стеариновый	$C_{18}H_{36}O_2$	2,4	–	1,7	2,1	2,3
Олеиновый	$C_{18}H_{34}O_2$	23,5	63,8	38,4	15,1	6,5
Линолевый	$C_{18}H_{32}O_2$	51,2	19,8	9,1	2,4	1,4
Линоленовый	$C_{18}H_{30}O_2$	8,5	10,4	0,5	0,1	0,3
Другие		3,4	1,5	0,1	0,2	0,7

**Примечание.** Указан массовый процентный состав метиловых эфиров жирных кислот.

Таблица 2

**Физико-химические свойства базового дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел**

Физико-химические свойства	Базовое ДТ	Метиловые эфиры растительных масел				
		Соевый	Рапсовый	Пальмовый	Пальмоядровый	Кокосовый
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	832	883	886	879	877	874
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	4,7	6,6	4,5	4,5	2,9	2,7
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	43120	38220	365500	36850	35610	35220
Цетановое число	56	–	54	64,5	58	57
Температура, °С						
потери текучести	–12,5	0	–7,5	12,5	–5,0	–5,0
выкипания 50% топлива	278	329	340	329	273	275
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,2	12,47	12,53	12,60	12,10	11,99
Массовая доля, %						
С	87,3	76,9	77,6	75,6	73,9	73,2
Н	12,5	12,2	11,9	12,9	12,3	12,3
О	0,4	10,9	10,5	11,5	13,8	14,5
S	<0,005	–	0,0006	0,0002	–	0,0002
H <sub>2</sub> O	–	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04
Содержание калия, мг/кг	–	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0
Массовая доля, %						
метанола	–	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,013
моноглицеридов	–	0,083	0,070	0,073	0,390	0,030
диглицеридов	–	0,020	0,170	0,178	0,310	0,150
триглицеридов	–	0,018	0,010	0,007	0,040	0,020

**Примечание.** «–» – свойства не определялись.

Обеспечение современных требований к показателям топливной экономичности и токсичности ОГ дизельных двигателей возможно лишь при дальнейшем совершенствовании распыливания и смесеобразования топлива. При этом скорость формирования топливно-воздушной смеси предопределяется тонкостью распыливания топлива, интенсивностью испарения топлива и диффузии его в сжатый воздух. Для достижения требуемого качества смесеобразования топливо должно обладать заданным фракционным составом, который является одним из важнейших показателей эксплуатационных свойств топлив для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и характеризует содержание в топливе различных фракций, выкипающих в определенных температурных пределах.

При снятии характеристик фракционного состава для традиционного дизельного топлива обычно выделяют температуру начала перегонки (начало кипения), перегонки 10, 50, 90 % топлива и ее окончания (конец кипения), соответствующую перегонке 96 или 98 % топлива. Температура перегонки 10 % топлива характеризует склонность топлива к образованию паровых пробок в системе питания дизеля. Наличие в топливе большого количества легких фракций приводит к увеличению жесткости работы двигателя и снижает его ресурс. Средняя испаряемость топлива определяется температурой выкипания 50 %, которая обуславливает также и период задержки воспламенения. Наличие в топливе тяжелых трудноиспаряющихся фракций можно определить по температуре перегонки 90 %. Температура окончания перегонки, соответствующая перегонке 96 или 98 % топлива, также определяет присутствие в нем тяжелых, выкипающих при высоких температурах, фракций. Их чрезмерное содержание в топливе приводит к ухудшению испарения и усложнению образования однородной топливно-

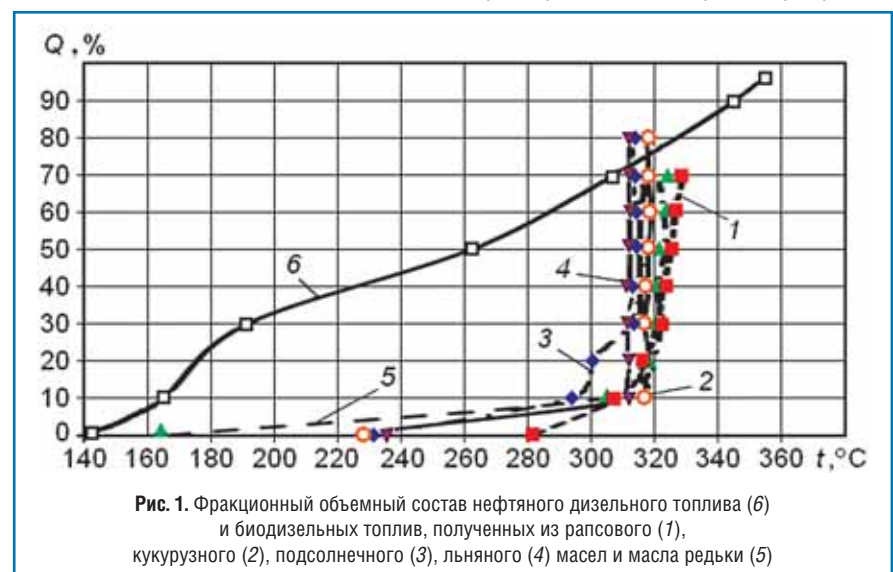
воздушной смеси. Высокая температура выкипания 96 % топлива свидетельствует о наличии тяжелых фракций, которые ухудшают смесеобразование, увеличивают нагарообразование на деталях цилиндропоршневой группы, снижают экономичность и надежность работы двигателя. При использовании топлив с большим содержанием тяжелых фракций определенная их часть догорает в такте расширения, вызывая дымность ОГ и повышение их температуры, рост удельного расхода топлива, загрязнение моторного масла и деталей двигателя продуктами неполного сгорания топлива, прежде всего – сажей.

Перечисленные факторы показывают необходимость учета фракционного состава при выборе топлива для дизелей. Это также относится и к биодизельному топливу. Однако этот важный показатель качества биодизельного топлива в технической литературе рассматривается сравнительно редко.

Фракционный состав топлив определяется методом перегонки – разделением смеси жидкостей на компоненты, основанным на разнице температур их кипения. Этот метод заключается в нагревании жидкости до кипения с последующей конденсацией паров в холодильнике. Методика определения содержания метиловых эфиров жирных кислот в биодизельном топливе

основана на газохроматографическом анализе биотоплива методом внутреннего стандарта. При этом использован аппаратно-программный комплекс «Кристалл 2000М» с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой ZB-1. Градуировочный коэффициент находится по общепринятой методике путем анализа бинарных смесей одного из определяемых компонентов (метилстеарат) и внутреннего стандарта (цетан).

Компонентами нефтяного дизельного топлива являются углеводороды и их производные, компонентами растительного масла – эфиры трехатомного спирта глицерина и высших алифатических жирных кислот (триацилглицериды), а компонентами биодизельного топлива – метиловые эфиры высших алифатических жирных кислот. Самой большой молекулярной массой обладают триацилглицериды (880-900 атомных единиц массовых – а.е.м.), молекулярная масса компонентов биодизельного топлива (290-310 а.е.м.) ниже, чем у растительных масел, но выше, чем у нефтяного дизельного топлива (180-230 а.е.м.), что приводит к более высоким температурам вспышки биодизельного топлива (145-170 °С по сравнению с 50-70 °С у нефтяного топлива) и, как следствие, к снижению пожароопасности биодизельного топлива при хранении и транспортировке.



Различия в строении и молекулярной массе компонентов нефтяного и биотоплив определяют и различие их фракционных составов.

Хроматографический анализ фракций биодизельного топлива подтверждает образование при перегонке гексановой (капроновая), октановой (каприловая), нонановой (пеларгоновая), декановой (каприновая) кислот и метилового эфира декандиовой (себаценовая), нонандиовой (азелаиновая) и октандиовой (пробковая) кислот окта- и нонадиенов, что соответствует известной схеме радикального окисления по метиленовым группам, находящимся в  $\alpha$ -положении к двойной связи [7].

Кривые разгонки биодизельных топлив, полученных из различных растительных масел, показывают (рис. 1), что температура кипения нефтяного дизельного топлива в процессе перегонки непрерывно увеличивается со 140 до 350 °С. Температура начала кипения биодизельных топлив, полученных из различных растительных масел, обычно колеблется от 220 до 285 °С. Исключение составляет масло редьки (160 °С). При испарении  $Q > 10\%$  объема кривые разгонки сложных

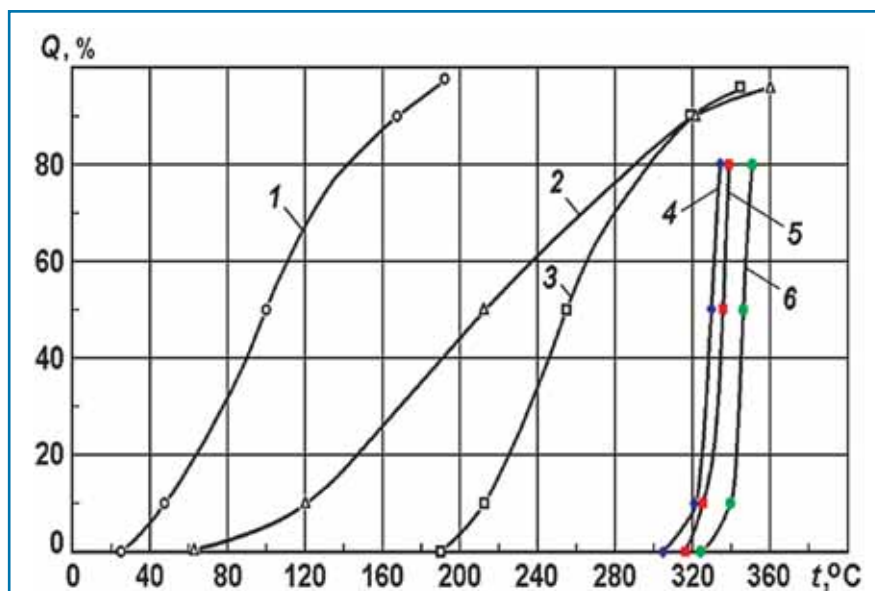


Рис. 2. Зависимость объема испарившегося топлива  $Q$  от температуры  $t$  разгонки различных топлив:

1 – бензин Аи-93; 2 – дизельное топливо широкого фракционного состава ШФС-1; 3 – дизельное топливо Л; 4 – метиловый эфир свиного жира; 5 – метиловый эфир рапсового масла; 6 – метиловый эфир соевого масла

метиловых эфиров идут резко вверх. При повышении температуры выше  $t = 310\text{--}330$  °С метиловые эфиры жирных кислот подвергаются термическому разложению.

Поскольку при перегонке биодизельного топлива отмечено термическое разложение его компонентов, можно предположить, что оно

происходит и при работе дизельного двигателя. Образующиеся при этом продукты окисления и полимеризации являются причиной негативных процессов в двигателе – нагаро- и коксоотложения на деталях камеры сгорания. Температура выкипания 50 % фракций для нефтяного дизельного топлива в данном случае составляла

Таблица 3

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топлива*						
	ДТ	МЭРМ	95 % ДТ + 5 % МЭРМ	80 % ДТ + 20 % МЭРМ	60 % ДТ + 40 % МЭРМ	40 % ДТ + 60 % МЭРМ	20 % ДТ + 80 % МЭРМ
Плотность при 50 °С, кг/м <sup>3</sup>	809	855	810	818	826	836	845
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	2,45	4,63	2,42	2,74	3,07	3,51	4,11
Коэффициент поверхностного натяжения при 50 °С, мН/м	25,3	29,0	25,4	26,0	26,7	27,4	28,1
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,8	42,2	41,9	41,5	40,5	39,6
Цетановое число	46,5	54	47	49	50	51,5	53
Температура самовоспламенения, °С	250	230	–	–	–	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	12,6	14,2	14,0	13,6	13,3	12,9
Массовая доля, %							
С	87,0	77,6	86,5	85,1	83,2	81,4	79,5
Н	12,6	12,2	12,6	12,5	12,4	12,3	12,2
О	0,2	10,2	0,71	2,24	4,28	6,22	8,28
S	0,20	0,002	0,19	0,16	0,12	0,08	0,02

Примечание. «–» – свойства не определялись; \* – указано объемное содержание компонентов в смеси.

Таблица 4

**Расположение распыляющих отверстий распылителей  
DOP 119S534 фирмы Motorpal**

Номер отверстия	Угловое расположение отверстия относительно штифта, градус	Угол наклона отверстия относительно оси распылителя, градус
1	8	63,5
2	90	72
3	172	63
4	237	52,5
5	303	53,5

**Примечание.** Нумерация распыляющих отверстий проведена от штифта корпуса распылителя.

265 °С. Для всех биодизельных топлив эта температура намного выше (300 °С и более).

Результаты аналогичных исследований различных нефтяных и альтернативных топлив приведены в работе [8]. Кривые фракционной разгонки нефтяных топлив (бензин Аи-93, топлива широкого фракционного состава ШФС-1 и дизельное топливо Л) и биотоплив (метиловые эфиры свиного жира, рапсового и соевого масел) подтверждают утяжеленный фракционный состав рассматриваемых биотоплив (рис. 2). Следует отметить, что начало кипения метиловых эфиров соевого, рапсового масла и свиного жира соответствует температурам 323, 316 и 304 °С. Температуры перегонки 10 % этих эфиров оказались равными 340, 325 и 322 °С, а температуры перегонки 50 % – 346, 336 и 329 °С. Таким образом, диапазон температур выкипания этих эфиров оказался существенно меньше, чем диапазон температур выкипания традиционных дизельных топлив.

В заключение анализа физико-химических свойств биодизельных топлив, полученных из растительных масел, следует отметить, что их несомненным достоинством является высокая температура вспышки, что приводит к снижению их пожароопасности при хранении и транспортировке и объясняется более тяжелым фракционным составом биодизельных топлив в сравнении с нефтяным. С другой стороны, следствием более тяжелого фракционного состава и

отсутствия достаточного количества легких фракций являются склонность к нагарообразованию и термическая окислительная деструкция эфиров с образованием карбоновых кислот, что повышает коррозионную агрессивность топлив. Следовательно состав биодизельного топлива, получаемого биоконверсией растительных масел, требует улучшения. Уменьшить скорость окислительных и деструктивных процессов в биодизельном топливе можно снижением концентрации реакционноспособных непредельных соединений. Этого можно достичь, например, использованием смесей биодизельного топлива с нефтяными и альтернативными, в частности, при добавлении синтетических низкомолекулярных эфиров предельных алифатических кислот и спиртов. Биодизельное топливо в этом случае соответствует товарному летнему дизельному практически по всем параметрам, в том числе по фракционному составу.

Как отмечено выше, чистый метиловый эфир рапсового масла по

своим физико-химическим свойствам несколько отличается от нефтяного дизельного топлива для быстроходных дизелей. Но смеси МЭРМ с дизельным топливом марки Л по ГОСТ 305–82 имеют свойства, достаточно близкие к свойствам стандартного ДТ (табл. 3).

В качестве объекта расчетных исследований выбран дизель типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода. Этот двигатель предназначен для малотоннажных грузовых автомобилей ЗиЛ-5301 «Бычок», а его модификации – для автобусов Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторов «Беларусь» Минского тракторного завода (МТЗ). Некоторые параметры данного дизеля приведены в работе [9]. Используемые в этом двигателе форсунки оснащены распылителями типа DOP 119S534 фирмы Motorpal (табл. 4) с выходом пяти распыляющих отверстий диаметром 0,34 мм на конус седла иглы диаметром 5,0 мм и максимальным ходом 0,30 мм (по направляющей). При этом суммарная

Таблица 5

**Закон подачи топлива дизеля Д-245.12С на режиме  
с частотой вращения  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> и цикловой подачей  $q_v=80$  мм<sup>3</sup>**

Угол поворота вала $\varphi$ , градус п.к.в.	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с	Угол поворота вала $\varphi$ , градус п.к.в.	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с	Угол поворота вала $\varphi$ , градус п.к.в.	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с
0	0	6,0	$8,6 \cdot 10^{-5}$	12,0	$8,8 \cdot 10^{-5}$
1,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	7,0	$8,5 \cdot 10^{-5}$	13,0	$8,2 \cdot 10^{-5}$
2,0	$5,6 \cdot 10^{-5}$	8,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	14,0	$6,4 \cdot 10^{-5}$
3,0	$7,6 \cdot 10^{-5}$	9,0	$9,5 \cdot 10^{-5}$	15,0	$4,4 \cdot 10^{-5}$
4,0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	10,0	$9,4 \cdot 10^{-5}$	16,0	0
5,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	11,0	$9,2 \cdot 10^{-5}$		

**Примечание.** П.к.в. – поворот коленчатого вала.

эффективная площадь распылителя, определенная при максимальном подъеме иглы форсунки, составляет 0,250 мм<sup>2</sup>.

При расчетных исследованиях задавался закон подачи (табл. 5), формируемый кулачками топливного насоса высокого давления (ТНВД) модели PP4M10U1f на номинальном режиме работы дизеля Д-245.12С.

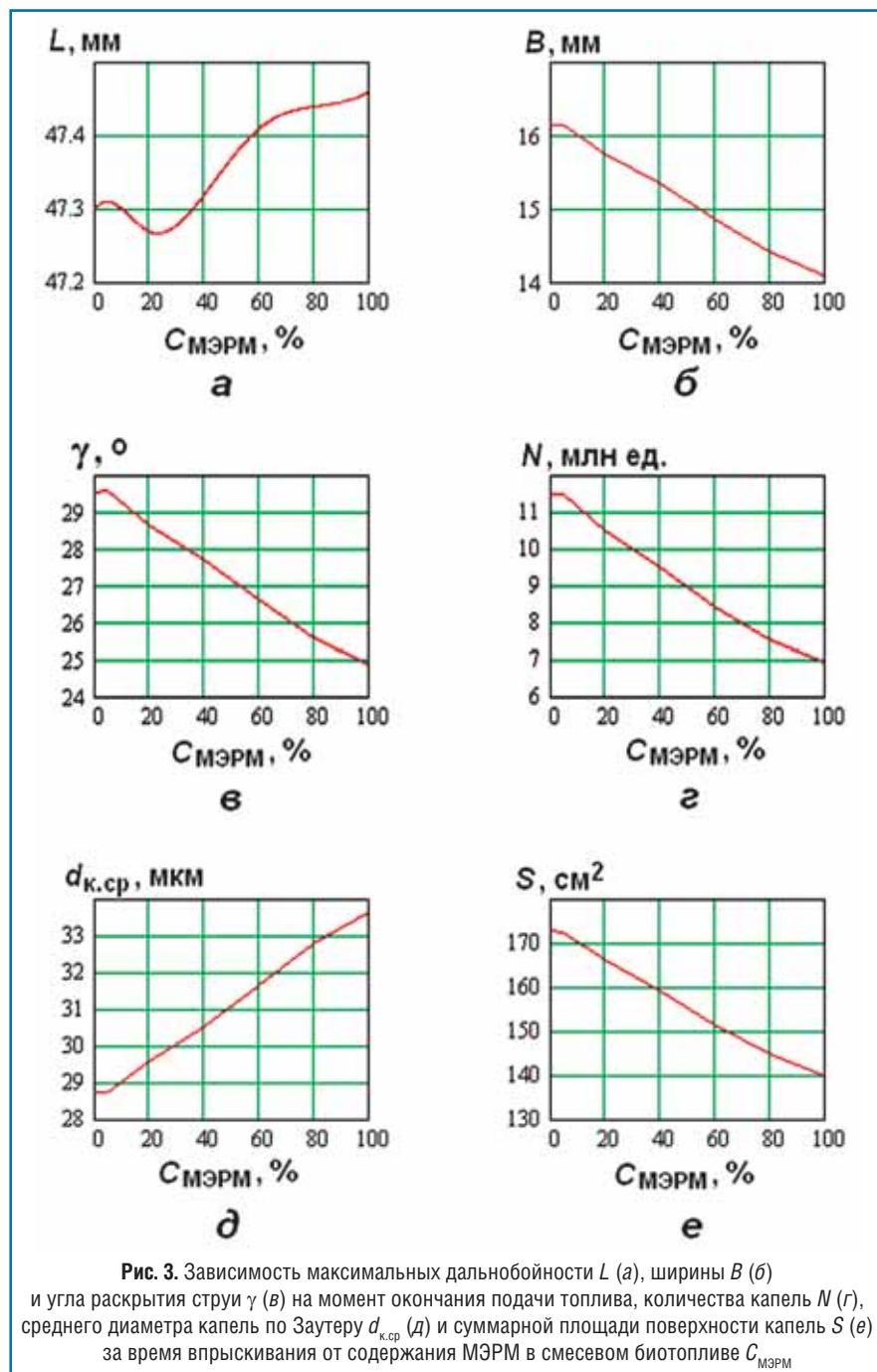
При расчетных исследованиях процессов впрыскивания и распыливания топлива проведена оценка влияния

свойств используемых смесей ДТ и МЭРМ на динамику развития струй топлива с использованием математической модели, описанной в работе [10]. Эта модель развития струи, созданная на основе закона сохранения импульса, учитывает действительный закон подачи топлива и отражает влияние следующих основных факторов: продолжительности процесса  $t$ , плотности воздуха  $\rho_v$ , диаметра распыливающего отверстия  $d_p$ , давления впрыскивания  $p_{впр}$ . При разработке методики

расчета динамики развития струи приняты следующие допущения:

- структура топливной струи рассматривается в виде двух зон – фронта и тела струи, отличающихся между собой характером взаимодействия как внутри струи, так и с окружающим воздухом;
- рассматривается не отдельная капля, а группа капель и пара топлива, образованных в результате распыливания порции топлива, представляющей собой малую часть топлива, подаваемого через распыливающее отверстие за одно впрыскивание;
- порция поданного топлива движется в струе по своему закону, взаимодействуя с окружающей средой и не взаимодействуя с ранее поданными порциями;
- при достижении порцией топлива фронта струи происходит обмен энергиями между ними на основе закона сохранения импульса, и топливо скапливается во фронте струи;
- фронт струи взаимодействует с воздухом, в результате чего происходит обмен энергиями на основе закона сохранения импульса;
- рассматривается обмен количеством движения только в прямолинейном направлении движения струи топлива.

На основании предложенной методики расчета динамики развития струй топлива разработана программа «СТРУЯ» на языке Turbo Basic. При расчетах динамики развития струи в дизеле типа Д-245.12С на номинальном режиме работы ( $n=2400$  мин<sup>-1</sup>,  $q_{ц}=80$  мм<sup>3</sup>) с использованием программы «СТРУЯ» определена зависимость максимальных дальности  $L$ , ширины  $B$  и угла раскрытия струи  $\gamma$  за период задержки воспламенения (ПЗВ) от содержания МЭРМ в смеси с ДТ. Указанные параметры определялись при впрыскивании топлива в среду с противодействием, соответствующим текущему давлению газов в цилиндре, а на графиках приведены расчетные значения этих параметров



**Рис. 3.** Зависимость максимальной дальности  $L$  (а), ширины  $B$  (б) и угла раскрытия струи  $\gamma$  (в) на момент окончания подачи топлива, количества капель  $N$  (г), среднего диаметра капель по Заутеру  $d_{к,ср}$  (д) и суммарной площади поверхности капель  $S$  (е) за время впрыскивания от содержания МЭРМ в смеси с ДТ.

на момент окончания топливоподачи. Кроме того, исследован ряд параметров процесса распыливания топлива за время впрыскивания (рис. 3).

Исследуемые параметры процессов впрыскивания и распыливания топлива оказались практически одинаковыми для ДТ и смесового биотоплива с малым содержанием МЭРМ ( $C_{\text{МЭРМ}}=5\%$ ). При дальнейшем росте  $C_{\text{МЭРМ}}$  все показатели процесса распыливания топлива ухудшаются. Лишь длина струи  $L$  за ПЗВ с ростом  $C_{\text{МЭРМ}}$  сначала сокращается, достигает своего минимума при  $C_{\text{МЭРМ}}=20-25\%$ , а затем монотонно увеличивается (см. рис. 3а).

В заключение следует отметить, что приведенные данные экспериментальных и расчетных исследований подтверждают возможность использования в дизелях биодизельных топлив, получаемых из различных сырьевых ресурсов. Наибольшее приближение к свойствам нефтяных дизельных топлив обеспечивает применение смесей нефтяного дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел. При этом удается получить показатели процессов

впрыскивания и распыливания топлива, достаточно близкие к аналогичным показателям дизеля, работаю-

щего на чистом дизельном топливе, особенно при небольшом содержании биодизельного топлива в смеси.

## Литература

1. **Володин В.М., Лупачев П.Д., Гольнев В.С.** Биотопливо и производство продуктов питания // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5. – С. 69-71.
2. **Шахов А.В.** Производить биодизель в Германии невыгодно // Сельский механизатор. – 2008. – № 7. – С. 44.
3. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орстик, Н.Т. Соколин, В.Ф. Федоренко и др. Под ред. В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ «Росинформротех», 2008. – 404 с.
4. **Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – М.: Издательский центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. – 340 с.
5. **Ашпина О.** Рапс – культура стратегическая // The Chemical Journal (Химический журнал). – 2005. – № 9. – С. 40-44.
6. **Муо Т.** The Effect of Fatty Acid Composition on the Combustion Characteristics of Biodiesel (A Dissertation Submitted to the Graduate School of Science and Engineering In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering). Japan: Kagoshima University, 2008. – 171 p.
7. **Тюкавкина Н.А.** Биоорганическая химия: учебник для ВУЗов / Н.А. Тюкавкина, Ю.И. Бауков. – М.: Дрофа, 2006. – 542 с.
8. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учебное пособие / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
9. **Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В.** Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 5. – С. 42-47.
10. **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.

## 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) 321-62-81**

или по e-mail: [transport.2@ngvrus.ru](mailto:transport.2@ngvrus.ru)





## Производство альтернативных видов топлива из растительных отходов

**В.В. Лозовецкий,**

профессор МГУЛ, д.т.н.,

**А.А. Шадрин,**

профессор МГУЛ, д.т.н.,

**Ю.А. Маркова,**

аспирант МГУЛ,

**И.В. Статкевич,**

аспирант Российского государственного университета туризма и сервиса

Рассмотрена возможность производства альтернативных видов топлива из растительных отходов. Приведены основные физико-химические свойства данного вида отходов и некоторые технологии их переработки, что позволяет оценить перспективность и экономичность этого направления производства нового энергоносителя, который способен хотя бы частично заменить традиционные виды топлива. Показано, что одним из возможных исходных материалов для получения биотоплива являются древесные отходы. Технология их переработки представляет новое направление, перспективность которого для экологии, экономики и мирового климата сложно переоценить.

**Ключевые слова:** отходы, растительные отходы, климат, экология, биотопливо, древесные отходы.

## Production alternative fuels from plant waste

**V.V. Lozovetsky, A.A. Shadrin, Ju.A. Markova, I.V. Statkevich**

The possibility of production alternative fuels from plant waste was considered. The main physical and chemical properties of this type of waste were given and some of the technologies of their processing, which allow to evaluate the prospects and profitability of this line of production of a new energy source that is capable of at least partly to replace traditional fuels. It is shown that one possible source of materials for bio-fuels is wood waste, processing technology of which represents a new direction, which availability for the environment, economy and the global climate is difficult to overestimate.

**Keywords:** waste, vegetable waste, climate, ecology, bio-fuel, wood waste.

**В** связи с сокращением запасов ископаемого органического сырья в последние годы во всем мире уделяется серьезное внимание вопросам химической и биотехнологической переработки древесины. В отличие от ископаемых источников органического сырья запасы древесины возобновляются. По ориентировочным

оценкам мировые разведанные запасы нефти примерно равны запасам древесины на нашей планете, однако, ресурсы нефти быстро истощаются, в то время как в результате естественного прироста запасы древесины увеличиваются. Значительным резервом повышения ресурсов древесного сырья является увеличение выхода

целевых продуктов из древесины. В недалеком будущем нас ожидает переход от нефтехимического производства к биохимической и химической переработке древесины и других видов растительного сырья.

По данным Министерства природных ресурсов РФ в 2009 г. было вырублено всего 127 млн м<sup>3</sup> древесины (24 % от всей расчетной лесосеки). При заготовке древесины только в лесу остается 7,6 млн м<sup>3</sup> (6 %) древесных отходов.

Наряду с этим на предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) при переработке древесины образуется более 40 млн м<sup>3</sup> (33 %) древесных отходов, из которых используется от 10 до 40 %, в основном в виде топлива (сжигается для получения теплоты и пара для технологических нужд). Постоянно растущие цены на нефтепродукты и уголь способствуют поиску и дальнейшему развитию технологий утилизации древесных отходов. В зависимости от вида отходов можно применять различные технологии их использования. Из отходов ЛПК можно получать как твердое, так газообразное и жидкое биотопливо. А затем уже теплоту, электричество или моторное топливо.

С учетом широкой номенклатуры отходов древесного сырья и в зависимости от целей их классифицируют:

- по виду исходного сырья – сучья, обломки, тонкомер, горбыли, вырезки, карандаши и пр.;
- по породам – хвойные, лиственные;
- по стадийности обработки – первичные и вторичные;
- по влажности – сухие и влажные;
- по форме и размерам – кусковые и мягкие;
- по виду биомассы – древесина, кора, древесная зелень.

По месту образования подразделяют лесосечные отходы, лесоскладские и отходы цехов переработки. Среди лесосечных отходов выделяют отходы после заготовки ствола дерева (пни, корни, обломки стволов, откомлевки и козырьки, если раскряжевка

хлыстов ведется на лесосеке). Часто к ним относят и ту часть малоценной древесины, которая находится на лесосеке, но ее используют в технологических целях.

К лесоскладским в РФ относятся отходы поперечной и продольной распиловки заготовленной древесины (kozyрьки, откомлевки, горбыли, рейки, обрезки, оторцовки пиломатериалов, опилки, кора).

Отходы лесопереработки – это, в основном, смесь полимеров различных углеводов (преимущественно глюкоза) и полимеров фенолов (лигнин), соотношение которых варьируется у различных деревьев. Таким образом, задача делится на две подзадачи:

- превращение полимеров в мономеры – простые сахара;
- синтез из полученных сахаров с использованием различных микроорганизмов продуктов, наиболее востребованных рынком.

Существовавшие в XX в. технологии не решали комплексно проблему утилизации отходов лесопереработки, так как единственно доступным способом выделения простых сахаров из древесины был кислотный гидролиз, который создавал большие экологические проблемы, не устраненные до сих пор. Появление в 2000-х гг. в промышленных количествах новых высокоактивных ферментов, разлагающих полисахариды до простых сахаров, позволяет заменить кислотный гидролиз на ферментативный, но только в том случае, если сырье – древесные отходы – будет соответствующим образом подготовлено к такому гидролизу. Большинство технологий в этой области связано с переработкой мягких пород, лиственных пород дерева, предварительно подвергающихся паровому взрыву. Практически отсутствуют разработки в области утилизации отходов хвойных пород дерева, которые составляют львиную долю в отходах лесопереработки в России. Именно разработка технологии переработки отходов хвойной древесины позволит решить проблему утилизации техногенных отходов лесоперерабатывающей отрасли в целом.

Для реализации результатов НИР проводятся ОКР по разработке новых типов технологического оборудования, часть опытных образцов которых прошла тестирование на опытной установке в ОАО «ВСКБТ» в августе-сентябре 2008 г. Новые типы оборудования предполагается использовать на следующих стадиях технологического процесса:

- размол и активация древесины до размера частиц 1...5 мкм производительностью 1...1,5 т/ч;
- использование нового штамма гриба – продуцента комплекса ферментов для разных видов растительных отходов: лиственных пород дерева, хвойных, соломы;
- непрерывное сбраживание сахаров с периодическим удалением растворителей;
- непрерывное культивирование дрожжей на послебутанольной барде с использованием нового типа ферментера;
- очистка воздуха производственных помещений от паров растворителей на 95...98 % с применением биофильтров.

Проводимые в настоящее время исследования направлены на воссоздание гидролизной подотрасли промышленности на новом технологическом уровне, позволяющем организовать производство без жидких стоков, твердых отходов, газовоздушных выбросов пыли, снизить в 2-2,5 раза долю парникового газа  $\text{CO}_2$ , повысить эффективность переработки используемого сырья за счет практически полного перевода в растворимое состояние сахаров, содержащихся в древесине.

При получении этанола из древесины перед гидролизом древесину размельчают до стружек толщиной 3 мм, шириной 10...70 мм и длиной 25 мм.

Гидролиз идет в больших (до 50 м<sup>3</sup>) гидролизных аппаратах, которые наполняют стружкой, добавляют 0,5%-ный раствор  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и вводят пар с давлением 1...1,2 МПа. Варка идет 40...50 мин. Выход сахара 45...48 % от сухой массы древесины. Реакция среды полученного гидролизата

кислая (рН 1,8...2,2), поэтому гидролизат нейтрализуют известковым молоком, в котором содержится 1,1...1,2 кг/л извести. В гидролизате сравнительно мало азота и фосфора, поэтому предварительно к каждому кубическому метру гидролизата добавляют 0,3 кг суперфосфата и 0,15 кг сульфата аммония. При температуре 85 °С через гидролизат продувают воздух (рН 5...6). Гипс осаждают, а прозрачную часть гидролизата после охлаждения используют для сбраживания.

Спирт получают и из мелассы. Предварительная подготовка питательной среды очень проста – мелассу разбавляют с добавлением питательных солей. Для приготовления напитков используют спирт, полученный только из пищевого сырья, для технических нужд – полученный из гидролизатов древесины, сульфитного щелока.

Отечественная технология получения этанола из древесины создана на Кировском ООО «БиохимЗаводе» (КБХЗ). КБХЗ на сегодняшний день – единственное предприятие в отрасли, которое обладает технологией и производством биоэтанола из пищевого сырья. Биоэтанол – это обычный этанол, получаемый в процессе переработки растительного сырья для использования в качестве биотоплива.

В мире уже давно задумались над альтернативой для традиционного горючего: мировое производство биоэтанола в 2005 г. составило 36,3 млрд л, из которых 45 % пришлось на Бразилию и 44,7 % – на США. Этанол в Бразилии производится преимущественно из сахарного тростника, а в США – из кукурузы. В августе 2005 г. США приняли Энергетический Билль (Energy Policy Act of 2005) и Стандарт возобновляемых видов топлива (Renewable Fuels Standard). Они предусматривают к 2012 г. ежегодное производство 30 млрд л этанола из зерновых и 3,8 млрд л из целлюлозы (стебли кукурузы, рисовая солома, отходы лесной промышленности т.д.).

Прорыв КБХЗ заключается в том, что была разработана технология

производства биоэтанола из непищевого сырья, что особенно актуально в условиях мирового финансового кризиса и нехватки продовольствия. Заводом совместно с ведущими отраслевыми институтами разработана и внедрена промышленная установка по производству топливного этанола, а на его базе – три рецептуры смешанных высокооктановых бензинов. Один из них по своим физико-химическим характеристикам соответствует стандарту Евро-5 и аналогичен европейской топливной смеси марки E85 с октановым числом 98 ед. Второй – А95-БИО с октановым числом 95 ед. – в своем составе содержит 55 % топливного этанола, что по европейским стандартам относит его к категории альтернативного топлива, произведенного из непищевого сырья.

Основное сырье для производства биотоплива – это древесные отходы. В регионах, где ведется активная лесозаготовка, опил вредит экологии и наносит убытки бюджетам. Он гниет, загрязняя окружающую среду, препятствует восстановлению после вырубок лесной зоны. Применение этанола в качестве добавок к бензинам позволяет уменьшить до 32 % вредные выбросы в отработавших газах при сгорании автомобильного топлива, экономить нефть и газ, а также использовать отходы лесопереработки и продукции сельского хозяйства. Таким образом, КБХЗ решает важные проблемы, которые ставит перед собой все мировое сообщество. Поскольку производство биотоплива из непищевого сырья устраняет сразу несколько экологических проблем – загрязнение выхлопными газами городов и продуктами переработки отходов лесоперерабатывающего производства окружающей местности – следовательно, оно способствует снижению парникового эффекта.

Разработками КБХЗ сегодня интересуются не только российские ученые, промышленники и государственные институты, но и мировое сообщество. Ученые США и КБХЗ работают над проблемой увеличения выхода этанола с использованием термофильных бактерий –

## Методы термохимической переработки биомассы

Технология	Выход полезных продуктов (% сухой массы)		
	Жидкость	Уголь	Газ
Быстрый пиролиз: температура 450...600 °С время < 2 с	75	12	13
Медленный пиролиз: температура 500...700 °С время 5...30 мин	30	30	40
Газификация: температура >800 °С	5	10	85

компонентов третьего поколения. Промышленное использование этих бактерий ученые США планируют только к 2030 г., в то время как на Кировском заводе термофильные бактерии уже давно используются в процессе производства. КБХЗ имеет возможность для испытания и практического использования термофильных бактерий на промышленной площадке предприятия. Совместное сотрудничество ученых США и предприятия КБХЗ позволит получить не позднее 2013 г. биологические компоненты с большим коэффициентом конверсии из растительной биомассы

– смеси из высших спиртов и биологических углеводов.

Энергетическое использование нереализованного потенциала древесной биомассы уже сейчас позволяет заменить более 10 % внутреннего энергопотребления без нарушения баланса экосистемы. Однако прямое использование низкокачественной древесины в энергетических целях сдерживается рядом факторов, обусловленных, прежде всего, свойствами биомассы (нестабильная влажность и размеры, низкая плотность энерговыделения), что приводит к низкой эффективности транспортировки

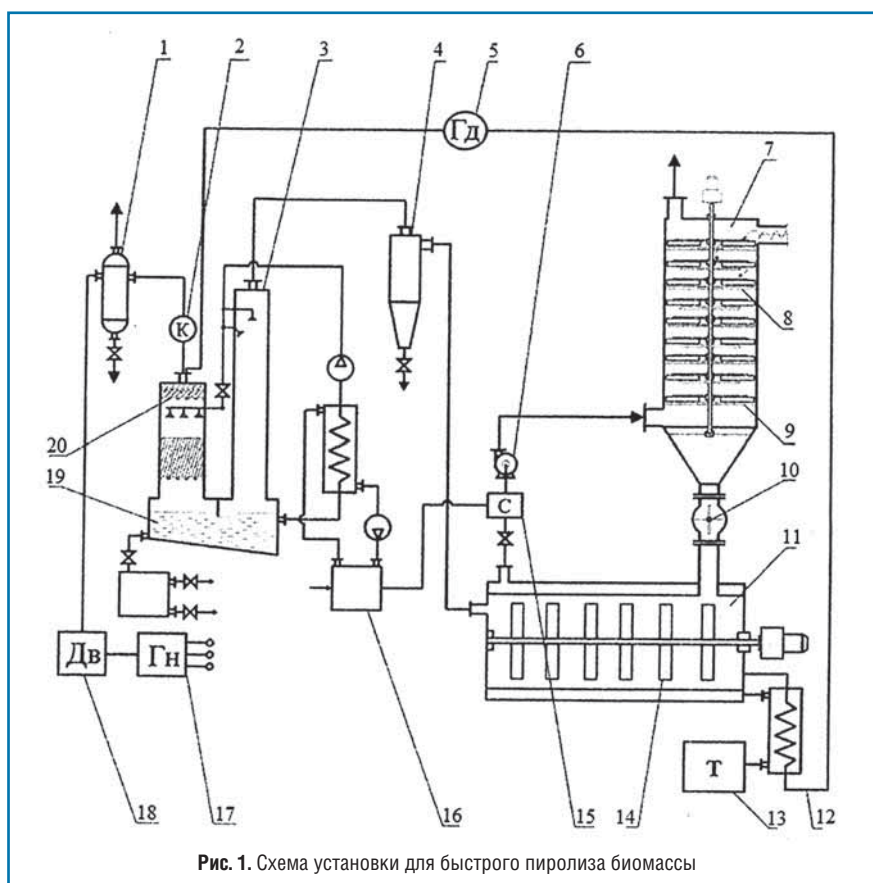


Рис. 1. Схема установки для быстрого пиролиза биомассы

топливной биомассы, необходимости сбора и концентрации данного ресурса и низкой технологичности сжигания биомассы.

Данные обстоятельства в большинстве случаев снижают экономическую эффективность энергетического использования биомассы, за исключением локального использования. Одним из решений данной проблемы является получение из древесной биомассы жидкого топлива методом пиролиза. Максимальный выход жидких продуктов наблюдается при использовании технологии быстрого пиролиза (таблица) [1].

Процесс быстрого пиролиза заключается в термическом разложении органических соединений биомассы в отсутствие окислителя при относительно низких температурах 450...550 °С, высокой скорости нагрева 500...1000 °С/с и незначительном времени пребывания продуктов в реакционном пространстве.

При быстром пиролизе из 100 кг древесины получается до 75 кг пиролизной жидкости и 10...15 кг древесного угля. Образующиеся газ и

уголь могут использоваться для энергообеспечения пиролиза и сушки древесины. Кроме того, уголь после соответствующей обработки может быть реализован как побочный коммерческий продукт.

Основными преимуществами жидких продуктов быстрого пиролиза биомассы при энергетическом использовании по сравнению с исходной биомассой являются их более высокая плотность энерговыделения, меньшие транспортные затраты, повышение технологичности, энергетического использования, возможность прямого сжигания в турбинах и тихоходных дизельных двигателях с генерацией электроэнергии, а также получение коммерческих продуктов для химического синтеза. Для реализации описанной технологии была разработана экспериментальная установка быстрого пиролиза биомассы древесины (рис. 1) [2].

Сырье в виде древесных частиц размером до 50 мм подается в бункер 5, откуда через питатель 6 поступает в реактор 7, где происходит быстрый абляционный пиролиз

сырья с образованием парогазовой смеси и угля. Частицы угля отделяются в циклоне 3. Выходящая из циклона парогазовая смесь подвергается конденсации в конденсаторе, состоящем из распылительной 2 и насадочной 11 колонн. Жидкие продукты собираются в приемной ванне 10. Неконденсируемые газы после отвода избыточной части компрессором 1 на генератор 9 для получения электроэнергии подаются с помощью газодувки 4 в реактор 7 для обеспечения конвективного тока и создания избыточного давления в системе. Тепловой энергией процесс обеспечивается с помощью топки 8, работающей на любом виде твердого топлива, в частности, на тех же отходах деревообрабатывающих предприятий. Топочные газы, прогревая реактор 7 через стенку рубашки, поступают в бункер 5 для сушки сырья.

В результате переработки сосновой щепы по описанной технологии на данной установке была получена партия продуктов быстрого абляционного пиролиза в виде горячего газа, мелкодисперсного древесного

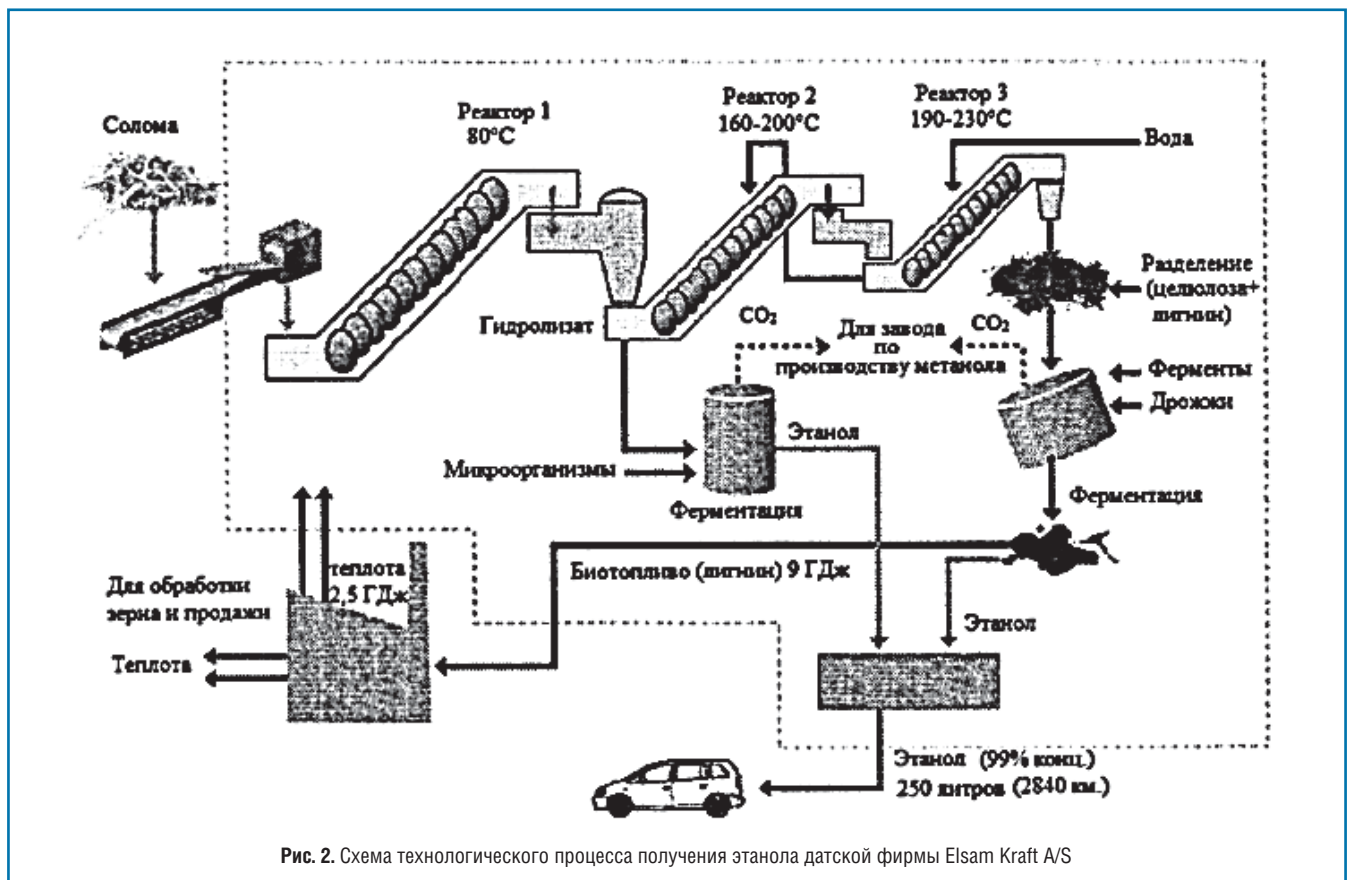


Рис. 2. Схема технологического процесса получения этанола датской фирмы Elsam Kraft A/S

угля и гомогенной жидкости – так называемой бионефти.

Анализ проведенных исследований позволяет сделать вывод о возможности энергетического использования бионефти путем ее сжигания в горелках распылительного типа при вышеперечисленных условиях. Однако для повышения эффективности энергетического использования бионефти и стабильной работы существующей технологической аппаратуры необходимы более глубокие исследования процессов горения и свойств бионефти.

Приведенные данные на технологической схеме (рис. 2) получения этанола из другого вида растительных отходов – соломы – свидетельствуют об эффективности и экологичности реализуемых процессов получения этанола. В частности из 1 т соломы может быть получено 250 л этанола, обеспечивающего пробег легкового автомобиля на расстояние 2840 км, произведено 2,5 ГДж теплоты и 0,5 ГДж электроэнергии. Образующийся в процессе производства этанола углекислый газ используется для производства метанола.

В последние годы в США, Канаде, Китае, странах ЕЭС и многих других приняты программы создания экологически чистого автомобильного транспорта, использующего водородное топливо. КБХЗ имеет реальную техническую возможность уже сегодня приступить к практическому использованию водорода в качестве моторного топлива, благодаря чему не только оздоровит экономическую обстановку, но и приблизит сроки более широкого освоения водородной энергетики. Внедрение водородного топлива позволит ускорить освоение самого энергетически чистого и эффективного энергоносителя.

КБХЗ активно ведет работу по созданию биометана на основе гидрирования углекислого газа, образующегося в процессе брожения дрожжей. Эта технология позволяет получить «зеленый газ», производство которого предусмотрено решением Евросоюза на уровне 5 % от мировой добычи природного газа.

Предприятие заключило договор со шведской фирмой Svenska Technoform АВ на совместное производство биометана из углекислого газа. Промышленное использование углекислого газа позволит уменьшить выбросы его в атмосферу и способствовать решению глобальной мировой проблемы парникового эффекта.

Основное сырье для производства биотоплива – это древесные отходы. Можно полагать, что нефть в ближайшее время останется основным источником получения энергии, хотя доля биотоплива в мировом энергетическом балансе будет возрастать. Рост значения биотопливной отрасли будет во многом связан с экологическими характеристиками ее продукции. Специалисты WEC (Всемирный энергетический совет) пришли к заключению, что использование биогорючего второго поколения, то есть полученного с помощью технологии преобразования биомассы в жидкость, и получение этанола из целлюлозы позволят снизить выбросы парниковых газов на 90 %.

Тема исследования возобновляемых источников сырья и биологического топлива находится среди приоритетов устойчивого развития и поддерживается правительствами многих развитых лесодобывающих и лесоперерабатывающих стран Европы [3].

В этом контексте повышение энергоэффективности и внедрение энергосберегающих технологий становятся первоочередными задачами для большинства национальных экономик. Данным процессам способствуют как рост цен на энергоносители, так и увеличивающийся объем выбросов парниковых газов, которые приводят к негативным последствиям, связанным с изменением климата и окружающей среды.

Сравнивать целесообразность использования природного газа и древесного топлива только по ценовому фактору не совсем корректно. Древесина является местным топливом, формирующаяся инфраструктура по его заготовке, транспортировке и хранению работает на благо государства.

Предприятия создают рабочие места, платят налоги, задействуют неэксплуатированное ранее сырье и отходы. Перевести эту пользу в денежный эквивалент довольно сложно. Ясно одно, что за этим направлением – будущее. Но поскольку использование современных видов древесного топлива охватывает сразу несколько отраслей, и для всех оно в равной степени новое, много жизненно важных процессов остается нерешенным.

Преимущества биотоплива второго поколения следующие:

- возможность подачи синтетического биотоплива напрямую в инфраструктуру существующих распределительных систем снабжения автотранспорта горючим;
- возобновляемость топлива;
- отсутствие  $\text{CO}_2$ , серы и ароматических углеводородов, в связи с чем даже в долго эксплуатировавшихся моторах не образуются отложения;
- более низкие (на 30...50 %) выбросы в атмосферу в сравнении с ископаемыми энергоносителями;
- более высокий, чем у солнечной и ветровой энергии, потенциал, так как растения «всегда под рукой»;
- возможность дальних перевозок и хранения, а также производства прямо на месте;
- высокая плотность энергии (40 МДж/л), сравнимая по качеству с синтетическим топливом из газа.

Конечно, основным преимуществом биотоплива второго поколения на современном этапе является то, что производится оно из непищевых продуктов, следовательно, не влияет на продовольственный рынок.

## Литература

1. Забелкин С.А., Тунцев Д.В., Грачев А.Н., Башкиров В.Н. Энергетическое использование жидких продуктов быстрого пиролиза древесины. //Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – 2010. – № 4 (73). – С. 79-84.
2. Грачев А.Н. Исследование быстрого пиролиза древесины в абляционном режиме. Известия Самарского научного центра РАН. – 2008. – Специальный выпуск. – С. 25-29.
3. Кожухов Н.И., Никишов В.Д., Федоренчик А.С., Ледницкий А.В. Биотопливо из древесного сырья. Изд-во МГУЛ, 2010. – 452 с.

## Комбинированная магнитокалорическая силовая установка на речных судах

**В.И. Карагузов,**  
профессор Омского государственного технического университета, д.т.н.

Магнитокалорические двигатели имеют высокий КПД и могут работать от малых перепадов температур между воздухом и водой. Эти свойства позволяют создать комбинированную силовую установку, которая способствует экономии топлива и снижению загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова:** комбинированная силовая установка, магнитокалорический двигатель, дизельный двигатель, речные суда.

## Combined magnetocaloric power-plant on river vessels

**V.I. Karagusov**

Magnetocaloric engines have high efficiency and can work from small differences of temperatures between air and water. These properties allow to create the combined power-plant which allows to save fuel and to pollute environment less.

**Keywords:** the combined power-plant, the magnetocaloric engine, the diesel engine, river vessels.

Перевозки речным транспортом являются одними из самых экономически выгодных, тем не менее доля затрат на топливо в судах достаточно высока и в условиях роста цен на органическое топливо постоянно увеличивается. Поэтому задача снижения расхода топлива остается актуальной. Кроме того, более низкое потребление топлива судами имеет еще одну положительную сторону – снижаются выбросы продуктов сгорания в атмосферу и нефтепродуктов в воду, что способствует уменьшению загрязнения окружающей среды. Большинство речных судов оснащено дизельными двигателями внутреннего сгорания, которые обладают рядом положительных качеств – экономичностью, надежностью, сравнительной простотой эксплуатации.

Современный уровень разработки магнитокалорических охладите-

лей позволяет создавать системы, работающие не только по обратному термодинамическому циклу (системы охлаждения), но и по прямому (тепловые двигатели). В магнитокалорических двигателях преобразование тепловой энергии в механическую работу происходит под действием магнитокалорического эффекта (колебание температуры магнитного рабочего тела при изменении внешнего магнитного поля или намагниченности магнитного рабочего тела).

Ранее автором рассматривался вопрос\* о возможности применения магнитокалорического двигателя внешнего сгорания на речных судах. Дальнейшее развитие этого направления позволило найти еще одно применение магнитокалорических двигателей на речных судах, которое имеет целый ряд преимуществ и привлекательных моментов. Следует

отметить, что эти преимущества проявляются не только на вновь построенных судах, но и при модернизации существующих.

Магнитокалорический двигатель обладает несколькими уникальными свойствами.

Во-первых, этот двигатель имеет внешние подвод и отвод теплоты, то есть совершенно безразлично, чем и каким образом нагреваются и охлаждаются теплообменники 2 и 3 (нумерация позиций приведена по рис. 1\*).

Во-вторых, этот двигатель работоспособен при любой (кроме нулевой или очень малой) разности температур между теплообменниками 2 и 3.

В-третьих, мы можем нагревать теплообменник 2, охлаждая при этом теплообменник 3, а можем и наоборот нагревать теплообменник 3, охлаждая при этом теплообменник 2.

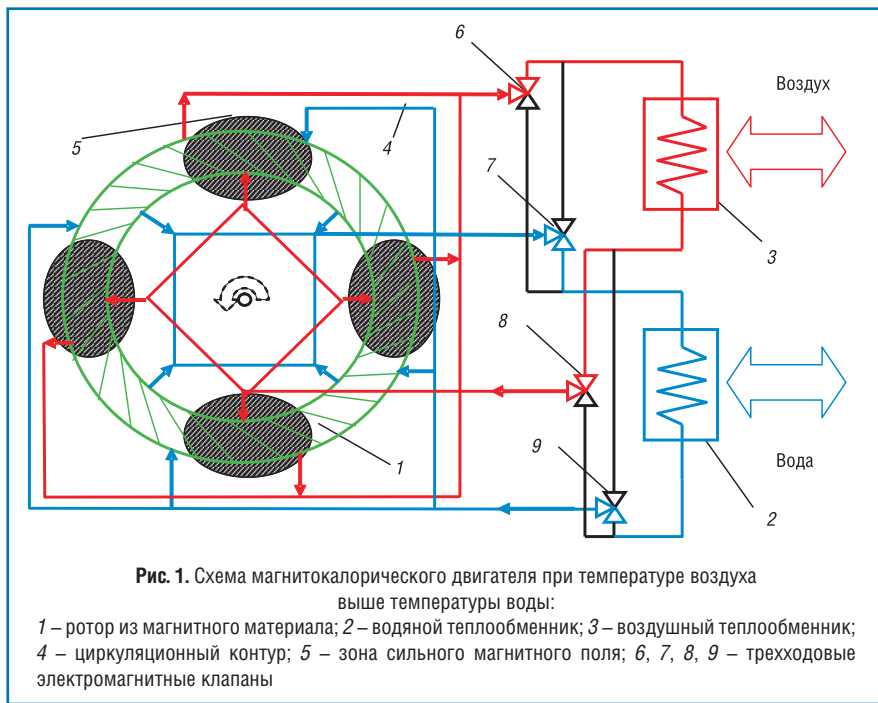
В-четвертых, при увеличении скорости судна интенсифицируется теплообмен как с водой, так и с воздухом, что увеличивает мощность магнитокалорического двигателя.

Из перечисленного можно сделать вывод, что магнитокалорический двигатель может работать от перепада температур между забортной водой и окружающим судно воздухом. Мощность его будет пропорциональна разности температур между водой и воздухом. При этом практически неважно, будет ли температура воздуха выше, чем воды, или наоборот.

С другой стороны, перечисленные преимущества магнитокалорического двигателя обуславливают существование некоторых недостатков. Действительно, не исключена ситуация, при которой температуры воздуха и воды равны или незначительно отличаются, что приведет к отсутствию подвода энергии к двигателю и его неработоспособности. Кроме того, мощность двигателя зависит от разности температур воды и воздуха.

Отсюда следует важный вывод: рассматриваемый магнитокалорический двигатель, работающий от перепада температур воздуха и воды, не может быть установлен на судно

\* **Карагузов В.И.** Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания на речных судах // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 2. – С. 38-41.



как единственный двигатель, а только в дополнение к двигателю внутреннего сгорания, например, дизельному, образуя таким образом комбинированную силовую установку.

Работает магнитокалорический двигатель следующим образом. При температуре воздуха выше температуры воды (рис. 1) трехходовые клапаны 6, 7, 8, 9 подключают воздушный теплообменник 3 в контур нагрева

(красные линии), а водяной теплообменник 2 – в контур охлаждения (синие линии). Прокачка теплоносителя осуществляется за счет геометрии каналов в рабочем колесе 1 и подводящих и отводящих линий циркуляционного контура 4. Для интенсификации теплообмена и упрощения запуска двигателя может быть использован циркуляционный насос (на схеме не показан).

В воздушном теплообменнике 3 теплоноситель нагревается от окружающего воздуха. На него же может подаваться воздух, нагретый от основного двигателя. Нагретый теплоноситель поступает в зону 5 ротора 1 из магнитного материала, которая находится в сильном магнитном поле. В результате нагрева в этой части ротора уменьшается намагниченность, и ротор 1 не взаимодействует с магнитным полем. Часть ротора 1 справа от зоны 5 холоднее части слева, поэтому ее магнитные свойства сильнее, и она будет сильнее притягиваться магнитным полем. В результате ротор 1 будет поворачиваться против часовой стрелки (по рис. 1). Вращение будет непрерывным, если часть ротора справа от зоны 5 всегда будет холоднее, чем часть ротора слева от зоны 5. Это реализуется при помощи теплообменника 2, который охлаждается забортной водой.

Если температура воздуха ниже температуры воды (рис. 2), трехходовые клапаны 6, 7, 8, 9 подключают воздушный теплообменник 3 в контур охлаждения (синие линии), а водяной теплообменник 2 – в контур нагрева (красные линии).

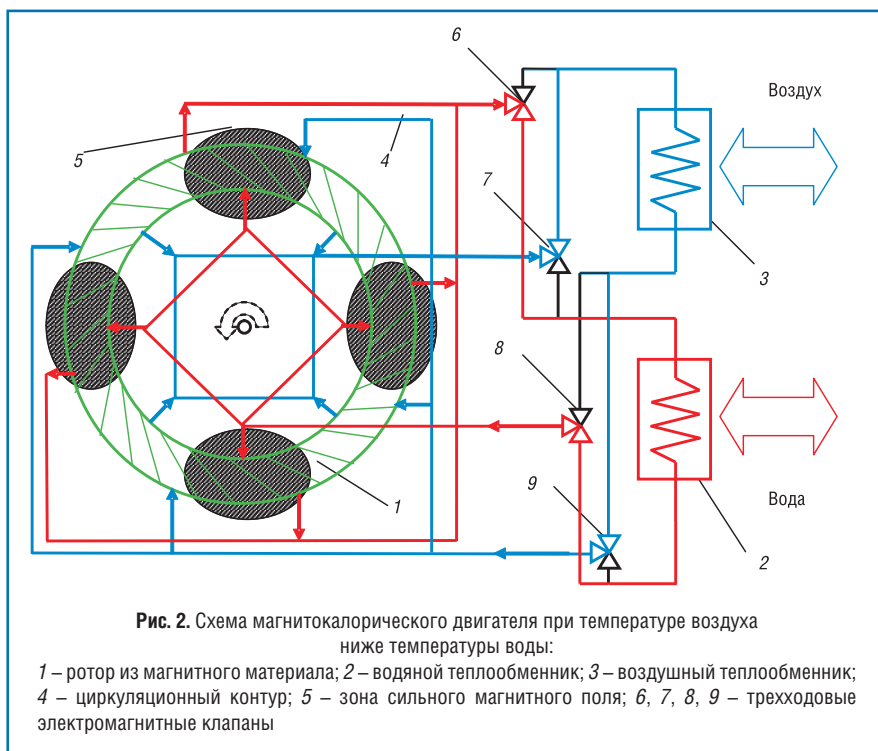
Рассмотрим, что дает судну такая комбинированная силовая установка.

При равных температурах воды и воздуха судно работает только на дизельном двигателе, при этом расход топлива не отличается от однотипных судов, оснащенных только дизельным двигателем.

При разности температур между водой и воздухом в 5...10° запускается магнитокалорический двигатель, причем его мощность зависит от этой разности температур. Следовательно, возможно уменьшение подачи топлива в дизельный двигатель, а значит и снижение его мощности на величину мощности, вырабатываемой магнитокалорическим двигателем.

Оценки показали, что в этом случае экономия топлива в зависимости от мощности магнитокалорического двигателя может составлять от 10 до 30 %, а в межсезонье и больше.

Таким образом, оснащение судов магнитокалорическим двигателем в дополнение к дизельному уменьшает расход топлива и загрязнение окружающей среды.





**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**



## Использование КПГ в Республике Саха (Якутия)

**В.В. Добрынин,**

первый заместитель председателя правления  
ОАО АКБ «Интрастбанк», к.э.н.,

**А.С. Измestьев,**

генеральный директор ООО «Сахаметан»,

**Р.Ю. Шипков,**

исполнительный директор ООО «Сахаметан»

В статье рассматривается опыт строительства и эксплуатации первой в Дальневосточном федеральном округе автомобильной газонаполнительной компрессорной станции в условиях Крайнего Севера, приводится анализ применения компримированного природного газа на различных предприятиях.

**Ключевые слова:** компримированный природный газ (КПГ), автомобильная газонаполнительная компрессорная станция (АГНКС), моторное топливо, транспорт, стоимость нефтяного и газомоторного топлива в г. Якутске, рост продаж КПГ, сталь 09Г2С, Микробокс.

## Use of compressed natural gas in the Republic of Sakha (Yakutia)

**V.V. Dobrynin, A.S. Izmestiev, R.Y. Shipkov**

The article is concerned with the experience of the construction and operation of the first in the Far Eastern federal district automotive compressor station in the Arctic conditions. Analysis of the compressed natural gas use in various enterprises.

**Keywords:** compressed natural gas (CNG), compressed natural gas fueling station, motor fuel, transport, oil and natural gas vehicle fuel cost in Yakutsk, increase of compressed natural gas sales, steel 09G2C, Microbox.



АГНКС-1

Республика Саха (Якутия), имея более 2,5 трлн м<sup>3</sup> разведанных запасов газа, достаточно разветвленную сеть газопроводов в Центральной Якутии и 84 газифицированных населенных пункта, по определенным причинам не вошла в утвержденную ОАО «Газпром» целевую комплексную программу «Развитие газозаправочной сети и парка техники, работающей на природном газе, на 2007-2015 годы».

Завоз нефтяного топлива в республику ежегодно требует значительных кредитных ресурсов для его закупки и хранения, что в конечном счете влияет на цену дизельного топлива и бензина. Налоги от производства завозного нефтяного топлива в основном выплачиваются на месте его производства. В то время как за газ рассчитываются с местными производителями газа, все налоги выплачиваются по месту, создаются новые рабочие места.

Потребность только бюджетных учреждений всех уровней, расположенных в г. Якутске, в 2010 г. составила 28,8 тыс. т нефтяного топлива на сумму около 1 млрд руб. Если перевести весь автотранспорт бюджетных учреждений г. Якутска на компримированный природный газ (КПГ), то только на разнице цены газа и нефтяного топлива можно сэкономить около 500 млн руб. (без учета стоимости оборудования).

Для использования природного газа в качестве моторного топлива и частичного замещения завозимых в республику нефтепродуктов в тех населенных пунктах, где имеется разветвленная система газоснабжения и достаточное количество автотранспорта, работающего на бензине и дизельном топливе, ООО «Сахаметан» совместно с ОАО «Интрастбанк» (г. Москва) разработало бизнес-план по строительству трех АГНКС в Якутске, двух в Мирном, а также в районных центрах Вилюйске, Покровске, Намцы, Майе и Ленске.

В настоящее время при финансовой поддержке ОАО «Интрастбанк»

построена и в мае 2007 г. запущена в эксплуатацию первая в Дальневосточном федеральном округе автомобильная газонаполнительная компрессорная станция в Якутске производства компании GNC «Галилео» из модельного ряда Микробокс (Микроскид). КПГ стоит 12 руб./м<sup>3</sup> по безналичному расчету и 10 руб./м<sup>3</sup> за наличный расчет, что в 2,1 раза дешевле бензина А-76 (80) и в 2,5 раза дешевле дизельного топлива. При пуске в эксплуатацию станции для привлечения потребителей цена на КПГ была установлена 8 руб./м<sup>3</sup>. Однако ежегодное повышение тарифов на газ и электроэнергию на 15-17 % вынудило поднять цену на КПГ в 2008 г. до 10 руб., а с 01.01.2009 г. – до 12 руб. В то же время для индивидуальных потребителей цена с 01.01.2009 г. держится на уровне 10 руб. (рис. 1).

Автовладельцев г. Якутска особенно привлекает то, что дизельные автомобили работают на КПГ как в газовом, так и в газодизельном режимах. Хорошо показали себя в процессе эксплуатации КАМАЗы, работающие в газодизельном режиме, и ЛИАЗы – в газовом.

За 3,5 года работы АГНКС более 340 ед. автотранспорта переведено на КПГ, и даже при практическом отсутствии на начальном этапе автомобилей, работающих на КПГ, в Якутске заправлено газом (рис. 2) более 70 тыс. автомобилей, при этом расход газа составил 3,43 млн м<sup>3</sup>, что равносильно 3,8 тыс. т нефтепродуктов. Экономия только от разницы цены газа и нефтяного топлива составила свыше 40 млн руб.

Мощность действующей АГНКС рассчитана на заправку до 1140 м<sup>3</sup>/ч или 27 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В настоящее время АГНКС ежедневно заправляет до 150 ед. автотранспорта объемом в 5,5-6 тыс. м<sup>3</sup> газа, что составило среднегодовую загруженность станции – 15,3 %. Объем реализации газа в 2010 г. достиг 1,467 млн м<sup>3</sup>, число газобаллонных автомобилей, заправляющихся на АГНКС, – 340 ед., расход газа на единицу автотранспорта – 4,687 м<sup>3</sup>.

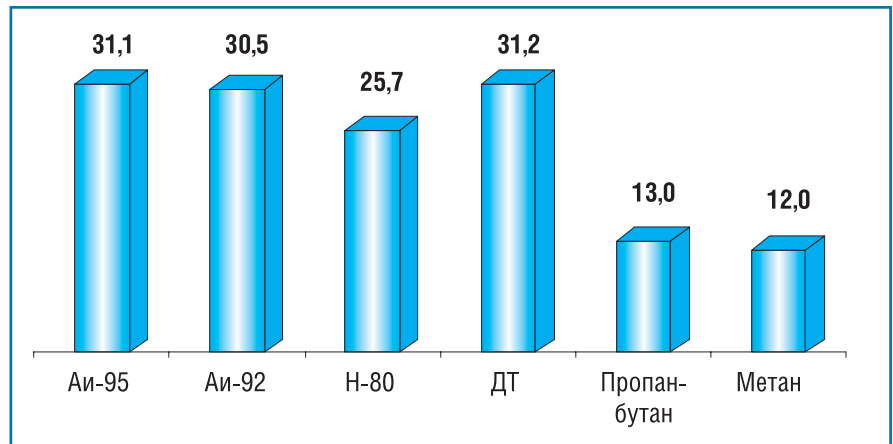


Рис. 1. Стоимость (руб.) жидкого нефтяного топлива на заправках ОАО «Саханефтегазсбыт» и газомоторного в г. Якутске на 31.12.2010 г.

Приведенные цифры показывают, что за 3,5 года эксплуатации станции при полном отсутствии на начальном эта-

Анализ рынка (рис. 3) свидетельствует о том, что этот сектор рынка рентабелен и постоянно растет.

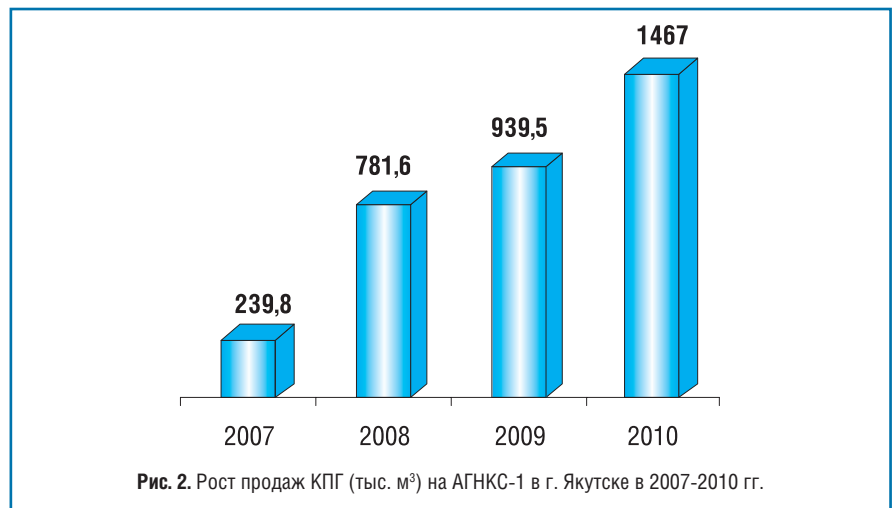


Рис. 2. Рост продаж КПГ (тыс. м<sup>3</sup>) на АГНКС-1 в г. Якутске в 2007-2010 гг.

пе работающих на КПГ автомобилей по отдельным показателям был достигнут среднероссийский уровень.

Окупаемость перевода автотранспорта на газ составляет от 2 мес. до 1 г. в зависимости от стоимости

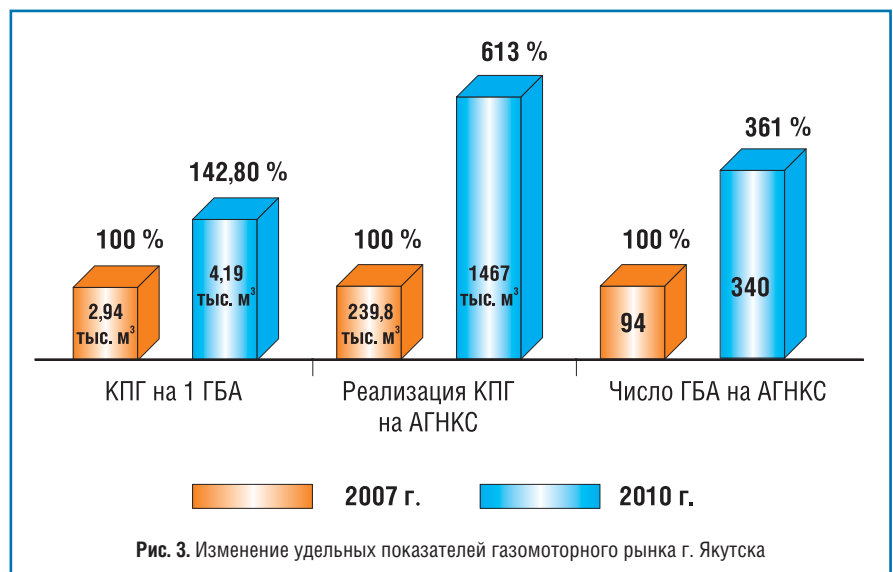


Рис. 3. Изменение удельных показателей газомоторного рынка г. Якутска



Технологический блок на АГНКС-1 Микробок

переоборудования и среднегодового пробега автомобиля.

В 2009 г. в рамках поддержки российского автопрома администрация г. Якутска в качестве софинансирования приобрела 16 автобусов марки ЛИАЗ-525657, работающих исключительно на сжатом природном газе. Применение КПГ на этих автобусах позволило исключить выброс сажи в атмосферу. Для сравнения, 16 дизельных автобусов аналогичной мощности за год эксплуатации выбрасывают с отработавшими газами почти 3 т сажи. Кроме того, эксплуатация этих автобусов даже при односменной работе позволила экономить до 600 тыс. руб./мес. только за счет разницы цены дизельного топлива и газа.

Эффективность и выгода очевидны. Их получили якутские автоперевозчики, значительно сэкономившие на топливе, и г. Якутск, получивший экологический эффект от применения КПГ на пассажироперевозках.

Предприятием ОАО «Энерготрансгаз», начиная с мая 2007 г., переведено на газ 33 ед. автотранспорта, ежемесячно заправляется

25 автомобилей. С начала эксплуатации сэкономлено более 5,4 млн руб. Руководство предприятия считает, что экономия от эксплуатации автомобилей на газе составляет 67% с учетом разницы цены нефтяного топлива и газа, увеличения срока межремонтного пробега в 1,5-2 раза, пробега до замены масла в 1,3-1,8 раза, продления срока эксплуатации свечей в 2 раза, а также в целом с учетом экономии газа за счет того, что его невозможно и незачем сливать.

МУП «Медавтотранс» за 2 года эксплуатации сэкономило около 1 млн руб., а Высшая школа музыки на девяти переведенных на газ машинах за 2,5 года – более 1,5 млн. руб. Жатайский судоремонтный завод использует КПГ для резки металла вместо пропана, что позволило производить работу при любых температурах. При этом учитывается и ценовой фактор.

В условиях бездорожья ООО «Сахаметан» перевело передвижные компрессорные станции ПКС-161161 на газодизельный режим с подключением их к магистральному газопроводу, что позволило без нарушения установленных сроков с огромной

экономией средств выполнить испытание вновь строящегося магистрального газопровода МГСВГКМ Мاستах-Берге-Якутск (III нитка).

При проектировании и строительстве АГНКС пришлось учитывать климатические особенности г. Якутска (проектная температура в зимний период  $-55^{\circ}\text{C}$ ), а также зачастую наличие в газе конденсата и частиц воды. Соответственно были заказаны резиновые изделия для работы при температуре  $-55^{\circ}\text{C}$ , уплотнительные манжеты из морозостойкой резины, а оборудование и трубопроводы, предназначенные для работы на открытом воздухе, из стали 09Г2С.

Для удобства эксплуатации и технического обслуживания было принято проектное решение о монтаже модуля Микробок, блока осушки и блока аккумуляторов в замкнутом утепленном помещении с воздушным отоплением в зимнее время. Однако воздушное (электрическое) отопление оказалось затратным и было заменено на обогрев помещения газовыми конвекторами. Заправочные колонки были утеплены изнутри, а фильтры обмотаны греющей лентой, что не позволило им замерзнуть.

Заправочные шланги аргентинского производства также не выдержали испытания якутскими морозами и были заменены на российские, произведенные компанией ЗАО ППП «Торас» (г. Санкт-Петербург).

Для предотвращения проброса масла и проскакивающих через блок осушки отдельных частиц воды и конденсата ООО «Сахаметан» планирует установить в ближайшее время на высокой стороне высокоэффективный сепаратор СГВ-7-80/320-30-Г производства ООО «НПО Вертекс» (г. Краснодар).

Планируемое в 2011 г. строительство второй АГНКС в г. Якутске должно повысить надежность заправки АТС. 3,5 года эксплуатации оборудования в условиях экстремально низких температур показало, что при определенной доработке оно вполне работоспособно, а применение природного газа на автотранспорте будет расширяться.

## Развитие газомоторного рынка в Республике Башкортостан

**Т.А. Бакиев,**  
начальник НТЦ ООО «Газпром трансгаз Уфа»

## The development of gas engine market in Republic of Bashkortostan

**T.A. Bakiev**

На территории Республики Башкортостан деятельностью по реализации компримированного природного газа (КПГ) в качестве моторного топлива занимается ООО «Газпром трансгаз Уфа», имея в своем составе 11 АГНКС, расположенных на автотранспортных магистралях федерального (М5 и М7) и республиканского значения. Данная сеть была построена в 80-е гг. прошлого столетия.

**З**амещение традиционных видов жидких моторных топлив природным газом всегда являлось актуальной задачей для Общества по экологическим и экономическим причинам. Однако в 90-х гг. прошлого столетия общеэкономическая обстановка в стране привела к существенному снижению загрузки АГНКС, которая упала почти до нулевой отметки. Общество несло большие убытки, так как на АГНКС заправлялось считанное число автомобилей.

Для исправления положения, учитывая социальную важность развития данного направления, руководство Общества с 2004 г. активно проводит последовательную политику, направленную на достижение рентабельности при эксплуатации АГНКС, обеспечение надежной и бесперебойной работы за счет повышения уровня технического состояния газонаполнительных станций.

Для дальнейшей эффективной работы АГНКС предприятием определена следующая стратегия:

- поддержание станций в технически работоспособном состоянии с

минимальными эксплуатационными затратами, что подразумевает отказ от услуг подрядных организаций по техническому обслуживанию и диагностике технологического оборудования с выполнением функций подрядчика соответствующими подразделениями инженерно-технического центра Общества;

- повышение рентабельности АГНКС за счет увеличения как пропускной способности действующих станций, так и числа переоборудованных автомобилей.

Для привлечения к переоборудованию автотранспорта частных лиц и предприятий Обществом проводятся широкомасштабные рекламные компании в СМИ, организовываются встречи с представителями автотранспортных предприятий и главами административных округов Республики Башкортостан. ООО «Газпром трансгаз Уфа» постоянно принимает участие в ежегодной международной выставке «Газ. Нефть. Технологии».

Очередная презентация предоставляемых услуг по переоборудо-

ванию автотранспорта и реализации КПГ прошла в г. Уфа 24-27 мая 2011 г.

Эффективность этих усилий подтверждается ростом потребления КПГ за счет сторонних потребителей, о чем наглядно свидетельствует динамика увеличения реализации. Так, в 2010 г. реализовано более 19,5 млн м<sup>3</sup> компримированного природного газа, что в 14 раз превышает показатели 2003 г. Сегодня ООО «Газпром трансгаз Уфа» единственное дочернее общество ОАО «Газпром», достигшее подобных результатов. Вместе с тем, руководство Общества понимает, что использование природного газа в нашем регионе сегодня незначительно, эффект от его применения в масштабах региональной экономики малозаметен, и останавливаться на достигнутых результатах еще рано.

В настоящее время Общество активно реализует мероприятия, позволяющие существенно повысить темпы роста парка газобаллонных автомобилей и расширить газозаправочную сеть. Так, в 2010 г. введен в эксплуатацию первый и единственный в Уфе пункт по техническому освидетельствованию баллонов.

В ближайшей перспективе за счет собственных средств Общества запланировано строительство четырех современных газонаполнительных компрессорных станций (две в Уфе, одна в Полянском ЛПУМГ и одна в Приютовском ЛПУМГ). Кроме того, с учетом значительного физического износа устаревшего оборудования для поддержания существующей сети АГНКС в работоспособном состоянии Общество планирует провести реконструкции четырех станций: АГНКС «Уфа-1» и «Стерлитамак-1» в 2012 г, «Уфа-2» в 2013 г. и «Стерлитамак-2» в 2014 г. Реализация указанных мероприятий позволит всерьез рассматривать в качестве стратегических партнеров муниципальный и сельскохозяйственный секторы.

Использование природного газа для автомобильного транспорта сельхозтоваропроизводителей становится как никогда актуальным. Так, в соответствии с требованиями нового технического регламента в 2011 г. прекратится производство бензина Нормаль-80, что повлечет за собой поиски альтернативных видов моторных топлив. В свою очередь Общество уже направило в адрес Министерства сельского хозяйства Республики Башкортостан информацию о структуре газозаправочной сети и преимуществах перевода автомобильного транспорта на газомоторное топливо.

Сегодня вопрос использования газобаллонной техники муниципальным транспортом остается открытым. Однако ООО «Газпром трансгаз Уфа» на своем примере показывает все преимущества использования данного вида транспорта. Так, в конце 2010 г. приобретены и успешно

эксплуатируются четыре газобаллонных автобуса марки «НефАЗ».

В рамках этих мероприятий Обществом ведется целенаправленная работа с правительством Республики Башкортостан, ориентированная на создание организационных основ стимулирования использования природного газа в качестве моторного топлива. Специалистами Общества разработан и представлен на рассмотрение в правительство Республики пакет следующих законодательных и программных документов:

- проект Закона об использовании природного газа в качестве газового моторного топлива в Республике Башкортостан;
- проект постановления Правительства Республики Башкортостан о расширении использования природного газа в качестве газового моторного топлива;
- проект соглашения между Республикой Башкортостан и ОАО

«Газпром» о расширении использования природного газа в качестве газового моторного топлива;

- проект программы по расширению использования природного газа в качестве газового моторного топлива в Республике Башкортостан.

В настоящее время организовано взаимодействие с органами государственной власти региона по созданию рабочей группы и сбору необходимой информации для дальнейшего согласования документов.

Принятие указанных документов является самым ожидаемым событием для всех заинтересованных участников, которыми являются не только предприятия, реализующие и использующие природный газ, но и жители городов и сел, для которых вопрос экологической чистоты среды их проживания занимает далеко не последнее место.



## 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)



## Устойчивость трактора РТМ-160 при работе в газодизельном цикле

**Б.П. Загородских,**

профессор Саратовского государственного аграрного университета, д.т.н.,

**Ю.А. Коцарь,**

профессор Саратовского государственного аграрного университета, д.т.н.,

**В.В. Володин,**

Саратовский государственный аграрный университет, к.т.н.,

**И.Д. Нигматулин,**

аспирант Саратовского государственного аграрного университета,

**И.М. Коростышевский,**

директор ООО «НТЦ «Авангард»

В статье приведены формулы и расчеты устойчивости трактора, работающего в газодизельном режиме, с установленным на нем газобаллонным оборудованием.

**Ключевые слова:** газодизель, система подачи газа в двигатель.

## Stability determination of RTM-160 tractor vehicle, converted to gas-diesel usage with a gas fuel

**B.P. Zagorodskiykh, Y.A. Kotsar, V.V. Volodin, I.D. Nigmatulin, I.M. Korostyshevsky**

The article contains formulas and a calculation of stability determination of a tractor vehicle with all appropriate gas-diesel equipment has mounted on.

**Keywords:** gas diesel, gas supply system to the engine.

Одним из направлений развития отечественного тракторостроения является применение альтернативных видов топлива, в том числе и сжатого природного газа (КПГ). На заседании комитета Государственной Думы по энергетике, посвященном развитию рынка природного газа на транспорте, принято решение рекомендовать Правительству Российской Федерации рассмотреть вопрос о стимулировании перевода первоочередных категорий транспорта, в том числе и сельскохозяйственной техники, на газомоторное топливо.

Обладая явными преимуществами в сравнении с другими видами топлива, природный газ имеет и существенный недостаток – необходимость использования специальных баллонов, в которых хранится газ под высоким давлением с целью увеличения длительности работы на одной заправке, так как теплотворная способность 1 м<sup>3</sup> газа соответствует 1 л дизельного топлива. Из этого вытекает следующая задача – размещение баллонов на тракторе без изменения его эксплуатационных качеств и, в первую очередь, продольной и поперечной устойчивости.

Для расчета устойчивости необходимо определить следующие параметры:

- объем газа для работы трактора в течение смены;
- марку и число баллонов;
- место расположения баллонов.

Объем газа, необходимого для работы трактора за смену  $G_{см}$ , определялся из условия расхода топлива за смену в дизельном режиме и процентного соотношения дизельного топлива и газа

$$G_{см} = N_e q_e k T,$$

где  $N_e$  – эксплуатационная мощность двигателя, кВт;  $q_e$  – удельный расход топлива, г/кВт;  $k$  – коэффициент использования мощности двигателя;  $T$  – продолжительность смены, ч.

Из условия 10-часовой рабочей смены и коэффициента загрузки двигателя  $k=0,85$  сменный расход дизельного топлива составляет 190 кг или 230 л.

Для сменной работы трактора в газодизельном режиме, сопоставимом с дизельным, с учетом того, что доля газа составляет  $\approx 75\%$ , сменный расход газа равен 172 м<sup>3</sup>.

На основании приведенных расчетов на трактор РТМ-160 на задней грузовой платформе трактора (рис 1, 2,) были установлены восемь цельнометаллических баллонов марки БТ-81-20-320/125 Орского машиностроительного завода объемом 80 л и рабочим давлением 20,0 МПа. Баллоны расположены вдоль и по краям грузовой платформы, что не снижает обзорность заднего механизма навески с рабочего места механизатора.

Для крепления баллонов на тракторе была изготовлена специальная кассета, представляющая собой сборную металлическую конструкцию из профиля квадратного сечения с ложементом специальной формы. Общая масса дополнительного оборудования, включающая массу

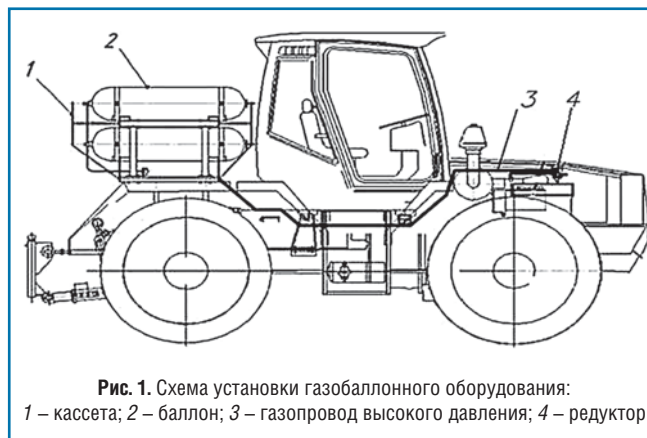


Рис. 1. Схема установки газобаллонного оборудования:

1 – кассета; 2 – баллон; 3 – газопровод высокого давления; 4 – редуктор



Рис. 2. Общий вид трактора



Рис. 4. Весы автомобильные подкладные «МЕРА-ВТП-10»

заправленных полностью баллонов и кассеты для их размещения, составляет 490 кг.

Основными параметрами устойчивости колесных тракторов являются: предельно статические углы подъема  $\alpha'_{lim}$ , уклона  $\alpha'_{lim}$  и поперечного уклона  $\beta_{lim}$ .

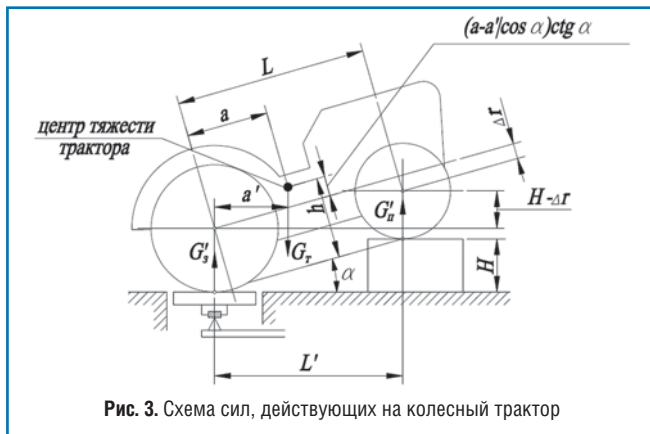


Рис. 3. Схема сил, действующих на колесный трактор

Для определения искомых параметров необходимо найти координаты центра тяжести трактора базовой комплектации и оснащенного газобаллонным оборудованием: вертикальную  $h$  и горизонтальную  $a$  (рис. 3). Координаты центра тяжести рассчитываются в соответствии с ГОСТ 12.2002 «Методика оценки безопасности».

Продольную координату центра тяжести определяют по следующему выражению

$$a = LG'_n / G_T$$

где  $L$  – продольная база трактора;  $G'_n$  – нормальная реакция на колесах переднего моста (при  $\alpha=0^\circ$ );  $G_T$  – вес трактора.

При определении нормальных реакций на колесах мостов трактора использовались тензометрические весовые платформы (рис. 4).

Вертикальную координату центра тяжести (см. рис. 3) рассчитывали по выражению

$$h = r_k + (a - a' / \cos \alpha) \operatorname{ctg} \alpha,$$

где  $r_k$  – радиус колеса заднего моста;  $a'$  – продольное расстояние от вектора веса трактора  $G_T$  до оси задних колес.

$$a' = L'(G'_n - G'_3) / G_T$$

где  $L'$  – продольное расстояние между центрами передних и задних колес;  $G'_n, G'_3$  – вертикальная реакция колес переднего и заднего моста на платформу весов при угле продольного подъема  $\alpha$  ( $\alpha=35^\circ$ ).

В результате исследований получены следующие значения координаты центра тяжести трактора с базовой комплектацией  $a$  и  $h$  и оснащенного газобаллонным оборудованием  $a_r$  и  $h_r$ :

$$a = 1656 \text{ мм}; a_r = 1462 \text{ мм};$$

$$h = 1362 \text{ мм}; h_r = 1462 \text{ мм}.$$

Параметры устойчивости (рис. 5) рассчитывали по следующим выражениям:

$$\operatorname{tg} \alpha_{lim} = a / h;$$

$$\operatorname{tg} \alpha'_{lim} = (L - a) / h;$$

$$\operatorname{tg} \beta_{lim} = 0,5B / h,$$

где  $B$  – ширина колеи трактора.

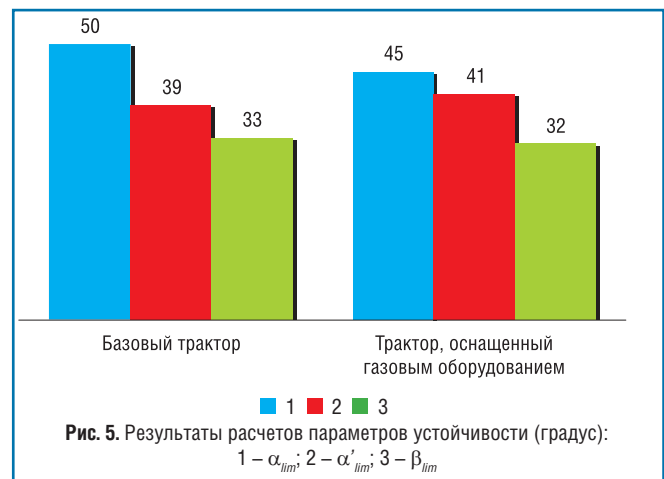


Рис. 5. Результаты расчетов параметров устойчивости (градус):  
1 –  $\alpha_{lim}$ ; 2 –  $\alpha'_{lim}$ ; 3 –  $\beta_{lim}$

Таким образом, увеличение вертикальной координаты центра тяжести на 100 мм и уменьшение ее горизонтального положения на 294 мм не привели к значительному изменению параметров устойчивости. Кроме этого, установка баллонов способствует более равномерному распределению нормальных реакций по ведущим мостам и повышению тягово-сцепных свойств трактора РТМ-160.

## Новости из-за рубежа

### News from abroad

#### ОАЭ:

##### Водное такси на метане

Власти эмирата Дубай (Объединенные Арабские Эмираты) всерьез задумываются над поисками энергоносителей, альтернативных нефти. Одним из них является природный газ. Чиновники рассматривают применение метана не только на автомобильном транспорте, но и на традиционных водных такси абра. Это деревянная моторная лодка на 20 пассажиров, которая является самым дешевым видом транспорта: стоимость поездки для одного пассажира составляет 1 дирхам ОАЭ (меньше 0,30 долл. США). В дубайской бухте Крик работают полторы сотни таких лодок, которые перевозят до 20 млн чел. в год.



Дубайская абра

Департамент по дорогам и транспорту Дубая (Dubai Roads and Transport Authority) проводит эксперимент по оснащению лодок абра метановыми двигателями. По предварительным расчетам переход на использование компримированного природного газа (КПГ) вместо дизельного топлива позволит сэкономить на топливе до 270 тыс. долл. США и сократить выбросы загрязняющих веществ на 66 % в год с каждого водного такси.

Транспортный департамент совместно с компанией Emarat Gas Co. переоборудовал для работы на КПГ три лодки. На них установлены газовые двигатели Volkswagen. Их преимущества над дизельными двигателями заключаются в том, что они безопаснее в эксплуатации с точки зрения пожара и взрывобезопасности, компактнее, тише, более экономичные, проще и не оставляют масляных следов на поверхности воды. Для заправки лодок абра на берегу установлена передвижная

газозаправочная станция. Чтобы заинтересовать первопроходцев-владельцев абра принять участие в эксперименте, им были вручены благодарственные сертификаты и премии в размере 5 450 долл. США.

Аналогичные намерения по метанизации водных такси выразили власти соседней Шарджи. Там речь идет уже о 200 лодках абра. По данным Информационного агентства Эмиратов, программа замены дизельных двигателей на газовые рассчитана на 10 лет. Опыт лодочников Дубая по переходу на использование КПГ может оказаться полезным для организации метанового водного такси на Универсиаде в Казани и Олимпиаде в Сочи.

Технологиям применения КПГ и СПГ на водном транспорте уделяется все больше внимания. На Балтике, в Персидском заливе, в Юго-Восточной Азии на метан переводят от легких пассажирских лодок до огромных океанских паромов. В России последние эксперименты в этой области были успешно проведены и... забыты еще во второй половине 90-х гг. прошлого века. А между тем российские судоходные реки имеют достаточно много АГНКС, которые могли бы стать источником КПГ и СПГ для бункеровки водных судов.

МЕТАИнфо

#### Франция:

##### Новая АГНКС для автобусов Страсбурга

Французская компания GNVert, принадлежащая группе GDF Suez, приступила к строительству АГНКС для метановых автобусов Страсбургской транспортной компании (Compagnie de Transports Strasbourgeois – CTS). Это будет уже третья АГНКС в компании CTS, где на КПГ работают 112 пассажирских автобусов. Компания GNVert является крупнейшим во Франции производителем и продавцом КПГ для автомобильного транспорта. Она уже построила 25 АГНКС для заправки тяжелой техники (автобусы и грузовики) и 110 АГНКС для легковых автомобилей. На станциях компании CTS ежедневно заправляются метаном более 2000 автобусов, 750 коммунальных машин, 40 тяжелых



Тотем АГНКС GNVert

грузовиков (с полезной нагрузкой 19 т и более) и 4 тыс. легковых автомобилей. Компания GNVert является «дочкой» французского энергетического гиганта GDF Suez, специализирующейся в области альтернативных видов топлива: КПГ, СПГ, биометан, метановодородные смеси и др.

Более половины городов Франции с населением 200 тыс. и более человек (Лиль, Нант, Париж, Тулуза) приняли решение о том, что большинство муниципальных автобусов должны использовать в качестве моторного топлива природный газ.

МЕТАИнфо

#### США: 650 метановых автобусов для Далласа

По данным компании Clean Energy Fuels Corp. (США), она получила заказ от муниципальной автобусной компании Далласа (Dallas Area Rapid Transit – DART) стоимостью 40 млн. долл. на строительство двух газозаправочных центров и двух центров технического обслуживания для маршрутных и инвалидных автобусов, работающих на КПГ. В ближайшие три года автобусная компания DART к уже имеющимся у нее автобусам на сжиженном природном газе закупает еще 452 маршрутных автобуса и 200 инвалидных микроавтобусов на КПГ. Компания Clean Energy Fuels Corp. ежедневно заправляет метаном 5 тыс. автобусов. Автобусы компании DART работают на 135 маршрутах. В 2010 г. она перевезла 38 млн пассажиров.

**Справка.** Инвалидный микроавтобус – это автобус особо малого класса с возможностью погрузки в него пассажиров в инвалидных креслах. В США они, как правило, работают по заказу клиентов и осуществляют перевозки по принципу «от двери до двери».

МЕТАИнфо



## Экономическая эффективность применения электропривода наземного транспортного средства

**В.И. Ерохов,**  
профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.,  
**А.В. Николаенко,**  
ректор МГТУ «МАМИ», к.э.н.

Проведена оценка технико-экономической целесообразности применения современного электромобиля нового поколения. Разработан метод оценки социально-экономического ущерба от выброса вредных веществ современной гибридной силовой установкой. Разработаны критерии оценки эффективности гибридного автомобиля на локальном и глобальном уровнях. Определены материальные и финансовые затраты на производство и эффективность эксплуатации электропривода. Приведены результаты экономической и экологической оценки эффективности электрического привода в полном жизненном цикле гибридной силовой установки.

**Ключевые слова:** эффективность электрического привода, нормирование вредных выбросов, агрессивность отработавших газов, гибридный автомобиль, жизненный цикл, парниковый эффект, диоксид углерода.

## Economic efficiency of application of an electric drive of a ground vehicle

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

The estimation of technical and economic expediency of application of a modern electromobile of new generation is lead. The method of an estimation of social and economic damage of emission of harmful substances of a modern hybrid power-plant is developed. Criteria of an estimation of efficiency of the hybrid car at a local and global level are developed. Material and financial expenses of manufacture and efficiency of operation of the electric drive are certain. Results of an economic and ecological estimation of efficiency of an electric drive in full life cycle of a hybrid power-plant are resulted.

**Keywords:** efficiency of an electric drive, normalization of harmful emissions, harm and aggression of the fulfilled gases, the hybrid car, life cycle, a hotbed effect, carbonic gas.

Применение моторного углеводородного топлива неизбежно сопровождается повышенными выбросами диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , характеризующими технический уровень современных наземных транспортных средств (НТС). Снижение выбросов  $\text{CO}_2$  традиционными методами не обеспечивает выполнение жестких экологических требований и является серьезной проблемой автомобилестроения.

Использование электропривода позволяет наиболее эффективно решить проблему повышения экологической безопасности НТС. Основным препятствием на пути широкого внедрения электропривода на автомобильном транспорте (АТ) является несовершенство традиционного источника электрической энергии и электронной системы его управления. Применяемые технологии проектирования электромобиля сопряжены с высокими материальными и финансовыми затратами.

Достигнутые результаты ведущих зарубежных фирм позволили решить концептуальные технические проблемы электрического привода. Наступил важный этап практической реализации электропривода, связанный с переходом от затратного метода финансирования к механизму, ориентированному на возвратные инвестиции.

Широкое внедрение электрического привода на АТ, имеющее стратегическое значение для современного индустриального общественного развития, сопряжено с повышенными затратами потребителя. Актуальной задачей на данном этапе является разработка метода оценки экономической и социально-экологической эффективности применения электропривода на автомобильном транспорте.

### Технико-экономическое обоснование применения современных электромобилей

Наиболее распространенным энергоносителем электромобилей являются традиционные свинцово-кислотные, никель-железные, никель-кадмиевые, серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторные батареи (АБ). По основным энергетическим характеристикам наиболее распространенные свинцово-кислотные АБ недостаточно эффективны и долговечны.

Запас хода электромобилей со свинцово-кислотными батареями минимальный. Применение никель-железных батарей сопровождается ростом запаса хода. В перспективе ожидается значительный рост запаса хода электромобилей с литий-серными АБ.

Традиционные электромобили имеют ряд принципиальных недостатков: малый запас хода, повышенную массу электропривода, ограниченный срок службы источника электроэнергии и высокую стоимость, которые сдерживают их применение в народном хозяйстве.

Наибольшую удельную энергоемкость имеют серебряно-цинковые батареи (88 Вт·ч/кг), но одновременно с этим они в 20 раз дороже свинцово-кислотных.

Положительный многолетний опыт эксплуатации электромобилей в Москве позволил сделать некоторые обобщения [1-6]. Опытная партия отечественных электромобилей выполнена на базе автомобиля УАЗ-451 ДМ. Электромобили У-131 снабжены системой электродвигателя на

переменном токе. Их грузоподъемность составляет 500 кг. На экспериментально-производственном предприятии при московском автокомбинате № 34 была организована опытная эксплуатация электроавтобуса РАФ-22038 и легкового автомобиля «Жигули» ВАЗ-2801.

Результаты работы позволили определить рациональную область применения электромобилей, эффективность перспективных технических решений и вопросы организации их эксплуатации в условиях мегаполиса. Обобщенные данные по легковым и грузовым электромобилям позволили определить их максимальный пробег в условиях города. Недостаточная продолжительность работы обычных АБ ограничена заложенными в их конструкцию активными веществами, после использования которых гальванические элементы выходят из строя. Традиционные АБ требуют зарядки от внешнего источника электроэнергии для восстановления запаса активных веществ.

Производительность грузового  $W_r$  (т · км) и легкого (автобус)  $W_a$  (пасс · км) автомобилей можно представить следующими зависимостями:

$$W_r = a_r L q;$$

$$W_a = a_a L q,$$

где  $a_r, a_a$  – постоянные коэффициенты пробега для грузового автомобиля и автобуса;  $L$  – запас хода, км;  $q$  – номинальная грузоподъемность, т (для грузового автомобиля), пасс. (для автобуса).

Размеры и массу аккумуляторной батареи определяют из условий обеспечения необходимого запаса хода и максимальной скорости движения электромобиля. Традиционный электромобиль оснащен аккумуляторной батареей с повышенной массой, снижающей его грузоподъемность в 1,5 раза по сравнению с ДВС.

Важной задачей является повышение энергоемкости батареи, предопределяющей запас хода электромобиля. Для электромобиля, эквивалентного по мощности современному автомобилю малого класса, в городских условиях эксплуатации достаточно иметь мощность электродвигателя 15 кВт. При такой мощности электродвигателя масса АБ не превышает 300 кг.

Расчеты Института комплексных транспортных проблем (ИКТП) показали, что для крупных городов требуется 100...120 тыс. грузовых электромобилей с расчетным дневным пробегом 65...70 км [5].

Электромобиль наиболее эффективен для перевозки грузов различного назначения небольшими партиями на сравнительно небольшие расстояния. В перспективе стоимость электромобилей должна возрасти не более чем на 25 % базовой комплектации. В шестидесятые годы прошлого века [5] была создана серия зарядных станций АБ. Ускоренную подзарядку проводили в местах погрузки или разгрузки, совмещая ее с технологическими операциями. Продолжительность подзарядки батареи не превышала 1 ч.

Запас хода электромобиля зависит от отношения массы батареи к полной массе электромобиля. Увеличение массы АБ при постоянной полной массе ведет к уменьшению грузоподъемности. Электромобиль легко управляется, его электродвигатель способен к кратковременным перегрузкам и имеет хорошую тяговую характеристику. Поэтому

гибридная установка может иметь менее мощный электродвигатель. К перспективным направлениям в вопросах развития электромобиля относится использование электродвигателя с автономным источником электрического тока. Основные усилия в области электрохимии направлены на совершенствование имеющихся в эксплуатации АБ и поиск эффективных и дешевых источников тока.

### Эффективность гибридной силовой установки (ГСУ)

Существующие комбинированные энергоустановки уступают перспективным установкам на топливных элементах. Схема гибридной установки повторяет схему традиционной силовой установки электромобиля, дополненной генератором с приводом от ДВС, работающим в зоне максимальной топливной экономичности. Электрический ток, вырабатываемый генератором, обеспечивает зарядку АБ и поступает в обмотки тягового электродвигателя.

Частота вращения ротора электродвигателя пропорциональна напряжению, определяющему скорость движения электромобиля. Скорость движения электромобиля регулируют изменением напряжения в обмотках электродвигателя.

Производительность ГСУ в значительной степени зависит от режимов движения в целом и отдельных его фаз.

- *Начало движения.* При трогании с места и движении на малых скоростях используется электродвигатель. В загородных условиях ДВС и электродвигатель работают одновременно. При необходимости генератор подзаряжает АБ за счет избыточной мощности двигателя.

- *Разгон.* АБ отдает энергию, дополняющую мощность ДВС, обеспечивая интенсивный разгон. Бензиновый ДВС при разгоне работает в нормальном режиме. Для улучшения динамики ГСУ дополнительная энергия поступает от электродвигателя. При работе в нормальном режиме бензиновый двигатель также снабжает энергией генератор. Характеристика крутящего момента электродвигателя является определяющей для разгона электромобиля, продолжительность которого достигает 45 % в общем балансе.

- *Движение.* При движении автомобиля в нормальном режиме привод колес осуществляется за счет бензинового двигателя и электромоторов. Энергия двигателя распределяется между колесами и электрическим генератором, приводящим в движение электромоторы. При необходимости генератор выполняет зарядку батареи, отдавая ему излишки энергии.

- *Торможение.* При торможении электромотор работает как генератор. Он преобразует кинетическую энергию в электрическую, накапливающуюся в батарее. Бензиновый ДВС автомобиля работает в обычном режиме. Делитель мощности в гибридной трансмиссии направляет необходимый поток мощности, обеспечивающей эффективный режим движения.

- *Остановка.* Эта фаза сопровождается автоматическим выключением ДВС, обеспечивая экономию топлива. В этом случае работают только электродвигатели. Основой устройства распределения энергии является компактный

**Сравнение параметров НТС с различными источниками энергии**

Тип автомобиля	Полная масса, кг	Максимальная скорость, км/ч	Запас хода, км
Автомобиль с бензиновым двигателем	815	110	400
Электромобиль на свинцовых батареях	1145	80	160
на топливных элементах	875	80	240

механизм планетарной передачи, управляющий взаимодействием бензинового ДВС, электромотора и генератора [3].

Мощная батарея обеспечивает энергией электрические системы электромобиля. Гибридная силовая установка использует в своей работе высокопроизводительную никель-гидридную АБ. Генератор и электродвигатель являются устройствами переменного тока, а АБ – постоянного тока. Выходное напряжение АБ трансформируется в выходное напряжение генератора. При торможении генератор используется для замедления движения автомобиля. Он вырабатывает электроэнергию, которая хранится в АБ.

Инвертор представляет собой устройство, преобразующее постоянный ток от АБ в трехфазное переменное напряжение с изменяемой частотой. При запуске электромобиль начинает работать от своего электродвигателя при достаточной зарядки АБ. Чтобы привести в движение автомобиль с использованием электроэнергии, двигатель сначала запускается от генератора, и одновременно система рассчитывает энергию, необходимую для всего автомобиля. На малых скоростях большее количество энергии поступает от электромоторов.

Энергетическая установка на топливном химическом элементе (ТХЭ) позволяет получать электрическую энергию из ТХЭ, минуя стадия сгорания. ТХЭ работает без остановок длительное время и позволяет коренным образом повысить технический уровень современного электромобиля. Предпочтение отдают топливным элементам на водородном топливе.

Напряжение 200 В трансформируется в напряжение 380 В. Пластина ТХЭ площадью 1 м<sup>2</sup>, содержащая 40 г платины, способна вырабатывать 5 кВт электроэнергии. Использование электрохимического генератора (ЭХГ) позволяет получить КПД до 90...95 % по электроэнергии (табл. 1).

Пробег электромобиля по городскому циклу при глубине разряда литий-ионных и литий-полимерных батарей 70 % составляет 145 км [4]. Максимальная скорость – 130 км/ч. Время разгона до 100 км/ч достигает 13,2 с. Средний пробег между зарядками составляет 130...140 км при 70%-ной глубине циклирования. Суммарный пробег автомобиля на одном комплекте АБ насчитывает 200 тыс. км. Масса АБ с системой обслуживания для автомобиля массой 1300 кг составляет 300 кг. Номинальная мощность литий-ионной АБ достигает 100 А·ч при номинальном напряжении 270 В, срок службы – 1000 циклов (не менее 5 лет).

### Жизненный цикл гибридного автомобиля

Жизненный цикл гибридного автомобиля закладывается на стадии конструирования, обеспечивается технологией и поддерживается в эксплуатации. Инвестиционная

привлекательность сдерживается высокими начальными затратами в жизненном цикле гибридного автомобиля.

Суммарные затраты  $C_{\Sigma}$  инвестиционного проекта гибридного автомобиля определяются по следующей формуле

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma_{\text{эз}}} + M_{\Sigma_{\text{эу}}} + C_{\Sigma_{\text{нар}}}$$

где  $C_{\Sigma_{\text{эз}}}$  – суммарные приведенные затраты изготовления и эксплуатации электрического привода, руб/кВт·ч;  $M_{\Sigma_{\text{эу}}}$  – суммарный ущерб социально-экономической среде от выбросов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , руб/кВт·ч;  $C_{\Sigma_{\text{нар}}}$  – суммарный ущерб от выбросов парниковых газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$ , руб/кВт·ч.

Для продвижения проекта создания ГСУ нужны экономические методы оценки затратного и возвратного механизмов финансовых вложений. Создание опытных образцов гибридных автомобилей носит преимущественно поисковый инициативный характер. Стоимость созданной продукции может быть оценена по фактическим затратам (издержкам). Экономические оценки результатов различных фирм существенно отличаются.

Капитальные вложения в реализацию проекта определяются в соответствии с технологическими принципами проектирования гибридной установки. Они включают традиционные затраты на строительные-монтажные работы, закупку компонентов ГСУ и технологического оборудования, установку и его наладку. Структура и содержание статей затратного механизма не вызывают сомнения.

Модель определения экономической эффективности проекта ГСУ включает капитальные вложения, годовой пробег автомобиля, трудоемкость, удельные затраты и себестоимость работ. Срок окупаемости капитальных вложений по существующим методикам необходимо рассчитывать с учетом национальных и глобальных особенностей развития экономики.

Для предприятий, располагающих научным потенциалом, но при отсутствии материально-технической базы для создания опытных образцов и промышленных партий, удобна лизинговая форма или система льготного кредитования. Суммарные инвестиционные затраты проекта создания гибридного автомобиля представлены зависимостью

$$C_{\text{из}} = (K_0 + \Delta K_d) + (C_0 + \Delta C_d),$$

где  $K_0$  и  $\Delta K_d$  – основные и дополнительные капитальные вложения;  $C_0$  и  $\Delta C_d$  – основные и дополнительные эксплуатационные расходы, связанные со снижением ущерба, наносимого окружающей среде.

Дополнительные капитальные вложения ( $\Delta K_d$ ) и эксплуатационные расходы ( $\Delta C_d$ ) по абсолютной величине могут быть выше показателей базовой модели.

Минимальные приведенные затраты, учитывающие текущие расходы в сфере эксплуатации транспорта, и капитальные вложения на создание эффективных

транспортных коммуникаций, представлены зависимостью

$$C_{\text{пз}} = (C_{\text{т}} + E_{\text{н}} K_{\text{к}}),$$

где  $C_{\text{т}}$  – текущие эксплуатационные затраты;  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  $K_{\text{к}}$  – капитальные затраты на создание ГСУ.

Экономическая эффективность перевода автомобилей на ГСУ позволяет оценить затраты на приобретение компонентов ГСУ, суммарные эксплуатационные затраты, экономию и затраты на топливо, срок окупаемости всех затрат от внедрения ГСУ, срок окупаемости затрат на переоборудование, суммарные затраты на переоборудование базовых автомобилей.

Экономический анализ создания ГСУ учитывает основное ее преимущество, связанное с экологической безопасностью. Продвижение проекта ГСУ включает финансовые затраты на приобретение новых автомобилей, дополнительные вложения на подготовку предприятия к использованию ГСУ, увеличение затрат на техобслуживание и текущий ремонт, инвестиции в создание зарядной станции. Экологические фонды располагают достаточными ресурсами для решения проблем ГСУ.

Возвратный механизм вложенных средств базируется на снижении расхода топлива и текущих издержек при эксплуатации ГСУ. Окупаемость проекта по этим статьям займет многие годы. Получение кредитных средств на приобретение ГСУ в условиях низкой рентабельности проекта и кредитоспособности предприятия также проблематично.

Улучшение качества окружающей среды носит общечеловеческий характер. В центральной части крупных городов продолжительность жизни сокращается на 10 лет. Экологический аудит вложенных средств является надежным инструментом целевого расходования финансовых средств. Потребитель не заинтересован в приобретении ГСУ, существенно превышающей стоимость базового автомобиля. Государство берет на себя часть финансовых затрат в виде компенсации и предоставления владельцу ряда дополнительных льгот. Возвратный механизм включает возврат средств путем компенсации затрат со стороны государственных органов. Цена ГСУ не должна превышать 25 % цены автомобиля базовой модификации.

Инвестиционная привлекательность создания гибридных установок при существующих методах оценки эффективности для бизнеса не представляет практического интереса. Привлечение бюджетных средств для внедрения ГСУ обеспечивает перевод НТС на экономически чистое топливо. Развитие проекта требует поддержки со стороны муниципальных властей.

Система поддержки создания парка автомобилей с ГСУ должна предусматривать обеспечение заказами на выполнение транспортных услуг такими автомобилями. И в этом большая роль отводится городским властям, которые могут способствовать повышению объема транспортной работы и коэффициента использования этого парка. Важным этапом является предоставление льгот на налоговые платежи в период реализации проекта ГСУ.

Одной из форм инвестирования проекта внедрения ГСУ на данном этапе может стать система лизинга

предприятий с государственной собственностью. Это позволит решить важную задачу национальной экономики без значительных капитальных затрат. Лизинговая форма дает возможность решить многие вопросы налогообложения на государственном и муниципальном уровнях.

При технико-экономическом обосновании различных этапов создания ГСУ необходимо учитывать отечественный и зарубежный опыт применения электропривода НТС. Стоимость современного топливного элемента в 20 раз выше свинцово-кислотных батарей. Пористые электроды с высокоразвитой поверхностью (до 100 м<sup>2</sup>/г) позволяют снизить плотность тока и поляризацию электродов. Катализаторы, обеспечивающие ускорение химических реакций в ТХЭ, используют платину, палладий, никель и некоторые полупроводниковые материалы в достаточно больших объемах. Для создания эффективных топливных элементов (ТЭ) необходимо резко сократить или полностью исключить применение драгоценных металлов, а также повысить удельную мощность ЭХГ. Целесообразно использовать наиболее перспективный твердооксидный ТЭ. В качестве источника энергии ТХЭ можно использовать любое органическое топливо. Разработанная технология получения и хранения водорода и окислителя на борту электроавтомобиля может быть ориентирована на конверсию метанола.

Готовые к широкому применению водород-кислородные элементы ориентированы на использование твердых полимерных электролитов. Серьезным препятствием на пути широкого распространения ТЭ является также сравнительно высокая цена получаемой с их помощью электроэнергии – 3...8 тыс. долл. США/кВт.

В Японии специалисты считают, что широкому проникновению на рынок ТХЭ препятствуют высокая стоимость и необходимость их замены через пять лет. В перспективе стоимость компонента ТХЭ может составить 0,02 долл. США/кВт·ч. Наиболее перспективным источником энергии на АТ является электрохимический генератор, содержащий твердооксидные и твердополимерные ТЭ. Щелочные ТЭ, созданные на Новоуральском электрохимическом комбинате, имеют определенную перспективу на автотранспорте.

В Институте катализа им. Г.К. Борескова СО АН СССР изучена возможность использования металлов платиновой группы (палладия, платины и др.) для получения водорода. Создан ряд катализаторов для получения водорода из метана с последующей его очисткой с помощью мембран. Институт электрофизики и Институт высокотемпературной электрохимии Уральского научного центра АН СССР разработали методы получения нанопорошков и нанокерамики путем магнитного прессования. Уральский электрохимический комбинат в 1971 г. разработал электрохимический генератор «Волна» (мощность 1,2 кВт) на щелочном ТЭ для отечественной лунной программы.

Полезным является обобщение отечественного опыта по созданию ТХЭ. В 1982 г. НПО «Квант» впервые снабдил автомобиль «РАФ» водородным щелочным топливным элементом. В 2001-2003 гг. Уральский электрохимический комбинат, РКК «Энергия» и «АвтоВАЗ» на автосалонах в Москве демонстрировали автомобиль «Лада» с электродвигателем

и электрохимическим генератором «Фотон». В системе питания использовали хранящийся в баллонах водород. На одной заправке эти автомобили могут проехать 300 км.

Проникновение ТЭ на рынок сдерживается высокой себестоимостью электроэнергии и малым ресурсом. Наибольший ресурс отмечен у твердополимерных ТЭ – 2...5 тыс. ч работы. Требуемый же срок службы составляет 20...30 тыс. ч.

Потребности АТ в электрохимических генераторах на топливных элементах (мощность 15...100 кВт) составляют 500 тыс. в год. Стоимость одного такого генератора – более 3 тыс. долл. США.

Самое большое воздействие на окружающую среду оказывает транспорт, нанося значительный экономический и социальный ущерб. Наибольшее распространение получила методика оценки валовых выбросов. Эколого-экономический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха определяется по обобщенной зависимости

$$M_{\text{зв}} = \gamma \sigma f M_{\text{вв}}$$

где  $\gamma = 40$  руб./усл. т – нормирующая константа, переводящая уровень загрязнения территории в денежный эквивалент при оценке годовых выбросов ВВ;  $\sigma$  – показатель относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха в зависимости от типа территории ( $\sigma=46,67$  для различных территорий в 2005 г.,  $\sigma = 8$  для жилых районов города с высотной застройкой, включая улицы, магистрали и парки,  $\sigma=4$  для территорий промышленных предприятий);  $f=12$  – коэффициент, учитывающий характер рассеивания примеси в атмосфере;  $M_{\text{вв}}$  – приведенная к СО масса ВВ годового выброса от источника (с учетом относительной агрессивности), усл. т/год [1].

Приведенная масса годового выброса ВВ системных источников может быть определена по формуле

$$M_{\text{вв}} = \sum A_i m_i,$$

где  $A_i$  – показатель относительной агрессивности (относительно оксида углерода) различных примесей, поступающих в атмосферу, усл. т/т выброса;  $m_i$  – масса годового

Таблица 2

**Агрессивность вредных веществ при различных ПДК**

Компонент ОГ	Относительная среднесуточная агрессивность ВВ, усл. т/т
Оксид углерода СО	1
Углеводороды $C_m H_n$	2
Оксиды азота $NO_x$	–
Диоксид азота $NO_2$	35,29
Двуокись серы $SO_2$	60
Сероводород $H_2S$	375
Сажа С	60
Бензапирен $C_{20}H_{12}$	3 000 000
Акролеин $CH_2=CHCHO$	100
Формальдегид $H_2CO$	250
Соединения свинца $PbO_x$ (в пересчете на Pb)	4285,71
ТЧ (дизелей)	200

выброса  $i$ -го ВВ транспортным средством, т/год;  $n$  – общее число ВВ, поступающих в атмосферу.

Относительная агрессивность  $i$ -го компонента по отношению к СО определяется как отношение ПДК<sub>СО</sub> к ПДК <sub>$i$</sub>  для основных компонентов (табл. 2).

Показатель относительной агрессивности учитывает относительную опасность присутствия примеси в воздухе. Массу годового выброса  $i$ -го вредного вещества  $m_i$  можно найти по зависимости

$$m_i = \frac{H}{1000} \sum_{k=1}^k a_k m_{ik},$$

где  $H$  – годовая наработка автомобиля, км;  $m_{ik}$  – выброс  $i$ -го вредного компонента на  $k$ -м режиме, г/км;  $a_k$  – коэффициент, учитывающий продолжительность работы НТС на  $k$ -м нагрузочном режиме;  $k$  – число учитываемых нагрузочных режимов.

Зная объем отработавших газов и определяя концентрацию  $i$ -го компонента на каждом режиме, можно найти  $m_{ik}$ . Значения показателя относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха над различными территориями изменяются в диапазоне 1...300.

Величина суммарного базового выброса ВВ выбрана постоянной и соответствует среднесуточной ПДК СО (мг/м<sup>3</sup>) населенных пунктов. Сравнивая эту величину с санитарными нормами можно составить уравнение

$$A_i = g_i m_{OG} T_{OG CO},$$

где  $g_i$  – плотность  $i$ -го компонента;  $m_{OG}$  – масса ОГ;  $T_{OG CO}$  – относительная среднесуточная вредность компонента ОГ.

В ОГ ДВС при работе на метане наряду с традиционными ВВ ( $NO_x$ , СО, СН и твердые частицы) присутствуют парниковые газы ( $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $N_2O$ ). Если  $CO_2$  оказывает только парниковый эффект, то  $CH_4$  и  $N_2O$  дополнительно и вредное воздействие.

### Парниковый эффект

Разработанный метод позволяет оценивать ущерб от традиционных нормируемых компонентов ОГ, включая парниковые газы  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $N_2O$ . Существуют две модели оценки ущерба: «FUND IVM» (г. Амстердам) и «Open Framework» (Оксфорд). В качестве единицы измерения используется выброс 1 т  $CO_2$ . Результат расчетов показывает потенциал, выраженный в эквивалентном выбросе  $CO_2$ . Ущерб от глобального потепления можно определить за зависимостью

$$Y_{\text{пз}} = \gamma_{CO_2} \sum F_{\text{пар } i} m_i,$$

где  $Y_{\text{пз}}$  – парниковый эффект от выброса 1 т  $CO_2$ , рекомендуемое к использованию значение составляет 32 евро/т  $CO_2$ ;  $\gamma_{CO_2}$  – коэффициент приведения компонентов к  $CO_2$ ;  $F_{\text{пар } i}$  – потенциал изменения климата от выбросов  $i$ -го газа;  $m_i$  – масса выброса загрязнителя, кг;  $n$  – число ВВ, обладающих парниковым эффектом.

Плату за нормативные и сверхнормативные выбросы ВВ перечисляют в экологические фонды. Расчет экологических затрат, содержащих ориентировочную прогнозную стоимостную оценку риска, является определяющим при экологическом страховании. Выбросы парниковых газов

ДВС можно представить в виде суммы выбросов ВВ, приведенных к эквивалентному выбросу CO<sub>2</sub>:

$$M_{\text{пг}} = M_{\text{ог}} \gamma_{\text{ог}} + M_{\text{кг}} \gamma_{\text{кг}} + T_{\text{ти}} \gamma_{\text{ти}},$$

где  $M_{\text{пг}}$  – эквивалентный выброс парниковых газов;  $M_{\text{ог}}$  – суммарные выбросы ВВ, приведенные к CO<sub>2</sub>;  $M_{\text{кг}}$  – выбросы картерных газов;  $T_{\text{ти}}$  – топливные испарения;  $\gamma_{\text{ог}}, \gamma_{\text{кг}}, \gamma_{\text{ти}}$  – коэффициенты приведения компонентов к CO<sub>2</sub>.

Склонность ОГ к формированию парникового эффекта – условный показатель для сравнительной оценки вредных выбросов. В качестве единицы измерения используют выброс 1 т CO<sub>2</sub>, принимаемый для расчета парникового эффекта. В атмосферу, кроме CO<sub>2</sub>, выбрасываются также N<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub>. Потенциал ОГ НТС к возникновению парникового эффекта можно рассчитать по зависимости [7]

$$I_{\text{пар}} = m_{\text{CO}_2} + 320m_{\text{N}_2\text{O}} + 25m_{\text{CH}_4},$$

где  $m_{\text{CO}_2}, m_{\text{N}_2\text{O}}, m_{\text{CH}_4}$  – выбросы ВВ, т; числовые значения (1, 320 и 25) характеризуют относительную опасность выбрасываемых ВВ.

Результаты расчетов показывает потенциал, выраженный в эквивалентном выбросе CO<sub>2</sub>. Метан, имеющий значительный потенциал парникового эффекта, превышает в 25 раз CO<sub>2</sub>. Влияние CO<sub>2</sub> на парниковый эффект выражается в способности поглощать инфракрасные лучи, испускаемые поверхностью Земли.

Фактор характеристики  $F_{\text{пар}}$  показывает относительную опасность попадания вещества в окружающую среду. Для количественной оценки поглощения теплового излучения Земли используют следующее выражение

$$I_{\text{пар}} = \sum_i^n m_i F_{\text{пар}i},$$

где  $m_i$  – выброс  $i$ -го вещества.

Оценка кратковременных прогнозов парникового эффекта произведена за период (табл. 3) 20 и 50 лет, а долгосрочных – 100 и 500 лет. Для оценки жизненного цикла автомобиля рекомендуется использовать период 100 лет.

Наибольший вклад в образование парникового эффекта вносит выброс CO<sub>2</sub>, хотя он имеет минимальный фактор характеристики. Заметный вклад вносит NO<sub>x</sub> [7]. Уровень показателей легкового автомобиля при жизненном цикле

продолжительностью 10 лет позволил определить фактор характеристики (табл. 4).

Если тенденция роста выбросов CO<sub>2</sub> сохранится, то удвоение количества CO<sub>2</sub> в атмосфере может произойти в середине XXI в. Оптимистические модели предсказывают такое удвоение лишь к 2100 г. Грузовые автомобили на КПП и дизельные выбрасывают на 25...30 % CO<sub>2</sub> меньше в сравнении с бензиновыми автомобилями. Метан в 25 раз более активный парниковый газ по сравнению с CO<sub>2</sub>.

Оценка экологической эффективности энергоносителя может быть определена по приведенному выбросу ВВ, представляющему выброс 1 кг ВВ на 1 т израсходованного топлива. При переводе грузовых автомобилей на газовое топливо приведенные выбросы сокращаются вдвое в сравнении с жидким углеводородным топливом.

Расчет показателя  $C_{\Sigma}$  (руб./кВт · ч), учитывающего ущерб от парниковых газов CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O, проводится по формуле:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{CO}_2} + C_{\text{N}_2\text{O}} + C_{\text{CH}_4}.$$

Высокое содержание водорода в газовом топливе обеспечивает более полное сгорание горючей смеси. Для расчета  $C_{\Sigma}$  необходимо определить цену единицы выброса CO<sub>2</sub> (табл. 5).

Снижение содержания O<sub>2</sub> на отдельных участках крупного города сопровождается ростом содержания CO<sub>2</sub> до 0,8 %, превышающим в 20 раз уровень фона. Содержание O<sub>2</sub> является достаточно стабильной величиной, не имеющей суточной зависимости. В летнее время года содержание O<sub>2</sub> уменьшается на 2,3 %, а в зимнее – на 1,0 %. Наибольший вклад (95 %) в образование парникового эффекта вносят выбросы CO<sub>2</sub>. Заметный вклад, составляющий 4,8 %, вносит N<sub>2</sub>O.

Перевод автомобиля на ТХЭ обеспечивает потребление экологически чистого топлива, экономию нефтяного топлива, снижение эксплуатационных затрат на топливо, сокращение выбросов ВВ двигателей, уменьшение затрат на природоохранные мероприятия.

При расчете экономической эффективности перевода автомобиля на топливно-химические элементы приняты

Таблица 3

**Потенциал образования парникового эффекта**

Вещество	Фактор характеристики $F_{\text{пар}}$ изменения климата, кг CO <sub>2</sub> /кг вещества		
	20 лет	100 лет	500 лет
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	1	1	1
Метан CH <sub>4</sub>	62	25	7,5
Гемиоксид азота N <sub>2</sub> O	290	320	180

Таблица 4

**Вклад различных веществ в изменение климата**

Вещество	Выброс вещества, $m_i$ , кг	Фактор $F_{\text{пар}}$ , кг CO <sub>2</sub> /кг вещества	$m_i F_{\text{пар}i}$	Вклад вещества, %
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	35000	1	35000	94,8
Метан CH <sub>4</sub>	6,2	25	155	0,4
Гемиоксид азота N <sub>2</sub> O	5,4	320	1728	4,8
Итого ( $I_{\text{пар}}$ )	–	–	36883	100

Таблица 5

**Показатель агрессивности и цена CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O**

Парниковые газы	Показатель агрессивности	Цены, евро/т
CO <sub>2</sub>	1	32
CH <sub>4</sub>	23	161
N <sub>2</sub> O	296	2072

Таблица 6

**Сопоставительный анализ эффективности гибридного автомобиля**

Техническая характеристика	Автомобиль		
	Гибридный	На СУГ	Дизельный
Тип кузова / число дверей / мест	Хетчбек / 5/5	Седан / 5/5	Универсал / 5/5
Снаряженная масса, кг	1370	1790	1270
Тип двигателя	Бензиновый R4	Газовый, бензиновый R4	Турбодизель, R4
Рабочий объем, см <sup>3</sup>	1798	2300	1582
Максимальная мощность, кВт ( <i>n</i> , мин <sup>-1</sup> )	93 (5200)	73 (1500)	94 (4000)
Максимальный крутящий момент, Н·м ( <i>n</i> , мин <sup>-1</sup> )	142(4000)	206 (4000)	2600 (1900...2750)
Привод трансмиссии	Передний, бесступенчатый, автомат	Задний, 5-ступенчатый, механический	Передний, 4-ступенчатый, автомат
Максимальная скорость, км/ч	180	173	176
Пробег 350 км, л	16		21
Время разгона, с	10,4	13,5	11,9
Расход топлива, л/100 км	3,9	5,1	5,5
Объем топливного бака, л	45	55	48
Гарантия, год/км	3/100 000	3/100 000	5/150 000
Межсервисный пробег, тыс. км	10	15	15
Заводская гарантия на кузов, год	3	3	5
Содержание CO <sub>2</sub> в ОГ, г/км	120	104	170
Розничная цена, руб.	1 117 000	628 000	659 000

следующие положения. Разрабатываемая энергетическая установка на ТХЭ позволяет получать электрическую энергию из топливных элементов водорода и кислорода, минуя стадию сгорания (табл. 6).

В мировой практике автомобилестроения широко ведутся работы по созданию эффективных гибридных автомобилей. Ограниченный запас энергии в аккумуляторной батарее вынуждает специально проектировать двигатели с наибольшим соотношением между мощностью и массой и максимальным КПД. Применение подобного электропривода позволяет принципиально решить экологические и энергетические проблемы современных транспортных систем.

Достоинства топливных элементов побуждают многочисленные компании вкладывать огромные средства в их разработку. Развитие технологии ТЭ позволяет повысить технический уровень современного электроавтомобиля. Предпочтение следует отдавать ЭХТ на водородном топливе.

В результате выполненного комплекса исследований разработаны критерии и параметры оценки эффективности мероприятий по улучшению качества окружающей среды. ГСУ позволяет существенно снизить содержание парникового газа CO<sub>2</sub> в сравнении с известными энергетическими установками на автомобильном транспорте.

## Литература

1. **Ерохов В.И., Николаенко А.В.** Оценка экологической безопасности современных автотранспортных средств // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 1. – С. 66-70.
2. Теоретические основы проектирования автомобилей нового поколения, работающих на химических топливных элементах. Карунин А.Л., Ерохов В.И., 2007 г. Отчет № 01 200 962 746, НИР МГТУ «МАМИ». – 2007. – 69 с.
3. **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.
4. **Мирзоев Г.К., Казаров А.П.** Разработка электроавтомобилей ОАО «АвтоВаз» // Журнал Автомобильных инженеров. – 2010 – № 1. – С. 18-25.
5. **Ставров О.А.** Электроавтомобили. Изд-во «Транспорт», 1968. – 100 с.
6. **Васильев И.П.** Методика оценки ущерба, наносимого отработавшими газами ДВС при использовании в качестве топлива метана // ДВС. – 2009. – № 2. – С. 94-96.
7. Сравнительная оценка различных типов испарителей топлива для питания автомобильных двигателей. Звонов В.А., Корнилов Г.С., Козлов А.В. Проблемы конструкции двигателей // Сб.научн. тр. НАМИ. – 1998. – С. 239–254.

## Ресурсно-экологическая оценка автомобильного транспорта крупных городов

**С.В. Чмыхалова,**  
профессор Московского государственного  
горного университета, к.т.н.

Автомобильный транспорт рассматривается как часть городской транспортной системы. Рабочие процессы автомобильного транспорта являются комплексными. Производительность автомобилей, расход ими топлива и воздуха, выбросы и токсичность отработавших газов исследуются совместно. Ресурсные и экологические свойства автомобилей зависят от конструкции двигателей, качества топлива, качества дорог и системы управления дорожным движением. Применение этого метода дает возможность усовершенствовать автомобильный транспорт и улучшить управление дорожным движением.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт, ресурсы, экология, системный подход к техническим системам, производительность автомобилей, расход топлива и воздуха, выбросы и токсичность отработавших газов.

## Environmental and ecological properties of city motor transport

**S.V. Chmykhalova**

Motor transport regards as a component of city transport system. Motor transport working process is complex. Productivity of transport, consumption of oil and air, atmospheric emission and toxicity of exhaust gases dissipation are observed like component of motor transport working process. Environmental and ecological properties of motor transport depend of engine construction, fuel quality, road quality and road management. This method divides the possible action into motor transport and road management.

**Keywords:** moto transport, environment, ecology, systems approach in technical system, productivity of transport, consumption of oil and air, atmospheric emission and toxicity of exhaust gases dissipation.

**В** транспортной системе городов особое место занимает автомобильный транспорт, отличающийся от других видов большим количеством и разнообразием транспортных средств и маневренностью [1]. Автомобильный транспорт решает ряд народнохозяйственных задач, главной из которых является обеспечение перевозок грузов и пассажиров в требуемых объеме и номенклатуре.

Работу автотранспорта характеризуют следующие показатели:

- технико-экономические, учитывающие капитальные и эксплуатационные расходы на выполнение перевозок;
- потребительские, к которым относится оценка возможности автотранспортных средств удовлетворять требования потребителей услуг по перевозке грузов и пассажиров;
- эксплуатационные (технологические), к которым относятся производительность, потребление топлива, надежность транспортного средства, относительная продолжительность его обслуживания, степень выполнения транспортных функций и т.д.;
- качество перевозок – своевременность и скорость доставки груза (пассажира), качество дорожного покрытия и организации дорожного движения.

Автомобильный транспорт имеет ряд преимуществ перед другими видами транспорта, отличается маневренностью, то есть приспособленностью к выполнению своих функций при различных условиях работы. Однако существует и ряд недостатков – низкая ресурсная экономичность и высокая экологическая опасность, представляющая непосредственную угрозу для жизни и здоровья людей, пользующихся транспортом или находящихся в непосредственном контакте с автомобилями на улице [2-7].

Ресурсно-экологическая оценка [8] рассматривает транспортную систему с позиции потребления природных ресурсов (ресурсная часть) и загрязнения окружающей среды (экологическая часть).

Ресурсная проблема транспортной системы непосредственно связана с развитием экономики и проявляется в резком увеличении расхода природных ресурсов – воздушных, водных, земельных, сырьевых, биологических, что приводит к истощению их запасов в природе и даже к полному исчезновению некоторых из них [3, 9].

Экологическая проблема транспортной системы обусловлена быстрым увеличением численности городского населения и стремлением к повышению комфортности жизни людей, созданием предприятий, производящих товары народного потребления, централизованным обеспечением населения электроэнергией, холодной и горячей водой, бурным развитием личного автотранспорта и т.д., что приводит к загрязнению окружающей природной среды коммунальными и техногенными отходами [2, 4-7].

Автомобиль является комплексным загрязнителем окружающей среды, в которую при работе автотранспорта поступают:

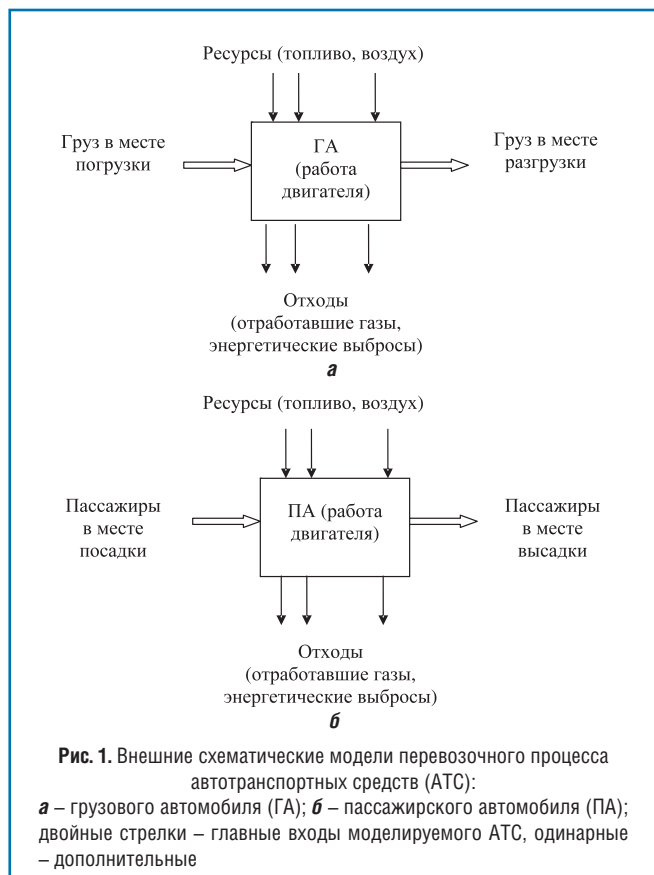


- пыль, сдуваемая с насыпного груза и выбрасываемая из-под колес (пыль, осевшая на дорогу, продукты износа дороги и шин);
- токсичные газы (отработавшие газы, картерные газы, испарения топлива);
- шум от выхлопа двигателя, неровностей дороги и протектора шин;
- электромагнитные колебания при работе системы зажигания бензиновых двигателей;
- тепловое загрязнение от выхлопных газов, нагретых деталей двигателя, автомобиля и др.

При изучении рабочих процессов действующих объектов, в том числе автотранспорта, обычно применяют метод моделирования [7, 10], который обладает высокой наглядностью и позволяет существенно упростить исследование. Модели, применяемые при изучении функционирования объектов, принято делить на макромоделли («черные ящики» и внешние модели) и на микромоделли («прозрачные ящики» и внутренние модели).

Метод моделирования целесообразно применять и для исследования рабочих процессов автотранспортных средств (АТС).

Внешние модели любых объектов, в том числе автотранспортных средств [5, 7] (рис. 1), имеют принципиальный недостаток: они не раскрывают процессы, происходящие внутри изучаемых объектов, – операции, выполняемые объектами. От этого недостатка свободны внутренние модели действующих объектов.



Перевозочный процесс, выполняемый автомобилями и автопоездами, имеет четко выраженный циклический характер. Полный транспортный (ездовой, перевозочный) цикл АТС включает погрузку груза или посадку пассажиров, движение с грузом или с пассажирами, выгрузку груза или пассажиров, движение к месту новой погрузки или посадки. При этом погрузка груза или посадка пассажиров может происходить на прежнем или новом месте.

В реальных условиях такой цикл может неоднократно повторяться (рис. 2).

В городских условиях автотранспортные средства, как правило, движутся потоком и перевозят грузы и пассажиров по комплексному ездovому циклу (рис. 3), состоящему из нескольких последовательно реализуемых элементарных ездovых циклов, чередующихся с плановыми и вынужденными остановками. При плановых остановках грузовых АТС происходит погрузка и выгрузка, а пассажирских – посадка и высадка пассажиров. Вынужденные остановки

происходят у светофоров и регулировщиков движения автотранспортных средств и из-за пробок, образующихся в результате недостаточной пропускной способности автомобильных дорог.

После построения схематических моделей рабочих процессов изучаемых объектов переходят к разработке их математических моделей, выражающих количественные связи, существующие между входными и выходными параметрами объектов. Математические модели используют для определения показателей, характеризующих рабочий процесс исследуемых объектов с качественной и количественной точек зрения.

Главным эксплуатационным показателем работы автотранспортных средств является их производительность – транспортная работа, выполняемая в единицу времени (ед.вр.). Для грузовых АТС используют показатель, имеющий размерность т·км/ед.вр., для пассажирских АТС – пасс·км/ед.вр. [1, 5, 10, 11]. В качестве единицы времени принимают час, цикл, сутки, месяц, год, выбор которой зависит от цели и задач конкретного исследования. В данной работе основными единицами времени являются час (ч) и цикл (ц).

Рабочий процесс автотранспортных средств характеризуют также расходы топлива и воздуха, выбросы отработавших газов в атмосферу (кг/ч). Математические модели рабочих процессов исследуемых объектов целесообразно делить, как и схематические, на внешние и внутренние.

Рассмотрим перевозочный процесс АТС. Внешние математические модели перевозочного процесса включают

формулы для расчета производительности автотранспортных средств, расходов топлива и воздуха, а также выбросов отработавших газов.

Производительность грузового и пассажирского АТС для основной операции перевозочного процесса – ездки с грузом или с пассажирами – определяется по следующим формулам:

$$W_{гр} = m_{гр} S_{гр} / t_{гр};$$

$$W_{пасс} = n_{пасс} S_{пасс} / t_{пасс};$$

где  $m_{гр}$ ,  $S_{гр}$ ,  $t_{гр}$  – соответственно масса перевозимого груза, т; расстояние, км; продолжительность перевозки груза, ч;  $n_{пасс}$ ,  $S_{пасс}$ ,  $t_{пасс}$  – соответственно число перевозимых пассажиров; расстояние, км; продолжительность перевозки пассажиров, ч.

Ресурсные и экологические показатели могут быть рассчитаны по следующим формулам:

- для грузовых АТС –

$$G_{т.гр} = g_{т.гр} W_{гр};$$

$$G_{в.гр} = g_{в.гр} W_{гр};$$

$$G_{ор.гр} = g_{ор.гр} W_{гр};$$

где  $G_{т.гр}$ ,  $G_{в.гр}$ ,  $G_{ор.гр}$ ,  $g_{т.гр}$ ,  $g_{в.гр}$ ,  $g_{ор.гр}$  – соответственно абсолютные и удельные расходы топлива и воздуха, а также количество отработавших газов грузовыми АТС;

- для пассажирских АТС –

$$G_{т.пасс} = g_{т.пасс} W_{пасс};$$

$$G_{в.пасс} = g_{в.пасс} W_{пасс};$$

$$G_{ор.пасс} = g_{ор.пасс} W_{пасс};$$

где  $G_{т.пасс}$ ,  $G_{в.пасс}$ ,  $G_{ор.пасс}$ ,  $g_{т.пасс}$ ,  $g_{в.пасс}$ ,  $g_{ор.пасс}$  – то же для пассажирских АТС.

При исследовании эксплуатационных характеристик грузовых и пассажирских автотранспортных средств целесообразно привести их производительность и ресурсно-экологические показатели к сопоставимому виду. Для этого достаточно в расчетные формулы производительности пассажирских перевозочных средств вместо числа пассажиров  $n_{пасс}$  подставить их общую массу  $m_{пасс}$ . После такой подстановки производительность грузовых и пассажирских АТС будет иметь одинаковую размерность, и их можно будет рассчитывать по единой формуле:

$$W_{АТС} = m_n S_{р.е} / t_{р.е};$$

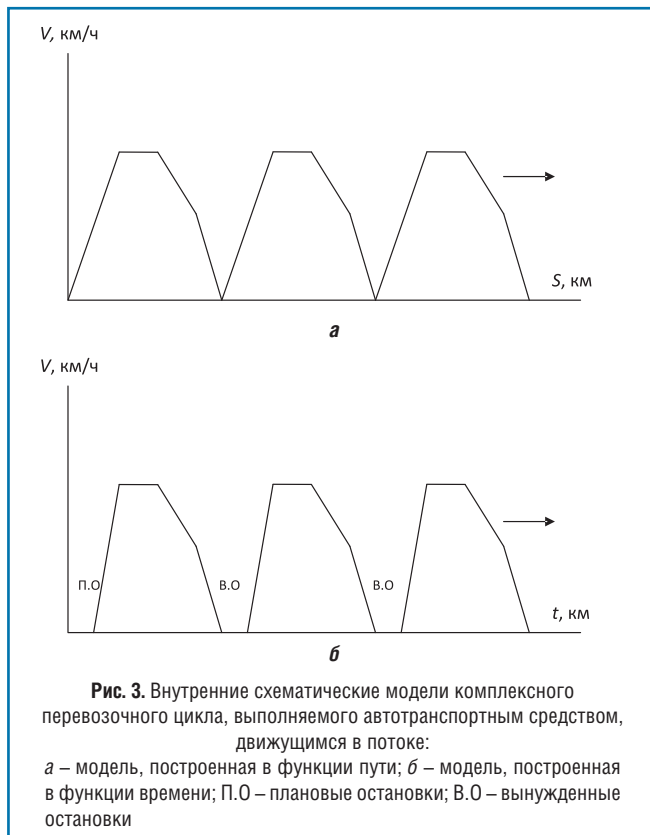
где  $m_n$  – полезная масса АТС, т;  $S_{р.е}$  – длина рабочей ездки, км;  $t_{р.е}$  – продолжительность рабочей ездки, ч.

При расчете полезной массы для пассажирских АТС необходимо использовать следующее выражение:

$$m_n = \begin{cases} m_{гр} & \text{для грузовых АТС, т;} \\ 10^{-3} m_{пасс} n_{пасс} & \text{для пассажирских АТС, т.} \end{cases}$$

Здесь  $m_{пасс} \approx 70...80$  кг – расчетная масса одного пассажира, принимаемая равной средней массе взрослого человека.

Следует заметить, что в личном автотранспорте водитель сам является пассажиром. Коэффициент  $10^{-3}$  введен для пересчета полезной массы в тонны, необходимого для сопоставления  $m_n$  для пассажирских с  $m_n$  для



**Рис. 3.** Внутренние схематические модели комплексного перевозочного цикла, выполняемого автотранспортным средством, движущимся в потоке:  
 а – модель, построенная в функции пути; б – модель, построенная в функции времени; П.О – плановые остановки; В.О – вынужденные остановки

грузовых АТС. При таком подходе к определению показателей работы автотранспортных средств расчетные формулы для расходов топлива и воздуха, а также выбросов отработавших газов станут общими для грузовых и пассажирских АТС:

$$G_T = g_T W_{АТС};$$

$$G_B = g_B W_{АТС};$$

$$G_{ог} = g_{ог} W_{АТС}.$$

Между ресурсными и экологическими показателями работы автотранспортных средств существуют определенные количественные связи:

$$G_B = G_T \alpha_B I_{ог} = G_T k_B;$$

$$G_{ог} = G_T + G_B = G_T (1 + \alpha_B I_{ог}) = G_T k_B;$$

$$g_B = g_T \alpha_B I_{ог} = g_T k_B;$$

$$g_{ог} = g_T + g_B = g_T (1 + \alpha_B I_{ог}) = g_T k_B.$$

Здесь  $I_{ог}$  – количество воздуха, необходимого для сгорания в двигателе 1 кг топлива, кг/кг;  $\alpha_B$  – коэффициент избытка (или недостатка) воздуха в рабочей смеси, поступающей в двигатель;  $k_B = \alpha_B I_{ог}$  – коэффициент перехода от расхода топлива к расходу воздуха;  $k_{ог} = 1 + \alpha_B I_{ог}$  – коэффициент перехода от расхода топлива к выбросу отработавших газов.

Производительность автотранспортного средства зависит от его полезной массы и условий эксплуатации, мощности установленного на нем двигателя и полноты ее использования, от конструкции двигателя, силовой установки, трансмиссии и ходовой системы.

Зависимость производительности автотранспортного средства  $W_{АТС}$  от эффективной мощности его двигателя  $N_e$  (кВт), расходуемой в перевозочном процессе, может быть выражена формулой

$$W_{АТС} = \Phi_{АТС} N_e,$$

где  $\Phi_{АТС}$  – перевозочный фактор автомобиля или автопоезда, характеризующий полноту преобразования работы двигателя (кВт·ч) в транспортную работу АТС (т·км).

Перевозочный фактор автотранспортного средства – комплексный параметр, учитывающий особенности конструкции АТС как перевозчика грузов или пассажиров и особенности условий его эксплуатации: транспортных, дорожных, организационных, погодных-климатических.

Для определения эффективной мощности двигателя, обеспечивающей нормальную работу конкретного АТС с заданной производительностью в заданных для него условиях эксплуатации, может быть использована обратная формула

$$N_e = W_{АТС} / \Phi_{АТС}.$$

Точные значения перевозочного фактора автотранспортного средства должны определяться опытным путем.

Часовой расход топлива автомобильным двигателем может быть рассчитан по известному, широко применяемому уравнению

$$G_T = g_e N_e = k_g g_{ен} k_N N_{ен},$$

где  $g_{ен}$  и  $N_{ен}$  – удельный расход топлива и эффективная мощность двигателя на номинальном (расчетном) режиме;

$g_e$  и  $N_e$  – удельный расход топлива и эффективная мощность двигателя на рабочем режиме;  $k_N$  – коэффициент, учитывающий полноту использования номинальной мощности двигателя на рабочем режиме ( $k_N \leq 1$ );  $k_g$  – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива при переводе двигателя с номинального режима на частичные режимы ( $1 \leq k_g < \infty$ ).

После определения часового расхода топлива на рабочем режиме можно рассчитать расход воздуха и количество отработавших газов.

Производительность автотранспортного средства  $W_{о.ц}$ , работающего по одиночному циклу, определяется по формуле

$$W_{о.ц} = m_{пол} S_{p.e} / t_{о.ц}.$$

В это уравнение входит продолжительность рассматриваемого цикла  $t_{о.ц}$ , рассчитываемая по формуле

$$t_{о.ц} = t_{н.о} + t_{p.e} + t_{к.о} + t_{х.е},$$

где  $t_{н.о}$  и  $t_{к.о}$  – продолжительность начальной и конечной остановок;  $t_{p.e}$  и  $t_{х.е}$  – продолжительность рабочей и холостой езды.

Для определения средних часовых расходов топлива и воздуха, а также среднего количества образовавшихся при выполнении одиночного ездового цикла отработавших газов могут быть использованы следующие уравнения:

$$G_{т.о.ц} = (G_{т.н.о} t_{н.о} + G_{т.p.e} t_{p.e} + G_{т.к.о} t_{к.о} + G_{т.х.е} t_{х.е}) / t_{о.ц};$$

$$G_{в.о.ц} = (G_{в.н.о} t_{н.о} + G_{в.p.e} t_{p.e} + G_{в.к.о} t_{к.о} + G_{в.х.е} t_{х.е}) / t_{о.ц};$$

$$G_{ог.о.ц} = (G_{ог.н.о} t_{н.о} + G_{ог.p.e} t_{p.e} + G_{ог.к.о} t_{к.о} + G_{ог.х.е} t_{х.е}) / t_{о.ц}.$$

Эти уравнения содержат средние значения ресурсных и экологических показателей работы автотранспортных средств для всех операций, из которых складывается одиночный ездовой цикл, и соответствующие им промежутки времени, которые рассчитываются по формулам:

$$t_{p.e} = (t_p + t_{уд} + t_{зд} + t_{т.p.e}),$$

$$t_{х.е} = (t_x + t_{уд} + t_{зд} + t_{т.х.е}).$$

Аналогичные уравнения могут быть получены и для комплексных ездовых циклов, состоящих из нескольких простых, подобных одиночному, рассмотренным выше.

Математические выражения для расчета эксплуатационных показателей автотранспортных средств в циклических перевозочных процессах образуют внутренние математические модели ездовых циклов АТС.

Таблица 1

**Баланс расхода топлива и продолжительности работы АТС в комплексных перевозочных циклах, характерных для городских условий эксплуатации**

Режим работы АТС	Расход топлива, %	Продолжительность работы, %
Остановки с работающим двигателем	15	39,5
Разгоны	35	18,5
Установившиеся режимы	37	29,2
Замедления и торможения	13	12,8
<b>Всего</b>	<b>100</b>	<b>100</b>



Таблица 2

**Средние количества токсичных компонентов  
в отработавших газах (г),  
образующихся при сгорании в двигателях  
1 кг топлива [13]**

Токсичные компоненты	Двигатель	
	бензиновый	дизельный
Монооксид углерода	465,59	20,81
Углеводороды	23,28	4,16
Оксиды азота	15,83	18,01
Ангидрид серной кислоты	1,86	7,80
Альдегиды	0,93	0,78
Сажа	1	5
Свинец	0,5	–
<b>Всего</b>	<b>508,99</b>	<b>56,56</b>

Таблица 3

**Относительные количества токсичных компонентов ОГ,  
образовавшиеся при сгорании в двигателе 1 кг топлива,  
выраженные в CO-эквиваленте**

Токсичные компоненты	Двигатель	
	бензиновый	дизельный
Монооксид углерода	1	1
Углеводороды	0,05	0,2
Оксиды азота	0,034	0,865
Ангидрид серной кислоты	0,004	0,375
Альдегиды	0,002	0,0375
Сажа	0,002	0,24
<b>Всего</b>	<b>1,092</b>	<b>2,717</b>

Таблица 4

**Относительная опасность токсичных компонентов ОГ,  
выраженная в CO-эквиваленте [7, 12]**

Токсичные компоненты	Показатель относительной опасности
Монооксид углерода	1
Сернистый ангидрид SO <sub>2</sub>	22
Оксиды азота в пересчете на NO <sub>2</sub>	41,4
Углеводороды C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1,26
Альдегиды	0,025
Сажа	41,5

Полученные при испытаниях автотранспортных средств в городских условиях опытные данные позволили составить средние балансы расхода топлива и времени для характерных режимов работы АТС, эксплуатируемых в крупном городе (табл. 1) [7, 12].

Как видно из таблицы, при работе АТС в городе основную, но не решающую роль в формировании рассматриваемых эксплуатационных показателей его играют установившиеся режимы движения.

Необходимо отметить, что при выполнении одиночного перевозочного цикла показатели работы АТС (производительность, расходы топлива и воздуха, количество отработавших газов) в значительной мере зависят от мастерства водителя, который может выбирать интенсивность разгонов, торможений и скорость движения. При разгонах и торможениях, движении с экономичной скоростью, рациональном использовании энергии, накопленной автотранспортным средством в процессе разгона, можно добиться значительного сокращения циклового расхода топлива, а следовательно, количества токсичных веществ, образующихся при сжигании топлива в цилиндрах двигателя.

В транспортных потоках, характерных для городских условий эксплуатации автотранспортных средств, водитель вынужден подчиняться их закономерностям: часто останавливать, разгонять и тормозить автомобиль, двигаться на неэкономичных скоростях, длительное время работать на режимах холостого хода. Все это существенно ухудшает комплексные показатели экономичности и экологичности автотранспортного средства, эксплуатируемого в городе.

Математические модели рабочих процессов одиночного АТС в течение одного цикла могут быть экстраполированы на рабочий день, месяц, год, а затем на автомобильный парк города путем умножения соответствующих производственных, ресурсных и экологических показателей работы АТС на число циклов, выполняемых за день, месяц, год, и число автомобилей (автопоездов) в автопарке.

Несомненный научный и практический интерес представляет сопоставление автотранспортных средств с бензиновыми и дизельными двигателями по показателям ресурсной экономичности и экологической безопасности. Установлено, что при одинаковых условиях эксплуатации автотранспортных средств с бензиновыми и дизельными двигателями и при одинаковых нагрузочных режимах расход топлива у бензиновых двигателей в 1,2-1,4 раза больше, чем у дизельных, а расход воздуха существенно больше у дизельных двигателей. В отработавших газах автомобильных двигателей содержатся нейтральные (азот, кислород, водяной пар, диоксид углерода) и токсичные (оксид углерода, оксиды азота, углеводороды, альдегиды, сажа) компоненты.

Это положение выражается формулами:

$$G_{ог} = G_{н.к} + G_{т.к};$$

$$G_{н.к} = k_{н.к} \cdot G_{ог};$$

$$G_{т.к} = k_{т.к} \cdot G_{ог};$$

где  $G_{н.к}$  и  $G_{т.к}$  – суммарные выбросы нейтральных и токсичных компонентов, кг/ч;  $k_{н.к}$  и  $k_{т.к}$  – коэффициенты, характеризующие относительное содержание в отработавших газах автомобильных двигателей соответственно нейтральных и токсичных компонентов.

Значения этих коэффициентов (табл. 2) зависят от типа двигателя и применяемого в нем топлива:

- для бензиновых двигателей  $k_{н.к} \approx 0,49$  и  $k_{т.к} \approx 0,51$ ;
- у дизелей  $k_{н.к} \approx 0,94$  и  $k_{т.к} \approx 0,06$ .

Данные табл. 2 показывают, что отработавшие газы бензиновых двигателей содержат во много раз больше токсичных компонентов в сравнении с ОГ дизелей. При этом одни и те же токсичные компоненты ОГ образуются в сравниваемых двигателях в разных сочетаниях. Для приведения этих данных к сопоставимому виду количества токсичных компонентов выражают обычно в СО-эквиваленте. Выбор монооксида углерода в качестве эквивалента обусловлен тем, что именно он занимает в составе отработавших газов главное место (табл. 3).

При определении относительной опасности токсичных компонентов отработавших газов в СО-эквиваленте (табл. 4) были учтены предельно допустимые концентрации (ПДК) в атмосфере для монооксида углерода и других токсичных веществ, входящих в состав ОГ. При сравнении бензиновых и дизельных двигателей по токсичности выбросов вредных веществ в атмосферу необходимо учитывать, что они расходуют топливо в разных количествах. При одинаковых нагрузках и условиях эксплуатации бензиновый двигатель расходует в 1,2-1,4 раза топлива больше, а значит и выбрасывает отработавших газов и токсичных веществ в атмосферу во столько же раз больше по сравнению с дизелями. Таким образом, на основании анализа результатов экспериментальных исследований можно утверждать, что автомобильные бензиновые двигатели выбрасывают в атмосферу в 10-12 раз больше токсичных веществ по сравнению с дизелями.

Автомобильные транспортные средства не только потребляют природные ресурсы – топливо и атмосферный воздух, они интенсивно загрязняют атмосферу своими отходами – токсичными и нетоксичными (нейтральными) компонентами отработавших газов. Они также загрязняют окружающую среду жидкими и твердыми материальными отходами, энергетическими выбросами (шум, вибрация, тепловые и электромагнитные излучения), продуктами износа самих АТС, в том числе шин, и автомобильных дорог, а также вспомогательных и обслуживающих машин и механизмов. Таким образом, в современных автотранспортных средствах тесно переплетаются две проблемы современности – ресурсная и экологическая, решение которых состоит в разработке комплексного подхода к защите окружающей природы и человека от негативных воздействий на них автомобильного транспорта. Комплексный подход включает:

- улучшение экологических характеристик транспортных средств и топлива;
- улучшение организации дорожного движения в городе;
- увеличение протяженности дорог и магистралей, строительство новых дорог и транспортных развязок, а также парковочных участков;
- улучшение качества дорожного покрытия и строительно-ремонтных дорожных работ.

Применение описанного метода позволяет систематизировать показатели автотранспортного процесса, установить связи, существующие между производительностью автотранспортных средств, расходом топливных и воздушных ресурсов, количеством и токсичностью отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу.

---

## Литература

---

1. **Афанасьев Л.Л., Цукерберг С.М.** Автомобильные перевозки: Учебн. для вузов. – М.: Транспорт, 1973. – 320 с.
2. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Р.В. Малов, В.И. Ерохов, В.А. Щетина, В.Б. Беляев. – М.: Транспорт. 1982. – 200 с.
3. **Говорущенко Н.Я.** Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. – М: Транспорт, 1990. – 135 с.
4. **Голубев И.Р. Новиков Ю.В.** Окружающая среда и транспорт. М.: Транспорт, 1987. – 207 с.
5. **Иванов В.Н. Ерохов В.И.** Экономия топлива на автомобильном транспорте. – М.: Транспорт, 1984. – 302 с.
6. **Трофименко Ю.В.** Промышленно-транспортная экология: Учеб. для вузов/под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2001 – 273 с.
7. **Чмыхалова С.В.** Негативные воздействия автомобильного транспорта крупных городов на окружающую природу и население // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2008, – № 8. – С.191-201.
8. **Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И.** Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
9. **Быстраков Ю.И., Колосов А.В.** Экономика и экология. – М.: Агропромиздат, 1988. – 204 с.
10. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
11. **Литвинов А.С. Фаробин Я.Е.** Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств. М.: – Машиностроение, 1989. – 240 с.
12. **Амбарцумян В.В., Носов В.Б. Тагасов В.И., Сарбаев В.И.** Экологическая безопасность автомобильного транспорта. – М.: ООО Изд-во «Научтехлитиздат», 1999. – 208 с.
13. **Якубовский Ю.** Автомобильный транспорт и защита окружающей среды: Пер. с пол. – М.: Транспорт, 1979. – 198 с.

## Расчет элементов системы газовой подачи для ДВС с искровым зажиганием

**В.А. Шишков,**

начальник технического отдела ООО «Рекар», к.т.н.

Приведен алгоритм расчета элементов газобаллонного оборудования для электронной системы управления двигателем внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием, работающим на газовом топливе. На основании исследований, проведенных автором, даны рекомендации по расчету расходных характеристик элементов газобаллонного оборудования (ГБО) для газового ДВС на различных режимах его работы.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, газобаллонное оборудование, впрыск газового топлива, искровое зажигание, электронная система управления.

## Account of elements of system of gas submission for the engine of internal combustion with spark ignition

**V.A. Shishkov**

The algorithm of account of elements gas of the equipment for an electronic control system the engine of internal combustion with spark ignition working on gas fuel is given. On the basis of researches carried out the author, gives the recommendations for account of the account characteristics of elements gas of the equipment for gas the engine of internal combustion on various modes of his work.

**Keywords:** the engine of internal combustion, gas the equipment, direct injection of gas fuel, spark ignition, electronic control system.

Использование газобаллонного оборудования для конкретных двигателей обуславливает необходимость определения характеристик его элементов, чем и занимаются разработчики ГБО и производители автомобилей на газовом топливе. Установщики ГБО используют только их рекомендации. Правильный подбор элементов

ГБО к конкретному двигателю и автомобилю является важной задачей с точки зрения выполнения современных требований как по токсичности отработавших газов, так и по ездовым качествам.

### Расчет электромагнитной форсунки для газового двигателя с искровым зажиганием

Расчет расходной характеристики форсунки как обычно выполняется для стандартных условий ее работы с последующей проверкой в крайних точках по рабочим характеристикам двигателя и диапазона условий эксплуатации [1]. При этом невозможно учесть все факторы, которые влияют на работоспособность элементов газовой подачи. Поэтому в алгоритме управления двигателем предусмотрены корректирующие коэффициенты, которые нарабатываются в процессе калибровочных работ системы управления при испытаниях в различных условиях эксплуатации автомобиля.

Коррекция расхода газа в зависимости от параметров электромагнитных форсунок более сложная, так как зависит от их конструкции, перепада давления, напряжения питания, температуры катушки, расхода газа и воздуха, поступающего в цилиндр двигателя, и т.д. Под расходом газа понимается количество топлива, которое прошло через сопло форсунки за один рабочий цикл от момента начала открытия клапана до момента посадки клапана на седло при его закрытии.

Цикловая подача газового топлива

$$q_{\text{ц}} = G_{\text{вц}} / (\alpha I_{\text{о}}),$$

где  $G_{\text{вц}}$  – цикловой расход воздуха, г/цикл;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $I_{\text{о}}$  – количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг газового топлива, кг/кг.

Для метана  $I_{\text{о}} = 17,176$ , а для сжатого природного газа (КПГ) как моторного топлива во всем диапазоне его химического состава  $I_{\text{о}} = 16,7 \dots 17,176$ .

Цикловая подача газового топлива определяется как для холостого хода (ХХ), то есть при минимальной частоте  $n_{\text{хх}}$  вращения коленчатого вала, так и для максимального мощностного режима работы двигателя  $n_{\text{макс}}$ . Минимальная цикловая подача газа необходима для выбора динамической точки настройки газовой форсунки (выбор усилия затяжки пружины клапана форсунки), а максимальная – для выбора статической точки настройки расходной характеристики, то есть для выбора площади проходного сечения ее жиклера. По значениям расхода в динамической и статической точках настройки выбирается линейный диапазон расходной характеристики форсунки с учетом запасов по ее краям.

Цикловой расход воздуха при впрыске газа как во впускной трубопровод, так и непосредственно в камеру сгорания с учетом возможности одновременной подачи в двигатель газообразного и жидкого топлив определяется при минимальной и максимальной температурах воздуха на входе по выражению

$$G_{\text{вц}} = (V_{\text{ц}} / i) \rho_{\text{в}} \eta_{\text{ц}} (1 - (1 - q_6 / q_{\text{ц}}) (1 - q_2 / q_{\text{ц}}) / I_{\text{в}}) (1 - k_{\text{вп}}) k_{\text{в}},$$

где  $V_{ц}$  – рабочий объем всех цилиндров;  $i$  – количество цилиндров;  $\rho_b$  – плотность воздуха на впуске,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\eta_{ц}$  – коэффициент наполнения цилиндров воздухом равен отношению количества свежего заряда в цилиндре двигателя к количеству заряда, который размещается в объеме, равном рабочему объему цилиндра, при давлении и температуре во впускном трубопроводе;  $q_{ц} = q_1 + q_2 = q_r + q_6$  – цикловая подача топлива;  $q_1$  – доля газа при его впрыске во впускной трубопровод до момента закрытия впускного клапана;  $q_2$  – доля газа при непосредственном впрыске газа в цилиндр после закрытия впускного клапана;  $q_r$  – доля газового топлива в цикловой подаче;  $q_6$  – доля бензина (жидкого топлива) в цикловой подаче;  $l_v$  – объемное количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания  $1 \text{ м}^3$  газового топлива (для метана  $l_v = 9,53$ , а для КПГ как моторного топлива во всем диапазоне его химического состава  $l_v = 8,0769 \dots 10,601$ );  $k_{вп}$  – объемная доля водяного пара в воздухе;  $k_b = f(n, T_{дв}, p_{о'}, T_{дв'})$  – коэффициент коррекции наполнения цилиндров воздухом, где  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $T_{дв}$  – температура двигателя,  $p_{о'}$  – давление окружающей среды, МПа,  $T_{о'}$  – температура окружающей среды, К.

Коэффициент корреляции  $k_b$  определяется в процессе проведения калибровочных работ на конкретной конструкции двигателя с учетом его впускной и выпускной систем.

Коэффициент наполнения для максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя без наддува определяем по формуле из [2] при минимальной и максимальной температурах воздуха на входе

$$\eta_{ц} = \zeta_{сз} (\epsilon / (\epsilon - 1)) (p_a / p_o) (T_o / (T_o + \Delta T)) [1 - \zeta_{оч} \zeta_{p_{ор}} / (\epsilon p_a)],$$

где  $\zeta_{сз}$  – коэффициент дозарядки свежего заряда;  $\epsilon$  – степень сжатия в цилиндрах двигателя;  $p_a$  – давление в начале сжатия обычно определяют по эмпирическим выражениям, в первом приближении  $p_a = 0,09$  МПа;  $\Delta T$  – подогрев свежего заряда от стенок на прогревом двигателе, в первом приближении  $\Delta T = 4 \dots 16$  К;  $\zeta_{оч}$  – коэффициент очистки цилиндров;  $\zeta$  – отношение средних удельных теплоемкостей продуктов сжатия и свежей смеси, в первом приближении  $\zeta = 1$ ;  $p_{ор}$  – давление остаточных газов, в первом приближении  $p_{ор} = 0,105 \dots 0,11$  МПа.

Коэффициент очистки цилиндров с наддувом определяем по эмпирической зависимости

$$\zeta_{оч} = 1 / (e^{\phi_k} - 1),$$

где  $\phi_k$  – коэффициент избытка продувочного воздуха, в первом приближении  $\phi_k = 0,98$ ;  $e = 2,71$ .

Для четырехтактного двигателя без наддува коэффициент очистки  $\zeta_{оч} = 1$ .

Определяем статический расход через газовую форсунку:

$$G_{ст.мин} = 1000 q_{ц} (n_{макс}) / t_{макс},$$

где  $t_{макс}$  – максимальное время открытия клапана газовой форсунки, мс.

При фазированном распределенном впрыске газа  $t_{макс}$  может изменяться в диапазоне частот  $14,667 \dots 100$  Гц

( $850 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$ ) от 68,182 до 10 мс соответственно. Поэтому для линейного диапазона расходной характеристики форсунки ширина импульса впрыска будет, например, 2,5 мс на режиме ХХ и 10 мс при максимальной частоте вращения коленчатого вала.

Максимальный статический расход с учетом всех издержек производства и допусков определяем из соотношения

$$G_{ст.макс} = \{1 + [(0,09 \dots 0,11)^2 + (0,05 \dots 0,065)^2 + (0,1 \dots 0,2)^2]^{1/2}\} G_{ст.мин},$$

где следующие коэффициенты увеличения максимального статического расхода:  $0,09 \dots 0,11$  – от качества сборки двигателя;  $0,05 \dots 0,065$  – от ширины поля допуска рабочей характеристики и повторяемости;  $0,1 \dots 0,2$  – для обогащения газозвдушной смеси с целью охлаждения нейтрализатора или катколлектора на максимальных мощностных режимах работы.

По максимальному статическому расходу вычисляем площадь проходного сечения жиклера форсунки по соотношению (1) для сверхкритического истечения газа из сопла форсунки и по соотношению (2) для до критического истечения газа.

Рассмотрим влияние перепада давления газа на расход через форсунку

$$G = \rho_{г} W F,$$

где  $\rho_{г}$  – плотность топлива (газ) на входе, зависящая от температуры и давления газа;  $W$  – скорость истечения газа из сопла форсунки.

$$W = f(\rho_{г}, \nu, \Delta p),$$

где  $\nu$  – вязкость газа, оказывающая существенное влияние при малых сечениях сопла.

Для докритического истечения скорость газа равна

$$W = [(2g / \rho_{г}) \Delta p]^{1/2},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\Delta p = p_{вх} - p_{вых}$  – перепад давления на форсунке.

Рассмотрим два случая истечения:

- дозвуковое (коэффициент скорости  $\lambda < 1$ , или  $\pi = p_{вх} / p_{вых} < \pi_{кр}$ );
- сверхзвуковое ( $\lambda = 1$ , или  $\pi > \pi_{кр}$ ).

При сверхзвуковом истечении в минимальном сечении сопла газовой форсунки возникает скачок уплотнения, и фактически скорость истечения равна скорости звука в данной среде  $W = a_{зв}$ . Если при дозвуковом истечении газа за минимальным сечением сопла форсунки имеется расширяющийся канал, например, сопло Лаваля, то скорость истечения может увеличиваться до скорости звука, и тогда тоже возникнет скачок уплотнения. Из-за условий монтажа газовых форсунок во впускную трубу двигателя внутреннего сгорания возможности таких сопел ограничены.

Расход газа при сверхкритическом истечении

$$G = \rho_{г} a_{зв} F, \quad (1)$$

где  $a_{зв}$  – скорость звука в газе при  $p_{вх}$  и  $T_{вх}$ ;  $F$  – площадь минимального сечения сопла форсунки.

Расход газа при докритическом перепаде

$$G = \mu F \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{p_{вх}}{\sqrt{RT_{вх}}} \sqrt{\frac{1}{\pi^k} - \frac{1}{\pi^{k+1}}}, \quad (2)$$

где  $\mu = 0,6 \dots 0,7$  – коэффициент истечения;  $k$  – показатель адиабаты;  $R = R_r / M$ ;  $R_r$  – газовая постоянная;  $M$  – молекулярная масса газа, для метана  $M = 16$ .

Таким образом, расход газа через форсунку при сверхкритическом перепаде практически не зависит от скорости, так как  $W = a_{зв}$ . В этом случае расход может увеличиваться только за счет уплотнения газа на входе в форсунку, например, повышением входного давления и снижением температуры газа или увеличением ширины импульса открытого состояния клапана или проходного сечения жиклера форсунки.

Ширина импульса открытого состояния форсунки для увеличения расхода газа не может превышать период работы одного цилиндра (для четырехтактного двигателя это два оборота коленчатого вала). Например, при частоте вращения коленчатого вала двигателя  $6000 \text{ мин}^{-1}$  и фазированном последовательном впрыске газа период составляет 20 мс. Необходимо отметить, что время открытия впускного клапана ограничено еще меньшим временем цикла всасывания воздуха в цилиндр двигателя. Это время открытого состояния впускного клапана составляет для различных модификаций двигателей  $250 \dots 320^\circ$  по углу поворота коленчатого вала, что соответствует примерно  $7 \dots 9 \text{ мс}$  при  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ . Оптимальным считается такой случай, когда ширина импульса впрыска при максимальной нагрузке и частоте вращения коленчатого вала двигателя не превышает время открытого состояния впускного клапана.

Не все конструкции газовых электромагнитных форсунок укладываются в эти условия, поэтому допускается смещать момент начала впрыска газа в сторону опережения перед началом открытия впускного клапана. В этом случае ширина импульса впрыска ограничивается сверху и составляет не более 20 мс. Если это условие не соблюдается, то необходимо выбрать другую форсунку с большей производительностью или установить по две форсунки на каждый цилиндр двигателя.

Расход газа по формулам (1) и (2) можно вычислять только при статическом истечении при полностью открытом клапане форсунки. В динамических режимах, когда

клапан форсунки работает в импульсном режиме, необходимо учитывать доли переменного расхода газа во время перемещения клапана в положение «открыто» и обратно в положение «закрыто». Эти доли зависят от следующих параметров:

- напряжения и тока питания катушки форсунки;
- индуктивной составляющей катушки форсунки;
- массы подвижных элементов клапанной пары;
- линейного хода клапанной пары;
- характеристик материалов катушки, якоря и направляющей клапана, пружинного элемента, корпуса;
- перепада давления газа на клапане форсунок;
- температуры катушки форсунки и т.д.

С учетом того, что заводы, производящие автомобили, используют готовые конструкции газовых электромагнитных форсунок, целесообразно влияние напряжения питания, перепада давления и температуры катушки (температура катушки влияет на ее сопротивление) на расход определять экспериментальным путем или запрашивать необходимые данные у изготовителя (рис. 1).

В конечном варианте расход газа через форсунку представляет собой многомерную функцию различных параметров, которые необходимо учитывать для точной дозировки топлива в алгоритме управления двигателем. Например, для двигателя с искровым зажиганием объемом 1,5 л суммарное влияние перепада давления на газовой форсунке и циклового расхода воздуха через двигатель внутреннего сгорания на коэффициент расхода газа представляет собой сложную функцию в виде изогнутой поверхности (рис. 2).

Под коэффициентом  $k_r$  расхода газового топлива через форсунку понимается комплексная величина, зависящая от многих факторов, а именно – от собственных характеристик форсунки, параметров топлива, количества воздуха, реально попавшего в цилиндр на конкретном режиме работы двигателя. Этот коэффициент используется для коррекции топливоподачи при калибровочных работах электронной системы управления двигателем.

Сложность поверхности данной функции связана с двумя основными факторами:

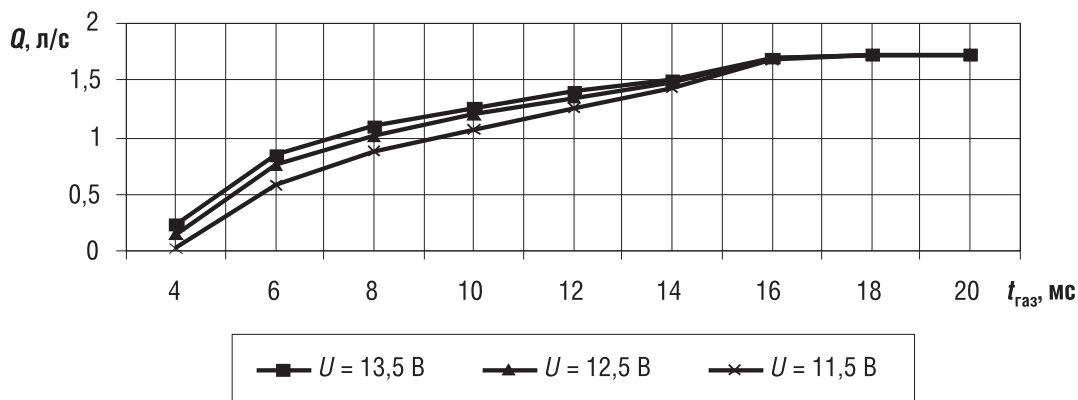
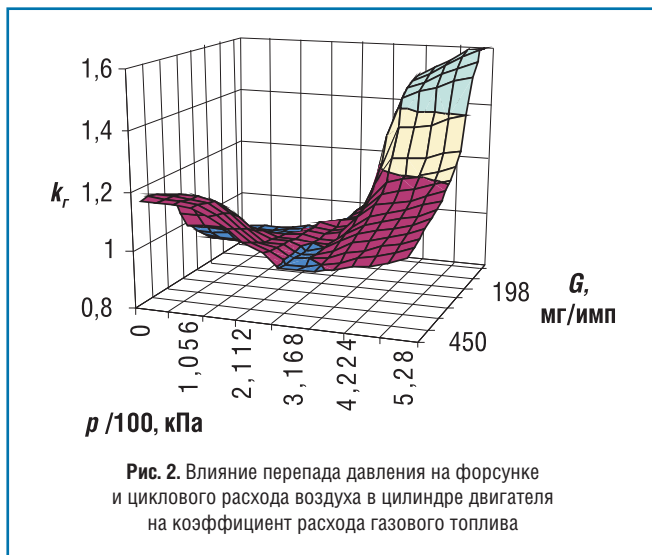


Рис. 1. Влияние напряжения питания на расход воздуха через газовую форсунку





- влиянием характеристик газовой электромагнитной форсунки;
- изменением наполнения цилиндров двигателя в зависимости от расхода и давления газообразного топлива.

На режимах ХХ, где ширина импульса открытого состояния клапана форсунки наименьшая и перепад давления газа максимальный, коэффициент расхода наибольший  $k_f < 1,6$ . На режимах с повышенной нагрузкой двигателя и при среднем перепаде давления газа на форсунке  $k_f \approx 1$ . На режимах ХХ, где ширина импульса открытого состояния клапана форсунки наименьшая и перепад давления газа минимален,  $k_f < 0,8$ . На режимах с повышенной нагрузкой двигателя и при минимальном перепаде давления газа на форсунке  $k_f \approx 1,2$ .

### Расчет газового редуктора

Газовые редукторы бывают механические и электрические. Механические редукторы представляют собой подпружиненный клапан с обратной связью посредством мембраны и соответствующей полости. Электрические редукторы – это ряд электромагнитных клапанов различной производительности, поддерживающих выходное давление за счет скважности и длительности открытия соответствующего клапана. В качестве электромагнитных клапанов можно использовать клапаны от газовых форсунок с различной производительностью.

Расчет механического газового редуктора состоит из следующих этапов:

- определения сечения и хода клапана редуктора при минимальном и максимальном давлении на входе при заданных минимальном расходе и перепаде давления газа для обеспечения режима холостого хода;
- определения сечения и хода клапана редуктора при минимальном и максимальном давлении на входе при заданных максимальном расходе и перепаде давления газа для обеспечения максимального режима работы двигателя по нагрузке и оборотам коленчатого вала;
- подбора числа ступеней редуктора;

- выбора среднего сечения клапана редуктора для первой и второй ступеней и подбора профилей сечений клапанов для поддержания линейного закона изменения расхода при изменении режима работы двигателя;
- уточнения расходов газа при минимальных и максимальных режиме работы двигателя и давлении на входе;
- определения количества теплоты и расхода среды, необходимых для подогрева клапанной пары редуктора из условия отсутствия примерзания при использовании газа с большим содержанием воды;
- определения параметров пружины и мембраны для настройки клапанной пары редуктора для работы при минимальных и максимальных расходе и давлении на входе;
- уточнения характеристик редуктора в процессе доводочных работ.

В данной работе рассматриваются только первые пять этапов расчета механических редукторов.

Одним из основных условий стабильной работы редуктора является непрерывная подача газа, то есть незакрытие клапанной пары редуктора при любых сочетаниях режимов работы двигателя на холостом ходу. Это необходимо для снижения уровня пульсации давления газа на выходе из редуктора и соответственно повышения точности дозирования газа в цилиндры двигателя. Для поддержания постоянного перепада давления на редукторе используют надмембранную полость, соединенную с воздушным ресивером двигателя.

Площадь сечения клапана редуктора при сверхкритическом перепаде давления определяют по выражению

$$F = G / (\rho_T a_{3B}),$$

где  $G$  – требуемый расход газа на холостом ходу и максимальном по нагрузке и частоте вращения коленчатого вала режиме работы двигателя при максимальных и минимальных температуре и давлении газа на входе в редуктор (всего восемь значений расходов);  $\rho_T$  – плотность газа на входе в клапанную пару при минимальных (например, 0,5 МПа и  $-30^\circ\text{C}$ ) и максимальных (20 МПа и  $+85^\circ\text{C}$ ) давлении на входе в редуктор и температуре газа;  $a_{3B}$  – скорость звука при истечении газа из клапанной пары редуктора при тех же значениях давления и температуры газа.

Площадь сечения клапана редуктора при докритическом истечении газа определяется с использованием выражения (2).

Фактически получаем восемь значений площади клапана редуктора, из которых выбираем минимальное и максимальное. Задаемся конструкцией клапана редуктора в виде щели или отверстия, закрываемых подпружиненным клапаном. Для обеспечения максимального расхода топлива в двигателе вычисляем размеры отверстия или щели по максимальной выбранной площади.

Для обеспечения минимального расхода топлива в двигатель определяем ход клапана по минимальной выбранной площади

$$H = F_{\min} / l_p,$$

где  $l_p = \pi d$  – длина окружности отверстия клапана редуктора.

По величине подъема клапана редуктора назначают размер ячейки сетки топливного газового фильтра на входе в редуктор. Размер ячейки должен быть меньше или равен величине подъема клапана редуктора.

Для малоразмерных двигателей (менее 2 л) на режимах ХХ невозможно обеспечить непрерывающийся расход газа через клапанную пару редуктора. Поэтому обычно редуктор делают двухступенчатым, в котором первая ступень работает в импульсном режиме (есть расход – нет расхода), а вторая – при низких давлениях с постоянным расходом газа, что позволяет точнее поддерживать давление на выходе. Для второй ступени редуктора выбирают соответствующие входные давления в зависимости от применяемого газа (для СУГ на выходе первой ступени давление 300 кПа, для КППГ – 500...1000 кПа). Размеры отверстия и хода клапана вычисляют аналогично, как для первой ступени редуктора при соответствующих температурах и давлении газа на входе.

При определении параметров редуктора для его устойчивой работы рекомендуется выбирать отношение давления на входе к давлению на выходе в каждой ступени более 2,8.

### Расчет топливных трубопроводов

Порядок расчета топливных трубопроводов:

- по значению максимального расхода топлива с учетом 3-5-кратного запаса определяют диаметр топливного трубопровода и выбирают стандартный трубопровод (диаметр 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 24 мм);
- определяют геометрические характеристики трубопровода с учетом конкретного транспортного типа, а именно – общую длину трубопровода, количество и виды гидравлических сопротивлений (повороты, изменения сечения, соединения отдельных трубопроводов и т.д.);
- выполняют предварительные прочностные расчеты и выбирают толщину стенки топливного трубопровода;
- вычисляют гидравлические сопротивления всех участков трубопроводов;
- определяют суммарное гидравлическое сопротивление топливного трубопровода и его влияние на давление на входе в дозирующий элемент;
- определяют пульсационные составляющие давления топлива в трубопроводе и их влияние на точность дозирования топлива в отдельных циклах работы цилиндров;
- оптимизируют топливные трубопроводы (по гидравлическому сопротивлению, пульсациям давления и расхода, прочности конструкции) для повышения точности дозирования топлива.

В данной работе рассматривается только первый пункт.

Проходной диаметр топливного трубопровода для газовых топлив

$$d_{\text{тр}} \geq [(4/\pi) k_d G_{\text{макс}} / (\mu \rho_t W_t)]^{1/2},$$

где  $k_d$  – коэффициент увеличения расхода топлива (для газовых трубопроводов при использовании КППГ для устойчивой работы редуктора в динамических режимах  $k_d = 2...4$ );  $G_{\text{макс}}$  – максимальный расход топлива в двигателе при максимальной частоте вращения коленчатого вала и нагрузке двигателя в динамическом режиме ускорения, кг/с;  $\mu = 0,6...0,7$  – коэффициент расхода, обычно принимают его минимальное значение;  $\rho_t$  – минимальная плотность топлива в трубопроводе при минимальном давлении перед форсунками и максимально допустимой температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $W_t$  – скорость течения топлива в трубопроводе, м/с.

$$W_t = [(2g/\rho_t)(\Delta p_t)]^{1/2},$$

где  $\Delta p_t$  – перепад давления топлива (гидравлическое сопротивление трубопровода от выхода из баллона до редуктора или от редуктора до дозирующего устройства), кПа.

В первом приближении принимают для газовых впрысковых систем топливоподачи перепад давления между баллоном и редуктором 10...200 кПа в зависимости от давления в баллоне и максимального расхода газа, а между редуктором и газовой рампой форсунок на уровне 50...300 Па в зависимости от максимального расхода газа и его температуры.

По приведенной выше методике определяют геометрические параметры проходных сечений основных элементов ГБО при различных внешних условиях и граничных параметрах газового топлива (максимальные и минимальные значения давления, температуры и расхода). Эти данные необходимы для определения расходных, гидравлических и конструктивных характеристик при проектировании и выборе элементов ГБО для ДВС с искровым зажиганием с электронной системой управления. Кроме этого, совершенствуя вышеприведенную методику вычисления параметров элементов ГБО можно уменьшить диапазон изменения коэффициента коррекции  $k_f$  (см. рис. 2) газового топлива, поступающего в цилиндры двигателя, что, в свою очередь, сократит время проведения адаптации оборудования к конкретному автомобилю и двигателю.

### Литература

1. **Шишков В.А.** Расчет элементов системы топливоподачи поршневого двигателя внутреннего сгорания. Методические указания к курсовой работе. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева, кафедра «Машиностроения», издательство СГАУ, 2007. – 36 с.

2. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Вырубов, Н.А. Ивашенко, В.И. Ивин [и др.]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

## Моделирование теплообмена при подаче СПГ в двигатель

**А.И. Цаплин,**

профессор, декан факультета Пермского ГТУ, д.т.н.,

**С.В. Бочкарев,**

профессор Пермского ГТУ, д.т.н.

В статье представлена модель учета роста давления в магистрали питания двигателя КАМАЗ с криогенным топливом при конкретных условиях теплоизоляции. С использованием уравнения теплового баланса удалось получить модель в простой линейной форме. Это делает модель пригодной для широкого применения при решении практических задач по проектированию топливных систем подачи сжиженного природного газа (СПГ) в двигатель. Адекватность модели проверялась проведением эксперимента на специальном стенде.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, двигатель, трубопровод, эксперимент, расчет, давление, теплообмен.

## Simulation of heat transfer for liquefied natural gas engine

**A.I. Tsaplin, S.V. Bochkarev**

Article presented model growth line pressure engine KAMAZ cryogenic when specific conditions, thermal insulation. Using the heat balance equation, managed to get a model in the simple linear form. This makes the model suitable for use in addressing practical tasks related to the design of the fuel systems of liquefied natural gas engine. The adequacy of the model was tested the experiment at a special bench.

**Keywords:** liquefied natural gas, engine, pipeline, experiment, calculation, pressure, heat.

**П**риродный газ является эффективным альтернативным топливом для применения в моторах различных видов транспорта [1]. Плотность природного метана в тысячу раз ниже плотности бензина. Поэтому, если заправлять автомобиль метаном при атмосферном давлении, то для равного с бензином количества топлива понадобится бак в 1000 раз больший. Чтобы не возить огромный

прицеп с топливом, необходимо увеличить плотность газа. Этого можно достичь сжатием метана до 20...25 МПа, то есть получить компримированный газ.

Однако целый ряд объективных недостатков, присущих использованию компримированного природного газа (КПГ), сдерживает распространение газобаллонных автомобилей [2]. Это малый запас хода автомобилей из-за меньшей (в 3-4 раза) плотности КПГ в сравнении с бензином, большая масса газового баллона в сравнении с массой содержащегося в нем газа, снижение температуры КПГ при дросселировании перед впрыском его в цилиндры двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и др.

Эффективное повышение плотности газа достигается его сжижением, при котором плотность возрастает в 640 раз. СПГ – криогенный продукт, получаемый из природного газа с преобладающим содержанием метана путем его очистки и сжижения. Количество метана в природном газе колеблется в зависимости от месторождения от 70 до 99 %. Энергетическая массовая эффективность СПГ выше, чем у бензина.

Однако при низких температурах ( $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже) теплообмен с окружающей средой приводит к росту давления в сосудах и магистралях топливной системы двигателей [3, 4]. Из-за неизбежной разности температур между криогенным топливом и окружающей средой происходят процессы теплообмена в баках, трубопроводах топливных систем, приводящие к образованию газообразной фазы и повышению давления при хранении и подаче СПГ по трубопроводам. При неконтролируемом росте давления возможно разрушение элементов топливных систем. Применение современной теплоизоляции трубопроводов не исключает возможность утечки СПГ, а лишь уменьшает скорость нарастания давления. Возникают проблемы безопасности, которые требуют теоретического и экспериментального разрешения на уровне проектирования эффективной теплоизоляции, снижающей скорость роста давления.

Представленная адекватная математическая модель и инженерная методика расчета позволяют прогнозировать рост давления в магистрали питания двигателя с криогенным топливом при конкретных условиях теплоизоляции.

Рассмотрим фрагмент трубопровода длиной  $L$  с внутренним диаметром  $d$  и слоем изоляции диаметром  $D$  (рис. 1). Жидкий метан при температуре кипения  $T_0$  течет

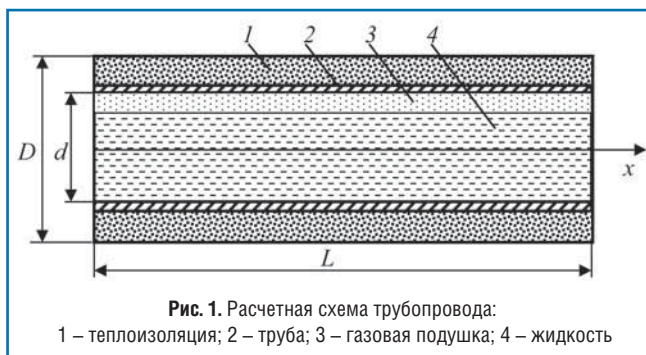


Рис. 1. Расчетная схема трубопровода:

1 – теплоизоляция; 2 – труба; 3 – газовая подушка; 4 – жидкость

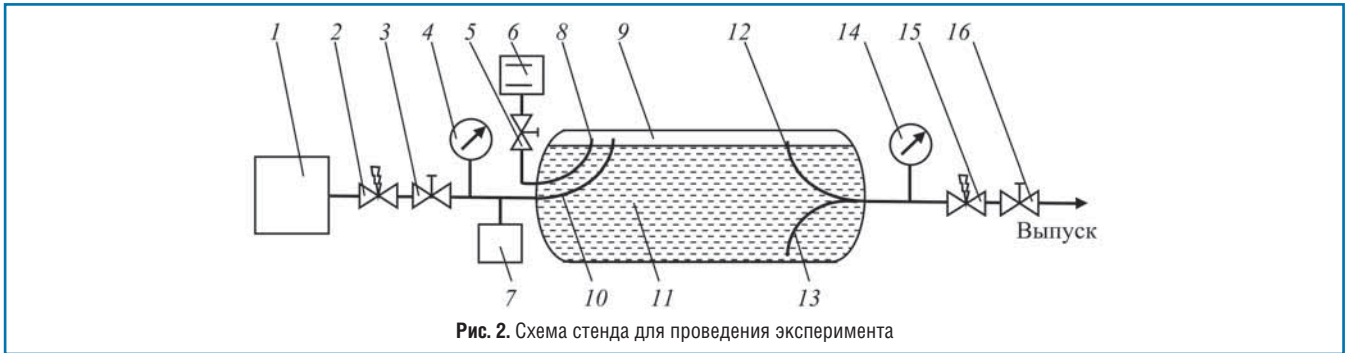


Рис. 2. Схема стенда для проведения эксперимента

в направлении оси  $x$  с массовым секундным расходом  $G$ . Через слой изоляции от окружающей среды с температурой  $T_c$  подводится тепловой поток  $q_l$  так, что общая мощность подводимой теплоты по всей длине трубопровода составляет  $\Phi = q_l L$ .

Подвод теплоты через стенку трубопровода приводит к образованию в нем газообразной фазы метана массой  $m_r$  в соответствии с уравнением теплового баланса

$$\Phi = K_l (T_c - T_0) L = Q \frac{dm_r}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $K_l$  – коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, учитывающий свойства материалов изоляции и трубопровода, а также режимы течения метана и наружного теплообмена [5];  $Q$  – удельная теплота испарения;  $\tau$  – время.

Интегрирование уравнения (1) дает при постоянной мощности подводимой теплоты линейный рост массы газообразного метана

$$m_r = \frac{\Phi \tau}{Q}. \quad (2)$$

Будем считать, что образовавшийся в трубопроводе газообразный метан подчиняется уравнению состояния идеального газа

$$p = \frac{m_r RT_0}{M V}, \quad (3)$$

где  $p$  – давление;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M$  – масса моля метана;  $V = \pi d^2 L / 4$  – объем трубопровода.

Подстановка в соотношение (3) уравнения (2) дает зависимость для линейного роста давления в трубопроводе

$$p = \frac{RT_0 \Phi}{MV Q} \tau. \quad (4)$$

Время нахождения метана в трубопроводе длиной  $L$  и диаметром  $d$  при его заданном массовом секундном расходе  $G$  в предположении незначительности массы газообразного метана по сравнению с массой жидкого метана ( $m_{ж} \gg m_r$ ) составляет

$$\tau = \frac{\rho_{ж} S L}{G}, \quad (5)$$

где  $S = \pi d^2 / 4$  – площадь поперечного сечения трубопровода;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкого метана.

Коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку определяется по формуле [5]

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{нар} D} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_{вн} d}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{нар}$ ,  $\alpha_{вн}$  – коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях трубопровода соответственно;  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции.

Режим течения жидкого метана определяется числом Рейнольдса. В качестве примера для трубопровода диаметром  $d = 0,03$  м при расходе топлива  $G = 5,1 \cdot 10^{-3}$  кг/с и динамической вязкости жидкого метана  $\mu_{ж} = 105$  мкПа·с  $Re = 4G / (\pi d \mu_{ж}) = 4 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3} / (3,14 \cdot 0,03 \cdot 105 \cdot 10^{-6}) \approx 2062$ .

Это подтверждает вязкостный режим течения. Кроме того, с учетом перепада температур  $\Delta T$  в жидком метане, вызванного конвективным теплопереносом [3], приближенная оценка среднего коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности определяется из вязкостно-гравитационного режима течения по формуле [5]

$$\overline{Nu} = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,33} (Gr Pr)^{0,1}, \quad (7)$$

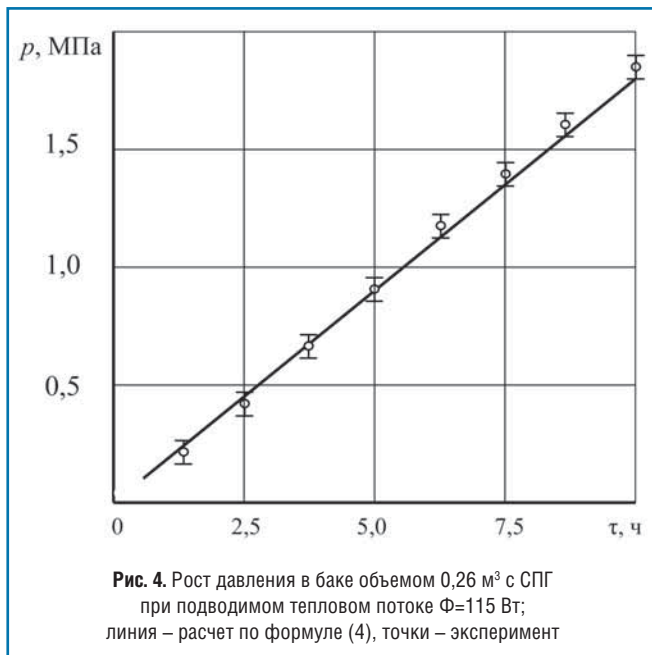
где  $Pr = \nu_{ж} / a_{ж}$  – число Прандтля;  $Gr = g \beta d^3 \Delta T / \nu_{ж}^2$  – число Грасгофа;  $\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкого метана;  $a_{ж} = \lambda_{ж} / (\rho_{ж} c_{ж})$  – коэффициент температуропроводности жидкого метана;  $\lambda_{ж}$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $c_{ж}$  – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная массовая теплоемкость;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкого метана;  $\Delta T$  – разность температур в жидком метане и на внутренней поверхности трубопровода.

Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубопровода зависит от режима течения и может быть найден по формуле

$$\alpha_{вн} = \overline{Nu} \lambda_{ж} / d. \quad (8)$$



Рис. 3. Внешний вид криобака с наклеенными датчиками



Полученные соотношения описывают рост давления в закрытом трубопроводе при заданном расходе жидкого метана в зависимости от свойств теплоизоляции и условий внешнего теплообмена.

Проверку адекватности математической модели роста давления в сжиженном газе проводили на стенде (рис. 2), который включает автозаправщик или заправочную емкость 1, криобак 9, датчики предельного заполнения 12 и давления 7, трубку для заполнения сжиженным газом 10, вентили запорные 3, 16, электропневмоклапаны 2, 15, манометры 4, 14, предохранительную мембрану 6 и трубопроводы. Датчик предельного заполнения 12 служит для определения окончания момента заправки, соответствующего наполнению криобака. Трубку 8 применяют для отвода (дренаж) из криобака испарившегося газа. Для предотвращения опасного увеличения давления в криобаке служит технологическая линия, состоящая из датчиков давления 7, вентиля 5 и мембраны 6. Трубка 13 предназначена для слива сжиженного газа 11 из криобака. Пневмоэлектроклапаны 2, 15 установлены для дистанционного управления системой.

Криобак (рис. 3) изготовлен из стали и обмотан органо-пластиком. В качестве теплоизоляционного материала использовано муллитокремнеземистое волокно. Во время испытаний при атмосферном внешнем давлении и температуре окружающей среды 20±5 °С бак помещался в алюминиевый кожух.

Методика проведения эксперимента предполагает подготовку системы измерений к испытаниям, проверку установки на герметичность, предварительное охлаждение криобака жидким метаном до равновесного состояния и, наконец, его заполнение. Измерительную информацию регистрировали датчики температуры, давления и деформации телеметрической станции с микропроцессором.

Результаты эксперимента (рис. 4) подтвердили, что теплоприток от окружающего воздуха к теплоизолированному

криобаку вызывает повышение давления в нем через 10 ч от первоначального 0,1 до 18 МПа. Расчетный анализ роста давления по формуле (4) при исходных данных (табл. 1) подтверждает адекватность теоретического анализа в указанном интервале давлений.

Рассмотрим теплообмен в магистрали питания двигателя автомобиля типа КАМАЗ, трубопровод которого изолирован пенополиуретаном. При исходных данных, представленных в табл. 2, режим течения СПГ в магистрали вязкостно-гравитационный:

$$Re = 2062; Pr = 0,24 \cdot 10^{-6} / 0,14 \cdot 10^{-6} = 1,71,$$

$$\text{при } \Delta T=2\text{K } Gr = 9,81 \cdot 65 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03^3 \cdot 2 / (0,24 \cdot 10^{-6})^2 = 6 \cdot 10^7.$$

В соответствии с уравнением (7) число Нуссельта  $\overline{Nu} = 0,15 \cdot 2062^{0,33} \cdot 1,71^{0,33} (6 \cdot 10^7 \cdot 1,71)^{0,1} = 14,0$ , а коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубопровода  $\alpha_{\text{вн}} = 14,0 \cdot 0,207 / 0,03 = 96,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  значительно превышает коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубопровода, который оценивается значением  $\alpha_{\text{нар}} \approx 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Таблица 1

### Характеристики СПГ в условиях эксперимента

Параметр	Значение
Объем криобака, $V, \text{ м}^3$	0,26
Плотность метана, $\text{кг}/\text{м}^3$ газообразного, $\rho_g$ жидкого, $\rho_{\text{ж}}$	82,1 422
Удельная теплота испарения, $Q, \text{ кДж}/\text{кг}$	511
Температура, К кипения, $T_0$ окружающей среды, $T_c$	111,7 293
Подводимый тепловой поток, $\Phi, \text{ Вт}$	115
Масса моля метана, $M, \text{ кг}/\text{кмоль}$	0,016
Универсальная газовая постоянная, $R, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$	8,314

Таблица 2

### Характеристики теплообмена в трубопроводе с СПГ [6]

Параметр	Значение
Диаметр трубопровода, м внутренний, $d$ внешний, $D$	0,03 0,11
Длина магистрали трубопровода, $L, \text{ м}$	1
Массовый секундный расход, $G, \text{ кг}/\text{с}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость жидкого метана, $c_{\text{ж}}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	3,41
Коэффициент теплопроводности жидкого метана, $\lambda_{\text{ж}}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,207
температуропроводности жидкого метана, $a_{\text{ж}}, \text{ м}^2/\text{с}$	$0,14 \cdot 10^{-6}$
кинематической вязкости жидкого метана, $\nu_{\text{ж}}, \text{ м}^2/\text{с}$	$0,24 \cdot 10^{-6}$
объемного расширения жидкого метана, $\beta, \text{ К}^{-1}$	$65 \cdot 10^{-4}$
теплопроводности теплоизоляции, $\lambda_{\text{из}}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,03
теплоотдачи на наружной поверхности трубопровода, $\alpha_{\text{нар}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	5

В этих условиях для пенополиуретановой изоляции  $\lambda_{из} = 0,03$  Вт/(м·К) коэффициент теплопередачи (6) составит

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{5 \cdot 0,11} + \frac{1}{2 \cdot 0,03} \ln \frac{0,11}{0,03} + \frac{1}{96,6 \cdot 0,03}} = 0,042 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

а удельный тепловой поток на 1 м трубопровода –  $\Phi/L = K_i(T_c - T_0) = 0,042(293 - 111,7) = 7,6$  Вт/м.

В режиме ожидания при остановке подачи питания СПГ в двигатель подводимый тепловой поток для трубопровода длиной  $L=1$  м составит  $\Phi \approx 7,6$  Вт. Расчетное избыточное давление в трубопроводе объемом  $V = \pi d^2 L/4 = 3,14 \cdot 0,03^2 \cdot 1/4 = 7,07 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>, которое в соответствии с уравнением (4) увеличивается по линейному закону, возрастет в два раза уже через время

$$\tau = \frac{pMV}{RT_0} \cdot \frac{Q}{\Phi} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,016 \cdot 7,07 \cdot 10^{-4} \cdot 511 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 111,7 \cdot 7,6} = 164 \text{ с} \approx 2,7 \text{ мин.}$$

Предложенная математическая модель позволяет адекватно описывать рост давления в теплоизолированном трубопроводе с СПГ в пределах от 0,1 до 1,8 МПа и может оказаться полезной для проектирования параметров тепловой изоляции, режимов питания двигателя с криогенным топливом в конкретных условиях теплоизоляции, прогнозирования давления в магистрали при аварийных режимах.

*Статья выполнена в рамках работ по Постановлению Правительства № 218 о создании высокотехнологичных производств.*

## Литература

1. **Пронин Е.Н.** Природный газ в моторах – топливо XXI века // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 2 (2). – С. 9-12.
2. **Морев А.И., Ерохов В.И.** Эксплуатационное и техническое обслуживание газобаллонных автомобилей. – М.: Транспорт, 1988. – 184 с.
3. **Цаплин А.И., Бочкарев С.В., Селезнев С.П.** Разработка математической модели бездренажного хранения СПГ // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 2 (2). – С. 30-33.
4. **Цаплин А.И., Бочкарев С.В.** Методика теплового расчета перевозчика сжиженного природного газа // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 2 (8). – С. 70-73.
5. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3, М.: Энергия, 1975. – 488 с.
6. **Загорученко В.А., Журавлев А.М.** Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. – М.: Изд-во Госстандарт СССР, 1969. – 236 с.



## Требования по подготовке статей к опубликованию в журнале

В связи с тем, что Международный научно-технический журнал Национальной газомоторной ассоциации «Транспорт на альтернативном топливе» включен в 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, CMYK) – 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).

## Развитие технологий крупнотоннажного производства СПГ

**Е.Б. Федорова,**

доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, к.т.н.

В статье анализируются два пути развития крупнотоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ) – экстенсивный, связанный с увеличением масштабов производства, и интенсивный, основанный на совершенствовании существующих технологий сжижения природного газа, оптимизации элементов технологических процессов. В экстенсивном развитии производства СПГ основную роль сыграли производительность компрессоров и теплообменников, мощность компрессорных приводов. Производительность отдельных технологических линий не может расти бесконечно, поэтому в настоящее время крупнотоннажное производство СПГ должно развиваться за счет внедрения энергоэффективных технологий и оборудования.

**Ключевые слова:** СПГ, крупнотоннажное производство СПГ, технологии сжижения природного газа.

## Development of LNG Large-Scale Production Technologies

**E.B. Fedorova**

The article analyzes two patterns of large-scale production of liquefied natural gas - an extensive, associated with increasing production scale, and intensive, based on the improvement of existing natural gas liquefaction technologies, optimization of process parts. Key factors of the extensive LNG production development is capacity of compressors and heat exchangers, the power of compressors drivers. Capacity of LNG trains can not grow indefinitely, so at present LNG large-scale production have to be developed through the introduction of energy efficient technologies and equipment.

**Keywords:** LNG, large-scale LNG production, natural gas liquefaction technologies.

**В**стоимости завода СПГ наибольшая часть затрат (30-40 %) приходится на технологический процесс охлаждения и сжижения природного газа, включающий предварительное охлаждение, выделение высококипящих компонентов ( $C_2+$ ), охлаждение и конденсацию в основном криогенном теплообменнике. На всех заводах СПГ он объединен в технологическую линию,

оборудование которой оказывает основное влияние на формирование себестоимости СПГ, – это компрессоры с приводами, системы внешнего охлаждения циклов и многопоточные криогенные теплообменники.

Для снижения себестоимости СПГ существует два пути: экстенсивный и интенсивный. Экстенсивный путь – это рост производительности

отдельной технологической линии, увеличение масштабов производства. Интенсивный путь заключается в оптимизации существующих технологий и оборудования.

### Экстенсивное развитие технологий

За пятьдесят с лишним лет существования производства СПГ прослеживается четкая тенденция экстенсивного развития. Мощность единичных технологических линий выросла с 0,3 млн т/год (Арзев в Алжире, 1964 г.) до 7,8 млн т/год (Катар, 2011 г.).

В экстенсивном развитии технологий сжижения природного газа ключевую роль сыграли три элемента:

- производительность компрессоров;
- приводы компрессоров;
- конструкции теплообменников как основных аппаратов для охлаждения и конденсации природного газа в процессе сжижения.

На первом в мире крупнотоннажном заводе в Алжире (1964 г.) использовалась технология каскадного сжижения, предложенная совместно компаниями Technip и Air Liquide. Эта технология включает три отдельных цикла охлаждения: первый на пропане охлаждает газ до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего этиленовый цикл снижает температуру природного газа приблизительно до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и, наконец, метановый цикл охлаждения конденсирует природный газ, превращая его в жидкость, готовую к транспортировке при  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На заводе в Арзеве использовались паровые турбины в качестве привода компрессоров для каждого холодильного цикла и морская вода для внешнего охлаждения конденсаторов. Для пропанового цикла охлаждения применялись теплообменники кожухотрубчатого типа, а для этиленового и метанового циклов – спирально-витые. Общая мощность

завода составляла 0,9 млн т/год СПГ. Завод до настоящего времени находится в эксплуатации.

Завод СПГ на Аляске с единственной технологической линией, производивший 1,5 млн т/год, использовал технологию каскадного процесса компании Phillips (Phillips Cascade), похожую на технологию алжирского завода, но значительно большей производительности: мощность одной технологической линии на Аляске в пять раз выше, чем в Арзеве. На Аляске впервые использовались газовые одновальные турбины в качестве приводов компрессоров и пластинчато-ребристые теплообменники, также разработанные компанией Phillips.

Завод СПГ в Марса-эль-Бреге (Ливия) первым использовал более простой, хотя и менее эффективный, однопоточный холодильный цикл на смешанном хладагенте (SMR), разработанный компанией Air Products and Chemicals, Inc. (APCI). Основной целью разработки было сокращение числа компрессоров и теплообменников на одну технологическую линию. Завод состоял из двух технологических линий по 0,75 млн т/год, каждая из которых включала спирально-витой главный криогенный теплообменник (МСНЕ). Это было серьезное отступление от классической технологии сжижения природного газа. Вместо каскадного процесса, использующего отдельные холодильные циклы на чистых хладагентах со ступенчатым понижением температуры природного газа, технология SMR использует однопоточный холодильный цикл со смесью углеводородов (метана, этана, пропана и т.п.) в качестве хладагента (СХА). Конденсация компонентов хладагента так же, как и их испарение, происходит в одном холодильном цикле в широком интервале температур до необходимых  $-160$  °С. Впервые схему однопоточного цикла глубокого

охлаждения разработал советский ученый А.П. Клименко еще в 1956 г.

На заводе СПГ в Скикде (Алжир) также использовалась технология SMR, но усовершенствованная компанией Technip и названная TEALARC. Здесь однопоточный цикл охлаждения использует два уровня давления хладагента. Завод состоял из трех технологических линий на 1 млн т/год каждая, что на 33 % мощнее линий в Марса-эль-Бреге.

На заводе в Лумуте (Бруней) основные инновации заключались в применении цикла предварительного пропанового охлаждения перед основным циклом охлаждения на СХА. Это было первое применение процесса С3-MCR, разработанного компанией APCI и до сих пор являющегося самым распространенным в мире. Термодинамическая эффективность этого процесса существенно выше эффективности процесса SMR. Завод в Лумуте был вторым, где использовались новейшие спирально-витые алюминиевые теплообменники компании APCI. Производители оборудования окончательно пришли к выводу, что предельный размер главного криогенного теплообменника (МСНЕ) определял индивидуальную производительность технологической линии. На этом заводе компрессоры приводились в движение паровыми турбинами, а в качестве внешнего охлаждения холодильных циклов использовалось водяное охлаждение.

Первые две технологические линии в Абу-Даби были по 1,25 млн т/год. В Индонезии производительность каждой из двух технологических линий выросла до 2 млн т/год за счет увеличения размеров главного криогенного теплообменника (МСНЕ) и паровых турбин.

В Аруне (Индонезия) для слегка измененной версии универсального в то время процесса APCI С3-MCR впервые после Аляски

использовались газовые турбины, но усовершенствованной конструкции. Первые газовые турбины типа GE Frame 5C (General Electric™) с двойным валом облегчали запуск и обеспечивали большую эксплуатационную гибкость. Подключение газовой турбины непосредственно к валу компрессора упростило конструкцию и повысило эффективность использования топлива, а также снизило капитальные вложения в результате отсутствия парогенерирующего оборудования и установок очистки воды в паровом цикле.

На заводе в Бинтулу (1983 г.) в последний раз использовались паровые турбины для привода компрессоров, при этом производительность отдельной технологической линии выросла до 2,1 млн т/год. Такой рост в 80-е гг. прошлого века произошел в первую очередь за счет увеличения размеров основного оборудования, что стало возможным благодаря опыту эксплуатации и обработке данных, накопленным при эксплуатации предыдущих заводов СПГ. Например, на заводе СПГ в Брунее применялись компрессоры с паровыми турбинами мощностью 20 МВт. Поставщики оборудования для первого завода СПГ в Малайзии смогли уверенно увеличить мощность паровых турбин до 35 МВт. Кроме того, компания APCI приобрела ценный опыт производства оборудования для заводов СПГ 70-х гг. и смогла увеличить размеры основных криогенных теплообменников.

Основными инновациями 80-х гг. стала полная замена водяного охлаждения на воздушное, впервые примененное в Австралии на заводе North West Shelf (NWS). Воздушное охлаждение было использовано в связи с экологическими ограничениями на применение водяного охлаждения в этом регионе и стало доминирующим в



последующих проектах. Здесь также использовались газовые турбины.

Одной из главных задач 90-х гг. стала максимизация мощности, передаваемой с вала газовой турбины на компрессор, и дальнейшее увеличение производительности технологических линий. Существенным шагом вперед стало применение на втором малазийском заводе Бинтулу MLNG II (1995 г.) массивных газовых турбин GE Frame 7 и GE Frame 6 (таблица). Один вал турбины Frame 7 передавал крутящий момент на осевой и центробежный компрессоры холодильного цикла со смешанным хладагентом. Такие же турбины использовались при строительстве заводов в Нигерии и Омане в новом четырехступенчатом цикле предварительного пропанового охлаждения. Мотивацией к использованию турбин GE Frame 7 с одним валом стало снижение на 15-20 % капитальных затрат на единицу мощности и на 10-15 % потребления топлива за счет уменьшения количества турбин.

Новые идеи были использованы на заводе в Тринидаде (1999 г.). К этому времени компания ConocoPhillips усовершенствовала каскадный процесс сжижения, впервые использовавшийся на Аляске в 1969 г., и поставила на завод в Тринидаде свою технологию оптимизированного каскадного процесса – ConocoPhillips Optimized Cascade® [1]. Эта технология построена на концепции надежности «двух линий

в одной» и по производительности сразу сравнялась с процессом APCI C3-MCR. В то время нормой при строительстве заводов СПГ было сооружение сразу двух-трех технологических линий во избежание перебоев в поставках СПГ в случае выхода из строя какого-либо оборудования. Проект Atlantic LNG в Тринидаде показал возможность и, при определенных условиях, экономическую состоятельность завода с единственной технологической линией, обеспечивающей надежность поставок СПГ и более низкие капитальные затраты. Концепция проста: более необходимое и менее надежное оборудование (например, турбины и компрессоры) дублируется, а остальное более надежное оборудование, такое как аппараты воздушного охлаждения или пластинчатые теплообменники, – не дублируется [2].

С началом нового века технологические линии по производству СПГ продолжили наращивать свои мощности. С одной стороны, на строящихся заводах по-прежнему применяли технологию APCI C3-MCR, но в качестве приводов компрессоров цикла предварительно пропанового охлаждения стали использовать газовую турбину GE Frame 7EA. Это позволило повысить производительность технологических линий (предыдущие модели газовых турбин Frame 5 и Frame 6 обладали меньшей мощностью, см. таблицу). Так было на заводах

в Малайзии – MLNG III (2003 г.), две линии по 3,8 млн т/год, в Австралии – Karratha Gas Plant (North West Shelf Australia LNG), линия 4 (2004 г.) и линия 5 (2008 г.) по 4,4 млн т/год.

В некоторых проектах этого периода перешли полностью с водяного на воздушное охлаждение.

С другой стороны, первое десятилетие нового века ознаменовалось рождением нескольких новых технологий сжижения природного газа.

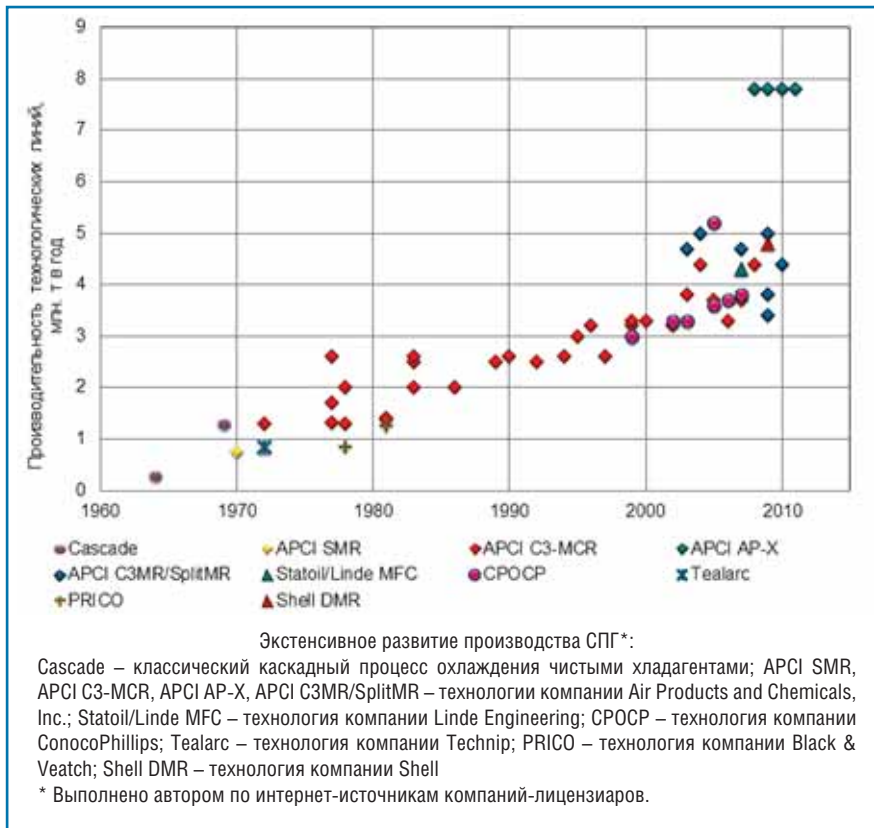
В 2003 г. при строительстве двух новых производственных линий в Катаре на заводе Ras Gas II появился первый усовершенствованный вариант процесса C3-MCR компании APCI – процесс C3MR/SplitMR™ [4]. Суть инновации заключалась в том, что компрессор цикла предварительного пропанового охлаждения и один из компрессоров основного цикла со смешанным хладагентом приводились в движение приводом одной газовой турбины при полном использовании ее мощности. Это позволило приблизить производительность по СПГ одной линии к уровню 5 млн т/год.

Одновременно с компанией APCI компания ConocoPhillips работала над увеличением производительности оптимизированного каскадного процесса. Поднять производительность четвертой технологической линии в Тринидаде до 5,2 млн т/год позволили компании следующие технические решения:

- использование трех компрессоров вместо двух в пропановом и этиленовом циклах;
- добавление промежуточного охлаждения в компрессоры метанового цикла;
- включение дополнительных конденсаторов пропана в пропановый цикл охлаждения;
- усовершенствование конструкции лопаток компрессорных колес [5].

**Мощность газовых турбин [3]**

Модель GE Frame	Мощность, кВт
5 B	22 300
5 C	24 200
5 D	27 900
6	37 200
7 EA	73 500
9	106 200



В свою очередь компания Linde Engineering разработала собственную конструкцию высокопроизводительных спирально-витых теплообменников, которые были использованы на заводе North West Shelf (NWS) в Австралии при строительстве четвертой и пятой линий (по 4,4 млн т/год) и на Сахалине (4,9 млн т/год) [6]. Кроме того, компания Linde Engineering на норвежском заводе СПГ Сновит, начавшем работу в 2007 г., применила свой собственный каскадный процесс Multi Fluid Cascade (MFC) и свои теплообменники. В процессе MFC – три цикла охлаждения: предварительный, основной и переохлаждение, каждый из которых использует смешанный хладагент. В качестве приводов компрессоров компания Linde Engineering впервые в истории производства СПГ использовала электродвигатели. Производительность единственной технологической линии составила 4,1 млн т/год.

Для завода СПГ на Сахалине компания Shell предложила новую

технология сжижения Double Mixed Refrigerant Liquefaction (DMR) – со смешанными хладагентами и в цикле предварительного охлаждения, и в цикле основного охлаждения и сжижения. Производительность каждой из двух технологических линий завода составила 4,8 млн т/год.

В 2002 г. компания APCI анонсировала новую модификацию процесса C3-MCR – процесс AP-X™, который сочетает технологию C3-MCR с заключительным азотным циклом переохлаждения с детандером, а в качестве приводов компрессоров используются газовые турбины Frame 9E мощностью до 126 МВт. Как одновальные турбины эти же модели требуют дополнительного устройства для запуска – стартера, который может быть электродвигателем, паровой турбиной или небольшой газовой турбиной (например, для запуска одновального Frame 9 потребуется Frame 5) [7]. Постоянное использование таких стартеров приводит к увеличению энергопотребления.

Добавление азотного цикла в процессе AP-X™ на 11 % увеличило производство СПГ [3]. Использование газовых турбин большой мощности в сочетании с дополнительным холодильным циклом позволило поднять единичную производительность технологических линий до 7,8 млн т/год на заводах RasGas (линии 6 и 7), Qatar Gas II, Qatar Gas III и Qatar Gas IV в Катаре. С запуском завода Qatar Gas IV в феврале 2011 г. Катар стал крупнейшим производителем СПГ в мире: суммарная мощность его заводов достигла 77,1 млн т/год [8].

На протяжении первых 40 лет производительность росла количественно с каждым новым проектом (рисунок), но количественный рост не может продолжаться бесконечно. Хотя линии большой производительности позволяют снизить себестоимость СПГ, с началом XXI в. их мощности стали соизмеряться с размерами газового месторождения и рынками сжиженного природного газа. Дальнейшее развитие технологий производства СПГ, помимо количественного роста единичной производительности, должно идти по интенсивному пути за счет повышения эффективности технологий и снижения энергозатрат.

### Интенсивное развитие технологий

Один из основных путей интенсивного развития технологий сжижения природного газа – это оптимизация состава смешанного хладагента. Использование в процессах сжижения углеводородных смесей в качестве хладагента позволяет облегчать условия эксплуатации для компрессоров. В этом направлении ведутся работы всеми компаниями, разрабатывающими технологии производства СПГ. Оптимальный состав СХА зависит от многих факторов, среди которых – состав сырьевого газа,

климатические условия, в которых осуществляется технологический процесс, производительность технологической линии и др. Поэтому СХА подбирается для каждой технологической линии индивидуально.

В частности, при исследовании процесса APCI C3-MCR с целью его оптимизации для одного из заводов в Катаре выяснилось, что увеличение содержания метана в смешанном хладагенте снижает нагрузку на компрессор цикла предварительного пропанового охлаждения, но при концентрации метана выше некоторого значения может снизиться общая эффективность процесса [3]. Кроме того, на производительность пропанового компрессора оказывает влияние температура предварительного охлаждения, а на производительность компрессора основного цикла охлаждения – температура на выходе из главного криогенного теплообменника.

В преддверии реализаций крупных российских СПГ-проектов, таких как Штокман или Ямал, компании-лицензиары предлагают решения по адаптации существующих технологий к условиям арктического климата. Очевидно, что в процессе предварительного охлаждения пропан необходимо заменять смесью более легких компонентов, например, этана и пропилена (APCI) или этана и пропана (Shell). Замена пропана смешанным хладагентом на стадии предварительного охлаждения позволяет увеличить производительность на 5-10 % при использовании стандартного для технологического процесса оборудования [9].

Еще одним способом повышения энергоэффективности процессов сжижения является замена клапанов Джоуля–Томсона на жидкостные или двухфазные детандеры. Изначально конструкции детандеров не допускали конденсации

жидкости более 5 % в процессе расширения, но развитие инженерии позволило создать детандер с двухфазным потоком на выходе. Первые жидкостные детандеры появились на заводе СПГ MLNG Dua в Малайзии в 1996 г. На выходе из блока сжижения, где рабочее давление остается на уровне 4,0...4,5 МПа, замена дросселей высокого давления на жидкостные детандеры позволяет увеличить количество сжиженного газа и вернуть часть энергии для производства электричества.

Жидкостные детандеры могут быть размещены в двух или трех местах технологической линии сжижения газа:

- в контурах холодильных агентов перед входом в главный криогенный теплообменник (промежуточные и конечные этапы);
- в контуре СПГ на выходе из главного криогенного теплообменника.

В среднем, детандеры производят дополнительно около 4 % энергии [10].

## Литература

1. The ConocoPhillips Optimized Cascade Process. ConocoPhillips Liquefied Natural Gas. [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 20.02.2011 г.] [http://lnglicensing.conocophillips.com/EN/lng\\_tech\\_licensing/cascade\\_process/Pages/index.aspx](http://lnglicensing.conocophillips.com/EN/lng_tech_licensing/cascade_process/Pages/index.aspx).
2. **Eaton A., Hernandez R., Risley A., Hunter P., Avidan A., Duty J.** LOWERING LNG UNIT COSTS THROUGH LARGE AND EFFICIENT LNG LIQUEFACTION TRAINS – WHAT IS THE OPTIMAL TRAIN SIZE? *ConocoPhillips Liquefied Natural Gas. Publications.* [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 09.03.2011 г.] <http://lnglicensing.conocophillips.com/EN/publications/documents/aiche.pdf>.
3. **Paradowski H.** PROPANE PRECOOLING CYCLES FOR INCREASED LNG TRAIN CAPACITY. *Norwegian University of Science and Technology.* [В Интернете] 2009 г. [Цитировано: 14.06.2009 г.] <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/LNG%20Conferences/2004/Data/Papers-PDF/PS2-3-Paradowski.pdf>.
4. Baseload Plants Using MCR Process and Equipment. *Air Products and Chemicals, Inc.* [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 22.01.2011 г.] <http://www.airproducts.com/LNG/Experience/BaseloadPlants.htm>.
5. **Diocee T.S., Hunter P., Eaton A., Avidan A.** Atlantic LNG Train 4 “The World’s Largest LNG Train”. (LNG14 – 2004). *ConocoPhillips Liquefied Natural Gas. Publications.* [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 02.03.2011 г.] <http://lnglicensing.conocophillips.com/EN/publications/documents/atlanticttrain.pdf>.
6. Coil-Wound Heat Exchangers. *Linde Engineering.* [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 08.03.2011 г.] [http://www.linde-engineering.com/en/images/P\\_3\\_1\\_e\\_09\\_150dpi19-5793.pdf](http://www.linde-engineering.com/en/images/P_3_1_e_09_150dpi19-5793.pdf).
7. **Meher-Homji C.B. и др.** GAS TURBINES AND TURBOCOMPRESSORS FOR LNG SERVICE. *TURBOLAB - Texas A&M University System Turbomachinery Laboratory.* [В Интернете] 2011 г. [Цитировано: 15.03.2011 г.] <http://turbolab.tamu.edu/uploads/files/papers/t36/T36-TUT02.pdf>.
8. Home page. *Qatargas.* [В Интернете] 2010 г. [Цитировано: 07.03.2011 г.] <http://www.qatargas.com.qa/>.
9. **Pillarella, Mark R. и др.** LARGE LNG TRAINS: DEVELOPING THE OPTIMAL PROCESS CYCLE. *Air Products and Chemicals, Inc.* [В Интернете] 1996-2011 г. [Цитировано: 20.04.2011 г.] <http://www.airproducts.com/NR/rdonlyres/A02F12BB-3DDC-404D-B5E5-DA229DB35DC8/0/LargeLNGTrains.pdf>.
10. **Morin P.** The Liquefaction Plant. *Technoscoop.* 2005 г., Т. 29, 04.
11. **Bosma P., Nagelvoort R.K..** Liquefaction Technology; Developments through History. *Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium.* [В Интернете] 2009 г. [Цитировано: 09.02.2011 г.] <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/gas-processing-doha-2009/fscommand/p03.pdf>.

## СССР: Газовые автомобили в Великой Отечественной войне

Работы по газификации автотранспорта начались в СССР еще в 20-х гг. XX в. по двум основным направлениям: газобаллонные и газогенераторные автомобили. Двигатели первых работали на природном газе, хранящемся в сосудах высокого давления, а двигатели вторых использовали газ, генерируемый прямо на борту машины из дров, угольных брикетов, торфа. Но в основном это были так называемые «чурочки». Газогенераторное направление в течение многих лет оставалось приоритетным.

**П**ервые в СССР испытания автомобиля с газогенераторной установкой В.С. Наумова состоялись в 1928 г. В 1934 г. был проведен первый испытатель-

ный пробег газогенераторных автомобилей по маршруту Москва – Ленинград – Москва, в котором участвовали автомобили ГАЗ-АА и ЗИС-5 с установками,

спроектированными в НАТИ (Научно-исследовательский тракторный институт). А уже в 1936 г. Советское правительство принимает решение о массовом производстве газогенераторных автомобилей. В эти же годы осваиваются газогенераторные модификации тракторов для лесного и сельского хозяйства. В марте 1939 г. XVII съезд ВКП(б) поставил перед машиностроителями задачу: «Перевести на газогенератор все машины на лесозаготовках, а также значительную часть тракторного парка сельского хозяйства и автомобильного парка».

К началу войны в отрасли экономики стали поступать

Параметры	Автомобили		
	ГАЗ-42	ГАЗ-44	ЗИС-30
Год начала выпуска	1939	1939	1941
Тип	Грузовой, газогенераторный	Грузовой, газобаллонный	Грузовой, газобаллонный
Грузоподъемность, кг	1200	1100	2500
Число мест в кабине	2	2	2
Масса автомобиля без нагрузки, кг	2050	2230	3600
Двигатель	Бензиновый, 4-тактный, 4-цилиндровый	Бензиновый, 4-тактный, 4-цилиндровый	Газовый, 4-тактный, 6-цилиндровый
Диаметр цилиндра/ход поршня, мм	98,43/107,95	98,43/107,96	101,6/114,3
Рабочий объем, л	3,28	3,28	5,55
Степень сжатия	6,5	4,6	5,3
Максимальная мощность, л.с.	30	42	73
Максимальный крутящий момент, кг·м	11	14	28,5
Частота вращения, мин <sup>-1</sup> при максимальной мощности при максимальном крутящем моменте	2400 1200	2400 1400-1500	2300 800-1000
Максимальная скорость с полной нагрузкой по шоссе, км/ч	50	65	60
Расход топлива на 100 км пути с нагрузкой по шоссе, л	60 кг древесных чурок	20 м <sup>3</sup> метана; 40 м <sup>3</sup> светильного или коксового газа	36 м <sup>3</sup> метана; 70 м <sup>3</sup> светильного или коксового газа
Запас хода с полной нагрузкой по шоссе, км	80	300 или 150 в зависимости от газа	240 или 120 в зависимости от газа



Газогенераторный ГАЗ-42

газогенераторные автомобили ЗИС-13, ЗИС-21, ГАЗ-42, тракторы ЧТЗ и ХТЗ. В военные годы ЗИС-21 и ГАЗ-42 эксплуатировались не только в тылу, но и на фронтах. В частности, половина транспортных автомобилей блокадного Ленинграда, Ленинградского фронта и Краснознаменного Балтийского флота была оснащена газогенераторными установками (таблица). К концу войны в СССР эксплуатировалось 200 тыс. газогенераторных автомобилей, тракторов, передвижных электростанций, катеров, мотовозов и других установок.

Тема использования газогенераторных автомобилей развивалась не только в СССР. К 1941 г. на генераторном газе в Европе работали почти полмиллиона машин! Из них 300 тыс.

только в Германии. Этот вид моторного топлива применяли в Австралии, Великобритании, Индии, Китае, Финляндии, Фран-



Газобаллонный ЗИС-30

ции, Швеции, Японии. Газогенераторные автомобили до сих пор ездят по дорогам Северной Кореи.



Газобаллонный ГАЗ-44

Продолжались разработки и в области газобаллонных автомобилей. Так, в 1942 г. обком КПСС Саратовской обл. принял решение о переоборудовании грузовых автомобилей на природный газ. Работа была организована так, что всего через 1 мес. городская техника тылового назначения в Саратове стала работать на местном метане, а бензин пошел на нужды фронта.

Не только разработкой газогенераторных и газобаллонных автомобилей занимались советские инженеры в годы войны. Младший воентехник полка

аэростатов заграждения ПВО Ленинграда Борис Щелищ разработал технологию применения водорода в качестве моторного топлива для автомобильных бензиновых двигателей, использовавшихся как приводы к лифтовым лебедкам для выборки аэростатов. На водород было переведено в общей сложности 500 автомобильных двигателей. Это был первый и до сих пор единственный в мировой практике случай массового применения водорода в автомобильных двигателях.

МЕТАИнфо

## Международная газовая выставка Gas Show 2011 года в Варшаве

**11** -12 марта 2011 г. в крупнейшем Варшавском международном выставочном комплексе EXPO XXI была развернута экспозиция, посвященная достижениям на рынке автомобильного газобаллонного оборудования (ГБО) и автогазозаправочной техники, – газовая выставка Gas Show 2011. Это мероприятие, проводимое

системами питания. Все фирмы, представившие такое оборудование, предлагают использование газа как добавку к дизельному топливу в основном для улучшения экологических и динамических показателей автомобилей.

Постепенно внедряются газобаллонные автомобили (ГБА) с ГБО, установленным на сборочном конвейере

выставке газовый Volkswagen Commercial – Caddy, хорошо зарекомендовавший себя и в России, производится в Польше. Рядом с этим автомобилем экспонировалась малогабаритная «домашняя» заправка метаном, которая подключается к газовой магистрали низкого давления. Но основная тенденция – это установка оборудования на автомобили в сервисных предприятиях.

На стендах гостеприимных дилеров и производителей можно было познакомиться с современными комплектами и элементами ГБО. Системы распределенного впрыска газа четвертого поколения прочно заняли основное место в номенклатуре предлагаемой продукции. Тенденция вытеснения обычных блоков управления системами с функциями взаимодействия с Европейской бортовой диагностической системой (EOBD или OBD-II) прочно закрепилась. Сегодня можно уверенно сказать, что блоки OBD завоевали европейский рынок ГБО.

Введение в прошлом году в России нового технического регламента «Безопасность колесных транспортных средств» предусматривает соответствие ГБА 115 правилам ЕЭК ООН.



На стенде фирмы Landi Renzo

в Польше в течение 15 лет и ставшее уже традиционным, свидетельствует о постоянном росте интереса к применению газомоторного топлива в этой стране.

На выставке было оформлено более 80 стендов, представлявших продукцию 150 фирм. Среди них ГБО известных крупных голландских, итальянских и польских производителей Vialle, Landi Renzo, BRC, OMVL, Valtek, A.E.B. Emmegaz, AC, Auto Gaz Centrum (AG), Autronic, Elpigaz, Vitkovice Milmet, Versus Gas, Stako и др.

Интерес к выставке, как и в предыдущие годы, не ослабевает несмотря на посткризисное время. Традиционным стало присутствие большого количества русскоговорящих специалистов из России, СНГ и стран Балтии.

На открытой площадке выставки были продемонстрированы микроавтобусы с газодизельными

ре завода. Заводская установка ГБО существенно повышает надежность эксплуатации ГБА. Показанный на



На выставке



Экспозиция газодизельных автомобилей

И блоки EOBD позволяют эффективно решить эту задачу.

Многие системы управления четвертого поколения оснащаются адаптерами Wi-Fi, позволяющими значительно упростить коммуникацию с диагностируемым газобаллонным автомобилем.

Ряд фирм показал комплекты ГБО с непосредственным впрыском бензина. Для управления подачей газа в этих комплектах используются, например, блоки DPI, которые позволяют существенно расширить сферу применения газообразных топлив за счет переоборудования двигателей автомобилей с прямым впрыском – FSI.

Большой интерес вызвала новинка фирмы Vialle – система пятого поколения с распределенным впрыском жидкой фазы газа в камеру сгорания

ДВС и непосредственным впрыском универсальной форсункой, которая может подавать газ или бензин. Штатные бензиновые форсунки впрыскивают газ в сжиженном виде под давлением, создаваемым насосом, который расположен в газовом баллоне. Затем давление газа перед впрыском в камеру сгорания повышается в универсальном топливном насосе.

Инжекторные системы пятого поколения – это технологический прорыв, значительно расширяющий сферы применения альтернативных топлив на автомобилях с непосредственным впрыском бензина экологических стандартов Евро-4 и Евро-5.

Совершенствуется также и сервисное оборудование. В настоящее время ощущается дефицит такой



Блок управления газовой системой питания с функцией взаимодействия с EOBD

продукции. Стенд польской фирмы ABtest позволяет выполнить проверку и настройку газовых форсунок оригинальной конструкции в условиях, близких к эксплуатационным, за счет изменяющихся режимов их работы на стенде.



Автомобиль Škoda Octavia с системой подачи газа непосредственно в цилиндр

Варшавская выставка показала, что в странах Восточной Европы стабильно растет интерес к автомобилям, использующим газовое топливо, и идет активное их совершенствование ведущими фирмами.



У стенда фирмы Elpigaz



Автомобиль Volkswagen Commercial – Caddy заводской сборки, работающий на КПГ; рядом – малогабаритная метановая заправка

## Авторы статей в журнале № 3 (21) 2011 г.

**Акимов Виктор Сергеевич**, студент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, р.т. (499) 263-69-18

**Алексеева Ольга Константиновна**, начальник отдела водородной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н., р.т. 8 (499) 196 95 49, e-mail: alex@hepti.kiae.ru

**Бакиев Тагир Ахметович**, начальник НТЦ ООО «Газпром трансгаз Уфа», р.т. 8 (347) 237-28-88, e-mail: info@ufa-tr.gazprom.ru

**Бочкарев Сергей Васильевич**, д.т.н., профессор Пермского ГТУ, тел./факс (342) 2391200 e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru

**Вакуленико Андрей Вадимович**, инженер МАДИ, р.т. (499) 155 04 64

**Володин Виктор Владимирович**, к.т.н. Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 8-961-845-25

**Девянин Сергей Николаевич**, д.т.н., заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина (МГАУ им. В.П. Горячкина), м.т. 8 917 51-96-394

**Добрынин Владимир Васильевич**, первый заместитель председателя правления ОАО АКБ «Интрастбанк», к.э.н., тел. (495) 234-58-96, e-mail: v.dobrynin@intrustbank.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

**Загорских Борис Павлович**, профессор Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, д.т.н., 8-906-315-02-02

**Изметьев Александр Самуилович**, генеральный директор ООО «Сахаметан», тел. 8-914-227-35-30, e-mail: lzm.a@carat2000.ru

**Карагузов Владимир Иванович**, профессор Омского государственного технического университета, д.т.н., тел. 8-913-971-3715, e-mail: karvi@mail.ru

**Карпов Данила Михайлович**, аспирант МАДИ, р.т. (499) 155-08-80

**Козлов Андрей Викторович**, главный научный сотрудник ФГУП «НАМИ», д.т.н., р.т. (495) 454-01-91

**Козлов Сергей Иванович**, главный научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н., 142217 Московская обл., пос. Развилка, тел. 8 495 719 60 88; e-mail: S\_Kozlov@vniigaz.gazprom.ru

**Коростышевский Исаак Матвеевич**, директор-главный конструктор ООО «НТЦ «Авангард», г. Саратов, ул. Тараса Шевченко, 38/48, кв. 165, р.т. 8 (8452) 47-02-69, м.т. 8 927 621-48-72

**Коцарь Юрий Алексеевич**, профессор, д.т.н., Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 8 927 158-93-42

**Кузнецов Всеволод Егорович**, старший научный сотрудник МАДИ, р.т. (499) 155-04-64

**Лозовецкий Вячеслав Владимирович**, д.т.н., профессор; Московский государственный университет леса, 141018 Мытищи, Московская область, ул. Летная, д. 23, кв. 123. Тел. 581-41-26; e-mail: lozovetsky@mail.ru

**Лукшо Владислав Анатольевич**, заведующий отделом ФГУП НАМИ, и.о. директора ЗАО «Автосистема», к.т.н., р.т. 454-45-51

**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 Юлия Александровна**, аспирант Московского государственного университета леса, 8 (498) 687-37-27

**Нагорнов Станислав Александрович**, д.т.н., заместитель директора по науке Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов Россельхозакадемии (ГНУ «ВИИТН», г. Тамбов), профессор Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ), м.т. 8 915 670-58-29

**Нигматулин Ильдар Дагевич**, аспирант Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, 8-908-553-35-04

**Николаенко Андрей Владимирович**, ректор Московского государственного технического университета «МАМИ», к.э.н., адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, р.т. (495) 223-05-23, доб. 12-01

**Пронин Евгений Николаевич**, заместитель начальника Управления – начальник отдела использования газа в качестве моторного топлива ОАО «Газпром»; руководитель исследовательской группы 5.3 Междонародного 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

**Статкевич Игорь Викторович**, аспирант Российского государственного университета туризма и сервиса, м.т. 8 916 391-29-83

**Теренченко Алексей Станиславович**, заведующий лабораторией ФГУП «НАМИ», к.т.н., р.т. (495) 454-01-91

**Фатеев Владимир Николаевич**, заместитель директора РНЦ «Курчатовский институт», профессор, д.х.н., тел. (499) 196-94-29, e-mail: fat@hepti.kiae.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

**Фомин Валерий Михайлович**, профессор Российского университета дружбы народов (РУДН), д.т.н., р.т. (495) 434-02-12, м.т. 8 915 211-44-15

**Хакимов Ринат Равильевич**, аспирант Российского университета дружбы народов (РУДН), м.т. 8 926 733-58-70

**Хачия Алексей Сергеевич**, профессор МАДИ, к.т.н., e-mail: khach@dv.madi.ru

**Цеплин Алексей Владимирович**, д.т.н., декан факультета Пермского ГТУ, профессор, тел.: (342) 2198212, e-mail: tai@pstu.ru

**Цуладзе Михаил Александрович**, генеральный директор ООО «АЭС-ЭКСПО», тел./факс: (495) 380-21-37, (499) 256-05-44, e-mail: acsexpo@mail.ru

**Чмыханова Светлана Валерьевна**, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды Московского государственного горного университета, доцент, к.т.н., член-корр. РАЕН, р.т. (499) 236-95-22, tchmy@mail.ru

**Шадрин Анатолий Александрович**, профессор Московского государственного университета леса, д.т.н., 8 (495) 605-10-75

**Шевченко Денис Владимирович**, аспирант Российского университета дружбы народов (РУДН), м.т. 8 926 561-25-40

**Шипков Руслан Юрьевич**, исполнительный директор ООО «Сахаметан», тел. (4112) 39-14-79, sakhametani@mail.ru

**Шихов 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-Shikhov@yandex.ru

**Шихов Иван Геннадьевич**, старший научный сотрудник МАДИ, к.т.н., р.т. (499) 155-08-80

## Contributors to journal issue No. 3 (21) 2011

**Akimov Viktor S.**, student of «Piston Engines» department of the Bauman Moscow State Technical University, office phone: +7 (499) 263-69-18

**Alexeeva Olga K.**, Head of department Hydrogen Energy&Plasma Technology Institute, National Research Centre «Kurchatov Institute», Candidate of Physical and Mathematical Sciences, р.т. 8 (499) 196 95 49, e-mail: alex@hepti.kiae.ru

**Bakiev Tagir A.**, Head of Science and Technology Centre Ltd. «Gazprom transgaz Ufa», office phone: +7 (347) 237-28-88, e-mail: info@ufa-tr.gazprom.ru

**Bochkarev Sergey V.**, Dr. Sci. Tech., professor of Perm State Technical University, t/f +7 (342) 2391200, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru

**Chmykhalova Svetlana V.**, candidate of technical science, prof. MSMU, corresponding member RASN, Ltd (Russian Academy of Natural Sciences), office phone: +7 (499) 236-95-22, tchmy@mail.ru

**Devyanin Sergey N.**, Dr. Sci. Tech., 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

**Dobrynin Vladimir V.**, INTRUSTBANK, Joint stock company, Joint stock commercial bank, Vice Chairman, Candidate of Economy, tel. +7 (495) 234-58-96, e-mail: v.dobrynin@intrustbank.ru

**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

**Fateev Vladimir N.**, RRC «Kurchatov Institute» Professor, Deputy Director, tel. +7 499 196 94 29, e-mail: fat@hepti.kiae.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

**Fomin Valery M.**, Dr. Sci. Tech., Professor of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), office phone: +7 (495) 369-90-48, m.t.: +7 915 211-44-15

**Izmetiev Alexander S.**, SAKHOMETAN, Ltd., General Director, tel. 8-914-227-35-30, e-mail: lzm.a@carat2000.ru

**Karaguzov Vladimir I.**, Dr. Sci. Tech., professor of Omsk State Technical University, e-mail: karvi@mail.ru, ph. 8-913-971-3715

**Karpov Danila M.**, Postgraduate MADI, office phone: +7 (499) 155-08-80

**Khachiyun Alexey S.**, cand. sc., professor MADI, e-mail: khach@dv.madi.ru

**Khakimov Rinat R.**, graduate of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), м.т. +7 926 733-58-70

**Korostyshevsky Isaaq M.**, Director, Chief Designer Ltd. «Avangard» (Saratov), office phone: +7 (8452) 47-02-69

**Kotsar Yury A.**, Dr. Sci. Tech., Professor of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, office phone: +7 927 158-93-42

**Kozlov Andrey B.**, Dr. Sci. Tech., Chief Scientist of NAMI, office phone: +7 (495) 454-01-91

**Kozlov Sergey I.**, «Gasprom VNIIGAZ», tel. +7 495 719 60 88, e-mail: S\_Kozlov@vniigaz.gazprom.ru

**Kuznetsov Vsevolod E.**, MADI, chief designer, office phone: +7 (499) 155-04-64

**Lozovetsky Vyacheslav.**, Doctor (Tech.), professor, Moscow State Forest University, phone: 581-41-26, e-mail lozovetsky@mail.ru

**Luksho Vladislav A.**, Head of the Division, NAMI, Acting Director, Avtosistema Ltd., cand. sc., technical sciences, +7 (495) 454-45-51

**Markov Vladimir A.**, PhD, Engng, professor of «Heat Physics» department of the Bauman Moscow State Technical University, phone: +7 917 584-49-54

**Markova Julia A.**, graduate of Moscow State Forest University, phone: +7 (498) 687-37-27

**Nagornov Stanislav A.**, Dr. Sci. Tech., Deputy Director for Science of the Russian Research Institute for the use of technology and products Rosselkhozakademii (Tambov), Prof., Tambov State Technical University, m.t. +7 915 670-58-29

**Nigmatulin Ildar D.**, graduate of the Saratov State Agrarian University named after NI Vavilov, +7-908-553-35-04

**Nikolaenko Andrey V.**, Rector of the Moscow State Technical University «MAMI», PhD, office phone: +7 (495) 223-05-23 (12-01)

**Pronin Evgeny N.**, Deputy Head of Directorate, JSC Gazprom, office phone: +7 (495) 719-14-81, e-mail: E.Pronin@adm.gazprom.ru

**Shadrin Anatoly A.**, Dr. Sci. Tech., professor, Moscow State Forest University, phone: +7 (495) 605-10-75

**Shevchenko Denis V.**, graduate of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), м.т. +7 926 561-25-40

**Shipkov Ruslan Y.**, SAKHOMETAN, Ltd., Executive Director, tel. (4112) 39-14-79, e-mail: sakhametani@mail.ru

**Shikhov Vladimir A.**, of department of Limited Liability Company «Recar», 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-Shikhov@yandex.ru

**Shikhov Ivan G.**, PhD, Engng, MADI, scientific engineer, office phone: +7 (499) 155-08-80, e-mail: shikhov\_i.g@mail.ru

**Statkevich Igor V.**, graduate of Russian State University for Tourism and Service, phone: +7 916 391-29-83

**Terenchenko Aleksey S.**, PhD, Engng, Head of Laboratory NAMI, office phone: +7 (495) 454-01-91

**Tsaplin Aleksey I.**, Dr. Sci. Tech., professor, dean of the Perm State Technical University, phone: (342) 2198212, tai@pstu.ru

**Tsuladze Mikhail A.**, General Director of ACS-EXPO, Ltd, t/f: +7 (495) 380-21-37, (499) 256-05-44, e-mail: acsexpo@mail.ru

**Vakulenko Andrey V.**, MADI, scientific engineer MADI, office phone: +7 (499) 155 04 64

**Volodin Victor V.**, PhD, Engng, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, +7-961-845-39-25

**Zagorodskikh Boris P.**, Dr. Sci. Tech., Professor of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, +7-906-315-02-02



# Подписка – 2011

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

Россия, 115304, Москва, ул. Луганская, д. 11.  
Тел.: 321-50-44, 321-6281, e-mail: transport.1@ngvrus.ru, transport.2@ngvrus.ru • www.ngvrus.ru

**Уважаемые читатели!**  
**Продолжается подписка на 2011 г.**

Подписчики	Годовая, 6 номеров	I полугодие, 3 номера	II полугодие, 3 номера
Россия	3300 руб. (включая 10 % НДС)	1485 руб. (включая 10 % НДС)	1815 руб. (включая 10 % НДС)
Страны СНГ	3300 руб. (включая 10 % НДС)	1485 руб. (включая 10 % НДС)	1815 руб. (включая 10 % НДС)
Страны дальнего зарубежья	170 евро / 230 долл.	100 евро / 140 долл.	120 евро / 170 долл.

Отдельные экземпляры журнала (550 руб. + 10% НДС = 605 руб.) можно приобрести в редакции.

Электронная версия журнала за 2011 г. (формат PDF, 6 номеров):

- для РФ и стран СНГ – 1700 руб., включая НДС 18 %.
- для стран дальнего зарубежья – 100 евро / 140 долл. США.

Годовую подписку на 2010 г. (шесть номеров) можно оформить по факсу, электронной почте или непосредственно в редакции; также через агентства «Роспечать» (подписной индекс **72149**), «Межрегиональное агентство подписки» (Каталог Российская пресса – Почта России, подписной индекс **12718**).

### Стоимость размещения рекламных полноцветных материалов в журнале:

В текстовом блоке	В рублях	В долларах США	В евро
1 страница (210×290 мм)	20 тыс. + 18 % НДС	850	625
½ страницы (125×176 мм)	12 тыс. + 18 % НДС	500	350
¼ страницы (70×176 мм)	7 тыс. + 18 % НДС	290	200
Презентация (1 стр.)	10 тыс. + 18 % НДС	300	170
Юбилейный раздел (1 стр.)	1,5 тыс. + 18 % НДС	–	–
На обложке			
1-я страница (150×210 мм)	20 тыс. + 18 % НДС	850	625
2-я или 3-я страницы (290×210 мм)	25 тыс. + 18 % НДС	1350	1000
4-я страница (290×210 мм)	30 тыс. + 18 % НДС	1450	1100

### Технические требования к рекламным модулям:

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

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