



ТРАНСПОРТ

НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

ЖУРНАЛ № 5 (23) 2011

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

НАЦИОНАЛЬНАЯ ГАЗОМОТОРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

АФФИЛИРОВАНА
С МЕЖДУНАРОДНЫМ ГАЗОВЫМ
СОЮЗОМ

Маршрут автопробега «Голубой коридор – 2011 Урал – Центр»



Тепловоз на альтернативном топливе

КНР: новое поколение автомобилей

Подземные хранилища СПГ на заправочных станциях

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 использова-
нию 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»,
исполнительный директор НГА

В.Л. Стативко
вице-президент НГА, к.т.н.

В.Н. Фатеев
зам. директора НИЦ «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 01.08.2011 г.
Подписано в печать 23.09.2011 г.
Формат 60х90 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: карта автопробега
«Голубой коридор - 2011 Урал - Центр»**

В НОМЕРЕ:

Автопробег «Голубой коридор – 2011 Урал – Центр».....	3
Чешская Республика: Опыт друзей	4
В.А. Марков, С.Н. Девянин Кукурузное масло как противодымная присадка к нефтяным топливам.....	6
Самарский авиационно-космический форум	12
В.И. Маврицкий, К.Г. Косушкин, В.П. Зайцев Влияние вида топлива на летно-технические характеристики вертолетов семейства Ми-8.....	13
В.В. Разносчиков, И.А. Демская Методика формирования оптимального состава АСКТ.....	16
Д.Н. Григорович, А.В. Заручейский Опытная эксплуатация газотепловозов на Московской железной дороге.....	20
В.А. Шишков Пропуски воспламенения в ДВС с искровым зажиганием с ЭСУД при работе на газовом топливе	26
С.И. Мандрик Новые возможности системы автоматического управления «СКАТ»	33
Н.Г. Кириллов, А.Н. Лазарев, А.В. Яковлев Исследования модели подземного хранилища заправочной станции СПГ.....	36
Газпром – КАМАЗ: стратегические направления сотрудничества	39
Автомобильный метан на выставке Иннопром – 2011	40
С.Л. Сазонов Планы руководства КНР по созданию нового поколения автомобилей на альтернативных источниках энергии.....	42
В.М. Фомин, Д.В. Шевченко Повышение эффективности использования энергии альтернативного топлива.....	46
Л.А. Гнедова, К.А. Гриценко, Н.А. Лапушкин, В.Б. Перетряхина, И.В. Федотов Проблемы оценки детонационной стойкости КПП	53
С.А. Григорьев, С.В. Коробцев Электрохимические водородные компрессоры/концентраторы на основе твердополимерного электролита.....	57
В.Ю. Рудаков Установка для исследования рабочих процессов газовых двигателей оптическим методом	60
С.А. Айрбабян, Г.И. Калабухов Противодавление в глушителях шума выпуска автомобилей	62
З.Р. Кавтарадзе, Р.З. Кавтарадзе Анализ механизмов образования и методов расчета концентрации оксидов азота в поршневых двигателях (часть 1).....	65
А.С. Клементьев История применения газового топлива в транспортных машинах	74
Авторы статей в журнале № 5 (23) 2011 г.	78

'Alternative Fuel Transport' international science and technology journal, No. 5 (23) 2011
Registered with the Federal Service for Supervision in Mass Communications and Cultural Heritage Protection

Printed Matter Registration Certificate No. FS77-30114

Founder and Publisher

Non-Commercial Partnership National Gas-Vehicle Association (NGVRUS)

Published: 6 issues a year

Editor-in-Chief

Tsybulsky, P.G.

Director General of Gazprom VNIIGAZ, PhD

Editorial board members

Budzulyak, B.V.

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

Erokhov, V.I.

MAMI Professor, Doctor of Engineering

Ignat'eva, N.E.

Deputy Editor-in-Chief

Ipatov, A.A.

Director General of FGUP NAMI,

Doctor of Engineering

Kavtaradze, R.Z.

Professor of N.E. Bauman's MGTU, 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 MGTU,

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, Executive Director, NGVRUS

Stativko, V.L.

vice-president, 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 01.08.2011

Endorsed to be printed on 23.09.2011

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

V.A. Markov, S.N. Devyanin

Corn Oil as Antismoke Additive to Petroleum Fuels6

V.I. Mavritskiy, K.G. Kosushkin, V.P. Zajtsev

The fuel type influence on Mi-8 helicopters family flight-technical characteristics 13

V.V. Raznoschikov, I.A. Demskaya

Technique of optimum structure aviation condensed fuel formation 16

D.N. Grigorovich, A.V. Zarucheyksy

Trial operation of gas-turbine locomotives at the Moscow railroad..... 20

V.A. Shishkov

The misses of ignition in the engine of internal combustion with spark ignition with electronic control system at work on gas fuel 26

S.I. Mandrik

New potential of the SKAT automatic control system..... 33

N.G. Kirillov, A.N. Lazarev, A.V. Yakovlev

Modeling Underground LNG Storage for Filling Stations..... 36

S.L. Sazonov

Plans of the Chinese Government concerning creation of the vehicles utilizing alternative energy sources 42

V.M. Fomin, D.V. Shevchenko

Increase of energy efficiency of alternative fuels..... 46

L.A. Gnedova, K.A. Gritsenko, N.A. Lapushkin,

V.B. Peretryakhina, I.V. Fedotov

Evaluation of CNG knock resistance..... 53

S.A. Grigoryev, S.V. Korobtsev

Electrochemical hydrogen compressors/concentrators based on solid polymer electrolyte 57

V.Y. Rudakov

Research optical unit to study processes in natural gas/diesel engines 60

S.A. Airbabamyayn, G.I. Kalabukhov

Counter-pressure in the exhaust system's muffler of automobiles..... 62

Z.R. Kavtaradze, R.Z. Kavtaradze

The analysis of NO-formation and methods of calculation of NO-concentration in the piston engines working on traditional and alternative fuel 65

A.S. Klementyev

History of the using gas fuel in transport machine 74

Contributors to journal issue No. 5 (23) 2011 79



Автопробег «Голубой коридор – 2011 Урал – Центр»

В целях популяризации использования наиболее экологически безопасного и экономически привлекательного вида моторного топлива – природного газа – ОАО «Газпром» организует пробеги автомобилей, работающих на природном газе, под общим названием «Голубой коридор». По традиции, участие в пробегах принимают только газовые автомобили заводского изготовления. По маршруту пробега проводятся круглые столы с участием представителей законодательной и исполнительной власти, автомобильной промышленности, машиностроительного комплекса, транспорта, аграрного сектора, средств массовой информации и автомобильной общественности. Организуются выставки газовых автомобилей, пресс-конференции.

По такой же организационной схеме в период с 19 октября по 1 ноября 2011 г. будет проведен уже пятый автопробег «Голубой коридор» по маршруту Екатеринбург – Челябинск – Уфа – Оренбург – Самара – Саратов – Волгоград – Воронеж – Тамбов – Тула – Москва. Протяженность маршрута составляет 3600 км, продолжительность – 14 сут.

Автопробегу предшествуют следующие, связанные с ним, тематические мероприятия:

- **Международная специализированная выставка газоиспользующего и газозаправочного оборудования GasSUF-2011.** (11-13 октября 2011 г., МВК «Сокольники», Москва).

- **IV Международная научно-практическая конференция «Газ в моторах-2011»**, которая пройдет в формате «Диалог с потребителем». Участникам конференции будет предоставлена возможность сделать доклад-презентацию о своей продукции и услугах по темам – газовые транспортные средства и стационарные агрегаты; газоза-

правочное оборудование; криогенная техника и технологии для малотоннажного производства, использования СПГ на транспорте и для автономной газификации; газобаллонное оборудование.

На встречу с производителями оборудования будут приглашены представители федеральных и региональных органов исполнительной и законодательной власти, промышленных предприятий, автотранспортных компаний, автозаправочного бизнеса, средств массовой информации.

- **Отраслевое совещание ОАО «Газпром»** на тему «Совершенствование нормативно-правовой базы Российской Федерации в области производства и использования газовых видов моторного топлива» (18 октября 2011 г., Екатеринбург).

- **Межотраслевое совещание с федеральными органами исполнительной власти** на тему «Актуальные задачи по поэтапной замене муниципального автотранспорта автомобилями на газомоторном топливе и расширению сети га-

зовых заправок в свете Поручения Президента Российской Федерации от 27.06.2011 г. № пр-1923», которое состоится по завершению автопробега «Голубой коридор – 2011» (2 ноября 2011 года, Москва).



«Голубой коридор – 2008»
Санкт-Петербург – Москва



«Голубой коридор – 2009»
Москва – Сочи



«Голубой коридор – 2010»
Москва – Набережные Челны – Москва



«Голубой коридор 2011 – Запад»
Прага – Грейфсвальд

Общая координация подготовки и проведения автопробега «Голубой коридор – 2011» поручена ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург».

МЕТАИнфо

Чешская Республика: Опыт друзей

Рынок природного газа, используемого в качестве моторного топлива, в Чешской Республике продолжает развиваться. В стране сложились практически все основные сегменты этого рынка: национальное производство метановых автобусов (класс M3) и грузовиков (класс N2 и N3), сосудов высокого давления, криогенных емкостей и регазификаторов для сжиженного природного газа. Национальный парк автомобилей, использующих метан, пока невелик – всего 2,5 тыс., в том числе 300 пассажирских автобусов и 40 грузовиков. Есть опыт применения такой экзотической газовой техники, как ледовые комбайны – полноприводные машины для восстановления ледового покрытия.



АГНКС: инвестор – компания RWE, производитель – компания Bauer

В Чехии работают 46 АГНКС: 33 общего пользования и 13 гаражных. Одна из станций введена компанией Vetex – дочерним обществом

Gazprom Germania, входящей в Группу Газпром. Розничная цена бензина в Чешской Республике составляет 1,42 евро/л (3-я декада августа 2011 г.),



Автобус Citelis, производство IVECO Irisbus



Информационная панель газовой колонки

дизельного топлива – 1,40 евро/л, природного газа (Карловы Вары, АГНКС RWE) – 0,76 евро/м³.

Ряд автотранспортных предприятий Чешской Республики имеет положительный опыт применения КПГ на транспорте. Муниципальный автобусный парк Dopravny Podnik Karlovy Vary a.s., который возглавляет директор Павел Боханек, эксплуатирует газовые автобусы с 2007 г. Всего в парке 85 автобусов среднего, большого и особо большого класса. 60 автобусов обслуживают городские маршруты, 25 машин работают на междугородних линиях.

В 2006 г. городские власти по согласованию с правительством Чешской Республики начали проект по снижению негативного влияния автотранспорта на окружающую среду. Карловы Вары – всемирно известный курорт, и качество воздуха является не менее важным для отдыхающих фактором, чем минеральные источники. Экономические соображения также имели место. Моторное топливо для муниципального автотранспортного предприятия освобождено от ряда налогов, поэтому дизельное топливо стоит 1,03 евро/л, а КПГ – 0,62 евро/м³.

С 2007 г. Dopravny Podnik начал эксплуатацию автобусов на КПГ. К настоящему времени парк эксплуатирует 16 автобусов большого класса Citelis производства компании IVECO Irisbus. Автобусы соответствуют нормам выбросов Евро-5. В планах компании приобретение еще четырех метановых автобусов и доведение их общего числа до 20 ед. Дизельная

модификация автобуса Citelis стоит примерно 250 тыс. евро. Газовая – на 31 тыс. евро больше. Поэтому при покупке новых автобусов эту разницу берет на себя правительство республики.

Пробег автобусов в Карловарском автобусном парке составляет вне зависимости от типа топлива 60-65 тыс. км/год. С учетом капитальных вложений в проект эксплуатационная экономия бюджетных затрат составляет 0,08 евро/км. Таким образом дополнительные затраты окупаются в среднем за 6 лет.

В условиях горного рельефа Карловых Вар (похожий на Сочи) дизельный автобус потребляет 40-43 л/100 км. У газовой модификации расход составляет 54 м³/100 км. Одной заправки газом достаточно для двух дней работы. По условиям завода-изготовителя баллоны должны проходить переосвидетельствование один раз в пять лет.

АГНКС (Bauer Kompressoren) для автобусного парка, оборудованная двумя колонками, профинансирована, спроектирована, построена и эксплуатируется фирмой RWE. На заправку одного автобуса уходит примерно 12 мин. При необходимости



Метановый автобус в зоне ТОиР

увеличения производительности АГНКС в существующем машинном отсеке предусмотрена возможность установки второго компрессора. Автобусы дозаправляются ежедневно по окончании смены в период с 18:00 до 24:00. Заправку осуществляет сменный оператор, у которого есть специальная заправочная карточка. Водители и механики прошли специальное обучение. Примечательно, что для повышения рентабельности АГНКС одна колонка для заправки автобусов расположена внутри автобусного парка, вторая – за забором для общего доступа.

Гараж автобусного парка был построен 40 лет тому назад. Он непригоден для хранения автобусов на КПГ, да и по действующим в Чехии правилам гаражное хранение газовых автобусов пока не разрешено. Им можно въезжать и оставаться в зоне технического обслуживания и ремонта. При этом газ из баллонов не выпускается, запорные вентили у каждого из них должны быть закрыты.

Муниципалитет Карловых Вар минимизировал затраты на приспособление производственно-технической базы. Например, власти отказались от строительства пункта проверки герметичности баллонов. По словам руководства компании Dopravny Podnik

Karlovy Vary a.s., автобусы хранятся на улице, и даже в случае утечки газа возникновение взрывоопасных концентраций метана исключено. Баллоны расположены на крыше автобуса, что также не создает предпосылок для аварийных ситуаций. Современная бортовая система безопасности и учета газа сразу просигнализирует об его утечке. Отсутствует пункт дегазации баллонов. В зоне ТОиР нет легкобросываемой кровли или фрамуг. Цех оборудован секционированной системой датчиков концентрации газа и системой автоматического отключения электроэнергии. Усилена система принудительной вентиляции.

В целом сегодня и водители, и слесаря автобусного парка привыкли к газовым автобусам, хотя на первом этапе идея освоения КПГ, по словам руководства, вызвала серьезные возражения. Сейчас компания является участником программы Европейской комиссии по освоению альтернативных видов моторного топлива для муниципального транспорта.

Чешский опыт эксплуатации газовых муниципальных автобусов в условиях горного рельефа, а также ледовых комбайнов мог бы пригодиться в олимпийском Сочи.

Е.Н. Пронин



Газовая раздаточная колонка и кард-ридер



Колонка внутри – для автобусов, снаружи – для остальных ГБА

Кукурузное масло как противодымная присадка к нефтяным топливам

В.А. Марков,

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

С.Н. Девянин,

заведующий кафедрой МГАУ им. В.П. Горячкина, д.т.н.

Рассмотрены возможные пути использования кукурузного масла в качестве топлива для дизелей. Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на смесях дизельного топлива и кукурузного масла различного состава. Показана возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов при использовании этих смесей в качестве топлива для автомобильных и тракторных дизелей.

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, кукурузное масло, смесевое биотопливо, противодымная присадка.

Corn Oil as Antismoke Additive to Petroleum Fuels

V.A. Markov, S.N. Devyanin

Possible ways of utilizing corn oil as a fuel for diesel engines are considered. Experimental work on D-245.12C diesel engine fueled with mixture of corn oil and diesel fuel of different percentage has been carried out. Possibility of exhaust toxicity characteristics improvement by using these mixtures as a fuel for automotive and tractor diesel engines is demonstrated.

Keywords: diesel engine, diesel fuel, corn oil, biofuel mixture, antismoke additive.

В последние годы в качестве реальной альтернативы нефтяным дизельным топливам рассматриваются различные растительные масла: подсолнечное, рапсовое, хлопковое, соевое, льняное, пальмовое, арахисовое, сурепное и некоторые другие [1]. Их можно использовать в качестве топлива для дизелей в исходном виде или после специальной химической обработки, а также в смеси с нефтяными топливами или спиртами. В настоящее время стоимость растительных масел и топлив на их основе соизмерима со стоимостью нефтяных дизельных топлив. Поэтому применение таких топлив в ряде случаев становится экономически выгодным, особенно в тех странах, где растительные масла имеются в избытке [2].

Следует отметить, что полное замещение нефтяных дизельных топлив растительными маслами или их производными (метиловые или этиловые эфиры растительных масел) в ближайшей перспективе маловероятно. Но следует учитывать, что даже при небольшой добавке растительного масла или его метилового эфира (до 5...10 % объема) в нефтяное дизельное топливо существенно улучшаются показатели токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей. В частности, при этом снижаются дымность ОГ (выброс сажи) и выбросы продуктов неполного сгорания топлива (в первую очередь – несгоревшие углеводороды) [3]. Таким образом, растительные масла можно рассматривать как экологическую добавку к нефтяным топливам.

Реальным резервом для получения указанной экологической добавки являются фритюрные масла, использованные в системе городского общественного питания и подлежащие утилизации [4-7]. Эта сырьевая база достаточно обширна. Например, в Японии ежегодные отходы фритюрных растительных масел составляют 400...600 тыс. т [8].

Одним из наиболее распространенных фритюрных растительных масел является кукурузное масло (КМ) с примерно такой же термической стабильностью, как и подсолнечное. Кукурузное масло получают из зародышей, масличность которых колеблется от 32 до 37 %, а также зерен кукурузы прессованием или экстрагированием органическими растворителями. В кукурузных зародышах сконцентрировано более 80 % жира, содержащегося в кукурузном зерне, около 20 % белков и около 74 % минеральных веществ [9]. По объему мирового производства кукурузное масло уступает лишь таким традиционным маслам, как соевое, пальмовое, рапсовое и подсолнечное, и сопоставимо с выпуском арахисового, хлопкового, кокосового и пальмоядрового масел. На долю кукурузного масла в мире приходится около 4 % [10].

Кукурузное полувысыхающее растительное масло – это жидкость светло-желтого цвета с температурой застывания от –10 до –20 °С, плотностью 914...926 кг/м³, динамической вязкостью при 20 °С 63...72 МПа·с, йодным числом 111...133 [11]. Масло нерастворимо в воде, но растворимо в органических растворителях (кроме высших спиртов), имеет температуру вспышки $t > 225$ °С. В жирнокислотном составе кукурузного масла доля насыщенных жирных кислот с числом атомов углерода от 14 до 24 составляет 9...21 %. Среди ненасыщенных жирных кислот 20,0...42,2 % приходится на олеиновую кислоту и 34,0...65,6 % – на линолевую кислоту [12]. В целом можно отметить, что жирнокислотный состав кукурузного масла близок к жирнокислотному составу наиболее распространенных растительных масел – рапсового, подсолнечного и др. (табл. 1).

Важнейшими характеристиками моторных топлив и растительных масел, используемых в качестве моторных топлив, являются кривые их фракционной разгонки, показывающие, какая объемная доля топлива испаряется при их нагревании до определенной температуры [1]. При снятии этих характеристик для традиционного дизельного топлива выделяют температуры начала перегонки (начало кипения), перегонки 10, 50, 90 % топлива, а также температуру окончания перегонки (конец кипения), соответствующую перегонке 96 или 98 % топлива. Температура перегонки 10 % топлива характеризует его склонность к

Таблица 1

Жирнокислотный состав растительных масел, %

Кислота	Растительные масла					
	Соевое	Пальмовое	Рапсовое	Подсолнечное	Арахисовое	Кукурузное
Бутановая (масляная) С 4:0	0	0	0	0	0	0
Гексановая (капроновая) С 6:0	0	0	0	0	0	0
Октановая (каприловая) С 8:0	0	0	0	0	0	0
Декановая (каприновая) С 10:0	0	0	0	0	0	0
Додекановая (лауриновая) С 12:0	0-0,1	0-0,5	0	0-0,1	0-0,1	0-0,3
Тетрадекановая (миристиновая) С 14:0	0-0,2	0,5-2,0	0-0,2	0-0,2	0-0,1	0-0,3
Гексадекановая (пальмитиновая) С 16:0	8,0-13,5	39,3-47,5	1,5-6,0	5,0-7,6	8,0-14,0	8,6-16,5
Гексадеценная (пальмитинолеиновая) С 16:1	0-0,2	0-0,6	0-3,0	0-0,3	0-0,2	0-0,5
Гептадекановая (маргариновая) С 17:0	0-0,1	0-0,2	0-0,1	0-0,2	0-0,1	0-0,1
Гептадеценная (маргаринолеиновая) С 17:1	0-0,1	0	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1
Октадекановая (стеариновая) С 18:0	2,0-5,4	3,5-6,0	0,5-3,1	2,7-6,5	1,0-4,5	0-3,3
Октадеценная (олеиновая) С 18:1	17,0-30,0	36,0-44,0	8,0-60,0	14,0-39,4	35,0-69,0	20,0-42,2
Октадекадиеновая (линолевая) С 18:2	48,0-59,0	9,0-12,0	11,0-23,0	48,3-74,0	12,0-43,0	34,0-65,6
Октадекатриеновая (линоленовая) С 18:3	4,5-11,0	0-0,5	5,0-13,0	0-0,3	0-0,3	0-2,0
Эйкозановая (арахиновая) С 20:0	0,1-0,6	0-1,0	0-3,0	0,1-0,5	1,0-2,0	0,3-1,0
Эйкозеновая (гадолеиновая) С 20:1	0-0,5	0-0,4	3,0-15,0	0-0,3	0,7-1,7	0,2-0,6
Эйкозадиеновая С 20:2	0-0,1	0	0-1,0	0	0	0-0,1
Докозановая (бегеновая) С 22:0	0-0,7	0-0,2	0-2,0	0,3-1,5	1,5-4,5	0-0,5
Докозеновая (эруковая) С 22:1	0-0,3	0	2,0-60,0	0-0,3	0-0,3	0-0,3
Докозадиеновая С 22:2	0	0	0-2,0	0-0,3	0	0
Тетракозановая (лигноцериновая) С 24:0	0-0,5	0	0-2,0	0-0,5	0,5-2,5	0-0,5
Тетракозеновая (нервоновая) С 24:1	0	0	0-3,0	0	0-0,3	0
Гексакозановая (церотиновая) С 26:0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топлива			
	ДТ	КМ	95 % ДТ + 5 % КМ	90 % ДТ + 10 % КМ
Плотность при 20° С, кг/м ³	830,0	921,2	834,6	839,1
Кинематическая вязкость (мм ² /с) при температуре, °С				
20	3,8	66,6	—	—
40	2,4	31,2	—	—
100	1,0	7,57	—	—
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,0	—	—
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	42500	37040	42300	41960
Цетановое число	45	37,6	—	—
Температура, °С				
самовоспламенения	250	—	—	—
помутнения	-25	-7	—	—
застывания	-35	-15	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг	14,31	12,38	14,23	14,11
Массовая доля, %				
С	87,0	77,5	86,5	86,0
Н	12,6	11,5	12,6	12,5
О	0,4	11,0	0,9	1,5
Массовая доля серы, %	0,20	0,002	0,190	0,180
Коксуемость 10%-ного остатка, % по массе	0,2	0,5	—	—

Примечание. «—» – свойства не определялись; для смеси ДТ и КМ указана объемная доля компонентов, %.

образованию паровых пробок в системе питания дизеля. Средняя испаряемость определяется температурой выкипания 50 % топлива. Наличие тяжелых трудноиспаряющихся фракций можно определить по температуре перегонки 90 % топлива.

Кукурузное масло имеет существенно более тяжелый фракционный состав по сравнению с нефтяным дизельным топливом (ДТ) [13]. Так, температура перегонки 50 % фракций дизельного топлива составляет 260 °С, а аналогичная температура для кукурузного масла равна 355 °С. Следует отметить, что исследуемое кукурузное масло при температуре $t > 360$ °С подвергается термическому разложению.

Известны отдельные исследования дизелей, работающих на кукурузном масле и его смесях с нефтяным дизельным топливом, проведенные некоторыми зарубежными двигателестроительными фирмами [14]. Вместе с тем проблема использования кукурузного масла в качестве экологической добавки к нефтяным топливам является недостаточно изученной. При этом смеси ДТ и КМ с небольшим содержанием кукурузного масла имеют ряд преимуществ по сравнению с чистым кукурузным маслом при их использовании в качестве моторного топлива.

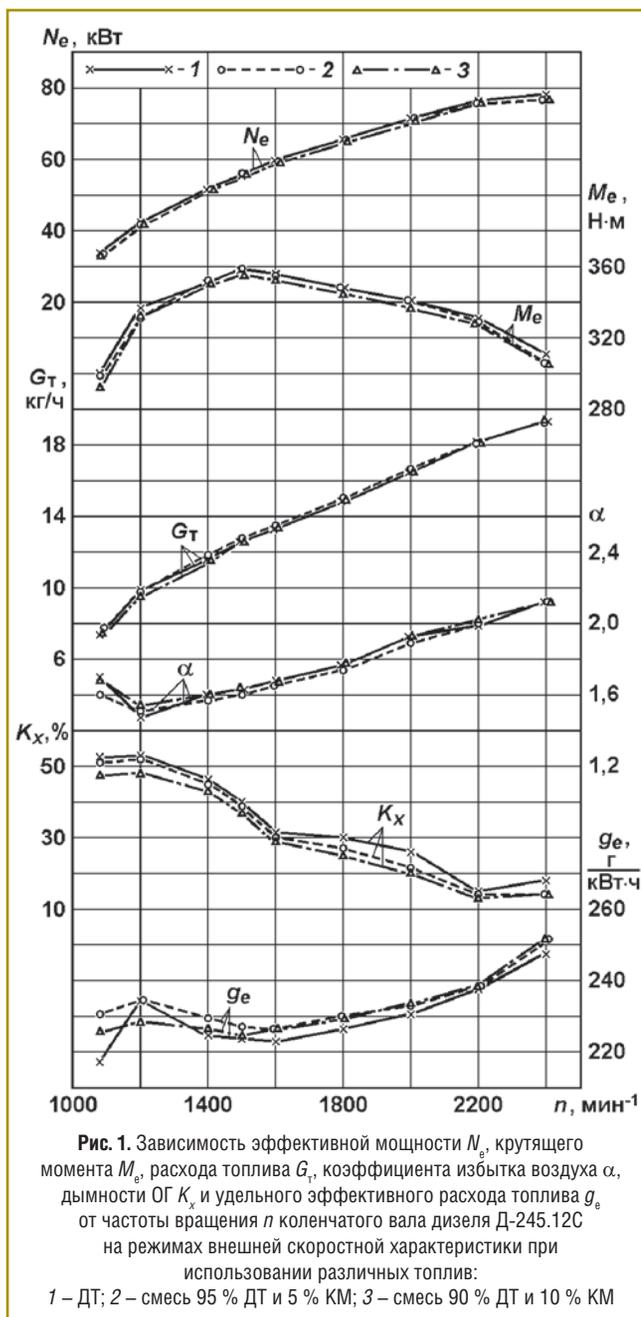
Физико-химические свойства кукурузного масла существенно отличаются от аналогичных свойств нефтяного ДТ. Более тяжелый фракционный состав КМ предопределяет его повышенные плотность и вязкость (табл. 2) [2].

Кукурузное масло имеет несколько меньшую теплотворную способность по сравнению с ДТ, что связано с наличием в молекулах жирных кислот кукурузного масла значительного количества атомов кислорода (массовая доля 11 %). Следует отметить и несколько худшую самовоспламеняемость КМ в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. Кукурузное масло более склонно к коксованию в условиях КС дизеля, что может привести к значительным отложениям кокса на стенки КС и распылители форсунок. Кроме того, КМ имеет повышенные температуры помутнения и застывания по сравнению с ДТ, что усложняет холодный запуск дизеля, работающего на кукурузном масле.

С учетом отрицательных качеств кукурузного масла наиболее привлекательно его применение в качестве моторного топлива для работы дизеля на смесях ДТ и КМ с небольшим содержанием последнего. Эти два компонента хорошо смешиваются в любых пропорциях, образуя стабильные смеси. Подбором состава этих смесей можно получить физико-химические свойства, близкие к свойствам стандартного ДТ.

Для оценки возможности использования кукурузного масла в качестве экологической добавки к нефтяному дизельному топливу проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) Минского моторного завода, устанавливаемого на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок». Некоторые параметры дизеля и условия эксперимента приведены в [15].

При испытаниях использовались дизельное топливо марки «Л» по ГОСТ 305–82 и его смеси, содержащие 5 и 10 % КМ (см. табл. 2). Исследовалось кукурузное масло, производимое ОАО «ЭФКО» (г. Алексеевка Белгородской обл.).



На первом этапе испытания дизеля Д-245.12С проводились на дизельном топливе и на смесях ДТ и КМ на режимах внешней скоростной характеристики. При этом отмечены слабая зависимость часового расхода топлива G_T , коэффициента избытка воздуха α , крутящего момента двигателя M_e и его эффективной мощности N_e от вида применяемого топлива (рис. 1). Такое незначительное изменение мощностных показателей (M_e и N_e) не требует изменения исходных регулировок дизеля.

Наличие в молекулах жирных кислот кукурузного масла значительного количества атомов кислорода приводит к снижению теплотворной способности исследуемых смесей ДТ и КМ (см. табл. 2) и к соответствующему увеличению удельного эффективного расхода топлива g_e . В частности, на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ перевод исследуемого дизеля с ДТ на смесь 95 % ДТ + 5 % КМ и на смесь 90 % ДТ + 10 % КМ сопровождается увеличением g_e

с 247,3 до 251,4 и 251,8 г/(кВт·ч) соответственно, однако при этом эффективный КПД дизеля η_e изменяется незначительно.

Наличие кислорода в молекулах КМ благоприятно сказывается на дымности ОГ K_x . На всех исследованных скоростных режимах при переводе двигателя с ДТ на смесь 90 % ДТ + 10 % КМ дымность ОГ снижалась на 7...23 %. При указанной смене топлива наибольшее снижение дымности ОГ отмечено на режиме с $n=2000$ мин⁻¹. Дымность ОГ уменьшилась с 26 до 20 % по шкале Хартриджа. На режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ дымность ОГ снизилась с 18,0 до 14,0 % по шкале Хартриджа, на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – с 40,0 до 37,0 % по шкале Хартриджа, а на режиме

с минимальной исследованной частотой вращения при $n=1080$ мин⁻¹ – с 52,5 до 47,5 % по шкале Хартриджа.

Экспериментальные исследования Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого цикла показали, что характеристика часового расхода топлива G_T (рис. 2а) свидетельствует о том, что на большинстве исследованных режимов замена ДТ смесями ДТ и КМ приводит к небольшому увеличению G_T , вызванному повышенными плотностью и вязкостью кукурузного масла. Однако, как отмечено выше, влияние вида топлива на часовой расход топлива G_T сравнительно невелико.

Тип применяемого топлива оказывает сравнительно небольшое влияние на концентрацию в ОГ оксидов азота C_{NOx} (рис. 2б). При работе дизеля Д-245.12С на ДТ, смеси 95 % ДТ

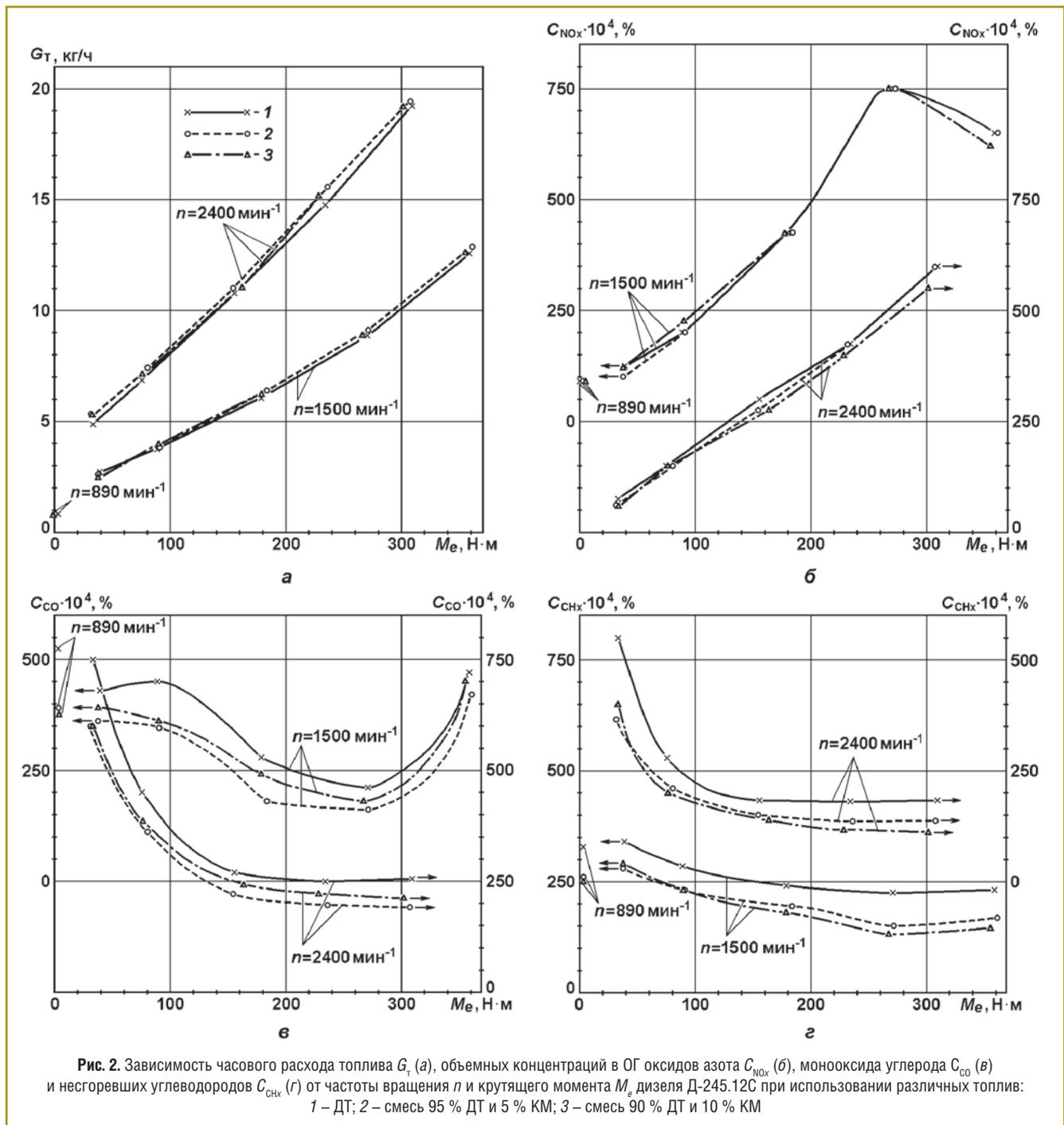


Рис. 2. Зависимость часового расхода топлива G_T (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NOx} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и несгоревших углеводородов C_{CHx} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С при использовании различных топлив: 1 – ДТ; 2 – смесь 95 % ДТ и 5 % КМ; 3 – смесь 90 % ДТ и 10 % КМ

+ 5 % КМ и смеси 90 % ДТ + 10 % КМ на режиме холостого хода при $n=890 \text{ мин}^{-1}$ объемное содержание оксидов азота в ОГ C_{NOx} составило 90 *ppm* или 0,0090 % при использовании всех трех видов топлива. На режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ значения C_{NOx} равны соответственно 650, 650 и 620 *ppm*, а на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – 600, 600 и 550 *ppm*.

Вид применяемого топлива в существенно большей степени оказывает влияние на содержание в ОГ монооксида углерода C_{CO} (рис. 2в). При работе дизеля Д-245.12С на трех рассматриваемых топливах на режиме холостого хода при $n=890 \text{ мин}^{-1}$ концентрации C_{CO} оказались равны соответственно 525, 390 и 375 *ppm*, на режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ – 470, 420 и 450 *ppm*, а на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – 255, 190 и 210 *ppm*.

Значительное положительное влияние тип применяемого топлива оказывает на концентрацию в ОГ исследуемого дизеля несгоревших углеводородов C_{CH} (рис. 2з). При переводе дизеля Д-245.12С с ДТ на смеси 95 % ДТ + 5 % КМ и 90 % ДТ + 10 % КМ на режиме холостого хода при $n=890 \text{ мин}^{-1}$ содержание несгоревших углеводородов в ОГ C_{CH} снижается с 328 до 260 и 250 *ppm*, на режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ – с 231 до 168 и 145 *ppm*, а на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – со 183 до 138 и 110 *ppm*.

По представленным на рис. 2 данным по содержанию в ОГ газообразных токсичных компонентов определялись интегральные удельные массовые выбросы токсичных компонентов на режимах 13-ступенчатого цикла ЕСЕ R49. При этом интегральные показатели токсичности ОГ рассчитывались с учетом коэффициентов K_i , отражающих продолжительность i -го режима. При оценке токсичности ОГ для каждого режима вычислялись часовые массовые выбросы токсичных компонентов ОГ, которые суммировались за весь цикл по каждому компоненту, и затем делением на условную среднюю мощность дизеля

за испытательный цикл определялись удельные выбросы вредных веществ по формулам

$$e_{\text{NOx}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{NOxi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad e_{\text{CO}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{COi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad e_{\text{CH}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{\text{CHi}} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i},$$

где $E_{\text{NOxi}}, E_{\text{COi}}, E_{\text{CHi}}$ – массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов на i -м режиме, г/ч; N_{ei} – мощность двигателя на i -м режиме, кВт; K_i – коэффициент, отражающий продолжительность i -го режима.

По представленным на рис. 2 характеристикам часового расхода топлива G_T рассчитаны удельный эффективный расход топлива g_e и эффективный КПД дизеля η_e на каждом i -м режиме, а также условные (средние на режимах 13-ступенчатого цикла) значения $g_{e\text{усл}}$ и $\eta_{e\text{усл}}$ по зависимостям

$$g_e = \frac{1000G_T}{N_e}; \quad \eta_e = \frac{3600}{H_u \cdot g_e}; \quad g_{e\text{усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{Ti} K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} K_i}; \quad \eta_{e\text{усл}} = \frac{3600}{H_u g_{e\text{усл}}},$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (см. табл. 2).

Экспериментальные данные подтверждают возможность заметного улучшения показателей дымности и токсичности ОГ исследуемого дизеля при использовании в качестве топлива смесей ДТ и КМ. Так, при замене ДТ смесью 90 % ДТ и 10 % КМ дымность ОГ K_x на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ уменьшилась на 22,2 %. При этом удельный массовый выброс оксидов азота e_{NOx} на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла снизился на 3,2 %, выброс монооксида углерода e_{CO} уменьшился на 13,8 %, выброс несгоревших углеводородов e_{CH} снизился на 30,0 %, а условный средний эффективный КПД на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла $\eta_{e\text{усл}}$ практически не изменился.

В целом, проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил эффективность использования кукурузного масла в качестве антидымной и экологической добавки к нефтяным дизельным топливам для отечественных транспортных дизелей.

Литература

1. Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учебное пособие. – М.: Изд-во «Легон-Автодата», 2008. – 464 с.
2. 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 им. В.П. Горячкина, 2008. – 340 с.
3. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
4. Neue Technik: Fette werden zu «Biodiesel» // Brennstoffspiegel. – 2002. – № 10. – Р. 4.
5. Nye M.J., Williamson T.W., Deshpande S. et al. Conversion of Used Frying Oil to Diesel Fuel by Transesterification: Preliminary Tests // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 1983. – Vol. 60. – № 8. – Р. 1598-1601.
6. Payri F., Macian V., Arregle J. et al. Heavy-Duty Diesel Engine Performance and Emission Measurements for Biodiesel (from Cooking Oil) Blends Used in the ECUBUS Project // SAE Technical Paper Series. – 2005. – № 2005-01-2205. – Р. 1-7.
7. Supple B., Howard-Hildige R., Gonzales-Gomez E. et al. The Effect of Steam Treating Waste Cooking Oil of the Yield of Methyl Ester // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2002. – Vol. 79. – № 2. – Р. 175-178.
8. Hamasaki K., Tajima H., Takasaki K. et al. Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel // SAE Technical Paper Series. – 2001. – № 2001-01-2021. – Р. 1-6.
9. Химическая энциклопедия (в пяти томах): Том 4. / Под ред. Н.С. Зефирова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – 639 с.
10. Марков В.А., Девянин С.Н., Шустер А.Ю. Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей // Грузовик. – 2009. – № 4. – С. 46-56.
11. ГОСТ 8808-73. Масло кукурузное. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 10 с.
12. Кодекс Алиментариус (лат. «Продовольственный кодекс»). Жиры, масла и производные продукты: Пер. с англ. – М.: Изд-во «Весь мир», 2007. – 68 с.
13. Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J. et al. Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils // Transactions of the ASAE. – 1982. – Vol. 25. – № 6. – Р. 1472-1477, 1483.
14. Erdogan D., Mohammed A.A. Effect of Preheated Corn Oil as Fuel on Diesel Engine Performance // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 1999. – Vol. 30. – № 3. – Р. 56-58.
15. Марков В.А., Девянин С.Н., Маркова В.В. Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизеля // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 5. – С. 42-47.

Поздравляем с юбилеем!

10 октября исполняется 65 лет Богдану Владимировичу Будзуляку. Он родился в 1946 г. в Ивано-Франковске (Украина). После окончания в 1967 г. Ивано-Франковского филиала Львовского политехнического института и в 1970 г. Ивано-Франковского института нефти и газа молодой специалист работал на предприятиях газовой отрасли, пройдя путь от мастера одного из предприятий до начальника Департамента по транспорту и использованию газа, члена Правления Российского,



затем Открытого акционерного общества «Газпром».

В 1995 г. Б.Будзуляк окончил Академию народного хозяйства при Правительстве Российской Федерации.

Богдан Владимирович – профессор, доктор технических наук (2003 г.), действительный член (академик) Академии горных наук (1995 г.), Академии технологических

наук (2000 г.), Российской инженерной академии (2002 г.). Он награжден многими государственными, отраслевыми наградами и почетными званиями, в числе которых орден «Знак Почета», медаль «За доблестный труд» Республики Татарстан, ордена Русской Православной Церкви Святого Благоверного князя Даниила Московского III степени и Преподобного Сергия Радонежского III степени, звания «Почетный работник газовой промышленности», «Заслуженный работник Минтопэнерго России», «Ветеран труда газовой промышленности», а также почетные грамоты Правительства Российской Федерации, Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации, Федерального агентства по атомной энергии. Есть еще одна ценная награда, которая говорит о том, что Богдан Будзуляк не только специалист высокого класса, но и отличный семьянин. Это Знак отличия «Родительская доблесть».

Богдан Владимирович также является лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (1996 г.), Государственной премии в области науки и техники (2000 г.), премии Международной инженерной академии «За выдающийся вклад в развитие системы газопроводов» (2006 г.), премий им. А.Н. Косыгина, А.К. Кортунова, Н.К. Байбакова, академика А.М. Люльки и др.

Б.Будзуляк – автор и соавтор более 90 опубликованных работ по проблемам функционирования, диагностики и ремонта Единой системы газоснабжения, а также другим вопросам газовой отрасли.

В настоящее время Б.Будзуляк возглавляет Некоммерческое партнерство содействия в реализации инновационных программ в области противокоррозионной защиты «СОПКОР».

Накануне круглой даты мы желаем Богдану Владимировичу прежде всего здоровья, благополучия, быть всегда в строю и оставаться молодым.

14 сентября исполнилось 50 лет Михаилу Юрьевичу Малышевскому, генеральному директору ООО «Газ-Ойл».

Михаил Юрьевич родился в Новгороде. В 1983 г. окончил Высшее военно-морское инженерное училище им. Ф.Э. Дзержинского. В 1996-1998 гг. проходил обучение в Санкт-Петербургском государственном университете экономики и финансов им. Вознесенского. Затем в 1983-1993 гг. была служба в рядах ВМФ РФ. С 1993 г. – офицер запаса, председатель правления



Фонда поддержки флота и реабилитации моряков-подводников.

В 2000 г. Михаил Малышевский назначен генеральным директором ООО «Запсибгазпром Северо-Запад» в г. Санкт-Петербурге, а в 2002 г. – исполняющим обязанности генерального директора ОАО «Запсибгазпром» в г. Тюмени. В 2003-2004 гг. – член правления, ди-

ректор по газоснабжению ОАО «Российские коммунальные системы», в 2004-2005 гг. – генеральный директор ЗАО «НАФТА».

В марте 2008 г. Михаил Юрьевич был назначен исполняющим обязанности генерального директора, а с 2010 г. – генеральным директором ЗАО «Газ-Ойл», впоследствии реорганизованного в ООО «Газ-Ойл», которое в настоящее время является членом Национальной газомоторной ассоциации.

Новые направления деятельности ООО «Газ-Ойл» связаны с технологиями сжатия и сжижения природного газа. Сжиженным газом можно обеспечивать потребности малой энергетики и оказать весомый вклад в поддержку сельского хозяйства. Эта технология позволяет решить проблемы газификации отдаленных поселений. Транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания могут использовать сжатый природный газ в качестве топлива, значительно увеличив экономичность и уменьшив вредные выбросы в атмосферу.

Малышевский М.Ю. – организатор, который не боится трудностей. В «Газ-Ойл» он пришел в самое сложное для предприятия время. Под его руководством ведется строительство первого в Калининградской области комплекса сжижения природного газа и АГНКС, создано предприятие по вывозу газового конденсата с КС Портовая (начало Северного потока), проведена первая международная конференция по Голубым коридорам Балтийского региона. Он активно работает над формированием регионального рынка природного газа для транспорта.

В прошлом опытный моряк, Михаил Юрьевич и сегодня сохранил любовь к морю. Теперь он бороздит Балтику на гоночном паруснике «Новелла». Друзья ценят его за добрый юмор, обязательность, находчивость.

Поздравляем Михаила Юрьевича с юбилеем и желаем ему доброго здоровья и успехов во всех его начинаниях.

Самарский авиационно-космический форум



Академик
Н.Д. Кузнецов

В Самарском государственном аэрокосмическом университете им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет) с 28 по 30 июня 2011 г. прошла международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», посвященная 100-летию со дня рождения генерального конструктора аэрокосмической техники акад. Н.Д. Кузнецова (на фото). Конференция проводилась в рамках II специализированного авиационно-космического форума, посвященного 50-летию первого полета человека в космос и Году российской космонавтики.

Цель конференции – выявление наиболее актуальных направлений в области научных исследований, проектирования, конструкционной прочности, надежности, производства и доводки двигателей, а также при подготовке инженерных кадров для аэрокосмической и других отраслей промышленности.

Тематика докладов включала 14 направлений, одно из которых было посвящено экологическим проблемам двигателестроения, энергетики и космических аппаратов. На конференцию было заявлено около 600 докладов, посвященных развитию отечественного двигателестроения. На открытии конференции выступили ведущие российские специалисты и организаторы производства.

Как известно, производство отечественных самолетов и двигателей с начала перестройки и по настоящее время сократилось более чем в 20 раз. Поэтому стоит задача возрождения одного из самых передовых и наукоемких производств – выпуск отечественных двигателей, которые могли бы успешно конкурировать с зарубежными аналогами. Большой проблемой является и подготовка новых специалистов, которые должны прийти в отрасль на смену ушедшим.

Естественно, одной из задач, которая стоит перед отечественным двигателестроением, следует считать выполнение современных экологических требований как по шуму, так и по токсичности отработавших газов. Второй задачей является существенное снижение расхода топлива.

В части представленных докладов была озвучена тема использования альтернативных топлив и источников энергии для современных двигателей. Одним из успешно развивающихся проектов признано создание образца газотурбинного двигателя для железнодорожного транспорта, работающего на сжиженном природном газе. Этот проект уже вошел в стадию опытной эксплуатации первого тепловоза с подобной силовой установкой.

В ракетной технике также идет переход к экологически чистым криогенным топливам, а именно к жидкому водороду. Для перспективных ракет в проекты заложены двигатели на этом виде топлива.

Для наземного транспорта были предложены как конструктивные мероприятия, так и возможные добавки к существующим углеводородным топливам для снижения токсичности отработавших газов и расхода топлива.

Выступления докладчиков были посвящены Н.Д. Кузнецову и его огромному вкладу в отечественное двигателестроение, работам, посвященным созданию газотурбинных двигателей НК-88 на жидком водороде и НК-89 на сжиженном природном газе, а также другим проектам.

К сожалению, финансирование этих работ было давно приостановлено. Многие технические наработки по газотурбинным и ракетным двигателям, сделанные коллективом ОКБ и опытного завода Н.Д. Кузнецова 20-30 лет назад, оказались настолько перспективными, что в настоящее время востребованы, при этом они превосходят многие мировые аналоги по техническим характеристикам. Это видно из того, что несколько десятков двигателей НК-33 приобрели американцы для своей новой ракеты. А двигатель НК-93 может стать базой для современного экономичного и надежного газотурбинного двигателя для гражданской авиации. Все эти разработки будут вечным памятником великому конструктору и организатору производства Н.Д. Кузнецову.

В.А. Шишков,
ООО «Рекар», СГАУ
им. акад. С.П. Королева



Полет самолета ТУ-155 на жидком водороде

Влияние вида топлива на летно-технические характеристики вертолетов семейства Ми-8

В.И. Маврицкий,
начальник НИО-10 ФГУП «ЦАГИ», к.т.н.,
К.Г. Косушкин,
начальник сектора НИО-10 ФГУП «ЦАГИ»,
В.П. Зайцев,
генеральный директор ОАО «Интеравиагаз»

В приведенном сравнительном анализе исследовалось влияние вида топлива (штатное – авиакеросин, и альтернативное – авиационное сконденсированное газовое топливо) на основные показатели вертолета как транспортного средства – массу перевозимого груза и дальность полета.

Ключевые слова: альтернативное топливо, авиагаз, авиационное сконденсированное топливо (АСКТ), вертолет, транспортная эффективность, Ми-8ТГ, Ми-8МТГ.

The fuel type influence on Mi-8 helicopters family flight-technical characteristics

V.I. Mavritskiy, K.G. Kosushkin, V.P. Zajtsev

In the comparative analysis resulted in article a fuel type influence (regular – aviakerosene, and alternative – aviation condensed (gas) fuel – АСКТ) on the basic indicators of the helicopter as vehicle (weight of payload, and range of flight) was investigated.

Keywords: alternative fuel, aviagas, АСКТ, helicopter, transport efficiency, Mi-8ТG, Mi-8МТG.

Штатное авиатопливо (авиакеросин) и альтернативное (авиационное сконденсированное пропанбутановое – АСКТ по ТУ 39-1547-91) отличаются по своим физико-техническим характеристикам, в первую очередь, по плотности (ниже, чем у керосина), теплотворной способности (выше) и давлению насыщенных паров при плюсовых температурах (выше). Поэтому перевод силовой установки на питание газовым топливом должен инициировать новые конструктивные решения и, в конечном итоге, привести к некоторому изменению внешнего облика вертолета.

Для выявления этих изменений и влияния их на основные летно-технические параметры вертолета был проведен сравнительный анализ, в котором исследовалось влияние характеристик топлива (керосин марки ТС-1 и АСКТ): на массу перевозимого им груза ($G_{гр}$) и дальность полета (L) – основные показатели вертолета как транспортного средства. При этом принималось, что масса $G_{дв}$ и

мощность $N_{дв}$ двигателей, параметры несущей системы и, следовательно, величина свободной тяги несущего винта $T_{нв}$, а также масса снаряжения $G_{сн}$ при изменении вида топлива останутся постоянными.

Перевод вертолета на газовое топливо связан в первую очередь с конструктивными изменениями топливной системы и, в частности, с изменением размеров и мест размещения топливных баков, поскольку сжиженные газы по объемной энергоемкости несколько уступают керосину. Кроме того, при положительных температурах превышение давления насыщенных паров АСКТ над атмосферным обуславливает необходимость увеличения прочности топливных баков и организации закрытого дренажа, что вызывает возрастание массы пустого вертолета $G_{пуст}$.

Увеличение размеров топливных баков (рис. 1) приводит к росту площади проекции вертолета на горизонтальную плоскость, что вызывает дополнительные потери подъемной силы несущего винта на вертикальную обдувку фюзеляжа с баками для АСКТ при вертикальном взлете и на режиме висения. Необходимость сохранения свободной тяги несущего винта ($T_{нв} = \text{const}$) влечет увеличение взлетной массы вертолета $G_{взл}$. Приближение бака к плоскости несущего винта приводит к уменьшению потерь тяги на обдувку, что вызывает обратный, по сравнению с предыдущим случаем, процесс.

Кроме того, увеличенные размеры топливных баков со сжиженным газом повышают лобовое сопротивление вертолета в горизонтальном полете. Это дополнительное сопротивление должно быть компенсировано ростом пропульсивной (тянущей) силы несущего винта, а, следовательно, и мощности

Таблица 1

Топливо	Плотность, кг/м ³	Теплота сгорания, кДж/кг
ТС-1 (ГОСТ 10227-62)	775	42914
АСКТ (ТУ 39-1547-91)	585	45200



Рис. 1. Подвесной бак для газового топлива

двигателя с соответствующим расходом топлива. Такое дополнительное вредное сопротивление вертолета можно определить в первом приближении (пренебрегая изменением интерференции между подвесными баками и корпусом вертолета), как разность сопротивления корпуса

вертолета Ми-8 с баками для АСКТ и корпуса вертолета Ми-8 со штатными баками для керосина.

И наконец, если принять, что переход на газовое топливо не изменит газодинамического цикла двигателя, то удельный расход топлива будет обратно пропорционален

превышению теплотворной способности газа над керосином (табл. 1).

Таким образом, используя известное соотношение, в котором взлетная масса вертолета и массы пустого вертолета, снаряжения, груза и запаса топлива на вертолете связаны между собой следующим образом

$$G_{\text{взл}} = G_{\text{пуст}} + G_{\text{сна}} + G_{\text{гр}} + G_{\text{т}}$$

было проведено сравнение основных летно-технических характеристик вертолета Ми-8МТ с двигателями ТВЗ-117ВМ на керосиновом и газовом топливах.

Расчеты показали, что суммарное действие двух разнонаправленных факторов – увеличения площади плановой проекции баков для газового топлива и уменьшения скорости вертикальной обдувки за счет приближения баков к плоскости несущего винта – в итоге уменьшит подъемную силу несущего винта на 30 кг. При сохранении величины свободной тяги несущего винта это приведет к возможности увеличения взлетной массы вертолета соответственно на 30 кг.

По результатам экспериментальных исследований в аэродинамической трубе было определено, что

Таблица 2

Характеристика вертолета Ми-8МТГ	На керосине		На газовом топливе		
	Базовый	С дополнительной заправкой	L=const (640 км)	G _т =const (1550 кг)	С полной заправкой топлива
1	2	3	4	5	6
Нормальная взлетная масса, кг	11100	11100	11130	11130	11130
Масса пустого снаряженного, кг	7523	7623	7683	7683	7683
Взлетный запас топлива, кг	2027	2287	1988	1897	2241
расходный бак	345	345	345	345	345
основные баки	1682	1682	1643	1552	1896
дополнительный бак	–	260	–	–	–
Запас топлива на горизонтальный полет, кг	1682	1941	1651	1560	1904
Расход топлива, кг/ч	605	605	593	593	593
часовой километровой	2,63	2,63	2,58	2,58	2,58
Крейсерская скорость, км/ч	230	230	230	230	230
Статический потолок, км	4	4	4	4	4
Масса груза, кг	1550	1191	1495	1550	1206
Дальность полета, км	640	738	640	605	738

корпус вертолета Ми-8 с внешними баками под газовое топливо имеет лобовое сопротивление примерно на 10 % больше, чем корпус вертолета Ми-8 со штатными баками. В связи с этим рост расхода топлива за счет дополнительного сопротивления вертолета от баков под газовое топливо составит около 3 %. Однако более высокая (на 5 %) теплотворная способность АСКТ приводит к соответственному уменьшению его расхода. Таким образом, при полете на АСКТ итоговые часовой и километровый расходы топлива вертолета уменьшатся на ~2 %.

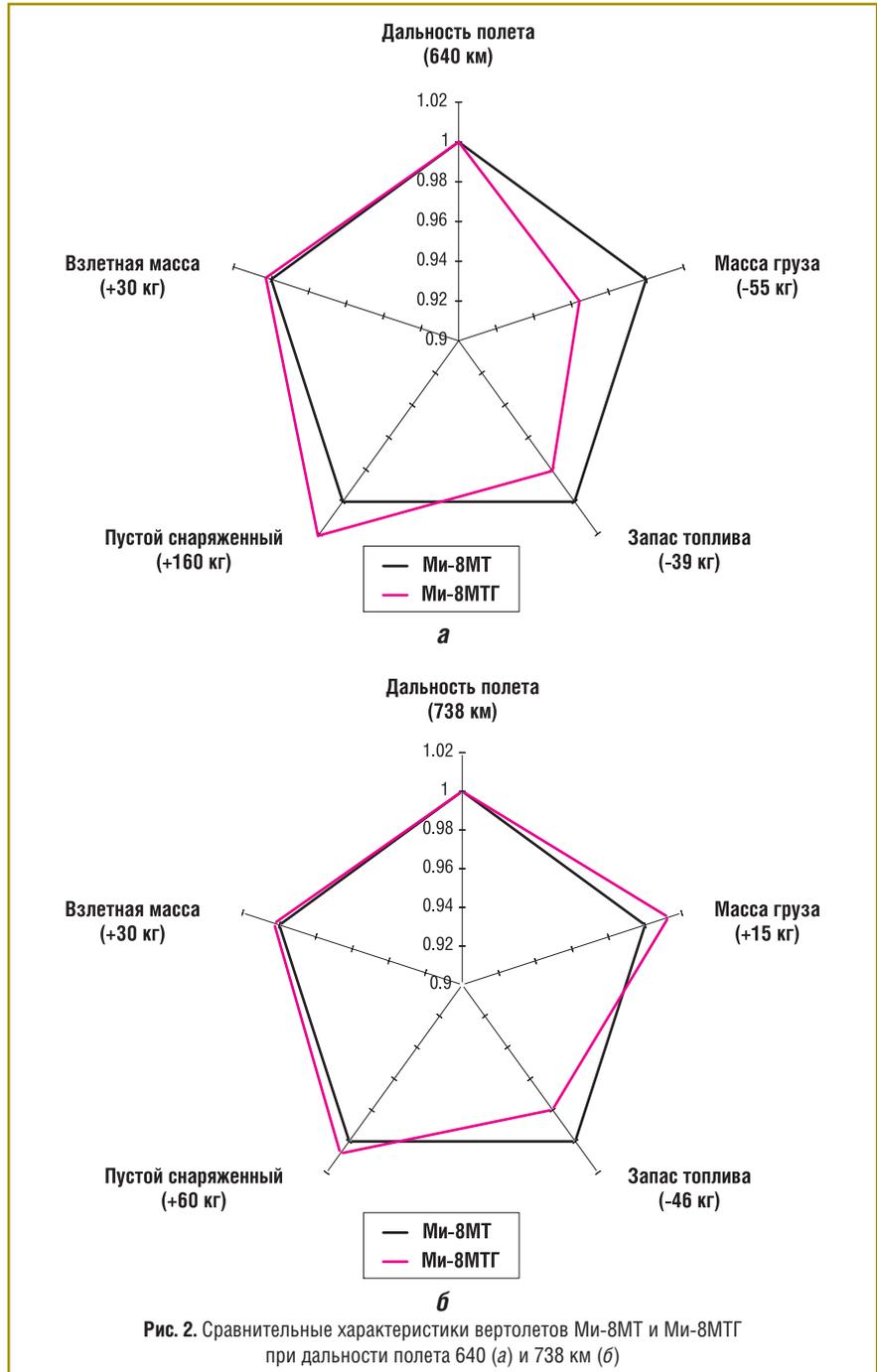
Кроме того, по данным МВЗ им. М.Л. Миля, переоборудование вертолета Ми-8МТ с двигателями ТВЗ-117ВМ на газовое топливо приведет к увеличению массы пустой машины приблизительно на 160 кг.

С использованием этих данных был произведен расчет основных летно-технических характеристик вертолета Ми-8МТ на керосиновом и газовом топливах, результаты которого представлены в табл. 2.

Видно, что при сохранении дальности полета $L = 640$ км вертолет с переходом на газовое топливо теряет в массе перевозимого груза 55 кг (~3,5 %), а при сохранении массы перевозимого груза $G_{гр} = 1550$ кг теряет в дальности 35 км (~5,5 %).

Однако проведенное сравнение не вполне корректно по отношению к газовому вертолету. Потребный запас топлива при обоих вариантах ($L = \text{const}$, $G_{гр} = \text{const}$) оказывается меньше, чем возможный запас топлива в установленных на вертолете внешних баках под газовое топливо. Следовательно газовый вариант топливной системы при сравнении с керосином имеет как бы переразмеренный объем баков, что и приводит к вышеуказанным потерям.

Для сравнения в столбце 6 приведен вариант расчета с полным запасом АСКТ, допускаемым объемом двух подвесных газотопливных баков по 1800 л при условии их заполнения газом на 90 % с необходимым 10%-ным запасом – газовой «подушкой».



Видно, что в этом варианте Ми-8ТГ дальность полета увеличивает до 738 км. Чтобы обеспечить такую дальность вертолета на керосиновом топливе, необходимо увеличить его запас на 260 кг, установив дополнительный бак (см. табл. 2, столбец 3). Видно, что массы перевозимого груза в этом случае отличаются несильно.

Таким образом, можно считать, что воздействия разнородных факторов на облик и характеристики вертолета Ми-8МТ при переходе на АСКТ взаимно уравновешиваются

и основные его летно-технические характеристики, а также показатели транспортной эффективности практически не меняются, что хорошо иллюстрирует рис. 2а.

В заключение следует заметить, что стоимость АСКТ в 2-4 раза меньше стоимости керосина (особенно в северных, сибирских, дальневосточных и арктических регионах), что приводит к существенному снижению затрат на топливо при перевозке пассажиров и груза (по стоимости пасс/км и т/км).

Методика формирования оптимального состава АСКТ

В.В. Разносчиков,

старший научный сотрудник ЦИАМ им. П.И. Баранова, доцент, к.т.н,

И.А. Демская,

инженер ЦИАМ им. П.И. Баранова

В статье представлена математическая модель теплофизических свойств топлив и индивидуальных углеводородов, а также их смесей в любых соотношениях. Представлены результаты опытных экспериментов по определению теплофизических свойств газовых топлив. Выполнено оптимизационное исследование по формированию парето-множества наилучших составов авиационного сконденсированного топлива.

Ключевые слова: математическая модель, газовые топлива.

Technique of optimum structure aviation condensed fuel formation

V.V. Raznoschikov, I.A. Demskaya

The paper represents the mathematical model of thermo-physical properties of fuels and individual hydrocarbons and also their mixes in various ratio. Results of experiments by determination thermo-physical properties of gas fuels are submitted. Optimization research on formation of pareto-set of the best structures of aviation condensed fuel is performed.

Keywords: mathematical model, gas fuel.

Начиная с середины 70-х гг. в нашей стране и за рубежом ведутся работы по созданию нового авиационного сконденсированного топлива (АСКТ) для летательных аппаратов различного целевого назначения. В технических условиях на АСКТ (ТУ 39-1547-91) предусмотрено ограничение на содержание пропана – не более 7,2 %, так как он в основном и определяет давление насыщенных паров в топливном баке при плюсовых температурах. Содержание других компонентов не регламентируется. Основным сырьем для получения АСКТ является попутный

нефтяной газ. По ряду эксплуатационных показателей АСКТ превосходит авиакеросин. Это топливо дешевле – его себестоимость соизмерима с себестоимостью автопропана, оно экологически чище и менее агрессивно по отношению к конструкционным и уплотнительным материалам. Требования, предъявляемые к АСКТ, очень разнообразны и определяются эксплуатационной спецификой авиационной техники. Несмотря на существующий ГОСТ на АСКТ, предварительный анализ, представленный в статье, показал, что его состав необходим

оптимизировать для получения максимальной массовой и объемной теплоты сгорания топлива.

Методика расчета математической модели и ее верификация

В справочных материалах недостаточно данных по свойствам индивидуальных углеводородов (ИУ) и их смесей. Как правило, они разбросаны по многим литературным источникам. Кроме того, нередко случаи, когда по одной и той же характеристике в различных источниках даются разные величины, а для некоторых ИУ и их смесей вообще отсутствуют данные по теплофизическим свойствам. В предлагаемой методике систематизированы и обобщены результаты работ, связанных с теплофизическим расчетом свойств индивидуальных углеводородов и их смесей. В результате анализа многочисленных литературных источников, основные из которых представлены [1-5], отобраны данные по основным теплофизическим свойствам, разработана математическая модель (ММ) расчета свойств ИУ и их смесей (далее ММ топлив), блок-схема которой представлена на рис. 1. Каждая из используемых методик расчета теплофизических свойств в процессе проверки их на адекватность дорабатывалась авторами.

ММ топлив позволяет рассчитать теплофизические (теплота сгорания H_u , плотность, давление насыщенных паров, энтальпия, теплоемкость, теплота испарения, сила поверхностного натяжения) и транспортные (вязкость, теплопроводность и др.) свойства как индивидуальных веществ (водород H_2 , алканы C_nH_{2n+2} и т.п.), так и топлив (керосины, синтетически сжиженное топливо из

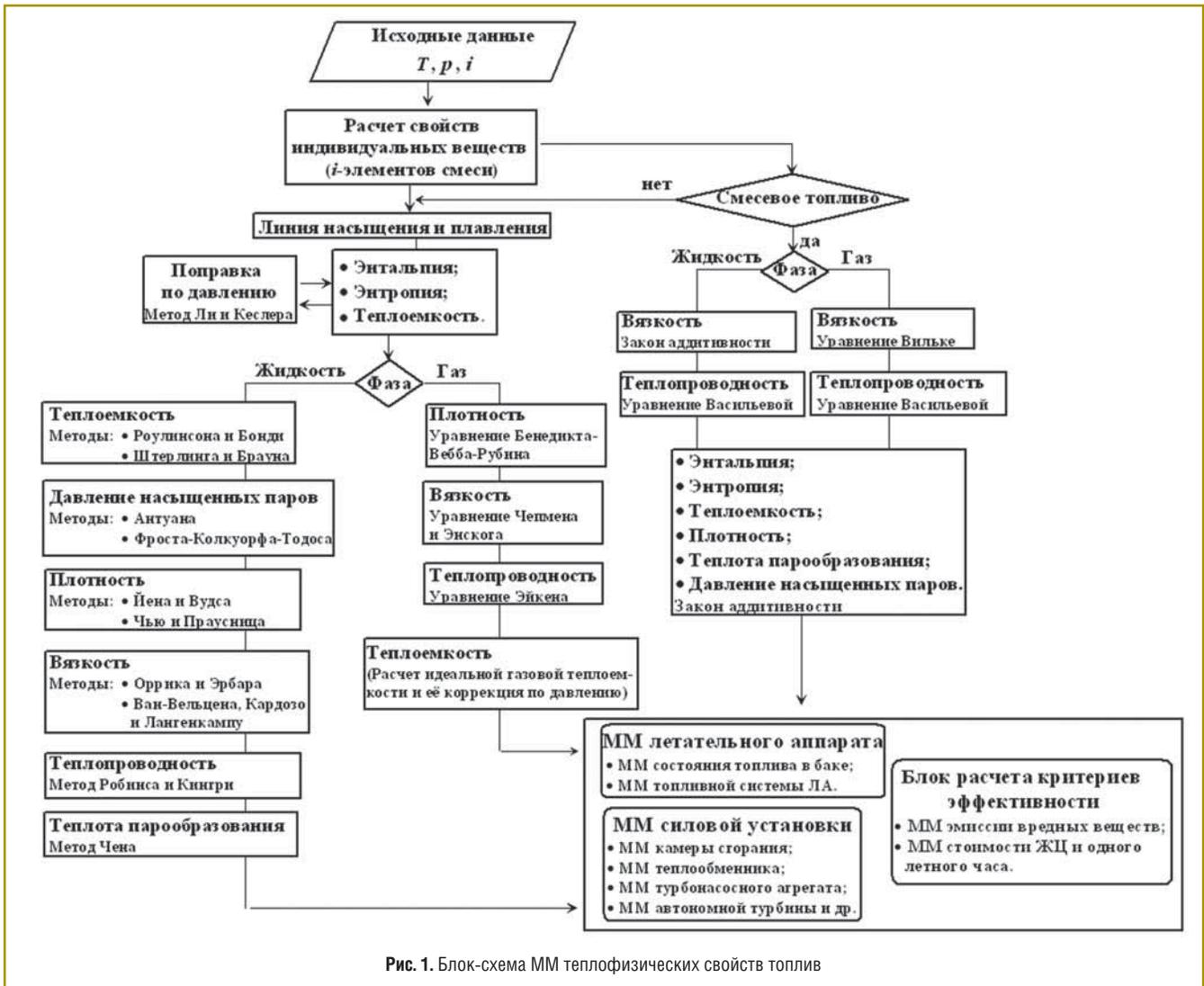


Рис. 1. Блок-схема ММ теплофизических свойств топлив

биосырья – СЖТБ, синтетически сжиженное топливо из газового сырья – СЖТГ, АСКТ, сжиженный природный газ – СПГ [6]. Теплофизические свойства ИУ и их смесей рассчитываются в широком диапазоне температур и давлений в жидком и газообразном состояниях. ММ расчета теплофизических свойств ИУ и их смесей относится к классу тех обеспечивающих основной расчет моделей, в которых они применяются – например, в ММ топливных систем летательного аппарата (ЛА), расчета стоимости жизненного цикла, элементов двигателя и определения эмиссии вредных веществ.

В доказательство адекватности работы ММ топлив представлены

результаты расчета плотности (рис. 2). В качестве примера были взяты этилен (C_2H_4) и пропилен (C_3H_6) и их соотношение (50 % C_2H_4 – 50 % C_3H_6). Погрешность расчета не превышает 1 %.

Графики для смеси этилена и пропилена (рис. 3) разделены на

жидкую и газообразную области, так как температура перехода этилена и пропилена из одной фазы в другую различна. Диапазон температур этиленпропиленовой смеси в жидком состоянии 110...160 К (рис. 3а), а в газообразном 230...600 К (рис. 3б).

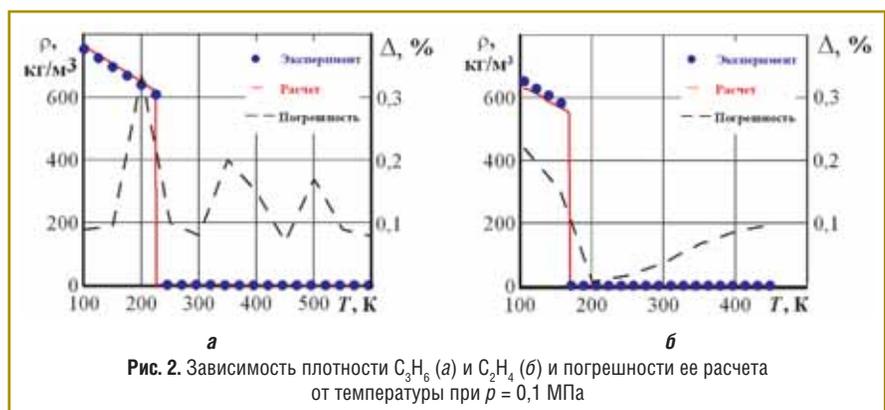
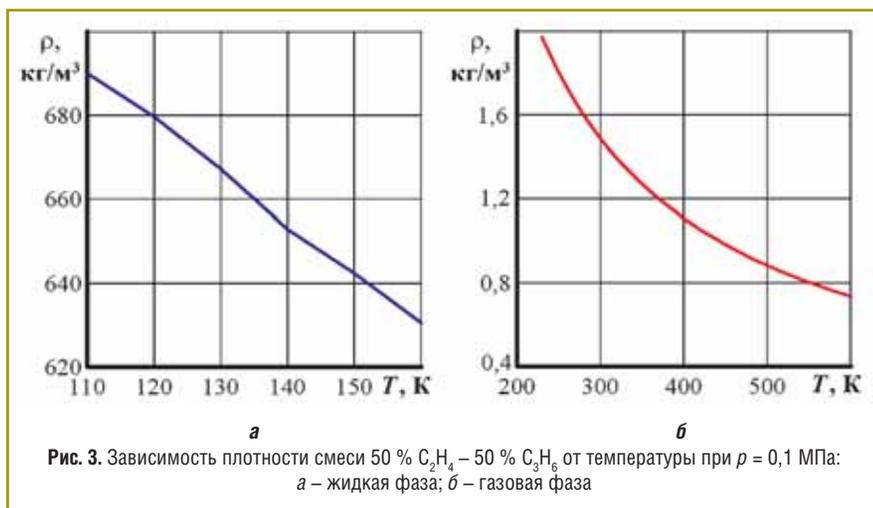


Рис. 2. Зависимость плотности C_3H_6 (а) и C_2H_4 (б) и погрешности ее расчета от температуры при $p = 0,1$ МПа

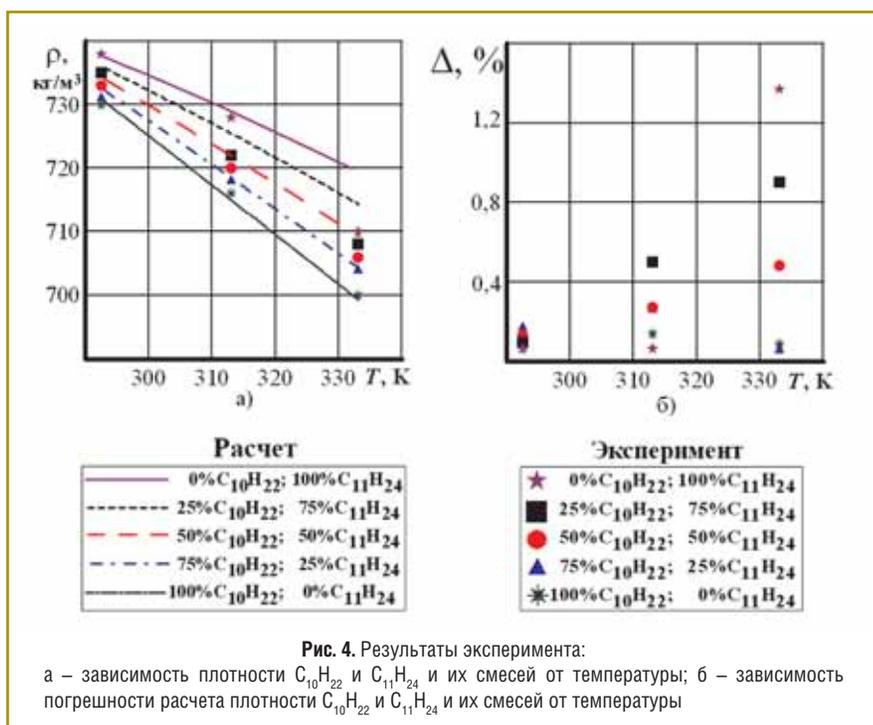


Для утверждения достоверности расчета теплофизических свойств ИУ и их смесей по данной ММ топлив авторами было решено проверить ее на адекватность, проведя ряд лабораторных экспериментов согласно установленному ГОСТу (ГОСТ 2517–85 для нефти и нефтепродуктов).

Постановка задачи оптимизации

Оптимизационное исследование по определению наилучших составов газового топлива проводилось для двух задач:

- анализа предварительного состава сконденсированного газового топлива компании ООО «СИБУР» [8];



Для экспериментов в качестве образцов были взяты декан и ундекан и их различные соотношения (рис. 4). Погрешность расчета не превышает 2 %.

- формирования составов высококипящего АСКТ.

В качестве критерия для оптимизационного исследования [9] первой задачи выбраны объемная

и массовая теплота сгорания, вектором варьируемых переменных являются массовые доли (0,0001...1) компонентов исследуемой смеси углеводородного топлива (пропан, изобутан, нормальный бутан, изопентан, нормальный пентан, гексан). Ограничивающими параметрами определено агрегатное состояние (жидкое) компонентов смеси топлива. Все компоненты смеси должны находиться в жидком состоянии, для этого необходимо соблюдать давление 1 МПа.

В качестве критерия во второй задаче выбраны объемная и массовая теплота сгорания, вектором варьируемых переменных являются массовые доли (0,0001...1) компонентов исследуемой смеси углеводородного топлива (пентан, изопентан, гексан, изогексан, гептан), ограничивающими параметрами определено агрегатное состояние (жидкое) компонентов смеси топлива при давлении 0,1 МПа.

Анализ оптимизационных исследований

Представленные компанией ООО «СИБУР» составы топлива являются, по оценкам авторов (рис. 5), близкими к оптимальному парето-множеству, но какой конкретно состав требуется производить может дать исследование в составе технического объекта, на котором будет использоваться топливо. Возможно, состав топлива будет определяться исходным сырьем, и этот факт будет ограничивать область оптимальных составов топлив.

Оптимизационное исследование по наилучшему составу АСКТ (пентан, изопентан, гексан, изогексан, гептан) представлено в виде области, ограниченной линией, выше которой не может быть лучших

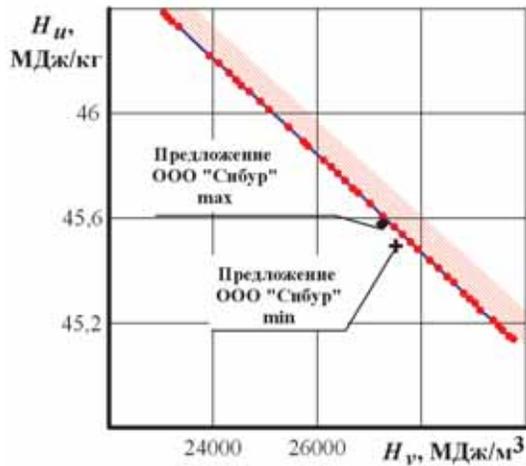


Рис. 5. Зависимость массовой теплоты сгорания от объемной теплоты сгорания при $p = 1$ МПа

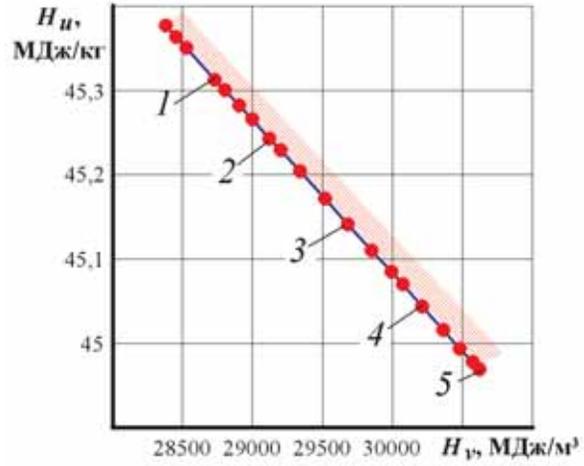


Рис. 6. Зависимость массовой теплоты сгорания от объемной теплоты сгорания при $p = 0,1$ МПа

Вариант	Состав топлива (массовая доля) и параметры							
	lC_5H_{12}	iC_5H_{12}	lC_6H_{14}	iC_6H_{14}	lC_7H_{16}	ρ_{20} , кг/м ³	H_u , МДж/кг	H_v , МДж/м ³
1	0,79	0,01	0,06	0,01	0,13	634,09	45,31	28731,9
2	0,46	0,01	0,47	0,01	0,05	643,63	45,24	29119,6
3	0,29	0,01	0,30	0,01	0,39	657,54	45,14	29682,4
4	0,13	0,01	0,14	0,01	0,71	670,75	45,04	30213,1
5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,96	680,97	44,97	30622,7

составов, так как каждая точка на этой линии отражает максимально возможные массовую и объемную теплоту сгорания (рис. 6).

Для примера некоторые лучшие составы топлив, отмеченные вариантами на графике, даны в таблице.

Проведенное оптимизационное исследование по формированию парето-множества для АСКТ показало, что каждая полученная точка отражает состав смесового топлива с максимально возможными массовой и объемной теплотой сгорания и дает основание для формирования технического условия на новое топливо.

Проверка адекватности ММ показала высокий уровень точности, о чем свидетельствуют сравнения расчетов с результатами,

полученными экспериментально. Особенностью разработанной ММ топлив является ее органичное взаимодействие с пакетом многопараметрической оптимизации, что

позволяет рассмотреть множество возможных вариантов и обоснованно определить оптимальный состав топлива по выбранным критериям эффективности.

Литература

1. Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Котова В.Н., Яновский Л.С. и др. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 400 с.
2. Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Галимов Ф.М. и др. Авиационные криогенные углеводородные топлива. – 1998. – 225 с.
3. Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Галимов Ф.М. и др. Инженерные методы определения физико-химических и эксплуатационных свойств топлив. – 2000. – 378 с.
4. Дубовкин Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания. – М.: Л., Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Пер. с англ. Под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
6. Разносчиков В.В., Чепанов А.И. Анализ использования криогенных и газовых топлив в силовых установках магистральных самолетов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – М.: Изд. МГТУ ГА. – 2008. – № 134. – С. 10-15.
7. Веб-ресурс «National Institute of Standards and Technology». – <http://www.nist.gov>
8. Веб-ресурс Компании ООО «СИБУР» – <http://www.sibur.ru>
9. Веб-ресурс Компании «Сигма-Технология» – <http://www.iosotech.com/ru>

Опытная эксплуатация газотепловозов на Московской железной дороге

Д.Н. Григорович,
заведующий лабораторией ОАО «ВНИИЖТ», к.т.н.,
А.В. Заручейский,
заведующий отделением ОАО «ВНИИЖТ», к.т.н.

В статье рассмотрены конструкции тепловозов, работающих по газодизельному циклу, приведены технические характеристики маневровых газотепловозов, указаны преимущества и недостатки различных систем газоподдачи, приведен анализ причин отсутствия экономической окупаемости опытной эксплуатации газотепловозов в московском регионе.

Ключевые слова: газотепловоз, газодизельный цикл, электронная система управления, электромагнитный клапан, пневмоклапан.

Trial operation of gas-turbine locomotives at the Moscow railroad

D.N. Grigorovich, A.V. Zarucheysky

The article deals with different locomotive constructions running on gas and diesel cycle, contains specifications for shunting gas-turbine locomotives, points out the advantages and disadvantages of different gas feeding systems, and analyzes the reasons for the poor return on investment associated with the pilot operation of gas-turbine locomotives in the Moscow region.

Keywords: gas-turbine locomotives, gas and diesel cycle, electronic control system, electromagnetic valve, pneumatic valve.

Стратегия развития ОАО «РЖД» предусматривает использование альтернативных видов топлива для тягового подвижного состава, среди которых одним из основных является природный газ. Прежде чем создавать новый тепловоз на газовом топливе, было принято решение переоборудовать несколько серий существующих дизельных тепловозов для отработки рабочего процесса и определения способов хранения запаса газа. Ранее специалисты ВНИИЖТ проводили работы по переводу на газодизельный цикл маневровых тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18, а также магистрального тепловоза 2ТЭ116. Газотепловозы ТЭМ18Г (рис. 1) были проверены в опытной эксплуатации, а ТЭМ2Г и 2ТЭ116Г прошли

наладочные испытания на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ



Рис. 1. Маневровый газотепловоз ТЭМ18Г-002 на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ (г. Щербинка)

(г. Щербинка), но по ряду причин не были переданы в эксплуатацию.

Маневровые газотепловозы ТЭМ18Г-001 и ТЭМ18Г-002 работают по газодизельному циклу с использованием природного газа и запальной порции дизельного топлива. На газотепловозе ТЭМ18Г-001 установлены механические клапаны подачи газа, приводимые в движение распределительным валом дизеля, а на ТЭМ18Г-002 – электромагнитные клапаны с микроконтроллерной системой управления.

Механические газовые клапаны имеют одно преимущество – достаточно большое проходное сечение, позволяющее обеспечивать шесть цилиндров четырехтактного дизеля часовым расходом газа до 180 кг/ч. При этом имеется и ряд недостатков. Привод механических газовых клапанов осуществляется через рычаг распределительного вала, а расход газа регулируется плунжерными дозаторами, расположенными перед газовыми клапанами. К несовершенствам таких клапанов относятся необходимость периодической проверки крепления ширмы и отсутствие прецизионности пары ширма – направляющая втулка. Последнее вызывает увеличение угла опережения подачи

Таблица 1

Мощностные и частотные характеристики тепловоза ЧМЭЗГ

Позиция контроллера	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Мощность главного генератора, кВт
0	350 ± 10	-
1	350 ± 10	20...40
2	380 ± 10	75...92
3	420 ± 10	155...171
4	460 ± 10	220...250
5	510 ± 10	300...330
6	570 ± 10	550...580
7	660 ± 10	695...720
8	750 ± 5	880...900

газа в цилиндр и ухудшает сгорание газозоудшной смеси. Серьезным недостатком механических клапанов является невозможность регулировки углов подачи газа на различных режимах работы тепловоза, что обеспечивает экономичные режимы только на фиксированных позициях контроллера машиниста.

Топливная аппаратура тепловозов позволяет качественно распылять топливо в цилиндрах дизеля в широком диапазоне цикловых подач: от 0,44 г/цикл на холостом ходу до 4,9 г/цикл на номинальном режиме для маневрового тепловоза и до 8,3 г/цикл для магистрального тепловоза. При работе тепловоза по газодизельному циклу цикловая подача дизельного топлива сокращается в 3-4 раза, что невозможно при холостом ходе, поэтому газотепловозы работают по газодизельному циклу только под нагрузкой. При этом механические газовые клапаны, приводимые в движение распределительным валом дизеля, продолжают работать и на холостом ходу. С учетом того, что на холостом ходу тепловозы работают до 80 % времени, повышенный износ механических клапанов является еще одним их существенным недостатком.

На основании опытной эксплуатации газотепловозов с механическими и электромагнитными клапанами подачи газа принято решение отказаться от механических клапанов. Недостаток электромагнитных клапанов – проходное сечение, не обеспечивающее необходимые расходы газа, – был устранен на тепловозе ТЭМ18Г-002 установкой двух электромагнитных клапанов параллельно на каждом цилиндре.

В феврале 2011 г. ВНИИЖТ передал в опытную эксплуатацию на Московскую железную дорогу еще один

переоборудованный на газодизельный цикл тепловоз ЧМЭЗГ (рис. 2). Маневровый газотепловоз ЧМЭЗГ (табл. 1) имеет шестицилиндровый дизель К6S310DR мощностью 993 кВт и электрическую передачу – тяговый генератор постоянного тока мощностью 885 кВт. После ввода в эксплуатацию тепловоз используется на маневровой работе в депо Лихоборы, Люблино и на станции Силикатная.

На газотепловозе ЧМЭЗГ под рамой и в аккумуляторном отсеке установлены газовые баллоны, объединенные в два блока, в которых хранится запас сжатого природного газа (КПП) под давлением 24,5 МПа. Все баллоны одногорловые, металлокомпозитные (ГОСТ 9731-79). Общий объем баллонов составляет 3755 л. Запас газа при давлении 15 МПа составляет 730 м³ (511 кг), при давлении 20 МПа – 938 м³ (657 кг), при давлении 25 МПа – 1170 м³ (820 кг). Запас дизельного топлива хранится в трех топливных баках, расположенных под рамой тепловоза, и составляет 3000 кг.

К блокам газовых баллонов с двух сторон газотепловоза подводится трубопровод с запорными вентилями, манометрами и заправочными штуцерами, что позволяет заправлять газотепловоз КПП с обеих сторон.



Рис. 2. Маневровый газотепловоз ЧМЭЗГ-1994



Рис. 3. Газовое оборудование газотепловоза ЧМ3ЗГ-1994

Часть газового оборудования размещена в баллонном тамбуре за кабиной машиниста, вторая часть смонтирована в одном блоке и размещена на торце переднего капота в отсеке, в котором установлен компрессор (рис. 3). Обе части газового оборудования соединены трубопроводом, проходящим под рамой газотепловоза.

Блок аппаратуры газоподачи соединен с блоком газовых баллонов трубопроводом, который включает редуктор первой ступени понижения давления газа, запорный вентиль и предохранительный клапан. Блок аппаратуры газоподачи соединен с газодизелем трубопроводом, проложенным по капоту над помещением с холодильником и дизельным помещением. Для вентиляции блока аппаратуры газоподачи в крыше отсека переднего кузова, в котором этот блок установлен, смонтирован отсасывающий осевой вентилятор, выбрасывающий воздух из блока наружу через люк в крыше кузова. Поступление свежего воздуха в блок осуществляется через просечки в дверях, установленных на боковой стене отсека.

Для вентиляции аппаратной камеры на дверце заднего капота справа установлен центробежный вентилятор, забирающий воздух снаружи через фильтр и подающий его для наддува отсека кабины машиниста, в котором размещена аппаратная камера. Для вентиляции помещений над газодизелем, генератором

и вспомогательным оборудованием установлены отсасывающие осевые вентиляторы. Все вентиляторы приводятся во вращение электродвигателями взрывозащищенного исполнения.

Для контроля довзрывоопасной концентрации природного газа в воздухе подкапотного пространства газотепловоза в дизельном помещении, в блоке аппаратуры газоподачи, аппаратной камере, помещении вспомогательного оборудования размещены шесть датчиков концентрации природного газа, а в кабине машиниста установлен блок сигнализации, управляющий системой взрывопреупреждения.

В отличие от электромагнитных клапанов газотепловоза ТЭМ18Г на газотепловозе ЧМЭЗГ для подачи газа в цилиндры дизеля установлены пневмоклапаны совместно с пилотными электромагнитными клапанами (рис. 4). Пилотные клапаны, управляемые электрическими импульсами, открывают при помощи сжатого воздуха пневмоклапаны, через которые газ попадает в цилиндры дизеля. В зависимости от режима



Рис. 4. Пневмоклапан и пилотный электромагнитный клапан на цилиндре дизеля газотепловоза ЧМ3ЗГ-1994

работы тепловоза давление газа на входе в цилиндры дизеля изменяется от 50 до 300 кПа. Необходимое давление устанавливается газовоздушным регулятором, который управляется по заданному алгоритму электронной системой с помощью электромагнитных клапанов. Воздух для управления пневмоклапанами под давлением 600...900 кПа поступает из тормозного ресивера тепловоза. Расчеты показали, что часовой расход воздуха для управления шестью пневмоклапанами тепловоза не превышает 5 % от производительности тормозного компрессора, что практически не влияет на частоту его включений по сравнению со штатной работой тепловоза на дизельном топливе.

Преимуществом пневмоклапанов по сравнению с электромагнитными является достаточно большое проходное сечение (D_u 14 мм), позволяющее использовать для каждого цилиндра только один клапан. К недостаткам следует отнести более низкое, чем у электромагнитных клапанов, быстродействие (на 40 %). Скомпенсирован данный недостаток более ранними углами открытия и закрытия клапанов, которые записаны в память системы управления. Предельная расчетная частота вращения коленчатого вала дизеля, при которой такие клапаны можно использовать, составляет около 1000 мин^{-1} , что характерно для большинства тепловозных дизелей.

Для управления подачей газа в цилиндры дизеля и газовым оборудованием тепловоза в кабине машиниста установлены два электронных блока на базе микроконтроллеров. Для устойчивой подачи запальной порции топлива на газодизеле установлены охлаждаемые форсунки специальной конструкции. Применение электронноуправляемой системы подачи совместно с охлаждаемыми форсунками обеспечивает устойчивую подачу

газа и запальной порции дизельного топлива при работе газотепловоза, начиная со второй позиции контроллера машиниста.

Для определения положения поршня в первом цилиндре дизеля к блоку управления пилотными клапанами подведен сигнал от индуктивного датчика отметки ВМТ, установленного на распределительном валу газодизеля. В процессе предварительных испытаний были откорректированы углы открытия и закрытия пилотных электромагнитных клапанов, которые записаны в энергонезависимую память электронного блока управления. Импульс ВМТ является началом отсчета цикла длительностью 720° поворота коленчатого вала. Зная момент прохождения предыдущего импульса, микроконтроллер рассчитывает продолжительность одного полного оборота вала и поворота вала на 1° . Таймер микроконтроллера программируется на рассчитанный интервал и инициирует прерывания при каждом прохождении 1° . Если текущий градус совпадает с углом открытия или закрытия одного из клапанов, микроконтроллер устанавливает или снимает напряжение на базе соответствующего управляющего транзистора. На блоке установлены семь светодиодов, которые

показывают импульс ВМТ и импульсы управления каждого из шести пилотных клапанов. В процессе отладки управляющие импульсы и импульс ВМТ передаются на компьютерную измерительную систему через дополнительный разъем, который установлен на блоке управления. При штатной работе тепловоза этот разъем не используется.

Тепловоз обеспечивает мощность дизель-генератора на всех режимах работы по газодизельному циклу. Вследствие неполного смесеобразования при быстротечных процессах в цилиндрах тепловоза удельный эффективный расход топлива при работе на газе несколько хуже чем при работе на дизельном топливе. Однако с учетом стоимости газа и его более высокой калорийности по сравнению с дизельным топливом при работе на газе может быть обеспечена значительная экономия средств на топливо.

Электронный блок управления газовым оборудованием газотепловоза ЧМЭЗГ создан на базе микроконтроллера с энергонезависимой памятью. Каждой входной комбинации сигналов, определяемой по органам управления тепловоза, соответствует своя комбинация выходных сигналов, определяемая программой

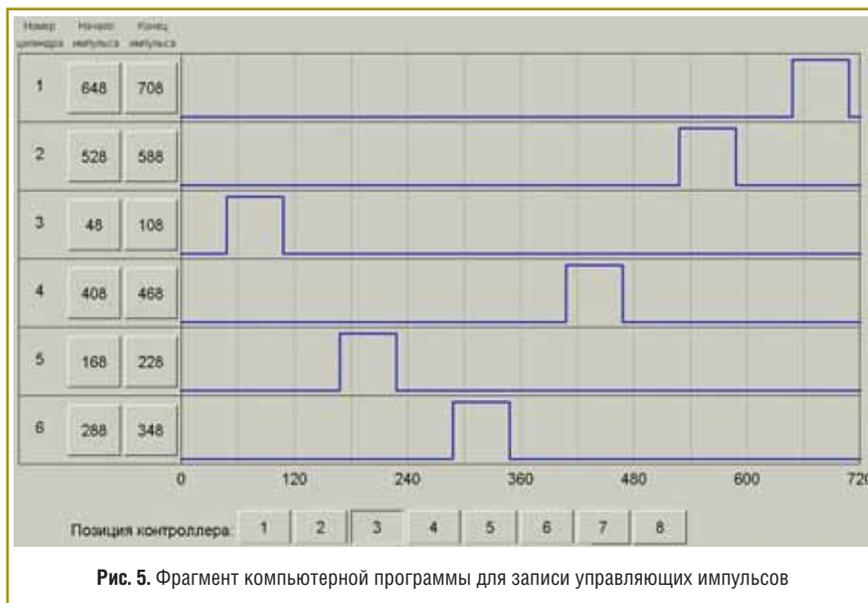


Рис. 5. Фрагмент компьютерной программы для записи управляющих импульсов

**Основные показатели работы газотепловоза ЧМЭЗГ-1994,
оборудованного электронной системой подачи газа при реостатных испытаниях**

Показатели	Значения						
	2	3	4	5	6	7	8
Позиция контроллера	2	3	4	5	6	7	8
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	379	419	458	491	553	651	747
Ток главного генератора, А	804	1235	1386	1764	2026	2087	2241
Напряжение главного генератора, В	105	155	194	218	258	312	364
Мощность главного генератора, кВт	84	191	269	385	523	651	816
Мощность вспомогательных нагрузок, кВт	18	20	22	26	32	42	56
КПД тягового генератора, %	92,8	93,2	93,4	93,6	93,9	94	93,9
Мощность дизеля, кВт	109	225	310	437	588	735	924
Часовой расход топлива, кг/ч	12,5	15,8	16,3	23,9	33,6	39,3	43,9
Часовой расход газа, кг/ч	20,6	43,2	52,1	69,8	97,4	126,5	165,7
Эквивалентный часовой расход топлива, кг/ч	35,2	63,3	73,6	100,7	140,7	178,5	226,2
Удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч	323	281	237	230	239	243	245
Доля дизельного топлива, %	35,6	25,0	22,1	23,7	23,9	22,0	19,4
Давление газа в коллекторе, кПа	73	74	90	208	274	345	388
Температура газа в коллекторе, °С	32	28	28	29	28	29	27
Средняя температура отработавших газов на выходе из цилиндров, °С	254	294	338	365	378	401	445

управления, записанной в память микроконтроллера. В ряде случаев в зависимости от предыдущего состояния агрегатов на одну и ту же комбинацию входных сигналов алгоритм управления предусматривает разные комбинации выходных сигналов. Для этого микроконтроллер устанавливает признак текущей операции, позволяющий на следующем шаге определить предыдущее состояние агрегатов.

Опрос состояния всех входных сигналов производится циклически с интервалом в 1 с. Входные комбинации формируются в двоичном коде «1» или «0». После обработки входных сигналов микроконтроллер в соответствии с алгоритмом управления заменяет отдельные биты входного кода третьим состоянием «х», которое означает, что состояние

агрегата не имеет значения для выработки следующей управляющей комбинации.

Микроконтроллер последовательно сравнивает обработанную входную комбинацию сигналов со строками таблицы, хранящейся в памяти. Как только происходит совпадение комбинации входных сигналов со строкой таблицы, микроконтроллер производит соответствующие установки и прекращает цикл опроса.

В период испытаний угол начала подачи изменялся в пределах от -50° до $+50^\circ$ п.к.в. от ВМТ, продолжительность подачи от 160° до 220° п.к.в.

Оптимальным по удельному эквивалентному расходу топлива углом начала подачи газа является угол, соответствующий ВМТ в процессе наполнения цилиндра. Это положение незначительно смещается влево

при увеличении частоты вращения коленчатого вала, когда сокращается время образования рабочей смеси.

Анализ результатов испытаний показал, что более раннее начало подачи вызывает повышенную утечку газа через цилиндр в процессе его продувки, более позднее ухудшает условия смесеобразования, так как с закрытием выпускных клапанов резко падает скорость поступающего в цилиндр воздуха. С увеличением давления газа для сокращения продолжительности подачи растут утечки газа и ухудшается смесеобразование, что сопровождается увеличением удельного расхода топлива.

Открытие и закрытие газовых клапанов происходит с задержкой относительно сигнала на их срабатывание, зависящей от частоты вращения коленчатого вала газодизеля

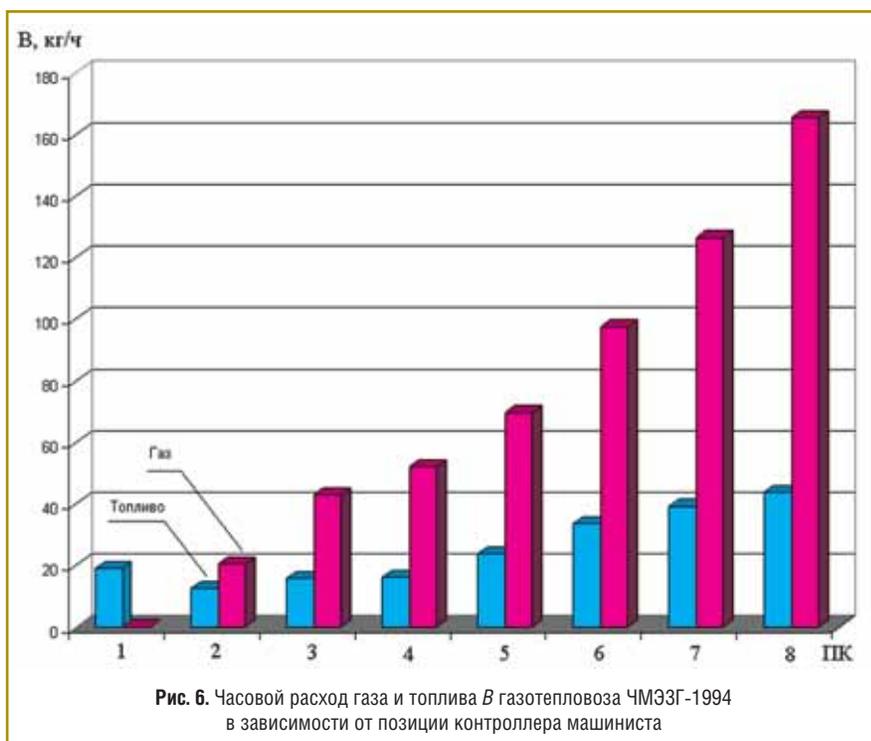


Рис. 6. Часовой расход газа и топлива B в газотепловоза ЧМЭЗГ-1994 в зависимости от позиции контроллера машиниста

и давления газа перед клапаном. Изменение давления управляющего воздуха в тормозном ресивере практически не влияет на продолжительность открытия–закрытия пневмоклапана, что обеспечивается его конструкцией и подтверждено предварительными испытаниями на стенде. Запаздывание открытия–закрытия пневмоклапана при давлении газа 100 кПа составляет около 10 мс, а при увеличении давления до 300 кПа – увеличивается до 25 мс. Система позволяет учесть эти задержки путем внесения поправок в программу управления клапанами (рис. 5).

Электронная система обеспечивает заданные генераторной характеристикой мощность и частоту вращения коленчатого вала газодизеля (табл. 2). Значение удельного эффективного расхода газодизельного топлива по позициям контроллера машиниста в среднем на 5 % превышает аналогичные показатели работы тепловоза на дизельном топливе. Объясняется это быстротечностью процессов смесеобразования в относительно

большом объеме цилиндра дизеля, что несколько уменьшает коэффициент полноты сгорания.

Часовой расход газа увеличивается пропорционально частоте вращения коленчатого вала и мощности дизеля, а часовой расход топлива имеет пологий участок характеристики на малых позициях контроллера машиниста (рис. 6). Объясняется это тем, что при низких цикловых подачах запальной порции дизельного топлива топливная аппаратура находится на границе устойчивой работы. При снижении запальной порции дизельного топлива и, соответственно, расхода топлива возможны пропуски вспышек. В процессе испытаний границы устойчивой работы были определены экспериментально.

Охлаждаемые форсунки специальной конструкции работают устойчиво без пропусков подачи запальной порции топлива в диапазоне 300...750 мин⁻¹, обеспечивая минимальную цикловую подачу 15 % от цикловой подачи при работе на дизельном топливе. Неравномерность подачи запальной порции в указанном диапазоне не превышает 2 %.

Опытная эксплуатация газотепловозов на Московской железной дороге, к сожалению, оказывается экономически убыточной по двум причинам. Первая причина – отсутствие инфраструктуры по заправке и обслуживанию газотепловозов. К решению этого вопроса ОАО «РЖД» приступит после создания партии достаточно надежных газовых тепловозов. Сама по себе эта причина объективна, и ее отрицательное влияние на экономическую составляющую эксплуатации газотепловозов могло бы скомпенсироваться за счет более низкой цены газа. Однако вторая причина – существующая в московском регионе цена газа – может свести всю кампанию на нет. Как выяснилось, отпускная цена газа на АГНКС московского региона составляет в среднем 14 руб./м³. При этом только одна организация «Мосавтохолод» имеет автогазозаправщик для доставки газа к месту заправки газотепловозов. Цена газа у «Мосавтохолода» составляет 18 руб./м³, а стоимость одной доставки 1500 м³ – 13 тыс. руб. С учетом того, что автогазозаправщик не оборудован дожимным компрессором, заправить в тепловозы за одну поездку удается только около 1000 м³. Нетрудно подсчитать, что при таких ценах говорить об экономической выгоде применения природного газа не приходится. Поэтому целью опытной эксплуатации является, главным образом, отработка технологий.

Безусловно, такие цены являются следствием нарушения положений Постановления Правительства Российской Федерации от 15.01.1993 г. № 31 «О неотложных мерах по расширению замещения моторных топлив природным газом», которое определяет предельную отпускную цену на сжатый природный газ в размере не более 50 % от цены бензина А-76, включая налог на добавленную стоимость.

Пропуски воспламенения в ДВС с искровым зажиганием с ЭСУД при работе на газовом топливе

В.А. Шишков,
начальник технического отдела ООО «Рекар»,
доцент Самарского государственного аэрокосмического университета
им. С.П. Королева, к.т.н.

Рассмотрена работа ДВС с искровым зажиганием с электронной системой управления двигателем (ЭСУД) при пропусках воспламенения как на бензине, так и на газовом топливе. Показано отрицательное воздействие пропусков воспламенения на работу двигателя, использующего топливо обоих видов. Описан алгоритм определения пропусков воспламенения в зависимости от сигналов с датчиков электронной системы управления ДВС. Предложены пути совершенствования алгоритма управления ДВС при пропусках воспламенения при работе на газовом топливе и возможности обратного переключения на бензин цилиндров, в которых они происходят.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), пропуски воспламенения, распределенный впрыск газового топлива, искровое зажигание, алгоритм, резервные режимы, диагностика, электронная система управления.

The misses of ignition in the engine of internal combustion with spark ignition with electronic control system at work on gas fuel

V.A. Shishkov

The work the engine of internal combustion with spark ignition with an electronic control system is considered at the misses of ignition both on petrol, and on gas fuel. The negative influence of the misses of ignition on work of the engine on both kinds топлив is shown. The algorithm of definition of the misses of ignition is described depending on available signals from gauges of an electronic control system the engine of internal combustion. The ways of perfection of algorithm of management the engine of internal combustion are offered at the misses of ignition at work on gas fuel and opportunity of return switching on petrol of cylinders, in which they occur.

Keywords: the engine of internal combustion, the misses of ignition, direct injection of gas fuel, spark ignition, algorithm, reserve modes, diagnostics, electronics control system.

Пропуски воспламенения опасны для двигателей, имеющих электронную систему управления с обратной связью по сигналу датчика кислорода в отработавших газах (ОГ). В этом случае при возникновении пропуска воспламенения в одном из цилиндров датчик кислорода обнаруживает его избыток в ОГ, что приводит к увеличению топливopодачи в соседние нормально работающие цилиндры. Работа двигателя нарушается, он не выполняет норм по токсичности отработавших газов. По нормам Евро-3 и Евро-4 допускается до 2 % пропусков воспламенения, при этом токсичность ОГ должна укладываться в соответствующие нормы. При пропусках воспламенения более 2 % электронный блок управления отключает данный цилиндр, при этом в нем прекращается топливopодача, и для некоторых ДВС отключается зажигание, а управление двигателем по сигналу датчика кислорода выключается для достижения нормальной работы других цилиндров (данная функция реализована не на всех моделях автомобилей). После останова и последующего пуска двигателя топливopодача в неисправный цилиндр и зажигание восстанавливаются, если пропуски зажигания повторяются, то снова происходит отключение цилиндра.

Пропуски воспламенения возникают по ряду причин.

При большом обеднении топливopвоздушной смеси $\alpha \gg 1$ возможными причинами могут быть нарушения дозировки топлива вследствие засорения жиклера электромагнитной форсунки или ее неисправности, неисправность датчика массового расхода воздуха (ДМРВ), подсос воздуха из атмосферы во впускной системе между ДМРВ и впускным клапаном и т.д.

При большом обогащении топливopвоздушной смеси $\alpha \ll 1$ пропуски могут быть вызваны заливом топливом свечи зажигания из-за неисправности электромагнитной форсунки,

неисправностью ДМРВ, подсосом воздуха из атмосферы в выпускной системе между выпускными клапанами и управляющим датчиком содержания кислорода в отработавших газах, неисправностью в системе подогрева газового редуктора или недостаточным расходом охлаждающей жидкости, подаваемой в газовый редуктор, особенно в холодный период времени.

Например, при применении пропан-бутана для подогрева редуктора необходимо использовать шланги, идущие к отопителю салона, а не соединять редуктор последовательно с обогревом дроссельного патрубка, где расход охлаждающей жидкости невелик из-за малого сечения отверстий для ее прохода в корпусе дроссельного патрубка. Если в летнее время этого расхода охлаждающей жидкости и будет достаточно для испарения пропан-бутана, то в холода начнутся проблемы с устойчивостью работы ДВС.

При неисправности свечи зажигания пропуск воспламенения может быть вызван увеличенным или уменьшенным зазором между электродами в сравнении с рекомендуемым, трещиной на изоляторе, проскакиванием искры по корпусу при рабочем давлении в камере сгорания, отложением загрязняющих веществ на электродах и изоляторе. При неисправности высоковольтных проводов к пропуску воспламенения могут привести выгорание внутреннего проводника с появлением в нем зазора, а также пробой изоляции. При неисправности катушки зажигания межвитковые внутренние замыкания снижают высоковольтное напряжение, внутренние обрывы провода катушки из-за термических напряжений между проводом и эпоксидной смолой, используемой для ее заливки в корпусе [1], также обуславливают этот вид неисправности. Кроме того, это может происходить из-за негерметичности впускного или выпускного

клапанов, что снижает компрессию в цилиндре.

При нарушении фазы впрыска топлива возможными причинами могут быть периодические сбои в работе датчика положения коленчатого вала из-за увеличенного зазора между датчиком и зубчатым шкивом, плохого контакта в соединениях колодок жгута проводов или нарушения изоляции провода, идущего от датчика, обрыв или надрыв резинового демпфера в зубчатом шкиве, а также нарушение фазы зажигания [1] и т.д.

Пропуски воспламенения при работе на газовом топливе

С учетом вышеизложенного очень часто при установке ГБО четвертого поколения с электромагнитными газовыми форсунками пропуски воспламенения возникают из-за неисправности одной из них или при значительном отклонении расхода газа от номинального через форсунки [2]. Это приводит к отключению одного из цилиндров. Такой дефект обуславливает неустойчивую работу двигателя и резкое изменение содержания кислорода в отработавших газах. Сигнал с датчика кислорода обычно показывает переобогащение топливовоздушной смеси, если увеличение топливодачи в другие цилиндры произошло до момента отключения данного цилиндра, или переобеднение топливовоздушной смеси, если отключение цилиндра из-за пропусков воспламенения произошло до увеличения топливодачи в другие цилиндры. В этом случае нормальная настройка газовой системы с помощью автокалибровки становится невозможной. Оборудование для проверки расхода газа через электромагнитные форсунки у многих установщиков ГБО отсутствует, поэтому им сложно понять причину отключения одного из цилиндров. Этого не происходило бы, если бы качество производимых газовых форсунок было стабильным.

Для быстрого определения причин неустойчивой работы двигателя на газовом топливе необходимо:

- остановить ДВС;
 - переключить работу ДВС с газа на бензин;
 - пустить ДВС на бензине и поработать на режиме холостого хода 10...15 мин;
 - выполнить диагностику работы электронной системы управления ДВС с помощью диагностического тестера (Tech, ДСТ-2, мотортестер и т.д.) на бензине, если замечаний не обнаружено, то переключиться на газ, если обнаружены пропуски воспламенения при работе на бензине – определить их причину и устранить, а затем выполнить автокалибровку и проверки при работе ДВС на газовом топливе;
 - при неустойчивой работе ДВС на газе выполнить диагностику электронной системы управления с помощью диагностического тестера (Tech, ДСТ-2, Мотортестер и т.д.), если прибор обнаружил код ошибки по пропускам зажигания, то по номеру ошибки определить номер цилиндра, в котором это произошло;
 - если ДВС работает на бензине без замечаний, то основной причиной отключения одного из его цилиндров при работе на газе является нарушение в нем газовой подачи, при этом необходимо проверить расходные характеристики газовых форсунок на специализированном стенде; неисправную газовую форсунку заменить на новую или, если это возможно, настроить ее, при этом отклонения расходных характеристик форсунок, установленных на одном двигателе, не должны превышать 5 %; при больших отклонениях выполнить их поднастройку или заменить на новые.
- Необходимо отметить, что некоторые модели автомобилей, изготовленные с учетом норм токсичности Евро-2, не имеют в алгоритме управления ДВС функции отключения цилиндра, в котором происходят пропуски воспламенения. В этом случае

диагностика ДВС с помощью тестеров при работе на бензине и газе не сможет определить эту неисправность – сигнал с датчика кислорода будет показывать обеднение топливовоздушной смеси, что приведет к еще большей неустойчивости работы ДВС на газовом топливе из-за переобогащения топливовоздушной смеси в других цилиндрах. Это вызовет повышенный расход топлива примерно на 25 %, и токсичность ОГ не будет соответствовать нормам Евро-2. Однако перегрева выпускной системы и нейтрализатора не будет, так как избыток топлива заберет часть их теплоты на испарение и разложение углеводородов на легкие фракции. При этом есть вероятность отложения тяжелых фракций углеводородов на внутренних поверхностях элемента нейтрализатора, что приведет к повышенному выбросу углеводородов и оксида углерода.

Для последующего восстановления эффективности нейтрализатора необходимо устранить неисправности, связанные с пропусками воспламенения, и «прожечь» нейтрализатор от отложений углеводородов, проехав по загородной трассе со средней нагрузкой на экономичном режиме движения со скоростью 80...100 км/ч расстояние от 20 до 60 км. Этот способ позволяет очистить нейтрализатор от отложений углеводородов только в том случае, если период эксплуатации автомобиля с пропусками воспламенения был невелик. При движении с максимальной нагрузкой со скоростью более 120 км/ч двигатель работает на обогащенной топливовоздушной смеси, что не способствует очистке нейтрализатора от отложений углеводородов.

Вероятность возникновения пропусков воспламенения при добавках в бензин или газообразное топливо газообразного водорода снижается из-за малой энергии вспышки смеси водорода с воздухом. Молекулы водорода в смеси с молекулами кислорода в воздухе являются активными

центрами воспламенения всей топливовоздушной смеси.

Вероятность возникновения пропусков воспламенения при работе ДВС на углеводородном газовом топливе (КПГ, пропан-бутан) наоборот значительно возрастает из-за того, что для воспламенения газовой топливовоздушной смеси (КПГ – воздух, пропан-бутан – воздух) требуется большая энергия искрового разряда на свече зажигания, так как температура вспышки этих смесей значительно выше температуры вспышки паров бензина с воздухом. Поэтому если газовые форсунки имеют расходные характеристики в поле допуска, то причиной возникновения пропусков воспламенения могут быть система зажигания, недостаточный подогрев или наличие жидкой газовой фазы (для пропан-бутана) на выходе из редуктора. Перегрев газа на входе в газовую рампу может также привести к пропускам воспламенения из-за значительного обеднения газовой смеси при снижении ее плотности в зависимости от температуры. Для быстрого поиска неисправности диагностику системы зажигания необходимо выполнять при работе на бензине в соответствии с инструкцией по ремонту и обслуживанию конкретного двигателя и автомобиля.

Особое внимание необходимо уделить датчикам температуры и давления газа в рампе форсунок, так как по величине их сигналов ведется коррекция топливоподачи в ДВС. Если показания этих датчиков не соответствуют реальной температуре и давлению газа, то газозоветная смесь может оказаться переобедненной или переобогащенной, что также может привести к неустойчивой работе ДВС и к пропускам воспламенения. Инерционность датчика температуры обычно составляет около 2...3 с, что при наличии двухфазного потока газа на входе в рампу форсунок приводит к неверной коррекции топливоподачи в электронном блоке управления ДВС. Некоторые датчики

температуры газа на входе в рампу форсунок имеют пластмассовый корпус, что увеличивает их инерционность до 5 с. Кроме этого, необходимо правильно устанавливать рампу газовых форсунок, датчики температуры и давления газа на ее входе в моторном отсеке на конкретном автомобиле. Если датчик температуры будет обдуваться встречным потоком воздуха, то показания его изменятся, и коррекция топливоподачи нарушается. Это особенно заметно в холодный период времени, когда по этой причине может возникнуть неустойчивая работа ДВС, приводящая к пропускам воспламенения или повышенной неполноте сгорания из-за обеднения газозоветной смеси, а в жаркий период – наоборот к переобогащению. Поэтому датчик температуры газа в рампе форсунок должен быть расположен в такой зоне моторного отсека, в которой на него будет оказано минимальное воздействие внешних факторов (набегающий поток воздуха, влияние температуры нагретых частей двигателя, попадание атмосферных осадков).

Алгоритм обнаружения пропусков воспламенения

При работе на газовом топливе алгоритм такой же, как и при работе на бензине. Построение этого алгоритма зависит от наличия одного или нескольких датчиков на ДВС – положения коленчатого вала, детонации, давления в камере сгорания, ионных токов при сгорании топливовоздушной смеси и температуры в камере сгорания.

При наличии датчика положения коленчатого вала пропуски воспламенения в одном из цилиндров ДВС определяются по знаку (при отрицательном – пропуск) и величине модуля скорости изменения частоты вращения коленчатого вала (или равенству нулю второй производной частоты вращения коленчатого вала по времени), а также



знаку и величине крутящего момента. Например, два условия пропуска воспламенения:

$$|dn/dt| < n_t \text{ и (или) } M_{кр} < M_t,$$

где dn/dt – скорость изменения частоты вращения коленчатого вала; $n_t = f(d\beta/dt; n; G_b)$ – некоторая граничная функция скорости изменения частоты вращения коленчатого вала, зависящая от скорости нажатия на педаль акселератора $d\beta/dt$, частоты вращения коленчатого вала n и расхода воздуха G_b (нагрузки) через ДВС; $M_{кр} = f(\gamma)$ – максимальный крутящий момент каждого цилиндра является функцией угла положения коленчатого вала γ ; $M_t = f(d\beta/dt; n; G_b)$ – некоторая граничная функция изменения крутящего момента, зависящая от скорости нажатия на педаль акселератора $d\beta/dt$, частоты вращения коленчатого вала n и расхода воздуха G_b (нагрузки) через ДВС.

Значение n_t на стационарном режиме может быть, например, 25...100 мин⁻¹/с, а для режима ускорения, например, 0...25 мин⁻¹/с, причем диапазоны этих значений для двигателя, работающего на газе, по сравнению с двигателем, работающим на бензине, больше примерно на 10...25 %.

Для каждого конкретного двигателя значения M_t на стационарном режиме и режиме ускорения также будут различны, причем диапазоны этих значений для двигателя, работающего на газе, по сравнению с двигателем, работающим на бензине, больше примерно на 10...25 %. Диапазон этих значений, в свою очередь,

связан с конкретным снижением мощности и крутящего момента при переключении с бензина на газовое топливо. Для двигателя с наддувом цилиндров или с увеличенной степенью сжатия для работы на газе диапазоны граничных функций будут аналогичны тем, которые определены для двигателя, работающего на бензине, так как изменение мощности и крутящего момента при переходе с одного вида топлива на другое незначительно.

Если педаль акселератора находится в стационарном положении $\beta = \text{const}$ (β – угол положения педали акселератора) или в режиме нажатия $d\beta/dt > 0$, то при пропуске воспламенения в одном из цилиндров на постоянном режиме возникнет кратковременный провал частоты вращения (рис. 1), а на режиме ускорения этот пропуск не даст прироста частоты вращения, будет или провал по величине крутящего момента на стационарном режиме или крутящий момент не возрастет при

ускорении по сравнению с предыдущими и последующими рабочими ходами соответствующих цилиндров, то есть $(dn/dt)_{-1} \leq 0$, а в предыдущем $(dn/dt)_{-1} > 0$ и последующем $(dn/dt)_{+1} > 0$.

Для стационарного режима работы ДВС (рис. 2) при пропуске воспламенения или вялом сгорании газозооной смеси в одном из цилиндров произойдет снижение максимального крутящего момента (например, при углах положения коленчатого вала 130° от ВМТ для первого цилиндра, 310° – для третьего цилиндра, 490° – для четвертого цилиндра и 670° – для второго цилиндра, если порядок работы цилиндров 1-3-4-2), например, на рис. 2 с 11,3 кН·м до значения, ниже граничного M_t .

Кроме этого, при провале крутящего момента в фазе рабочего хода одного из цилиндров или отсутствии его прироста на режиме ускорения электронный блок управления определяет номер этого цилиндра и далее ведет в нем счет числа пропусков воспламенения. При достижении 2 % пропусков воспламенения электронный блок управления отключает топливоподачу через форсунку в данный цилиндр, подачу зажигания в нем, а также обратную связь по сигналу с датчика кислорода в отработавших газах. Если педаль акселератора в режиме сброса газа $d\beta/dt < 0$, то как обычно происходит кратковременная отсечка топливоподачи с последующим ее восстановлением до режима, соответствующего конечному положению педали акселератора.



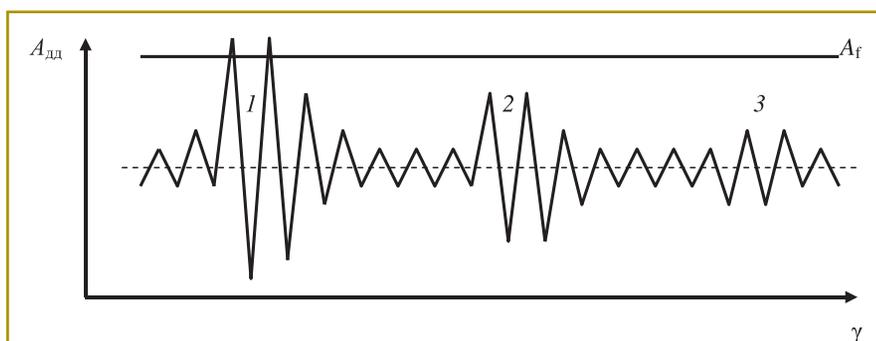


Рис. 3. Изменение амплитуды сигнала датчика детонации по углу положения коленчатого вала или по времени при пропуске воспламенения:

A_f – граница амплитуды сигнала датчика детонации для обнаружения пропуска воспламенения; 1 – нормальный процесс сгорания газовой смеси в цилиндре; 2 – вялый процесс сгорания с большой неполнотой сгорания; 3 – пропуск воспламенения при работе ДВС

В этом случае алгоритм обнаружения пропусков воспламенения необходимо отключить, чтобы не было ложных отключений цилиндров.

При наличии датчика детонации его сигнал также можно использовать в качестве исходного для обнаружения пропусков воспламенения в цилиндрах ДВС или в дополнение к сигналу датчика положения коленчатого вала, описанного выше, для повышения достоверности определения пропуска воспламенения.

Сигнал с датчика детонации в этом случае пропускается через специальный фильтр в соответствии с частотой вращения коленчатого вала ДВС. По амплитуде и частоте колебаний во время рабочего хода соответствующего цилиндра определяют наличие пропуска воспламенения или вялого горения с высокой неполнотой сгорания путем сравнения амплитуды с некоторой граничной функцией. Граничную функцию можно определить экспериментальным путем изменения неполноты сгорания в цилиндре ДВС при изменении обеднения и обогащения газовой смеси вплоть до получения пропуска воспламенения при разных температурах охлаждающей жидкости и различных внешних условиях. Если амплитуда $A_{дд}$ сигнала с датчика детонации ниже амплитуды A_f граничной функции при соответствующих внешних условиях, то в данном цилиндре наблюдается пропуск

воспламенения. При вялом горении для различной неполноты сгорания газовой смеси можно установить свою граничную функцию (рис. 3).

Необходимо отметить, что желательнее использование сигнала с датчика детонации для обнаружения пропусков воспламенения совместно с сигналом датчика неровной дороги, что обеспечит наиболее точное определение пропуска воспламенения или вялого горения с высокой неполнотой сгорания. Номер цилиндра, в котором наблюдается пропуск воспламенения, определяется при помощи синхронизации сигналов с датчиков детонации и неровной дороги с фазой рабочего хода соответствующего цилиндра, которая в свою очередь может быть определена по

фазе сигнала с датчика положения коленчатого вала или по фазе впрыска топлива в соответствующий цилиндр ДВС.

При наличии датчика давления в камере сгорания пропуск воспламенения можно определить по отсутствию или недостаточному росту давления в камере сгорания p_e в процессе горения топливовоздушной смеси в цилиндре, если был осуществлен впрыск топлива в этот цилиндр и соответственно подано зажигание. Условия пропуска воспламенения

$$p_{гр} > p_e,$$

где $p_{гр} = f(\epsilon; \gamma; T_{атм}; T_{ДВС}; p_{атм}; h; \eta; X_r; \eta_{сг}$ и т.д.) – некоторая граничная функция, зависящая от степени сжатия ϵ , угла положения коленчатого вала γ , температуры атмосферы $T_{атм}$, температуры двигателя $T_{ДВС}$, атмосферного давления $p_{атм}$, влажности атмосферного воздуха h , коэффициента наполнения цилиндров топливовоздушной смесью η , химического состава топлива [3] и продуктов сгорания X_r , полноты сгорания топливовоздушной смеси $\eta_{сг}$ и др. параметров.

Уровень граничной функции по давлению в камере сгорания при работе на газовом топливе в сравнении с работой на бензине будет ниже, если не предусмотрен наддув цилиндров или увеличение степени сжатия при работе на газовом топливе (рис. 4).

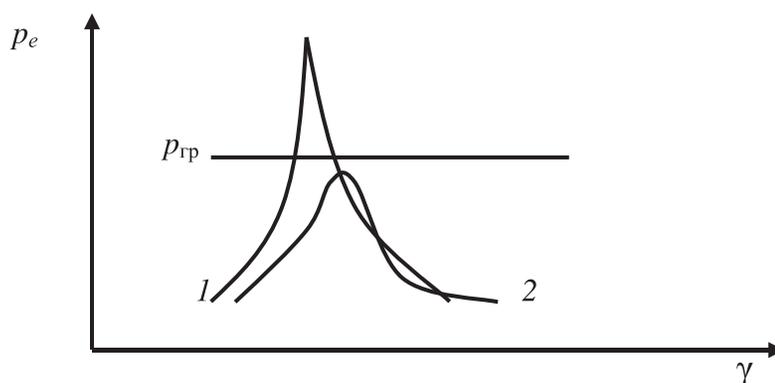
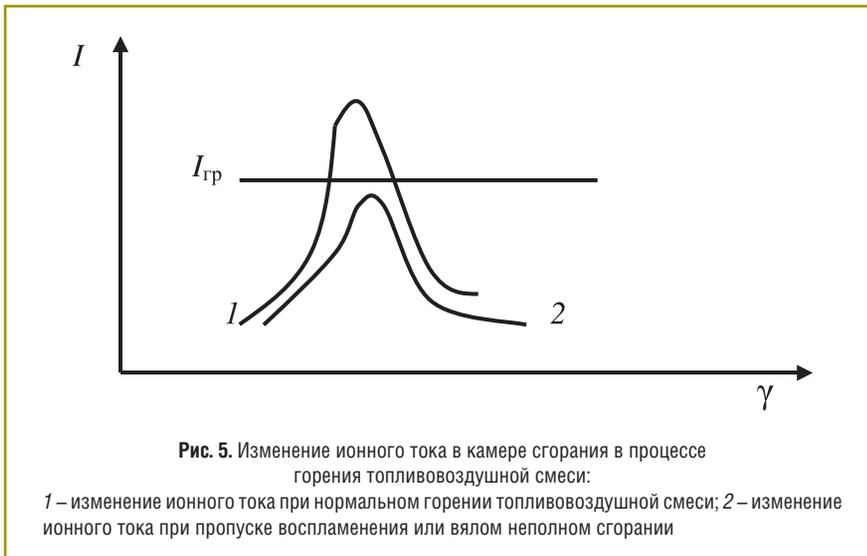


Рис. 4. Изменение давления в камере сгорания топливовоздушной смеси в зависимости от угла положения коленчатого вала относительно верхней мертвой точки поршня:

1 – изменение давления при нормальном горении топливовоздушной смеси; 2 – изменение давления при пропуске воспламенения или вялом неполном сгорании



Для улучшения достоверности определения пропуска воспламенения или вялого горения необходимо сравнить скорость увеличения давления в камере сгорания в процессе горения топливовоздушной смеси с некоторой граничной функцией.

$p_{гр} > dp_e/dt$ и (или) $p_t > dp_e/d\gamma$,
где $d\gamma$ – изменение угла положения коленчатого вала в процессе горения топливовоздушной смеси в цилиндре.

При отсутствии впрыска топлива и сигнала на зажигание при отсечке в режиме сброса газа алгоритм обнаружения пропусков воспламенения выключается.

При наличии датчика ионных токов в камере сгорания пропуски воспламенения определяются по величине этого тока в сравнении с некоторой функцией (рис. 5). Условия пропуска воспламенения в этом случае

$I_{гр} > I$,
где $I_{гр} = f(\gamma; T_r; U_i; p_e; h; X_r; \eta_{cr})$ – некоторая граничная функция ионного тока, зависящая от угла положения коленчатого вала γ , температуры горения топливовоздушной смеси T_r , напряжения на датчике ионных токов U_i , давления в камере сгорания в процессе горения топливовоздушной смеси p_e , влажности атмосферного воздуха h , химического состава топлива

и продуктов сгорания X_r , полноты сгорания топливовоздушной смеси η_{cr} и др. параметров.

По аналогии с датчиком давления в камере сгорания для большей достоверности обнаружения пропуска воспламенения можно ввести дополнительное условие по проверке скорости нарастания ионного тока dI/dt (или $dI/d\gamma$) в процессе горения топливовоздушной смеси в сравнении с некоторой граничной функцией.

При наличии датчика температуры в камере сгорания пропуски воспламенения определяют по уровню средней температуры во всем объеме камеры сгорания в процессе горения топливовоздушной смеси в сравнении с некоторой граничной функцией. Условие пропуска воспламенения в этом случае

$$T_{гр} > T_{пр}$$

где $T_{гр}$ – граничная функция режима работы ДВС, состава топливовоздушной смеси, вида топлива и внешних условий; $T_{пр}$ – температура продуктов горения в определенном диапазоне углов положения коленчатого вала γ в процессе горения топливовоздушной смеси.

Графическое изображение данного условия обнаружения пропуска воспламенения практически похоже на условие с ионными токами (см. рис. 4).

Все граничные функции для любого из вышеназванных датчиков можно определить экспериментальным путем. Для этого определяются значения функций Δp , $\Delta M_{кр}$, p_e , I , $T_{пр}$ на всех режимах работы ДВС, а затем вводятся граничные функции, отличающиеся от этих параметров на 5...20% в зависимости от конкретного двигателя и режима его работы. Граничные функции можно определить и расчетным путем при расчете параметров ДВС, делая запас по этим параметрам 5...20% в зависимости от конкретного двигателя и режима его работы. Но в этом случае требуется экспериментальная проверка полученных граничных функций, что фактически по затратам окажется выше, чем прямое экспериментальное их определение.

Граничные функции для различных газовых топлив и бензинов, а также различных двигателей отличаются друг от друга разным уровнем их протекания в зависимости от соответствующих параметров.

Работы по внедрению в систему управления ДВС последних трех вышеназванных датчиков только начинаются и имеют большую перспективу, так как могут решить много проблем, связанных с точностью дозирования топлива и управления режимом ДВС, оптимизацией параметров ДВС, снижением расхода топлива, токсичности ОГ и т.д. Для этого требуется разработать практически новый алгоритм управления ДВС.

Развитие алгоритма управления ДВС при работе на бензине и газе

Перспективным является алгоритм, в котором при обнаружении пропусков воспламенения более 2% при работе на газовом топливе вместо отключения данного цилиндра его переключают на работу на бензине, при этом выдается код ошибки, по которому можно определить его номер для последующего устранения неисправности. В этом варианте двигатель

будет работать без замечаний на всех цилиндрах, если причина пропуска воспламенения не в системе зажигания, а в системе газовой подачи. Если пропуски воспламенения в цилиндре, переведенном с газа на бензин, продолжатся, то только в этом случае происходит отключение данного цилиндра с отключением управления по обратной связи с управляющего датчика содержания кислорода в ОГ.

Для снижения влияния неравномерных нагрузок при возвратно-поступательных движениях, механического износа шатунно-поршневой группы и вероятности ее механических повреждений при работе двигателя с одним выключенным цилиндром включают режим ограничения мощности и крутящего момента. Этот алгоритм позволит во многих случаях нормально передвигаться автомобилю до станции технического обслуживания для устранения дефекта в системе подачи газового топлива. При выполнении автокалибровки газового электронного блока управления работой ДВС данный алгоритм необходимо выключать, чтобы он не вмешивался в формирование коэффициентов газовой подачи при возможных пропусках воспламенения или вялого неполного сгорания топливовоздушной смеси. После выполнения автокалибровки газового контура этот алгоритм включают и выполняют проверку его работы путем выключения подачи газа на одной из электромагнитных форсунок, при этом должна включиться в работу соответствующая бензиновая форсунка. В этом случае нет необходимости ограничения режима работы двигателя по мощности и крутящему моменту.

При возникновении пропуска воспламенения или вялого неполного сгорания топливовоздушной смеси по причинам ее переобогащения или переобеднения в одном или нескольких цилиндрах представляется возможность введения в алгоритм управления функции самообучения электронного блока управления по

топливоподаче в данные цилиндры. Сущность этого алгоритма заключается в том, что отключение цилиндра при пропусках воспламенения происходит после изменения обеднения или обогащения газовой смеси на определенный промежуток времени с выявлением числа пропусков воспламенения в данном цилиндре. Если это число снижается при определенном составе смеси и достигает, например, менее 2 %, то отключение цилиндра не происходит, а происходит запоминание коэффициента коррекции цикловой топливоподачи в данный цилиндр на данном режиме работы ДВС.

$$t_k = K_{ог} t_p,$$

где t_k – скорректированное время впрыска газа через электромагнитную форсунку при наличии пропусков воспламенения менее 2 % от общего числа рабочих тактов данного цилиндра; t_p – расчетное время впрыска газа через электромагнитную форсунку при работе ДВС без пропусков воспламенения; $K_{ог} = f(n; G_b; N_b)$ – коэффициент обучения, который является функцией частоты вращения коленчатого вала n , расхода воздуха G_b через ДВС и числа N_b пропусков воспламенения в данном цилиндре.

Если не происходит изменения числа пропусков воспламенения в данном цилиндре, то пропуск воспламенения не связан с переобогащением или переобеднением газовой смеси. В этом случае происходит отключение данного цилиндра.

Для начала самообучения в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель определяется один коэффициент коррекции топливоподачи для всего диапазона режимных параметров ДВС, а далее его можно уточнять в зависимости от конкретного режима работы и записывать в память электронного блока управления ДВС. По усредненному коэффициенту коррекции топливоподачи в конкретном цилиндре ДВС, который можно считать с электронного блока управления с помощью диагностической программы или тестера, можно определять состояние газовых электромагнитных форсунок. В случае значительного изменения данного коэффициента от единицы, например, более чем на 5 % в одну или другую сторону, выдается код ошибки, по которому необходимо либо выполнить настройку расходной характеристики, либо заменить данную газовую форсунку на новую, либо выполнить дополнительные проверки, которые выявят причины переобогащения (подсос дополнительного воздуха во впускном трубопроводе) или переобогащения (негерметичность впускного или выпускного клапанов) в данном цилиндре. Для получения достоверных данных по коэффициенту коррекции топливоподачи в конкретный цилиндр ДВС при пропусках воспламенения алгоритм самообучения, например, включают на стационарных режимах работы и выключают при сбросе или увеличении частоты вращения коленчатого вала.

Литература

1. **Шишков В.А.** Определение величины увеличения угла опережения зажигания при переключении с бензина на газ в зависимости от скорости горения топливной смеси // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3. – С. 20-23.
2. **Шишков В.А.** Алгоритм управления и диагностики состояния электромагнитных газовых форсунок ДВС с искровым зажиганием // АГЗК + АТ. – 2006. – № 6 (30). – С. 46-48.
3. **Шишков В.А.** Алгоритм адаптации электронной системы управления ДВС к различным химическим составам газового топлива // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 1. – С. 30-35.

Новые возможности системы автоматического управления «СКАТ»

С.И. Мандрик,
генеральный директор ЗАО «Промэнергомаш»

Широкие возможности системы автоматического управления «СКАТ» ЗАО «Промэнергомаш» позволяют поэтапно производить ее внедрение на объектах без ограничения работоспособности технологического оборудования, а также выполнять коммерческий и технический учет энерго-ресурсов.

New potential of the SKAT automatic control system

S.I. Mandrik

New potential of the SKAT automatic system, developed by LLC Promenergomash, allows step-by-step introduction of the system without any compromise to current capabilities of technological equipment in operation. Commercial and technical accounting of energy consumption is provided for.

В 2010 г. на АГНКС Воронеж-1 ООО «Газпром трансгаз Москва» успешно завершена первая очередь работ по капитальному ремонту системы автоматического управления станции с применением САУ «СКАТ». На первом этапе были заменены шкафы управления двумя компрессорными установками, технологические трубопроводы, входящие

в обвязку компрессоров, местные стойки КИПиА, датчики давления и температуры, клапаны.

При выполнении монтажных работ впервые на территории РФ на АГНКС была применена система бесварных соединений труб диаметром 10 мм, рассчитанных на рабочее давление 25 МПа. Данный способ монтажа минимизирует объем огневых работ на объекте и значительно упрощает дальнейшее обслуживание трубопроводов. На АГНКС установлен шкаф САУ «СКАТ» для управления двумя компрессорными установками и частично общестанционным оборудованием, при этом оставшиеся три компрессора сохранили полную работоспособность. Проведено подключение новой автоматики к существующим системам пожарной сигнализации и контроля загазованности, замена которых запланирована в рамках второй очереди капитального ремонта.

Такое взаимодействие старой и новой систем автоматического управления было реализовано впервые и подтвердило возможность

поочередной модернизации систем автоматического управления АГНКС. САУ «СКАТ» позволяет с минимальными затратами времени и ресурсов поэтапно вводить функции управления новыми компрессорами и другим стационарным оборудованием в уже работающую систему.

В то время, когда некоторые компании только декларируют возможность поэтапного внедрения современной системы автоматического управления технологическими процессами, фирма ЗАО «Промэнергомаш» это реализует.

Опыт наших специалистов позволяет подобрать оптимальный объем работ, необходимых для стабильной и долговременной работы всего объекта в целом. На сегодняшний день технической службой ЗАО «Промэнергомаш» разработаны несколько вариантов поэтапной модернизации систем управления АГНКС, начиная от управления одним компрессором до полной автоматизации всех технологических процессов станции, включая инженерные сети, мониторинг, пожарно-охранный комплекс и учет энергоресурсов, постоянное удорожание которых требует от промышленных предприятий разработки и внедрения комплекса мероприятий по энергосбережению. Первый и самый необходимый шаг в этом направлении – внедрение автоматизированного учета энергоресурсов.

ЗАО «Промэнергомаш» предлагает внедрение автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ): воды, тепла, электроэнергии и др. как в рамках САУ «СКАТ», так и отдельно. АСКУЭ является измерительным инструментом, позволяющим экономически обоснованно разрабатывать и осуществлять комплекс мероприятий по энергосбережению, своевременно его корректировать, обеспечивая динамическую оптимизацию затрат на энергоресурсы в условиях изменяющейся экономической среды. Предлагаемая система может взаимодействовать как с существующими приборами учета, отвечающими



Шкаф КИПиА



Система бесварных соединений труб

требованиям точности измерений и позволяющими снять данные, так и с новыми. Система поддерживает связь с теплосчетчиками SA-94, ТЭМ-05, ВИС.Т, КМ-5, ТРЭМ, ВКТ-7 (ТСК-7), ТЭМ-106, а также с любыми счетчиками электроэнергии, воды, теплоты или газа с импульсным выходом, 485-м и 232-м интерфейсами.

Система АСКУЭ обеспечивает:

- точное измерение параметров потребления энергоресурсов для расчетов в соответствии с реальным объемом их потребления и минимизации непроизводительных затрат, в частности, за счет использования более точных измерительных приборов или повышения синхронности сбора первичных данных;
- диагностику полноты данных для расчетов за энергоресурсы в соответствии с реальным объемом их потребления путем повышения достоверности данных, используемых для финансовых расчетов с поставщиками энергоресурсов и принятия управленческих решений;
- комплексный автоматизированный коммерческий и технический учет энергоресурсов и контроль их параметров на предприятии по действующим тарифным системам с

целью минимизации производственных и непроизводительных затрат на энергоресурсы;

- контроль потребления всех энергоносителей на точках и объектах учета в заданных временных интервалах (5, 30 мин, смены, сутки, декады, месяцы, кварталы и годы) относительно заданных лимитов, режимных и технологических ограничений мощности, расхода, давления и температуры с целью минимизации затрат и обеспечения безопасности энергоснабжения;
- фиксацию отклонений контролируемых параметров энергоресурсов, их оценку в абсолютных и относительных единицах для анализа как энергопотребления, так и производственных процессов с целью минимизации затрат на энергоресурсы и восстановление производственных процессов после их нарушения из-за выхода контролируемых параметров энергоресурсов за допустимые пределы;
- сигнализацию (цвет, звук) об отклонениях контролируемых величин от допустимого диапазона значений с целью минимизации производственных затрат на энергоресурсы за счет принятия оперативных решений;

- прогнозирование (кратко-, средне- и долгосрочное) расхода энергоресурсов с целью минимизации производственных затрат за счет планирования энергопотребления;
- автоматическое управление потреблением энергоресурсов на основе заданных критериев и приоритетных схем включения/отключения потребителей;
- поддержание единого системного времени с целью минимизации непроизводительных затрат на энергоресурсы за счет синхронных измерений;
- сбор данных и передачу в центр обработки информации по кабельной линии связи, что позволяет учитывать и контролировать параметры всех энергоносителей по всей структурной иерархии предприятия и др.

Благодаря АСКУЭ будут сведены к минимуму производственные и непроизводительные затраты на энергоресурсы, что позволит решать спорные вопросы между их поставщиком



Шкаф САУ «СКАТ» для АГНКС

и потребителем на основании объективного автоматизированного учета.

ЗАО «Промэнергомаш» предлагает полный комплекс работ по созданию и модернизации автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого и технического учета энергоресурсов (электроэнергия, теплота, газ, вода).

FAS

Flüssiggas-Anlagen

Посетите наш стенд
на выставке «Автокомплекс-2011»
1-3 ноября (ВД «Экспоцентр»,
павильон 7, стенд 534)



НЕМЕЦКОЕ КАЧЕСТВО

Современные комплексные решения
по транспортировке, хранению, учету
и продаже сжиженных газов

насосы • компрессоры • газораздаточные колонки • запорно-
предохранительная арматура • счетные установки •
газогенераторное оборудование • комплексы автоматизации

РЕКЛАМА

WWW.FAS.SU

узнайте подробнее
(495) 647 0577 • (812) 335 4950



Исследования модели подземного хранилища заправочной станции СПГ

Н.Г. Кириллов,

заслуженный изобретатель РФ, академик АВН, д.т.н.,

А.Н. Лазарев,

доцент, академик МАИ, к.т.н.,

А.В. Яковлев,

соискатель Военного инженерно-технического института

В статье рассмотрены основные проблемы проектирования и создания подземных хранилищ СПГ. Представлены результаты экспериментальных исследований модели подземного хранилища криогенной жидкости, позволяющей учитывать конструктивные и теплотехнические особенности современных заглубленных и подземных резервуаров СПГ, литологическую неоднородность грунтов, возможность их замерзания при отрицательных температурах и ряд других факторов. Показано влияние различных факторов на технологические показатели подземных хранилищ.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), мировой опыт производства СПГ, стационарные хранилища СПГ, подземные хранилища, технологии производства СПГ, криогенные жидкости, натурный эксперимент, температурные поля.

Modeling Underground LNG Storage for Filling Stations

N.G. Kirillov, A.N. Lazarev, A.V. Yakovlev

Major challenges associated with design and construction of LNG underground storage are examined. The results of tests of a scale model of the cryogenic underground storage are presented. Experimentation allowed to take into account specific engineering features and heat performance of berried LNG tanks, lithological diversity, freezing risks, and other factors. Impact of those factors on the performance of the storage is described.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), world experience of LNG production, stationary storage LNG, underground storage, liquefaction technologies and techniques, cryogenic liquid; on-site experiment, temperature fields.

Рост мирового производства и потребления природного газа и все возрастающая их роль в системах топливной энергетики и газоснабжения привели к интенсивному развитию современной инфраструктуры и рынка сжиженного природного газа. В настоящее время сектор СПГ является одним из самых динамичных в энергетической отрасли: мировое потребление сжиженного газа растет на 10 % в год, тогда как обычного (газопроводный) только на 2,4 %. Согласно прогнозам экспертов, в

2020 г. доля СПГ в мировой торговле газом составит около 35 % (в 1970 г. – 3 %), а в 2030 г. – уже около 60 % мировой торговли природным газом [1].

Перспективы производства СПГ в РФ связаны с решением проблем освоения шельфовых месторождений, а также использования сжиженного природного газа в качестве моторного топлива на транспорте. В технологической цепи производства и использования сжиженного природного газа (сжижение, хранение, регазификация и распределение)

одним из наиболее ответственных элементов являются хранилища (резервуары) СПГ, поскольку на их долю приходится значительная часть материальных и трудовых затрат. Необходимо отметить, что в настоящее время за рубежом уже достигнут высокий научно-технический уровень в создании надежных и эффективных конструкций резервуаров СПГ больших объемов.

Однако значительная концентрация СПГ, являющегося веществом с повышенной пожаровзрывоопасностью, на относительно небольших площадях хранилищ обуславливает необходимость обеспечения пожарной безопасности таких объектов, что особенно актуально при создании заправочных комплексов СПГ для перевода систем автономной энергетики и транспорта на этот вид топлива. В этих случаях предъявляются более жесткие требования к противопожарному нормированию при размещении хранилищ по отношению к населенным пунктам и промышленным объектам [2].

Все это вызывает необходимость детальной проработки обеспечения пожарной безопасности хранилищ СПГ при аварийных разливах и разгерметизации, вызванных внешними воздействиями (стихийные бедствия, диверсии и т.п.). В связи с этим в последнее время становится актуальным создание подземных хранилищ СПГ, которые обладают значительно более высокими



Рис. 1. Схема размещения и монтаж подземных горизонтальных резервуаров СПГ на заправочной станции для автомобильного транспорта

характеристиками пожаро- и взрывобезопасности, исключают крупномасштабный разлив продукта и с точки зрения безопасности являются оптимальными (рис. 1).

Подземное расположение резервуаров практически исключает возможность серьезного повреждения хранилища и разлива продукта при всех предусмотренных технологией режимах эксплуатации.

Для подземных криогенных хранилищ одним из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании, является промерзание вмещающего грунта. Некоторые грунты склонны при замерзании к значительному объемному расширению (пучение), что может привести к развитию опасных воздействий на хранилище со стороны промерзающего грунта. Поэтому способы проектирования и строительства подземных низкотемпературных хранилищ выбираются в соответствии с геотехническими особенностями строительной площадки.

Анализ зарубежного опыта показывает, что создание современных, высокоэффективных подземных хранилищ СПГ является весьма сложной технической задачей, требующей качественного прогноза и всестороннего анализа гидрологических, термомеханических и теплообменных процессов во вмещающем массиве грунта, сопряженной теплопередачи в конструкции хранилища, являющейся композицией различных видов теплоизоляционных и строительных материалов, а также теплового взаимодействия паровой и жидкой фаз сжиженного газа с поверхностью внутренней емкости [3].

Ввиду новизны для отечественной промышленности проблемы создания подземных хранилищ СПГ многие из важных аспектов проектирования и расчета не получили должного научно-методического обоснования. Число опубликованных в отечественной технической литературе исследований тепловых режимов подземных хранилищ СПГ незначительно. Эти публикации, в основном, носят обзорный характер существующего мирового опыта и не раскрывают в полном объеме реальных физических закономерностей теплофизических процессов подземных криогенных хранилищ. Кроме того, в настоящее время требуется экспериментальная проверка таких аспектов как учет многослойности и разнородности



Рис. 2. Модель подземного резервуара СПГ объемом $V = 0,03 \text{ м}^3$

конструкций хранилища и окружающего грунта, разрывности теплофизических характеристик и их зависимости от температуры и влажности, фазовых превращений при замерзании (оттаивании) крупнодисперсных и мелкодисперсных грунтов, а также грунтовой влаги, замерзание которой может протекать в широком интервале отрицательных температур, и др.

Важным направлением экспериментальных исследований при создании подземных криогенных хранилищ является изучение динамики теплопритоков к подземным криогенным хранилищам и распространения температурных полей в окружающем массиве грунта.

Для натуральных экспериментальных исследований была создана модель криогенного резервуара СПГ (рис. 2).

Внешняя стенка резервуара была изготовлена из фибробетоносил (ФБС), внутренний контейнер выполнен из нержавеющей стали марки 10Н18Т10Х толщиной 1 мм. В пространство между внешней стенкой и внутренним контейнером засыпался утеплитель – стеклянные микросферы диаметром до 0,7 мм, толщина слоя 50 мм. Кроме этого, в модели предусмотрены три технологические трубки, изолированные пенопластом, диаметрами: 32 мм – для залива криогенной жидкости (криожидкость, криопродукт), 25 мм – для выхода паров криожидкости и 25 мм – для измерения уровня криожидкости.

Необходимо отметить, что до настоящего времени в мировой практике создания криогенных хранилищ фибробетоносил не применялся. Поэтому одной из целей натурального эксперимента являлось исследование новых конструктивных материалов. Фибробетоносил

– это мелкозернистый бетон плотной структуры на основе портландцемента и плотного мелкого заполнителя, модифицированный добавками аморфного кремнезема и модифицированного бетона МБ-01, а также дисперсно армированный стальными волокнами.

Для исследований был разработан и создан специальный стенд с размерами в плане 4x4 м с грунтом глубиной 1,6 м. Напряженно-деформированное состояние первичной и вторичных емкостей модели резервуара в процессе эксперимента определялось электрическими тензодатчиками. После установки тензодатчиков модель опускалась в стенд кран-балкой с последующей послойной засыпкой грунтом (рис. 3).

Для определения температурных полей в ближайшей зоне массива грунта вокруг экспериментальной модели была изготовлена конструкция из 20 платиново-иридиевых термопар, которая располагалась вплотную к модели в нижней трети высоты конструкции. В массиве грунта на расстоянии 10 см от модели, с шагом 15 см и глубиной посадки 1 м были расставлены термопары хромель-копелевые (ТХК), которые подсоединялись к светолучевому осциллографу Н071.4 для фиксации отклонения луча с заданным интервалом времени.

В задачи эксперимента входило исследование геофизиологической обстановки в различных условиях функционирования хранилища при режиме захлаживания и эксплуатационном режиме. Процесс захлаживания сопровождался нестационарным температурным режимом в многослойной обделке

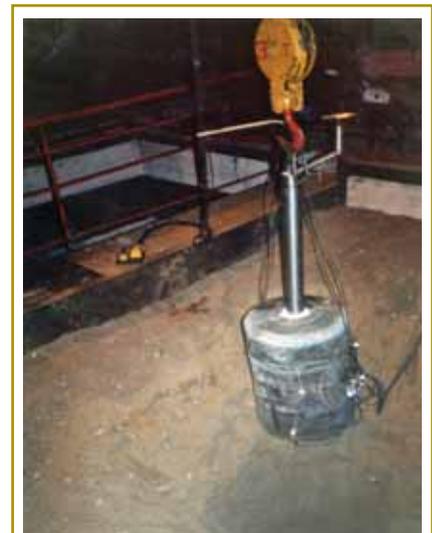
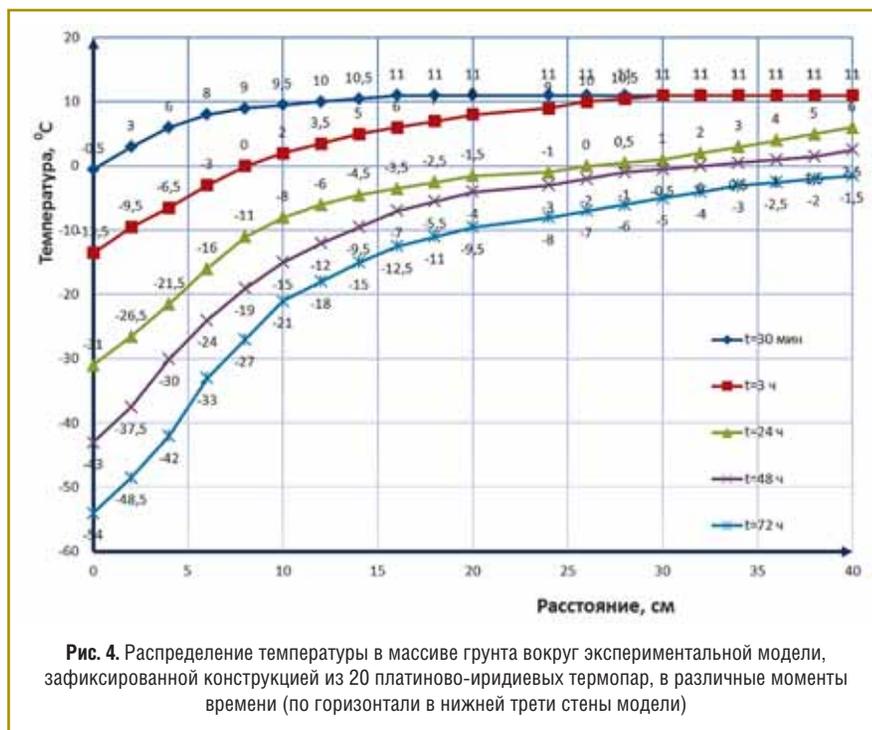


Рис. 3. Установка модели в испытательный стенд



резервуара и вмещающем массиве грунта. Эксплуатационный режим в целом характеризуется квазистационарным режимом.

Условия эксперимента не позволяют провести захлаживание емкости модели подобно захлаживанию в естественных условиях. Поэтому криогенную жидкость в модель заливали без предварительного постепенного захлаживания. Скорость заполнения резервуара ограничивалась только пропускной способностью заливной горловины патрубка (несколько минут).

Данный режим заполнения модели позволяет:

- воспроизвести в эксперименте максимально неблагоприятный режим захлаживания хранилища криопродуктом;
- в наибольшей мере проследить влияние максимальных градиентов температур на термонапряженное состояние конструктивных слоев резервуара и вмещающего грунта;
- добиться большей точности в определении граничных условий для проведения численного эксперимента.

Для повышения безопасности в модель заливался не СПГ, а сжиженный азот с температурой кипения $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Замораживание длилось 5 сут. Как показали исследования, приблизительно через 24 ч после начала залива криогенной жидкости деформации достигли максимума. Температура бетона в этот

промежуток времени изменялась от 10 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При последующем замораживании грунта тензодатчики оставались неподвижными, что позволило сделать вывод об установлении внутри резервуара стационарного режима. Напряженное состояние обделки при прохождении теплового потока определялось разностью относительных деформаций на внутренней и внешней поверхностях.

В результате исследований получено распределение температуры в грунте испытательного стенда в различные моменты эксперимента (рис. 4).

Размораживание длилось 6 сут. После извлечения модели и ее разборки при визуальном осмотре трещин и повреждений не обнаружено.

Основные результаты натурных испытаний модели подземного хранилища СПГ:

1. Определены закономерности формирования теплового режима во вмещающем массиве грунта и сопряженной конструкции подземного хранилища в условиях нестационарного и установившегося режимов.
2. Получены зависимости формирования полей деформаций и напряжений в конструктивных слоях многослойной обделки емкости хранилища при различных режимах функционирования.
3. Оценено влияние промерзающего грунта приконтурной зоны на напря-

женно-деформированное состояние емкости подземного резервуара.

4. Впервые в мире определена перспективность использования фибробетоносила для создания конструкций подземных низкотемпературных резервуаров для хранения СПГ.

Проводимые авторами многолетние теоретико-экспериментальные исследования позволяют утверждать, что подземные хранилища СПГ представляют собой безопасные и экономически дешевые типы хранилищ криогенных сред, однако данные инженерные сооружения требуют оптимального проектирования на основании обобщенного анализа всей совокупности физических процессов в конструкции хранилища и окружающем грунте.

Выполненные экспериментальные исследования позволяют в настоящее время проводить многофакторный анализ модели каждого вновь создаваемого подземного резервуара СПГ в приложении к конкретной конструкции хранилища и гидрогеологической обстановке окружающего массива грунта.

Следует подчеркнуть, что использование результатов экспериментальной работы позволило определить влияние различных процессов во взаимодействии друг с другом и создать адекватную физико-математическую модель для теоретических исследований. Результаты сравнения показывают, что разработанная математическая модель теплового взаимодействия низкотемпературных изотермических хранилищ с массивом грунта достаточно точно отражает реальный процесс и может быть рекомендована для практического применения.

Литература

1. Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н. и др. Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства // Газохимия. – 2011. – № 6. – С. 23-29.
2. Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н. Мировые тенденции в производстве и использовании сжиженного природного газа как универсального энергоносителя и моторного топлива // Двигателестроение. – 2010. – № 2. – С. 27-33.
3. «Development in safe design and operation of LNG storage». – 15th World Gas Conference / 15e Congres mondial du gaz, Lansanne 1982, Rapport de la Commission «H» (Gas liquefies) – IGH/H82. – P. 89-114.

Газпром – КАМАЗ: стратегические направления сотрудничества

13-14 июля 2011 г. группа специалистов ОАО «Газпром» во главе с начальником департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа, президентом НГА О.Аксютиным совершила поездку по предприятиям машиностроительного комплекса Республики Татарстан. Делегацию принимающей стороны возглавил заместитель министра промышленности и торговли Республики Татарстан И.Мингалеев. Руководство КАМАЗа представлял заместитель генерального директора ОАО «КАМАЗ» – директор по развитию И.Гумеров. Цель поездки – ознакомление с машиностроительным потенциалом республики и определение стратегических направлений сотрудничества.

Промышленность Татарстана традиционно поставляет разнообразную продукцию для нужд Газпрома. Немалый интерес представляют возможности КАМАЗа – лидера российского грузового машиностроения, который предлагает широкую гамму автомобилей общего и специального назначения: самосвалы, автокраны, седельные тягачи, вакуумные машины, мусоровозы, экскаваторы-планировщики, автогидроподъемники, вахтовки, передвижные мастерские, городские и пригородные автобусы НЕФАЗ и др. Кроме того, КАМАЗ готов выполнять пожелания заказчика

и строить именно те машины, которые ему нужны.

Было бы странным, если бы Газпром прошел мимо газовых автомобилей КАМАЗ/НЕФАЗ. В сфере использования газа в качестве моторного топлива интересы компаний во многом совпадают. Стороны провели совещание по данному вопросу и обозначили стратегические направления сотрудничества:

- продолжение совместной работы над федеральным законом «Об использовании альтернативных видов моторного топлива», а также предложениями для Правительства Российской Федерации по

стимулированию участников газомоторного рынка;

- совершенствование нормативно-правовой базы по вопросам производства и использования КПГ и СПГ для транспортных средств;

- подготовка программы газификации транспорта Казани, предусматривающей метанизацию 1 тыс. муниципальных пассажирских автобусов и коммунальных автомобилей с синхронным созданием адекватной газозаправочной инфраструктуры;

- разработка программы закупки машин на КПГ и СПГ для нужд предприятий газовой промышленности;

- совместная организация авторизованных центров технического обслуживания и ремонта газовых автомобилей КАМАЗ, а также подготовки квалифицированного и аттестованного технического персонала для этих центров на базе дочерних предприятий Газпрома;

- проведение совместных научно-технических мероприятий (конференции, презентации, круглые столы и т.д.) по вопросам эксплуатации газовых автомобилей;

- организация и проведение пробегов газовых автомобилей, выставок и т.д.;

- совместное участие в программах газификации транспорта в рамках региональных и муниципальных программ (республики Татарстан и Саха (Якутия), Приморье, Ямал) и спортивно-социальных проектов (Универсиада 2013 г., Олимпийские и Паралимпийские игры в Сочи в 2014 г., чемпионат мира по футболу 2018 г.);

- создание по рекомендациям Газпрома новой техники – многоцелевых шасси на СПГ, передвижных автогазозаправщиков, мобильных АГНКС.



Участники диалога Газпром – КАМАЗ

Е.Н. Пронин

Автомобильный метан на выставке Иннопром – 2011

15 июля 2011 г. в Екатеринбурге подписано Соглашение о расширении использования природного газа в качестве моторного топлива между правительством Свердловской обл., ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» и ОАО «КАМАЗ». Подписание соглашения приурочено ко Второй Уральской международной выставке и форуму промышленности и инноваций «Иннопром – 2011».



КАМАЗы на метане

На церемонии подписания председатель правительства Свердловской обл. А.Гредин отметил: «Для нас очень важно, что соглашением предусмотрена разработка программы по использованию газового топлива на территории Свердловской области. Надеюсь, что результатом нашей совместной работы с ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» и ОАО «КАМАЗ» станет повышение экономической эффективности нашего транспорта и снижение его негативного воздействия на окружающую среду. Весной текущего года делегация

Свердловской обл. во главе с губернатором А.Мишариным находилась с визитом в Татарстане. В ходе посещения Камского автозавода у нашей делегации большой интерес вызвала техника, которая работает на природном газе, в частности автобусы НЕФАЗ, коммунальная техника».

«Это соглашение является логическим продолжением работы, начатой ровно год назад на «Иннопром – 2010». Тогда в ходе форума было подписано соглашение, которое предусматривало расширение использования топлива на объектах ЖКХ,

малой энергетики промышленных предприятий», – заявил генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» Д.Гайдт. Сейчас проект по организации автономной газификации потребителей с применением сжиженного природного газа (СПГ) вступил в фазу практической реализации.

На выставке были продемонстрированы элементы технологических комплексов по производству, хранению, транспортировке и использованию СПГ. ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» (ранее ООО «Уралтрансгаз») является лидером российского рынка малотоннажного производства СПГ.

Главный конструктор по работе с нефтегазодобывающим комплексом научно-технического центра ОАО «КАМАЗ» А.Малюга и генеральный директор группы компаний «РаритЭК» Р.Батыршин сообщили, что по итогам нескольких лет работы создана широкая гамма сертифицированных газовых автомобилей на базе шасси КАМАЗ различного назначения: грузовики, самосвалы, вахтовые автобусы,

Регазификатор СПГ РАМ 500
производительностью 500 м³/ч

КАМАЗ на СПГ

вакуумные машины, мусоровозы, дорожная техника, городские, пригородные и полноприводные автобусы НЕФАЗ. Газовые двигатели КАМАЗ соответствуют экологическому классу Евро-4. Многие из этих газомобилей были показаны на совместной экспозиции компаний «ГТ Екатеринбург», «КАМАЗ» и «РаритЭК».

В рамках подписанного соглашения предполагается оперативно разработать программу реализации пилотного проекта по созданию демонстрационной колонны газовых автобусов (50 ед.) в одном



Объединенный стенд компаний «ГТ Екатеринбург», «КАМАЗ», «ПариТЭК»

из муниципальных автобусных парков. Автотранспортники предполагают создать сначала в Екатеринбурге, а затем и в других городах области специальные экологически чистые газовые автобусные маршруты, на которых будут отработаны все организационно-технические тонкости. Речь идет не об испытаниях газовых автобусов. Их испытывали уже во многих местах и в течение нескольких лет. Задача заключается в комплексной отработке вопросов в масштабах автобусной колонны, связанных с организацией заправки, технического обслуживания и ремонта,

проектирования производственно-технологического комплекса обеспечения работы автобусов на метане. Заправку автобусов компримированным, а в перспективе и сжиженным природным газом берет на себя ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург».

В ходе обмена мнениями газовики настойчиво подчеркивали: нет таких автопредприятий, где нельзя было бы организовать заправку машин природным газом. Туда, куда нельзя привести трубный газ, можно привезти сжиженный.

В рамках выставки-форума проведен круглый стол на тему «Метан –

моторное топливо для муниципального транспорта». Модератор круглого стола первый заместитель министра транспорта и дорожного хозяйства Свердловской обл. Е.Корягин высоко оценил экологический и экономический потенциалы природного газа для муниципального транспорта. Дело за главным – оперативно разработать и приступить к реализации пилотного проекта. Если сейчас в муниципальном бюджете отсутствуют средства, то финансирование проекта может взять на себя любая кредитно-финансовая структура. Например, филиал Газпромбанка в Екатеринбурге, представитель которого Я.Центер (управляющий) также выступил на круглом столе.



Стоимость КПП на АГНКС Екатеринбург-3



Коммунальные КАМАЗы на КПП

Не только «КАМАЗ» работает над созданием газовых автомобилей. На выставке были также показаны городской автобус большого класса ЛИАЗ (заводского изготовления) с газовым двигателем MAN и переоборудованный ООО «Газпром трансгаз Чайковский» автомобиль «Урал» с газовым двигателем Deutz. А директор департамента «Продвижение продукта ЛиАЗ» ООО «Русский автобусы – Группа ГАЗ» В.Орехов рассказал о масштабном проекте перевода муниципальных автобусов на метан в Санкт-Петербурге.

Е.Н. Пронин

Планы руководства КНР по созданию нового поколения автомобилей на альтернативных источниках энергии

С.Л. Сазонов,

ст. научный сотрудник Центра экономических и социальных исследований Китая Института Дальнего Востока РАН, к.э.н.

Стремительное экономическое развитие Китая в течение трех последних десятилетий привело к многократному увеличению потребления энергетических ресурсов и в первую очередь нефти. Значительный рост доходов населения страны стимулировал резкое повышение объемов производства и продаж автомобилей, особенно в крупных городах Китая. Эти факторы обусловили не только сильную зависимость страны от импорта нефтепродуктов, но и обострили экологическую ситуацию в мегаполисах КНР. Осознавая глобальные негативные последствия, правительство страны разработало программу 10-летнего развития автомобилестроения на основе энергосбережения и новой энергетики, направленную на создание транспортного парка и инфраструктуры нового поколения.

Ключевые слова: Китай, энергетическая безопасность, загрязнение окружающей среды, энергосбережение, новая энергетика, альтернативная энергетика, гибридные автомобили, электромобили, совершенствование технологий, налоговые льготы.

Plans of the Chinese Government concerning creation of the vehicles utilizing alternative energy sources

S.L. Sazonov

Chinese rapid economic development during the previous 30 years led to the iterative increase of energy resources' consumption, and first of all crude oil. Considerable growth of population's income stimulated sharp increase both of production' and sales' volume, particularly in the Chinese big cities. These factors stipulated not only for the strong dependence on oil import, but also sharpened the ecological situation in the Chinese megapolises. Realizing global negative consequences the government developed the programme of 10-years' automobile industry development, based on power economy and new power engineering aimed at the creation of motor vehicles' fleet and transport infrastructure of a new generation.

Keywords: China, energy safety, environmental pollution, power economy, new energy, alternative energy, hybrid motor car, electric vehicle, technology perfection, tax remission, transport infrastructure, subsidy, battery-charging station, accumulator.

По предварительным подсчетам, объем производства традиционных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) в 2011 г. превысит 20 млн, а в течение 12-й пятилетки 30 крупнейших автомобильных предприятий Китая планируют довести ежегодный объем производства до уровня в 35-40 млн. Директор Пекинского центра исследования транспортных проблем Го Цзифу отмечал, что в 2008 г. Китай потреблял 380 млн т бензина, из которых 100 млн т приходилось на содержание автопарка страны в 65 млн автомобилей [1]. В результате резкого роста объемов производства автомобилей к 2015-2020 гг. их парк вырастет в 5 раз и превысит 200 млн автомобилей, потребляющих ежегодно более 300 млн т бензина [2], что неизбежно создаст угрозу энергетической безопасности страны и приведет к катастрофической зависимости КНР от импорта нефти. Если в 2000 г. Китай импортировал лишь 60 млн т нефтепродуктов, то лишь с января по ноябрь 2010 г. объем импорта взлетел до 218 млн т.

Уже сегодня в Китае около 30 % потребляемого объема нефтепродуктов приходится на автомобильный транспорт [3]. Источником 90 % загрязнения окружающей среды в крупнейших городах также являются антропогенные выбросы в атмосферу автотранспортом (мелкодисперсные частицы, соединения углерода, свинца, фтора, серы и азота размерами 0,1-10 мкм) [4], который в дальнейшем может лишь обострить экологическую ситуацию в стране [5] и воспрепятствовать планам руководства КНР снизить к 2020 г. объем выбросов соединений углерода на 45 % по сравнению с 2005 г. [6].

Ясно осознавая глобальные негативные последствия, связанные с продолжением развития традиционной автомобильной промышленности, основанной на применении ДВС, Государственный Совет КНР одобрил Программу развития автомобилестроения на основе энергосбережения и новой энергетики (2011-2020) [7]. Следует отметить, что за прошедшее десятилетие Китай уже вложил 2 млрд юаней (300 млн долл. США)

в разработку энергосберегающих автомобилей, было получено более 500 патентов новейшие изобретения [8]. Согласно новой программе, руководство страны приняло решение об инвестировании более 100 млрд юаней (15 млрд долл. США) в развитие производства автомобилей, использующих новые виды энергии [9], из которых 50 млрд юаней будет направлено на научно-технические разработки, 20 млрд – на совершенствование технологий и 30 млрд – на рекламу и продвижение новинок. Кроме этого, более 15 млрд юаней будет инвестировано в создание соответствующей инфраструктуры по всей стране для подзарядки аккумуляторов (автозарядные станции) [10]. В первую очередь это касается производства автомобилей со смешанным источником питания: гибридных автомобилей (ГА)¹, транспортных средств с «нулевым выбросом» – электромобилей (ЭМ), а также в перспективе автомобилей, использующих альтернативные виды энергии (солнечную, водород, этанол и метанол).

Программа нацелена на превращение Китая в мирового лидера по производству «зеленых автомобилей», увеличение его доли в мировом объеме производства этих автомобилей с 2,7 % в 2010 г. до 35 % в 2020 г. [11]. Для достижения этих целей в стране к 2020 г. будет создано два автогиганта с ежегодным объемом производства в 1 млн новых автомобилей и от 3 до 5 автозаводов, производящих по 500 тыс. [12]. Планами предусматривается к концу 2013 г. произвести 500 тыс. автомобилей, использующих новые источники энергии [13], в 2015 г. – 1 млн, а к 2020 г. увеличить автопарк экологических автомобилей до 5 млн [14] и довести их ежегодное производство до 15 млн, большинство из которых будут составлять мини-гибриды [15].

С 2003 г. в реализации проектов в области производства электромобилей в Китае были задействованы иностранные компании, создававшие СП с китайскими предприятиями. 16 августа 2009 г. под руководством Госсовета КНР была учреждена Ассоциация производителей электромобилей, куда вошли ведущие китайские автопроизводители

BYD Automobile, Chery FAW Corp., Dongfeng Motor Corp., China Changan Automobile Group, а также крупнейшие производители аккумуляторных батарей и государственная энергетическая компания State Grid Corp. [16]. Таким образом, создание Ассоциации усилило государственный контроль над отраслью и позволило добиться большого прогресса.

В начале 2010 г. в Китае было выбрано 13 городов², где в экспериментальном порядке начали эксплуатироваться собранные на автозаводах Ассоциации около 70 типов гибридных автомобилей и электромобилей [17], предназначенные преимущественно для общественного транспорта, такси, служебных машин, муниципальных и почтовых служб – всего около 4 тыс. [18]. В 2010 г. Государственная электросетевая корпорация Китая (ГЭК) установила в этих городах более 6 тыс. ед. оборудования на 75 зарядных станциях [19], а в 2011 г. планирует только в Пекине построить 120 новых подобных станций [20]. Сегодня в столице используется более 300 новых автобусов на электротяге [21]. В Шанхае, где проводилась выставка ЭКСПО-2010, было построено 10 заправочных станций, а в городе туристы передвигались на 100 электроавтобусах и более 1 тыс. электромобилей. Первые итоги эксперимента показали, что обычный городской автомобиль с двигателем внутреннего сгорания потребляет на 100 км пробега около 10 л бензина, который обходится в 60 юаней. Электромобиль на 100 км потребляет около 14 кВт электроэнергии стоимостью лишь 12 юаней [22]. Тот факт, что объем производства литий-ионных аккумуляторных батарей в Китае составляет более 20 % общемирового, а технологии их изготовления и качество не уступают и даже иногда превосходят западные (а именно эти

батареи наиболее легкие и компактные³), становится благоприятным фактором для страны в стремлении переориентировать свой автомобильный рынок с традиционных машин на энергосберегающие [23].

Китайские власти отчетливо понимают, что существенной преградой к развитию рынка нового поколения автомобилей, использующих альтернативные источники энергии, могут стать высокая стоимость нового автомобиля, недостаточный уровень технологических разработок и неразвитая инфраструктура заправочных станций. Следует заметить, что разработчики новой Программы 2011-2020 осознают, что без решения этих проблем невозможно добиться серьезных достижений в завоевании как внутреннего, так и международного рынков. Например, объем продаж самого популярного в мире японского гибридного автомобиля Toyota Prius в 2009 г. превысил 100 тыс., тогда как даже в Китае объем продаж самого известного отечественного брэнда компании BYD F3DM едва превысил сотню, да и раскуплены они были, в основном, государственными структурами [24].

В Программе 2011-2020 ясно определены основные приоритетные направления развития рынка автомобилей, использующих альтернативные источники энергии. Программа беспрецедентна по своим рыночным перспективам и амбициозности – разработать и внедрить в массовое производство линейку китайских автомобилей, конкурирующих с обычными автомобилями по цене. Совершенствование технологий и налоговые льготы производителям гибридов и электромобилей смогут сделать эти автомобили даже дешевле обычных с бензиновыми двигателями.

¹ Гибридный автомобиль – высокоэкономичный автомобиль, использующий двигатель внутреннего сгорания для подзарядки основного аккумулятора во время движения. Двигатель для ГА имеет меньшую на 30-50 % мощность по сравнению со стандартными автомобилями, но имеет высокие КПД и экономичность, а также минимальный вред окружающей среде.

² Пекин, Шанхай, Чунцин, Чанчунь, Далинь, Ханчжоу, Цзинань, Ухань, Шэньчжэнь, Хэфэй, Чанша, Куньмин и Наньчан.

³ Они на порядок эффективнее свинцово-кислотных. Преодолеть расстояние в 220 км не проблема при использовании литиевой батареи – такое расстояние проедет традиционная автомашина с полным баком бензина. Они долговечны и экологичны, а всего за 2 часа литиевый аккумулятор заряжается до полной емкости.

С начала 2011 г. правительство КНР в экспериментальном порядке приступило к льготному финансированию производства новых экологичных автомобилей. Финансовые дотации предоставляются не покупателям, а непосредственно национальным автомобильным производителям, которые затем продадут новые энергосберегающие автомобили населению и организациям (общественный транспорт) по льготным ценам. Программа определяет следующие размеры дотаций:

Легковые автомобили и минифургоны – по 3 тыс. юаней (439 долл. США) на каждый кВт·ч аккумуляторной батареи, но не более 50 тыс. юаней (7,32 тыс. долл. США) на каждый гибридный автомобиль; не более 60 тыс. юаней (8,78 тыс. долл. США) – на электромобиль.

Городские автобусы длиной от 10 м и больше – максимум 80 тыс. юаней (11,715 тыс. долл. США) на каждый гибридный автобус со свинцово-кислотными аккумуляторами; максимум 420 тыс. юаней (61,5 тыс. долл. США) – на гибридный автобус с никель-металлогидридными (NiMH) и литий-ионными (Li-ion) аккумуляторными батареями; максимум 500 тыс. юаней (73,2 тыс. долл. США) – на автобус с полной электрической тягой [25].

Дополнительные дотации могут поступать и от местных властей, а их размеры могут варьироваться от 10 до 60 тыс. юаней [26]. Таким образом, стоимость автомобиля-такси на электрической тяге может быть на 25 % ниже стоимости традиционного бензинового такси. Например, в г. Шэньчжэнь электромобили компании BYD E6 с дальностью поездки на одной зарядке в 220 км постепенно вытесняют обычные такси, проезжающие в среднем около 250 км/сут. При себестоимости E6, составляющей 179,8 тыс. юаней (27,038 тыс. долл. США), совокупные дотации государства и местных властей, вычитаемые из стоимости электромобиля, составляют 120 тыс. юаней (18,045 тыс. долл. США). Стоимость же обычного бензинового автомобиля, используемого в качестве городского такси, составляет около 80 тыс. юаней (12,03 тыс. долл. США). Муниципалитет

г. Шэньчжэнь планирует к 2012 г. расширить парк городских электромобилей до 24 тыс. и построить 200 зарядных станций [27].

Правительство оставляет за собой право снижать размеры дотаций автопроизводителям после того, как объем их продаж конкретных новых моделей превысит 50 тыс. [28]. Определено также, что покупатели электромобилей будут полностью освобождаться от налога с продаж, а покупатели гибридных автомобилей – платить лишь половину [29]. И те и другие не будут платить дорожные сборы и освобождаются от оплаты муниципальных парковок [30].

Программа предусматривает также предоставление финансовой помощи непосредственно и гражданам: каждый покупатель традиционного автомобиля с ДВС рабочим объемом от 1,6 л и меньше, потребляющего на 20 % бензина меньше, чем обычный автомобиль, получает скидку в размере 3 тыс. юаней (439 долл. США) [31]. Планируется, что к 2015 г. потребление бензина обычным легковым автомобилем на 100 км пробега уменьшится до 5,9 л, а к 2020 г. – до 4,5 л [32].

В Программе 2011-2020 определена «дорожная карта» будущего технологического совершенствования автомобилей, использующих альтернативные источники энергии, с тем, чтобы их параметры превосходили лучшие мировые образцы. Правительство Китая ориентирует ведущие отечественные электротехнические компании довести к 2015 г. энергоемкость аккумуляторных батарей до 120 Вт·ч/кг, себестоимость – до 2 юаней за 1 Вт·ч, а к 2020 г. повысить энергоемкость до 200 Вт·ч/кг, себестоимость же снизить до 1,5 юаня за 1 Вт·ч [33].

Разработанный китайской автомобильной компанией BYD пятиместный электромобиль E6 может проезжать без дозаправки 220 км со скоростью 120 км/ч, что считается революционным прорывом, поскольку лишь недавно пробег в 100 км рассматривался в мире как предельный для электромобилей [34]. Будущее электромобилей связывают с производством новых моделей с

литий-полимерными (Li-pol) и цинково-воздушными (Zinc-Air) аккумуляторными батареями, которые все еще находятся в стадии разработки и для массового внедрения пока остаются довольно дорогими. Одна из таких моделей – электромобиль A380 (совместная разработка американской компании ZAP и китайской Zhejiang Jonway Automobile Co.), который может появиться на китайском рынке, – представляет собой пятиместный седан, способный проехать без дозаправки 300 км со скоростью более 110 км/ч. Ориентировочная стоимость электромобиля составит около 25 тыс. долл. США [35].

Ясно осознавая, что неразвитость инфраструктуры зарядных станций является главным препятствием массового распространения электромобилей, Правительство КНР планирует ускорить создание общенациональной сети зарядных станций для электротранспорта. Программой 2011-2020 определено к 2015 г. построить в стране 4 тыс. зарядных станций и еще 6 тыс. к 2020 г. [36]. Лаборатории автомобильной компании BYD разрабатывают технологию «быстрая заправка», которая за счет внедрения самого современного оборудования и более мощных электрических кабелей сможет обеспечить 50%-ю зарядку электромобиля за 10 мин, 80%-ю – за 20 мин, а полную – за 1 ч [37]. Крупнейшая китайская нефтяная компания China National Offshore Oil и автомобильная компания Chery, участники государственной программы развития промышленности на альтернативной энергетике, планируют создать в стране сеть гибридных заправочных станций, где клиенты смогут не только заряжать аккумуляторные батареи своих электромобилей, но менять разряженные на заряженные – своего рода мгновенная зарядка [38].

Реализация одобренной Госсоветом КНР Программы развития автомобилестроения на основе энергосбережения и новой энергетики (2011-2020) позволит отрасли перейти от стадии лабораторных исследований и разработок к полномасштабному производству новых экологических автомобилей, обеспечить стране

стабильный экономический рост, стимулировать инновационный прорыв в смежных отраслях, решение проблем занятости и снижения загрязнения окружающей среды. Стремительный рост традиционного автомобильного рынка в Китае приводит к увеличению спроса на энергоносители. И, несомненно, именно гибридные автомобили и электромобили позволят стране удовлетворить внутренний спрос, не попадая в зависимость от импорта нефти.

За последние годы в китайских мегаполисах, как и в других городах мира, защита окружающей среды от вредных выбросов превратилась в первостепенную задачу. В 2009 г. было опубликовано постановление, подготовленное совместно Министерством финансов и Министерством науки и технологии КНР «О внедрении в тестовом режиме в 13 городах Китая, включая Пекин, Шанхай, Ухань и Шэньчжэнь, транспортных средств, использующих альтернативные источники энергии». Согласно постановлению правительство страны выделило местным муниципалитетам инвестиции для выдачи субсидий владельцам автобусов и такси, использующих в качестве топлива электроэнергию.

В начале 2011 г. муниципальные власти Пекина приступили к опытному внедрению в практику самой современной технологии в области нового поколения подвижного состава городского общественного транспорта. Китайская корпорация China South Locomotive & Rolling Stock Corp Ltd (CSR) разработала на основе технологий, применяемых в создании мостовых кранов и самолетов Airbus A380, городской тоннельный автобус 3D Express Coach, передвигающийся на рельсах со скоростью 60 км/ч и занимающий две полосы движения городских магистралей. Впечатляют масштабы нового гиганта: ширина – 6, длина – 10, а высота – от 4 до 4,5 м. Нижний уровень тоннельного автобуса полый и позволяет автомобилям до 2 м высотой свободно проезжать под его верхней палубой, где в четырех отсеках могут разместиться более 1 тыс. пассажиров [39]. Новый суперэкспресс позволит на 20-30 %

сократить объем городского транспортного потока и улучшить экологическую обстановку в столице, поскольку работает либо на электричестве, либо на солнечных батареях.

Строительство первого отрезка полотна для нового суперавтобуса началось в конце 2010 г. в пекинском районе Мэньтоугоу, а по плану в 2011 г. он будет запущен в эксплуатацию. Стоимость строительства 1 км полотна для 3D Express Coach составляет 50 млн юаней, что в 10 раз

дешевле прокладки 1 км линии метро, причем требуется всего год для строительства 40-километрового участка полотна для нового автобуса, тогда как прокладка такой же по протяженности линии метрополитена займет три года [40]. Тестовые испытания суперэкспресса продлятся в Пекине в течение года, после чего столичные власти примут окончательное решение о строительстве новых линий, включая участок до столичного международного аэропорта.

Литература

1. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2011-02/14/content_331522.htm.
2. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2009-10/26/content_225658.htm.
3. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2011-02/14/content_331522.htm.
4. Федорова В. Билет на экобус. Электромобиль – не роскошь, а средство передвижения//Аргументы и факты. 2011. № 21.
5. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-04/12/c_13246996.htm.
6. http://news.xinhuanet.com/english2010/indepth/2010-07/08/c_1389839.htm.
7. <http://russian.people.com.cn/31518/7351439.html>.
8. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2010-10/11/content_302976.htm.
9. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-12/06/content_317297.htm.
10. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2011-02/14/content_331522.htm.
11. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-06/11/content_278837.htm.
12. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-12/10/c_13643626_2.htm.
13. http://news.xinhuanet.com/english2010/indepth/2010-07/18/c_13403512.htm.
14. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-12/06/content_317297.htm.
15. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2009-10/26/content_225658_3.htm.
16. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2010-10/11/content_302976.htm.
17. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2009-10/26/content_225658.htm.
18. <http://russian.people.com.cn/31518/6658734.html>.
19. http://russian.china.org.cn/news/txt/2011-01/10/content_21706250.htm.
20. http://russian.china.org.cn/news/txt/2011-01/04/content_21669284_2.htm.
21. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-05/13/c_13291918.htm.
22. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-12/10/c_13643626.htm.
23. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-06/11/content_278837.htm.
24. http://www.bjreview.com.cn/print/txt/2011-02/05/content_245688_2.htm.
25. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2009-10/26/content_225658_3.htm.
26. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-12/10/c_13643626.htm.
27. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-12/06/content_317297_2.htm.
28. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-12/06/content_317297.htm.
29. <http://russian.people.com.cn/31518/7351439.html>.
30. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2010-10/11/content_302976.htm.
31. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-06/11/content_278837_2.htm.
32. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-12/06/content_317297.htm.
33. <http://russian.people.com.cn/31518/7351439.html>.
34. http://www.bjreview.com.cn/print/txt/2011-02/05/content_245688.htm.
35. http://www.bjreview.com.cn/quotes/txt/2010-10/11/content_302976_2.htm.
36. http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2011-01/21/c_13700906.htm.
37. http://www.bjreview.com.cn/print/txt/2011-02/05/content_245688.htm.
38. http://www.bjreview.com.cn/business/txt/2010-06/11/content_278837_2.htm.
39. http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2010-08/26/content_11205250.htm.
40. http://www.chinadaily.com.cn/business/2011-01/12/content_11840834.htm.

Повышение эффективности использования энергии альтернативного топлива

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

Изложен новый подход к проблеме повышения эффективности использования энергии альтернативных топлив в двигателях транспортных средств на основе термохимической регенерации теплоты отработавших газов.

Ключевые слова: метанол, дизель, альтернативное топливо, термохимическая регенерация, отработавшие газы, термохимическая установка, теплосиловая установка.

Increase of energy efficiency of alternative fuels

V.M. Fomin, D.V. Shevchenko

A new approach to improve the energy efficiency of alternative fuels in the engines of vehicles on the basis of thermochemical heat recovery of exhaust gases is developed.

Keywords: methanol, diesel, alternative fuels, thermochemical regeneration, the exhaust gases, thermochemical plant, thermal power plant.

Согласно данным исследования внешнего теплового баланса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) существенная часть химической энергии топлива не реализуется в виде работы и отводится, в том числе, с отработавшими газами (ОГ) в окружающее пространство. В двигателях с искровым зажиганием доля необратимых потерь теплоты, уносимой из двигателя с ОГ, составляет 30...55 %, что соответствует 12...23 МДж на 1 кг израсходованного топлива. В дизелях та же составляющая энергетических потерь в тепловом балансе достигает 40 % [1].

Известно, что преобразование химической энергии любого вида топлива в работу в ДВС осуществляется в два этапа: на первом она преобразуется в теплоту, которая на втором этапе реализуется в работу. Именно при этих преобразованиях и происходят основные потери энергии топлива, снижающие показатели эффективности работы двигателя [1].

Для повышения эффективности использования химической энергии топлива необходимо снизить ее потери

на обоих этапах преобразования. До настоящего времени в двигателестроении, как и в целом в энергомашиностроении, успешно применялся основанный на классических положениях термодинамики весьма эффективный способ уменьшения потерь работоспособности топлива на втором этапе преобразования энергии. Эффективность этого преобразования, которая оценивается термическим КПД цикла, зависит от соотношения средних температур подвода T_1 (верхняя температура) и отвода T_2 (нижняя температура) теплоты в цикле:

$$\eta_T = 1 - T_2 / T_1, \quad (1)$$

то есть, чем выше средняя температура подвода теплоты при рассматриваемом уровне средней температуры отвода теплоты, тем выше термический КПД цикла.

В современных двигателях температурный уровень рабочего тела таков, что его дальнейшее повышение обуславливает серьезную проблему обеспечения необходимой термической прочности. Поэтому повышение эффективности использования топлива в тепловом двигателе путем повышения средней верхней термодинамической температуры рабочего тела в цикле зависит от возможностей дальнейшего повышения жаростойкости и жаропрочности конструкционных материалов деталей камеры сгорания. Если учесть, что эти возможности для большинства традиционных материалов уже практически исчерпаны, становится очевидным, что сам способ становится малоперспективным.

В этих условиях целесообразна разработка способа снижения необратимых потерь на первом этапе преобразования химической энергии топлива в теплоту. Причем, реализация этого способа по возможности не должна быть сопряжена с повышением температурного уровня рабочего тела.

Исходя из основных положений химической термодинамики [2, 3], можно утверждать, что реализация такого способа априори возможна лишь при наличии альтернативных топлив, сжигание которых при одинаковой температуре сопровождалось бы различными уровнями необратимых потерь. Подобные топлива путем термохимических превращений можно преобразовать в новое (искусственное) топливо с более высоким энергетическим потенциалом. Перевод химической энергии такого искусственного топлива в теплоту сопровождается меньшими необратимыми потерями.

Впервые научно-методическое обоснование этого способа было разработано проф. В.Г. Носачем [2], а его практическая реализация осуществлена применительно к стационарным технологическим системам, использующим в качестве энергоносителя твердое топливо. Поскольку предложенный способ предполагает необходимость организации эндотермического процесса конверсии топлива, в основе которого лежит цикл его термохимического преобразования, он получил наименование термохимического способа регенерации теплоты. Способ разработан на базе фундаментальных положений термодинамики и может быть применен для любого вида энергетической установки.

Как следует из определения способа термохимической регенерации, в рабочем цикле энергоустановки предусматривается еще один процесс. Если в обычной энергоустановке химическая энергия топлива преобразуется в теплоту в одну стадию, то здесь – в две. На первой – исходное топливо

подвергается конверсии, а уже на второй – конвертированное топливо сжигается на более высоком энергетическом уровне. Две стадии преобразования энергии, в процессе которых используется теплота, отводимая из цикла, позволяют повысить эффективность использования энергии исходного топлива. В общем случае эффективность термохимической регенерации зависит от типа энергоустановки, способа и условий организации в ней рабочего процесса, а также от вида исходного топлива (эндотермического эффекта системы реакций его конверсии).

Следует отметить, что продукты конверсии традиционного нефтяного топлива, полученные в термохимическом реакторе на основе механизма экзотермических реакций неполного окисления углеводородов, имеют по сравнению с исходным топливом более низкую теплоту сгорания [3], что исключает априори проявление эффекта регенерации.

Применительно к ДВС для обеспечения предварительного эндотермического этапа конверсии в качестве исходного конвертируемого продукта целесообразно использовать такие виды альтернативных топлив, которые имеют температуру конверсии ниже среднего температурного уровня ОГ. К таким топливам относится ряд легких гомологов предельных углеводородов (алканы), низшие спирты и простые эфиры. Выбор альтернативного топлива в качестве исходного продукта для конверсионного процесса является компромиссом, учитывающим его энергетическую ценность, температурные условия процесса, спектр образующихся при переработке газов и стоимость (таблица) [3].

К наиболее перспективному исходному продукту для организации конверсии в первую очередь следует отнести метиловый спирт (метанол), который в мировой практике уже относительно давно применяется в качестве заменителя традиционных моторных топлив. Важно то, что массовый показатель среды аккумулирования водорода, наиболее энергоемкого компонента конверсии, в виде жидкого метанола весьма высок: в 8,5 кг метанола содержится 1 кг водорода.

В настоящее время основным потребителем метанола является химическая промышленность. Он относится к возобновляемым природным ресурсам, то есть существует обширная сырьевая база для увеличения его производства и значительно более широкого использования в качестве энергоносителя.

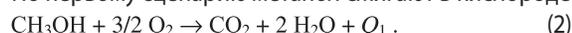
Предварительная оценка повышения исходной химической энергии

альтернативного топлива на примере метанола

Этот эффект достаточно просто может быть установлен на основе сравнения теплоты сгорания жидкого метанола и теплоты продуктов его конверсии. Теплота сгорания метанола $H_{uM} = 19670$ кДж/кг. Теплота сгорания газообразных продуктов конверсии метанола (ПКМ) $H_{uM}^k = 23870$ кДж/кг [3, 4]. Таким образом, при сгорании в двигателе 1 кг ПКМ, полученных из такой же массы жидкого метанола, высвобождается дополнительная тепловая энергия, накопленная в процессе конверсии спиртового топлива, равная $H_{uM}^k - H_{uM} = 4200$ кДж/кг. Следовательно, 21,4 % располагаемой энергии исходного топлива возвращается в рабочий цикл ДВС для совершения полезной работы.

Термохимическая сущность преобразования (повышение) энергии исходного топлива отражает основные положения термодинамики, в частности, закон Гесса и его следствия. Покажем это на основе анализа тепловых эффектов от сгорания метанола, осуществляемого по двум сценариям (маршрутам).

По первому сценарию метанол сжигают в кислороде:

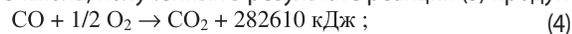


Тепловой экзотермический эффект Q_1 известен и равен 629440 кДж [3]. В результате реакции (2) образуются 3 кмоль продуктов сгорания.

По второму двухступенчатому сценарию разлагается сначала спирт



При этом образуются 1 кмоль CO и 2 кмоль H_2 с эндотермическим тепловым эффектом Q_2 . Затем сжигают в кислороде 3 кмоль, полученных в результате реакции (3) продуктов:



Тепловые эффекты для реакций (4) и (5) приведены согласно данным [4]. Суммарный тепловой эффект $Q_{\Sigma} = 282610 + 481480 = 764090$ кДж/кмоль. В элементарной реакции окисления водорода принимают участие две его молекулы, что приводит к удвоению суммарного теплового эффекта.

Согласно первому и второму сценариям окисления метанола начальное и конечное состояния системы (количество и состав) одинаковы: начальное – 1 кмоль CH_3OH , конечное – 1 кмоль CO_2 и 2 кмоль H_2O . Тогда в полном соответствии с законом Гесса суммарные тепловые эффекты различных маршрутов окисления метанола должны совпадать:

Характеристики исходного продукта для организации процесса термохимической регенерации теплоты ОГ ДВС

Исходный продукт	Стоимость, долл. США/кг	Энтальпия сгорания, кДж/г	Температура конверсии, К	Мольная доля компонента в смеси, %	
				H_2	CO
Метан	0,05...0,1	-50,1	1000	76	17,3
Пропан	0,4...0,8	-46,5	700	74	7,2
Бутан	-	-45,7	700	74	9,3
Октан	0,6...0,8	-44,7	>1000	70,8	20,4
Метанол	0,15...0,25	-19,7	570	74,4	4,3
Этанол	0,2...0,3	-26,8	600	73,2	4,3
Диметилэфир	-	-28,8	533	74,4	4,2

629440 = -Q₂ + 764090 кДж/кмоль. Отсюда: Q₂ = 134 650 кДж/кмоль. Теплота Q₂ соответствует тепловому эффекту (следствие 2 из закона Гесса) реакции (3) диссоциации метанола.

Проведенный анализ показал, что тепловой эффект от сжигания конвертированной смеси СО и Н₂ превышает эффект от сжигания того же количества неконвертированного метанола (исходное топливо) на Q₂ = 134 650 кДж/кмоль (то есть на 21,4 %), что соответствует затраченной при разложении спирта энергии. При организации эндотермической конверсии в условиях двигателя эта энергия «заимствуется» на основе утилизации тепловой энергии выпускных газов.

Предельно допустимый уровень повышения энергии альтернативного топлива

Из изложенного выше следует, что применение систем предварительного химического преобразования альтернативного топлива позволяет повысить эффективность его использования в ДВС за счет регенерации отходящей теплоты. Например, для двигателей с принудительным (искровым) воспламенением термодинамический цикл (цикл Отто) с регенерацией отходящей теплоты может быть представлен T-S-диаграммой (рис. 1).

На диаграмме теплота, регенерируемая в цикл, выражена как часть отходящей теплоты Q₂, то есть степень регенерации равна

$$w = \frac{Q_p}{Q_2}, \quad (6)$$

где Q_p = M₂ μ C_v (T_к - T_к) – количество теплоты, регенерируемой в цикл; Q₂ = M₂ μ C_v (T_б - T_а) – теплота, отведенная из цикла; M₂ и μ C_v – количество рабочего тела и его средняя молярная теплоемкость при постоянном объеме соответственно.

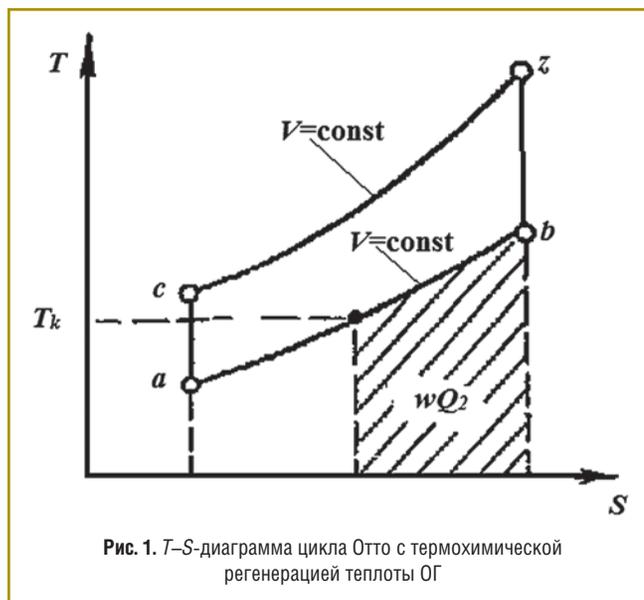
Нетрудно видеть, что

$$w = \frac{T_b - T_k}{T_b - T_a}. \quad (7)$$

Как следует из выражения (7), степень регенерации w зависит от температуры конверсионного процесса T_к и возрастает с ее уменьшением. Современные катализаторы позволяют реализовать конверсию альтернативных топлив при определенных рабочих температурах, например, для метанола не ниже 280...300 °С [4], определяя тем самым минимально возможный температурный предел ОГ ДВС, при котором осуществима организация этого процесса. Очевидно, что указанные требования по температурному уровню выпускных газов двигателя могут быть обеспечены лишь в определенном диапазоне изменения режимов его работы. Поэтому на сегодняшний день можно говорить лишь о возможности частичной регенерации теплоты ОГ ДВС на основе рассматриваемого способа. Решение проблемы более полной утилизации теплоты ОГ поршневых двигателей связано с перспективой разработки высокоэффективных катализаторов, способных инициировать процессы деструкции (разложение) альтернативных энергоносителей при пониженных температурах теплоносителя.

Анализ возможности повышения эффективности энергопреобразования топлива

Для иллюстрации возможности повышения эффективности использования химической энергии топлива



сопоставим возможности его энергопреобразования в двух энергетически подобных установках. Первая работает по обычной схеме, вторая – с использованием термохимической регенерации. Необходимый тепловой режим конверсии топлива обеспечивается за счет подвода теплоты от теплоотводящих ветвей цикла, то есть с использованием теплоты ОГ.

Первая установка работает следующим образом. Исходное топливо при параметрах окружающей среды поступает в теплосиловую установку (ТСУ), где сгорает с выделением теплоты Q₁ = H_и (при анализе масса топлива принята равной единице). Эта теплота передается рабочему телу ТСУ. Для упрощения анализа будем считать, что передача теплоты происходит обратимо при средней верхней температуре T₁. Продукты сгорания после совершения цикла отводятся в атмосферу.

Если у рабочего тела средняя нижняя температура, при которой осуществляется отвод теплоты, равна T₂, то производимая им работа может быть определена как

$$L = Q_1 - Q_2 = H_{им} - H_{им} \frac{T_2}{T_1} = H_{им} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (9)$$

При этом эффективность использования химической энергии топлива равна

$$\eta = \frac{L}{H_{им}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (10)$$

Зависимость (10) определяет КПД теплосиловой установки, который равен отношению количества энергии, преобразованной в работу, ко всей энергии, поступившей в ТСУ. Отметим, что КПД рассматриваемой идеализированной установки совпадает с термическим КПД цикла. Это свидетельствует о том, что в ТСУ без термохимической регенерации эффективность использования энергии топлива целиком зависит от преобразования теплоты в работу и не может превысить эффективность преобразования последней.

Вторая ТСУ работает с термохимической регенерацией теплоты ОГ. В отличие от первой ТСУ топливо в ее рабочее

пространство поступает не сразу, а предварительно проходит стадию термохимической переработки в специальном аппарате – термохимическом реакторе (ТХР). В нем под действием теплоты, поступающей из теплоотводящих ветвей цикла ТСУ при средней нижней температуре T_2 , совершается термохимическое преобразование исходного топлива в конвертированное, которое и подается на сжигание в ТСУ. Если принять, что теплообмен в этой ТСУ осуществляется обратимо (как и при анализе первого варианта), то рабочее тело ТСУ с ТХР должно получить теплоту при средней верхней температуре T_1 , равной теплоте сгорания конвертированного (искусственного) топлива: $Q_1^{ТХР} = H_{ум}^к$.

Следовательно, в этом случае воспринятая рабочим телом теплота превышает теплоту сгорания исходного топлива H_u на величину $\Delta H_{ум}^к$, которая была поглощена при термохимическом преобразовании исходного топлива в ТХР и соответственно равна

$$H_{ум}^к = H_{ум} + \Delta H_{ум}^к. \quad (11)$$

Будем считать, что ТСУ с ТХР преобразует воспринимаемую рабочим телом теплоту с той же эффективностью, что и ТСУ без ТХР, то есть термический КПД обеих установок одинаков. Тогда работа, которую может произвести ТСУ с ТХР, будет равна

$$L^{ТХР} = (H_{ум} + \Delta H_{ум}^к) \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (12)$$

Эффективность использования энергии топлива в ТСУ с ТХР определится выражением

$$\begin{aligned} \eta^{ТХР} &= \frac{L^{ТХР}}{H_{ум}^к} = (H_{ум} + \Delta H_{ум}^к) \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \frac{1}{H_{ум}^к} = \\ &= H_{ум} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \frac{1}{H_{ум}} + \Delta H_{ум}^к \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \frac{1}{H_{ум}^к} = \\ &= \eta_T + \frac{\Delta H_{ум}^к}{H_{ум}^к} \eta_T = \eta_T \left(1 + \frac{\Delta H_{ум}^к}{H_{ум}^к} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что эффективность преобразования химической энергии топлива в цикле, содержащем узел термохимической регенерации теплоты ОГ, по сравнению с ее преобразованием в обычной ТСУ может быть увеличена в $(1 + \Delta H_{ум}^к / H_{ум}^к)$ раз.

Покажем это на примере гипотетической теплосиловой установки с ТХР, работающей, например, на метаноле. Тепловой эндотермический эффект реакции конверсии метанола (количество теплоты, утилизированной от ОГ), как было показано выше, равен 4200 кДж/кг. Условно принимая среднюю верхнюю температуру цикла $T_1 = 2000$ К, а среднюю нижнюю – $T_2 = 1000$ К, имеем термический КПД идеальной ТСУ без ТХР $\eta_T = 50\%$ (9). Для установки с термохимической регенерацией отходящей теплоты согласно (13) он будет превышать КПД первой установки в $(1 + 4200/19670) = 1,21$ раза, то есть окажется равным $\eta = 60,5\%$.

Из приведенного анализа следует, что необратимые внешние потери преобразования химической энергии топлива в теплоту в случае использования способа термохимической регенерации теплоты ОГ всегда меньше соответствующих

потерь при непосредственном сжигании топлива без его предварительной термохимической переработки. Причем уменьшение необратимых потерь адекватно энергии, которую необходимо затратить на компенсацию суммарного теплового эндотермического эффекта реакций конверсии исходного топлива.

Реализация термохимического способа утилизации отходящей теплоты для условий рабочего цикла ДВС с искровым зажиганием возможна, если в качестве исходного топлива использовать углеводородные соединения с относительно низкой температурой реакций конверсии (спирты, эфиры и др.), газообразные продукты конверсии которых могут быть применены как основное топливо для питания двигателя. В этом случае по способу организации рабочего процесса подобный двигатель практически аналогичен газовому двигателю.

При этом не исключается принципиальная возможность реализации этого способа в составе систем питания дизелей, использующих в качестве запального дизельное топливо, а для организации конверсионного процесса – альтернативное топливо с низкой температурой преобразования. В данном случае расход последнего через реактор конверсии может оптимально варьироваться в соответствии с температурными и энергетическими возможностями теплоносителя (выпускные газы) для каждого конкретного режима работы двигателя по условию обеспечения полного завершения процесса конверсии.

Теоретические основы подобных систем питания поршневых двигателей в современной исследовательской практике остаются малоизученными. Однако они представляют определенный интерес, в первую очередь, с точки зрения оценки потенциальных возможностей применения ТХР в составе систем питания двигателей и повышения эффективности использования энергии альтернативных видов топлива.

Основным показателем для оценки эффективности рабочего цикла поршневого двигателя служит термический КПД термодинамического (идеальный) цикла [1]. Проанализируем влияние процесса термохимической регенерации на эффективность использования энергии топлива в термодинамическом цикле со смешанным подводом теплоты (теоретический цикл двигателя с воспламенением от сжатия – дизеля). В данном цикле принимают, что одна часть теплоты подводится при постоянном объеме, а другая – при постоянном давлении.

Рассматриваемый цикл состоит, таким образом, из адиабатных процессов сжатия ac и расширения zb , изохорного $c'z'$ и изобарного $z'z$ процессов подвода теплоты к рабочему телу и изохорного процесса ba отвода теплоты от рабочего тела к теплоприемнику (рис. 2).

Если теплота, регенерируемая с помощью ТХР, соответствует Q_p , то теплота, подведенная к рабочему телу такого цикла от теплоотдатчика (за счет сжигания топлива), составит

$$Q_1 = C_V(T_z' - T_c) + C_p(T_z - T_z') - Q_p.$$

Теплота, отведенная из цикла с термохимической регенерацией, соответственно будет равна

$$Q_2 = C_V(T_b - T_a) - Q_p.$$



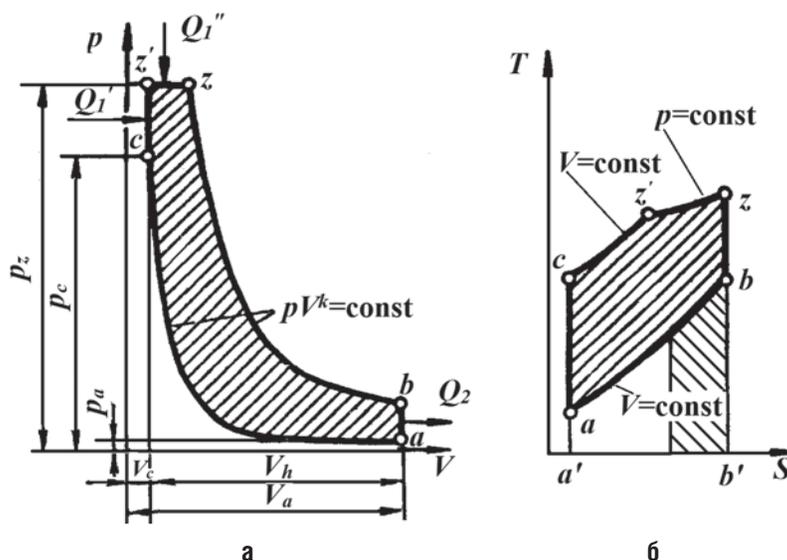


Рис. 2. Термодинамический цикл поршневого двигателя со смешанным подводом теплоты:
а – диаграмма p - V ; б – диаграмма T - S

Выразим теплоту, регенерируемую в цикл, как часть отходящей теплоты Q_2 :

$$Q_p = w Q_2 = w C_V (T_b - T_a),$$

где $w = Q_p / Q_2$ – степень термохимической регенерации отводимой из цикла теплоты. Выражение для расчета показателя эффективности использования энергии топлива $\eta^{\text{КР}}$ для термодинамического цикла со смешанным подводом теплоты с термохимической регенерацией будет иметь следующий вид

$$\eta^{\text{ТХР}} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{C_V (1-w)(T_b - T_a)}{C_V (T_z' - T_c) + C_p (T_z - T_z') - w C_V (T_b - T_a)}.$$

Введем следующие обозначения относительных температур:

$$\frac{T_c}{T_a} = \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{T_z'}{T_a} = \lambda \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{T_z}{T_a} = \lambda \rho \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{T_b}{T_a} = \lambda \rho^k,$$

где $\lambda = p_z' / p_c$ – степень изохорного повышения давления; $\rho = V_z / V_z'$ – степень изобарного расширения; $\varepsilon = V_a / V_c$ – степень сжатия; $k = C_p / C_V$ – показатель адиабаты; C_p и C_V – изобарная и изохорная теплоемкости рабочего тела; p_i , V_i и T_i – давление, объем и температура рабочего тела для соответствующих точек цикла (см. рис. 2).

Если подставить значения относительных температур в выражение $\eta^{\text{ТХР}}$, то получим зависимость для определения показателя эффективности использования энергии топлива для цикла с термохимической регенерацией

$$\eta^{\text{ТХР}} = 1 - \frac{(1-w)(\lambda \rho^k - 1)}{\varepsilon^{k-1}[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)] - w(\lambda \rho^k - 1)}.$$

Для сравнения заметим, что термический КПД η_t термодинамического цикла со смешанным подводом теплоты (теоретический цикл дизеля), который характеризует эффективность преобразования теплоты в работу, определяется зависимостью [1]

$$\eta_t = 1 - \frac{(\lambda \rho^k - 1)}{\varepsilon^{k-1}[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}.$$

Для термодинамического цикла ДВС с принудительным воспламенением (цикл Отто, $\rho = 1$) с термохимической регенерацией выражение показателя эффективности использования энергии топлива приобретает вид

$$\eta^{\text{ТХР}} = 1 - \frac{(1-w)}{\varepsilon^{k-1} - w}.$$

Термический КПД η_t [1] для этого цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Из полученных выражений видно, что эффективность использования энергии топлива в циклах ДВС может быть повышена с помощью термохимической регенерации при постоянных параметрах самого цикла (без повышения начальных параметров рабочего тела), то есть в том числе и без увеличения тепловой напряженности двигателя. Из этих же выражений следует, что величина $\eta^{\text{ТХР}}$ существенно зависит от степени термохимической регенерации отходящей теплоты. В связи с этим целесообразно рассмотреть условия, при которых степень термохимической регенерации отводимой из цикла теплоты достигает максимума.

Условия для достижения максимально возможной степени регенерации

Условия достижения максимально возможной степени регенерации выполняются, если состав продуктов конверсии соответствует условиям термодинамического равновесия (полное завершение конверсионного процесса). Эти условия реализуются, когда эндотермический эффект реакции конверсии соответствует подводу эквивалентного количества теплоты в реакционное пространство от внешнего источника – греющего теплоносителя, в роли которого в данном случае выступают ОГ двигателя.

В реальных условиях конверсионного процесса в выпускной системе ДВС теплоноситель (ОГ) должен располагать потенциально более высоким уровнем энергии, которая используется не только для компенсации эндотермического

эффекта реакции конверсии, но и для организации ее «вспомогательных» этапов. Она необходима также для предварительного нагрева исходного топлива до температуры кипения, его испарения, повышения температуры паров до температуры диссоциации, компенсации тепловых потерь в окружающую среду через стенки реактора и подводящего трубопровода.

Например, общие затраты тепловой энергии на полностью завершённую конверсию 1 кг метанола достигают 7 МДж [5-8]. При этом на компенсацию эндотермического эффекта реакции конверсии спирта расходуется 60 % общих энергетических затрат. Значительная их часть (около 25 %) расходуется на энергоёмкий процесс парообразования (теплота испарения метанола 1,1 МДж/кг). Из этого следует, что максимально возможная степень регенерации достигается при условии, когда тепловая энергия греющего теплоносителя (ОГ) соответствует общим затратам энергии, необходимой для конверсионного процесса.

Следует отметить ещё один интересный научно-практический аспект применения метода термохимической регенерации. При соответствующей организации термохимического преобразования исходного топлива появляется уникальная возможность регенерации не только тепловой, но и химической составляющей энергии потока выпускных газов, которой располагают продукты неполного сгорания топлива (СО, СН и др.). Такая возможность может быть реализована путем экзотермического доокисления этих продуктов на катализаторе в дополнительной секции дожигания реактора.

Расчетная величина мощности дополнительного теплового эффекта в этом случае может быть определена как

$$Q_{\text{доп}} = G_{\text{ОГ}} \sum (H_{\text{и}} m_i),$$

где $G_{\text{ОГ}}$ – массовый расход ОГ через реактор; $H_{\text{и}}$ и m_i – теплота сгорания i -го компонента неполного сгорания топлива и его относительное массовое содержание в ОГ.

Теплота, выделяющаяся при экзотермическом окислении этих продуктов, используется для повышения активности конверсионного процесса и увеличения количества конвертируемого метанола, что в целом способствует росту эффекта термохимической регенерации.

Приоритетный вариант реактора (патент РФ 2175396) [9], на основе которого была осуществлена практическая реализация подобного эффекта, представлен на рис. 3.

Оценка эффективности предлагаемого способа повышения энергии альтернативного топлива в реальных условиях двигателя

Оценка эффективности данного способа в условиях рабочего цикла дизеля типа 4Ч 10,5/12 была проведена в лабораторных условиях на моторном стенде. Термокаталитический реактор конверсии метанола устанавливался в выпускной системе дизеля в непосредственной близости от выпускного коллектора. Конвертированное топливо (газовая водородосодержащая смесь) из реактора подавалось в рабочее пространство дизеля через впускной трубопровод вместе с воздушным зарядом, где оно воспламенялось запальной порцией дизельного топлива.

Исследованиями установлено [6], что на нагрузочных режимах, когда температура ОГ на входе в реактор превышает 300 °С, производительность реактора, в том числе и по целевому компоненту H_2 , достигает своего наивысшего уровня, заметно повышая эффективность рабочего цикла. Так, на номинальном режиме работы регистрировалось повышение топливной экономичности дизеля на 8,5 % по сравнению с его работой без ТХР.

Улучшение экономических характеристик исследуемого дизеля с ТХР, работающего на смесевом водородосодержащем топливе, обусловлено влиянием двух факторов: эффектом частичной утилизации теплоты ОГ и улучшением кинетических показателей сгорания в присутствии H_2 (совершенствование рабочего процесса) [5, 6]. Для выявления доли участия каждого фактора в повышении экономичности двигателя проведено его испытание с использованием реактора конверсии метанола с автономным электрическим подогревателем, то есть без использования (регенерация) тепловой энергии ОГ. Установлено, что энергосбережение для данного дизеля за счет эффекта ТХР составляло 4,5 %, а за счет совершенствования рабочего процесса – около 4 %.

Снижение расхода топлива сопровождалось улучшением экологических качеств дизеля, работающего совместно с

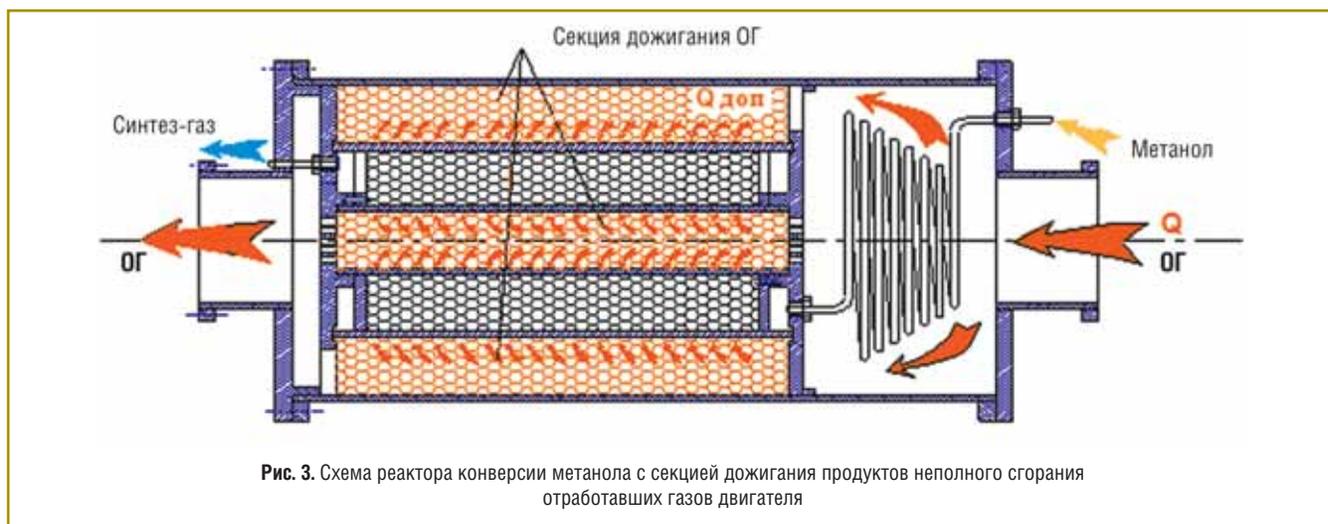


Рис. 3. Схема реактора конверсии метанола с секцией дожигания продуктов неполного сгорания отработавших газов двигателя

ТХР. В частности, на номинальном режиме содержание сажи в ОГ снижалось на 45 %, оксидов азота – на 16 %.

Для оценки энергосберегающего эффекта в условиях рабочего цикла ДВС с искровым зажиганием были проведены испытания на моторном стенде двигателя автомобиля АЗЛК-2141, оснащенного ТХР. В качестве основного топлива использовались ПКМ. Установлено, что экономичность ДВС на режиме холостого хода зависит от его скоростного режима. При низких частотах вращения коленчатого вала (от 1000 до 2500 мин⁻¹), характеризующихся пониженным температурно-энергетическим уровнем ОГ, показатели рабочего цикла практически соответствовали базовому варианту ДВС. Наиболее ощутимое повышение экономичности (на 15,5 % по сравнению с работой на бензине) наблюдалось в диапазоне частоты вращения вала 2800...3300 мин⁻¹ при температуре ОГ 350...450 °С. Это объясняется тем, что в данном диапазоне частоты вращения потребляемая реактором тепловая энергия и располагаемая энергия теплоносителя (ОГ) оказываются практически сопоставимыми.

На всех нагрузочных режимах ДВС с ТХР экономические показатели его рабочего цикла оказались выше (в среднем на 14 %), чем при работе на бензине (без ТХР).

Для выявления факторов улучшения топливной экономичности исследуемого двигателя было проведено дополнительное экспериментальное исследование. На первой стадии испытаний с использованием газобаллонной системы питания в цилиндры двигателя подавали синтез-газ, имеющий компонентный состав (объемные доли), аналогичный составу продуктов конверсии метанола: 65 % Н₂ и 35 % СО. Очевидно, что в данном случае эффект утилизации тепловой энергии ОГ не проявлялся.

На второй стадии испытаний двигатель работал совместно с ТХР. Утилизированная энергия ОГ, преобразованная в новый вид топлива (ПКМ) с более высокими энергетическими показателями, использовалась для совершения дополнительной полезной работы. То есть ДВС работал по схеме регенеративного цикла.

С учетом того, что в обоих случаях топливо имело один и тот же компонентный состав, его показатели сгорания, а значит и характер воздействия на кинетические параметры рабочего цикла были идентичными. Следовательно наблюдаемое в опыте повышение экономичности ДВС однозначно соответствовало эффекту термохимической регенерации

энергии ОГ. Это повышение на режимах внешней скоростной характеристики составило в среднем 4,3 %, а максимально – 5,3 % при частоте вращения коленчатого вала 3000 мин⁻¹.

Далее было проведено исследование уровня энергосбережения на автомобиле АЗЛК-2141 с ДВС, работающим совместно с ТХР, в условиях ездового цикла. Испытания проводились согласно регламенту, установленному Государственным ездовым циклом ГОСТ 20306–85, при котором топливная экономичность транспортного средства оценивается расходом топлива на 100 км пробега. При испытаниях зарегистрировано улучшение топливной экономичности модернизированного автомобиля на 15,1 % по сравнению с его бензиновым аналогом. Для выявления эффекта регенерации проведены сравнительные испытания этого же автомобиля с ДВС на синтез-газе из автономных баллонов без проявления регенеративного эффекта. По данным испытания установлено, что повышение экономичности за счет эффекта регенерации составило 4,8 %.

Применение рассмотренного способа утилизации энергии выпускных газов в транспортных двигателях представляется априори весьма перспективным. Благодаря технической простоте его реализация не требует переоборудования существующего производства ДВС и финансовых вложений. В качестве базового двигателя может быть использована любая серийная модель ДВС (в том числе и двигатель, находящийся в эксплуатации), освоенная отечественным двигателестроением. Основным элементом конверсионной системы – каталитический реактор – представляет собой простейшую конструкцию теплообменного аппарата, массовые и габаритные характеристики которого (в объеме обычного глушителя) обеспечивают удобство его установки в выпускной системе двигателя.

Важным стимулом дальнейшего развития подобных систем является то, что они обуславливают возможность совокупного совершенствования характеристик транспортного средства по комплексу показателей. Их реализация на транспортных средствах позволяет, в частности, утилизировать отходящую тепловую энергию, совершенствовать процессы сгорания, улучшать экологические качества АТС [5, 7], обеспечивая при этом возможность замены традиционного нефтяного топлива альтернативным энергоносителем из возобновляемых, в том числе биологических источников, способствуя таким образом решению проблемы ресурсосбережения.

Литература

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей // Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. Носач В.Г. Методы повышения эффективности использования топлива в технологических процессах // Теплофизика и теплотехника. – 1977. – № 37. – С. 44–47.
3. Вишняков А.В., Яковлева Н.В., Чащин В.А., Фатеев В.Н. Возможности и ограничения методов получения и очистки водорода для топливных элементов. Термодинамические и кинетические аспекты получения водорода в бортовых системах // Химическая технология. – 2002. – № 1. – С. 3–9.
4. Стеженский А.И. Паровая конверсия метанола. Наука думка, 1972. – 283 с.
5. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Повышение эффективности работы ДВС применением термохимической регенерации теплоты отработавших газов // Проблемы энергоаккумуляции и экологии в машиностроении. Сб. научн. тр. – М.: Изд. ИНМАШ РАН, 2003. – С. 156–170.
6. Фомин В.М., Бендик М.М., Сидоров М.И. Метод регенерирования энергии ОГ дизеля, работающего совместно с системой конверсии метанола / Материалы междунаrodn. симпозиума. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – С. 140–142.
7. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Совершенствование рабочего цикла ДВС с принудительным зажиганием и термохимической регенерацией отводимой теплоты / Материалы междунаrodn. симпозиума. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2005. – С.142–144.
8. 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.
9. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Корнилов Г.С. Способ работы двигателя // Патент РФ №2249807, опублик.: 10.04.2005. – Бюл. № 10.

Проблемы оценки детонационной стойкости КПГ

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

Рассмотрены экспериментальные методы оценки детонационной стойкости сжатого природного газа и модели расчетного определения октанового и метанового чисел.

Ключевые слова: сжатый природный газ (КПГ), качество КПГ, детонационная стойкость, октановое число, метановое число.

Evaluation of CNG knock resistance

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

Experimental methods of evaluating knock resistance of compressed natural gas and methods to calculate octane and methane numbers.

Keywords: compressed natural gas (CNG), quality of CNG, knock resistance, octane number, methane number.

Многие годы, когда сжатый природный газ применялся на переоборудованных бензиновых транспортных средствах (АТС), большой разрыв между детонационной стойкостью КПГ и бензинов не использовался, и казалось излишним нормировать в стандартах на КПГ его значения.

Однако высокий прирост числа АТС в мире, работающих на КПГ (до 20 % в год), и большая конкуренция на этом рынке привели к тому, что серийное производство метановых модификаций автомобилей освоили многие фирмы: Mercedes, BMW, Volvo, FIAT, Volkswagen, Ford, Honda, Opel, Renault, Cummins, Caterpillar, Iveco, КАМАЗ и другие автопроизводители.

Совершенствуя характеристики современных газовых двигателей для повышения их мощности, экономичности и экологических характеристик, производители организуют рабочий процесс на пределе детонационного сгорания топливоздушная смеси. Это обуславливает повышенные требования к качеству газовых моторных топлив, обеспечению стабильного уровня его детонационной стойкости.

Детонационные явления в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания с искровым воспламенением возникают, если в период предпламенных процессов окисления и сгорания образуется большое количество перекисей. Их образование происходит в виде самопроизвольно ускоряющейся сильно разветвленной цепной реакции (ЦР) и нарастает лавинообразно. Для начала ЦР нужны определенные соотношения концентраций воздуха и топлива, а также достаточно высокие температура и давление. Однако описать этот процесс детонации с точки зрения химической кинетики количественно на современном уровне развития науки не представляется возможным [1].

Если двигатель работает на топливе, при нагреве которого в цилиндре в процессе сжатия рабочей смеси образуется много перекисей, то при достижении их критической концентрации происходит взрывное воспламенение. Сгорание рабочей смеси идет с большой скоростью и резким повышением давления, возникает ударная волна, перемещающаяся по камере со сверхзвуковой скоростью. Ударная волна стимулирует воспламенение соседних слоев рабочей смеси, скорость сгорания которой становится равной скорости распространения ударной волны и составляет 1500...2500 м/с. Это воспринимается как «стуки» и приводит к повышенным механическим и тепловым нагрузкам, а также неполному сгоранию.

Окисление начинается с наименее стойкого компонента топлива. Развитие цепных реакций может быть замедлено антидетонационными присадками, прерывающими ЦР, и наоборот усилено, если присутствуют компоненты-медиаторы с наименее стойкими к окислению характеристиками и способствующие развитию ЦР.

Сравнивая развитие детонационных явлений при работе на бензине и на КПГ, следует отметить следующие особенности. В природном газе (ПГ) обычно присутствует не более десятка горючих компонентов значимых концентраций, а в бензине их может быть более 200 (в работе [1] приведены данные по детонационной стойкости более 100 компонентов только алканов и циклоалканов) с широким спектром детонационной стойкости, что способствует стабильному развитию ЦР в бензиновоздушной смеси.

Исследования по определению детонационной стойкости углеводородных газов показали, что оценка их по аналогии с методами, применяемыми для традиционного моторного топлива, не является объективной ввиду значительных различий процессов сгорания жидких и газообразных топлив [2]. В природном газе начавшаяся цепная реакция может прерваться на молекуле инертного газа, а если присутствуют компоненты-медиаторы – наоборот развиваться и разветвляться. Поэтому детонационную стойкость ПГ определяет как концентрация самих компонентов, так и их взаимное влияние, причем, как отмечают исследователи [2], характер влияния нелинейный.

Существуют методики определения требований к детонационной стойкости двигателей АТС, работающих на бензине в реальных дорожных условиях (ГОСТ 10373–75) и на СУГ (предложена Певневым Н.Г.) [3], однако отсутствуют методики ее определения для двигателей, использующих газомоторное топливо на основе метана.

В работе [4] приведены результаты стендовых испытаний пяти различных двигателей на природном газе различного состава с метановыми числами (МЧ) 75...100 и различной теплотворной способностью. МЧ определялось расчетным методом, разработанным Калифорнийским комитетом по ограничению загрязнения воздуха, однако, при расчете МЧ по приведенному компонентному составу по методикам AVL и Caterpillar (о которых пойдет речь ниже) эти величины на 5...15 ед. ниже. В частности, для компонентного состава газа с МЧ=76,1 подсчет по упомянутым методикам дал значения МЧ=70 и МЧ=71,1 соответственно. По результатам этого исследования можно сделать вывод, что при полном сохранении мощностных характеристик топливная экономичность ухудшается до 8 % при применении ГМТ с низкой калорийностью в сравнении с высококалорийным топливом и на ± 5 % при изменении МЧ. Эмиссия выбросов с отработавшими газами в большей степени зависит от МЧ газомоторного топлива, чем от его теплотворной способности, причем для разных двигателей характер зависимости – различный.

В стандартах на КПП фирмами-производителями двигателей и разными исследователями предлагаются различные расчетные методики оценки детонационной стойкости газомоторного топлива. Для оценки этого параметра у бензинов предложено много расчетных методик, математических моделей [1], некоторые из которых реализованы в хроматографах-октаномерах, позволяющих оперативно оценить октановое число (ОЧ). Однако нет общепризнанной методики определения детонационной стойкости КПП.

Впервые «октановую» шкалу для оценки детонационных свойств газов использовал в своих работах И. Бекстер (США, 1948 г.). При исследовании детонационной стойкости природных горючих газов исходили из предположения, что поскольку они относятся к углеводородам парафинового ряда, то по аналогии с эталонными топливами при их смешении ОЧ смеси определяется линейной зависимостью. Однако в результате проведенного исследования Фелт и Кирили показали, что для октановых чисел смесей пропан-бутана, пропан-изобутана и пропан-пропилена линейная зависимость не соблюдается [2].

По ГОСТ 27577 детонационную стойкость КПП оценивают так называемым расчетным октановым числом (РОЧ), которое определяется по закону аддитивности (1) как средневзвешенное ОЧ по компонентам. Однако это дает только ориентировочное представление о реальной детонационной стойкости испытуемой пробы газа, так как закон аддитивности работает тем хуже, чем больше дополнительных компонентов входит в состав природного газа, кроме того, в приложении приведены данные ОЧ только для пяти основных компонентов ПГ. Присутствие в составе природного газа инертных газов (CO_2 , N_2) существенно повышает его детонационную стойкость, однако это не учитывается в расчетной формуле

$$\text{РОЧ} = \frac{\sum_i^{n_i} \text{ОЧ}_i C_i}{\sum_i C_i}, \quad (1)$$

где ОЧ_i – октановое число i -го горючего компонента КПП (по моторному методу); C_i – объемная доля i -го горючего компонента КПП; n – число горючих компонентов КПП, определенных анализом.

В работе [2] проводились экспериментальные исследования на установке УИТ-65 по оценке точности так называемого расчетного метода определения октанового числа низкокипящих углеводородов, который применялся в нашей стране. Его сущность состоит в том, что ОЧ низкокипящего углеводорода определяется расчетным путем (обратным пересчетом с использованием принципа аддитивности) на основе данных испытаний смеси, состоящей из испытуемой фракции (в данном случае – изопентана, имеющего температуру кипения 27,9 °С и $\text{ОЧ}=92,3$) и высококипящего бензина, октановое число которого определяется отдельно.

Эксперименты проводились с двумя образцами бензина Б-70, имевшего $\text{ОЧ}=69,1$ и $\text{ОЧ}=70$. Результаты испытаний показывают, что октановые числа изопентана, рассчитанные по измеренным значениям ОЧ смеси и ОЧ базового бензина (в широком диапазоне изменения их концентрации – 25...75 %) с использованием принципа аддитивности, имеют большой разброс, который достигает 10 ед. (от 90,4 до 100,4). Это значительно превышает допустимую по ГОСТ 511 или ГОСТ 8226 погрешность определения ОЧ ($\pm 0,5$ ед.).

Таким образом, из приведенного анализа следует, что используемый в настоящее время расчетный метод определения октановых чисел на основе аддитивности дает большую погрешность, а также не позволяет определять детонационную стойкость газомоторного топлива, зачастую имеющего $\text{ОЧ} > 140$.

В научно-исследовательском центре фирмы AVL (Австрия) К.Кристоф и В.Картелир [6] разработали метод оценки детонационных качеств газомоторных топлив, где вместо «октановой» использована «метановая» шкала, ставшая в последнее время основной в оценке детонационной стойкости ГМТ. МЧ показывает объемное содержание (%) метана в его смеси с водородом, которая начинает детонировать при той же степени сжатия, что и проверяемый газ. В англоязычной литературе принято обозначение MN (Methane Number), иногда встречается MI (Methane Index), в Германии – MZ. Для определения метановых чисел различных газов по эталонным смесям исследователями был использован четырехтактный двигатель с подвижной крышкой цилиндра Waukesh, позволяющий плавно изменять степень сжатия от 4 до 21. Двигатель отличался от стандартного, применяемого для определения октановых чисел топлив, формой камеры сгорания. Метановые числа основных углеводородных газов приведены ниже.

Газ	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}
МЧ.....	100	44	34	11

В международных стандартах ISO 15403-1 и DIN 51624 приведено несколько методик подсчета метанового числа, результаты которых дают относительно близкие оценки детонационной стойкости газомоторного топлива. Рассмотрим суть описываемых методов.

Метод GRI оценки детонационной стойкости газомоторного топлива

Американский институт исследования газа, финансировавший предпринятое Юго-Западным исследовательским институтом исследование, использовал метод оценки октанового числа по ASTM для различных газообразных топлив на основе метана, чтобы измерить их детонационную стойкость (ссылки на их работы приведены в ISO 15403-1). Исследования проводились в соответствии с ASTM D 2699-97 на установке Waukesh. В результате было определено, что чистый метан имеет ОЧ≈140. Октановые числа большинства природных газов лежат в диапазоне 115...113. ОЧ чистого пропана изменяется в интервале 96...97.

Экспериментальные данные по определению ОЧ многокомпонентных смесей, под которые подпадает большинство видов природного газа, были аппроксимированы двумя формулами. Для расчета ОЧ топлива по концентрации его компонентов используется следующая формула:

$$\text{ОЧ} = 137,78 X_{\text{CH}_4} + 29,948 X_{\text{C}_2\text{H}_6} - 167,062 X_{\text{C}_3\text{H}_8} + 181,233 X_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + 181,233 X_{\text{CO}_2} + 26,994 X_{\text{N}_2}, \quad (2)$$

где X – молярная доля соответствующих компонентов (метан, этан, пропан, бутан, двуокись углерода и азот).

Для расчета октанового числа в зависимости от соотношения водород/углерод используется формула

$$\text{ОЧ} = 406,14 + 508,04 (\text{H/C}) - 173,55 (\text{H/C})^2 + 20,17 \times (\text{H/C})^3, \quad (3)$$

где H/C – отношение числа атомов водорода к числу атомов углерода.

На основании полученных экспериментальных данных была установлена корреляция между октановым числом, определенным по моторному методу, и метановым числом. Эта корреляционная зависимость, как отмечают исследователи, не совсем линейная, поэтому формулы нельзя точно преобразовать одну в другую:

$$\text{ОЧ} = 0,679 (\text{МЧ}) + 72,3; \quad (4)$$

$$\text{МЧ} = 1,445 (\text{ОЧ}) - 103,42. \quad (5)$$

Для расчета ОЧ ПГ по концентрации его компонентов применяются простейшие модели первого порядка без учета взаимного влияния (взаимодействия) факторов, то есть те же аддитивные модели.

Метод AVL оценки детонационной стойкости газомоторного топлива

Стандартным методом AVL, разработанным Институтом двигателей внутреннего сгорания (Австрия), были исследованы двух- и четырехкомпонентные смеси (таблица). Порядок вычисления МЧ приведен в ISO 15403-1:2006 и DIN 51624. Для определения метанового числа была использована та же установка, что и в методе GRI. Основанный на данных исследования метод AVL принят в немецком стандарте DIN 51624 для расчетного определения метанового числа КПГ. Его недостатком следует считать объединение в группы компонентов (например, в группе C_2 находятся этан и этилен), имеющих разную детонационную стойкость.

Существуют методики определения МЧ по трехкомпонентным номограммам, предлагаемые, например, фирмой Jenbacher, а также уже упоминавшийся метод расчета МЧ газомоторного топлива, разработанный Калифорнийским Комитетом по ограничению загрязнения воздуха [4]. Кроме этого, существуют программы расчета МЧ по компонентному составу газового топлива (так называемые «электронные калькуляторы», выложенные, например, на сайте [5]):

- AVL Methane Index Calculator, основанный на стандартном методе AVL;
- Caterpillar Methane Number Calculation Program (далее CAT).

Отличия значений МЧ (см. таблицу), полученных по разным методикам, могут быть обусловлены рядом причин.

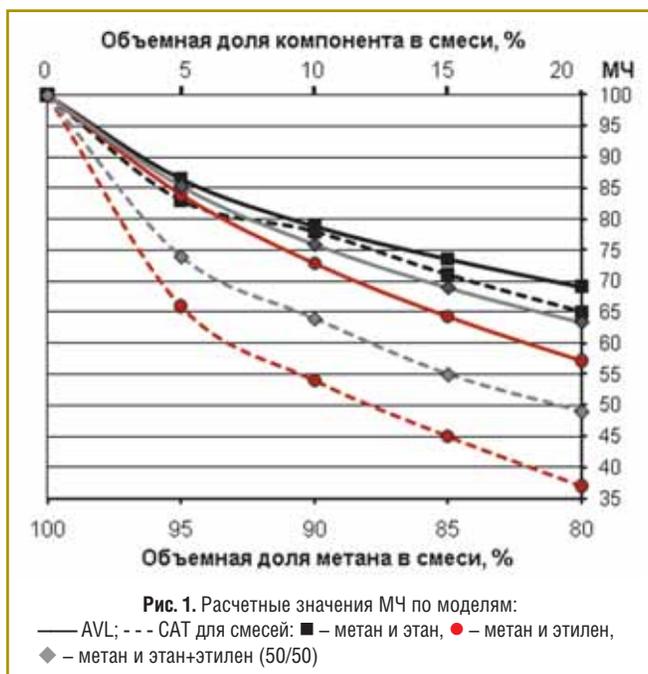
Экспериментальные методики определения детонационной стойкости одного и того же компонента, составов ПГ могут выполняться на различных установках, режимах испытания, отличающихся скоростными, нагрузочными, тепловыми параметрами и т.д. Кроме того, для аппроксимации полученных данных могут использоваться различные модели. Число компонентов (факторы) может быть различно, так, в программе AVL учитывается 14 компонентов, а в CAT – 21.

При определении расчетными методами МЧ по двум моделям заметно отличие значений МЧ (рис. 1), при этом максимальное наблюдается для смеси метана и этилена, которое может достичь 20 ед.

Значения МЧ смеси метана со смесью этана и этилена (50/50) при подсчете по модели AVL дает среднеарифметическое значение МЧ смесей метана с этаном и метана

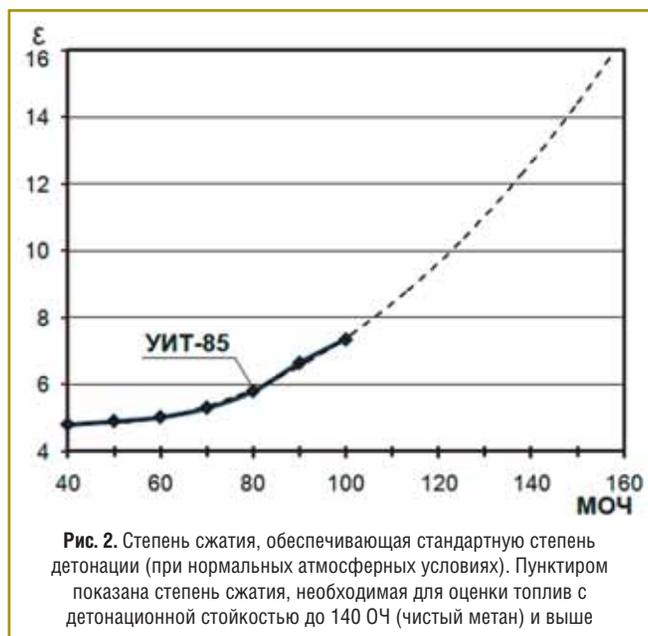
Метановые числа различных сортов природного газа, измеренные на установке Waukesh, а также рассчитанные по их компонентному составу

Параметры	Состав природного газа			
	A	B	C	D
Объемная доля компонентов топлива, %				
N_2	0,63	3,62	11,13	0,81
CO_2	0,00	1,59	1,28	0,08
C_1	88,58	87,48	82,9	98,31
C_2	8,37	5,40	3,68	0,05
C_3	1,73	1,31	0,67	0,19
C_{4+}	0,69	0,60	0,34	0,56
Метановое число				
Измеренное AVL	73,18	76,20	86,18	95,00
Расчетное AVL	73,0	79,3	86,6	90,5
Расчетное CAT	71	79	86	94
Расчетное GRI	74,4	77,1	70,2	93,9



с этиленом. Это свидетельствует о том, что модель не учитывает взаимного влияния этих компонентов. При расчете МЧ по калькулятору CAT этилен оказывает большее влияние на снижение детонационной стойкости, чем по модели AVL. При этом детонационная стойкость смеси метана со смесью этана с этиленом (50/50) отличается от среднеарифметического МЧ смесей метана с каждым из этих компонентов на ~15 %, что свидетельствует о том, что эта модель учитывает взаимное влияние компонентов. В целом влияние компонентов на МЧ смесей нелинейное, при аппроксимации экспериментальных данных использовались модели как минимум второго порядка.

При разработке стандартного метода определения МЧ газомоторного топлива целесообразно максимально использовать опыт, инструментарий и методические подходы, наработанные при определении детонационной



стойкости традиционных топлив. В настоящее время детонационную стойкость бензина при соблюдении всех требований метода определения ОЧ, устанавливаемых отечественными стандартами (ГОСТ 8226–82, ГОСТ 511–82, ГОСТ Р51105–97) или аналогичными зарубежными (ASTM D2699, ASTM D2700, EN 25163, ISO 5163, ISO 5164), определяют экспериментально на отечественных установках УИТ-85 или на установках Waukesh различных модификаций.

На отечественных установках при добавлении в изооктан тетраэтилсвинца можно определять детонационную стойкость топлив с ОЧ<110 (по ISO на установке Waukesh с ОЧ<120). Сравнение детонационной стойкости производят при так называемой стандартной степени детонации (рис. 2), интенсивность которой регулируют изменением степени сжатия одноцилиндровой установки. У установок УИТ-85 степень сжатия $\epsilon=4...10$, а у Waukesh – $\epsilon=4...18$.

Для ГМТ с большей детонационной стойкостью, например, для биогаза, имеющего МЧ на 30 % выше, требуется степень сжатия более 12, что может обеспечить только установка Waukesh.

Для получения модели влияния различных компонентов на МЧ необходимо на стандартной установке на регламентированных режимах, обеспечивающих воспроизводимость, исследовать влияние более 20 компонентов, характерных для ПГ, и их взаимное влияние на детонационную стойкость. Математическая модель (например, полиномиальная), описывающая результаты испытаний, должна быть не ниже второго порядка для учета нелинейного влияния компонентов с членами, учитывающими взаимодействие факторов.

Литература

1. Математическое моделирование октановых чисел бензинов, получаемых из природного газа. Лapidус А.Л., Смоленский Е.А., Рыжков А.Н., Мышенкова Т.Н., Чуваева И.В. // Газохимия. – 2009. – Июль-август. – С. 72-74.
2. Анализ проведенных исследований по оптимизации методов определения октановых чисел газомоторных топлив. Туровский Ф.В., Морев А.И., Гнедова Л.А., Водолага В.С. // НТС. Сер. Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Подготовка, переработка и использование газа. Энергосбережение/ИРЦ Газпром. – № 9-10. – С. 3-11.
3. Исследование антидетонационных свойств сжиженных газов на двигателе ЗИЛ 373. Певнев Н.Г. // Химия и технология топлив и масел. – 1973. – № 6. – С. 43-47.
4. **Feist M.** Fuel composition testing using Cummins, John Deere, and Detroit diesel natural gas engines / FINAL REPORT// SwRI® Project No. 03.13721 – Prepared For Mr. M. Landau Southern California Gas Company. – 2009. – April. – P. 811.
5. Методики определения метанового числа, «Электронные калькуляторы» для расчета МЧ». Электронный ресурс / <http://www.oilforum.ru/topic/7486-u-kogo-est-metodika-rascheta-metanovogo-chisla-p/>
6. **Christoph K., Cartellieri W. and Pfeifer U.** Bewertung der Klopffestigkeit von Kraftgasen mittels der MethanzQhi und deren praktische Anwendung bei Gasmotoren. MTZ 33. 10, 1972.

Электрохимические водородные компрессоры/концентраторы на основе твердополимерного электролита

С.А. Григорьев,

доцент, начальник лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», к.т.н.,

С.В. Коробцев,

директор Института водородной энергетики и плазменных технологий, к.ф.-м.н.

В статье рассмотрены устройство, принцип действия и перспективы применения электрохимических водородных компрессоров/концентраторов на основе твердополимерного электролита (ТПЭ), обладающих высокой селективностью по водороду и позволяющих получать высокочистый (объемная доля до 99,72 % и выше) водород высокого давления при энергозатратах на процесс не более 0,6 кВт·ч на 1 м³ водорода (суммарные затраты на очистку и компримирование). Описываются технические подходы к созданию модифицированных газоплотных ТПЭ-мембран и каскадной схемы электрохимической батареи, позволяющих получать высокочистый водород под давлением несколько десятков мегапаскалей.

Ключевые слова: водород, электрохимический компрессор/концентратор, твердополимерный электролит, модифицированная мембрана.

Electrochemical hydrogen compressors/concentrators based on solid polymer electrolyte

S.A. Grigoryev, S.V. Korobtsev

Feature, principle of operation and prospective of application of electrochemical hydrogen compressors/concentrators based on solid polymer electrolyte (SPE) are considered. SPE hydrogen compressors/concentrators demonstrate high selectivity for hydrogen and allow to receive high purity (up to 99,72 vol. % and more) and high pressure (up to several tens of atmospheres) hydrogen at power costs on process no more than 0,6 kW·h/m³ of hydrogen (overall power inputs for clearing and compressing). Technical approaches for development of modified SPE-membranes with reduced gas cross-permeation and the cascade scheme of the electrochemical stack allowing to receive high purity hydrogen under pressure of several hundreds atmospheres are described.

Keywords: hydrogen, electrochemical compressor/concentrator, solid polymer electrolyte, modified membrane.

Сегодня стало особенно очевидным, что экономика, основанная на использовании нефти и газа при всех ее неоспоримых преимуществах, неотвратимо ведет к энергетическому и экологическому кризисам, геополитическим потрясениям, связанным с ограниченностью запасов и неравномерным распределением ископаемых ресурсов на планете. Осознание этого дает мощный импульс развитию исследований в области поиска альтернативных энергоносителей и их коммерциализации. В частности, прорабатывается концепция водородной энергетики [1], которая предполагает получение водорода с использованием возобновляемых источников (солнечных, ветровых, геотермальных и т.д.) или атомной энергии [2], его хранение, транспортировку и эффективное использование в энергетике, химической, металлургической, металлообрабатывающей, пищевой и других областях. В первую очередь концепция водородной энергетики ориентирована на использование водорода в качестве универсального топлива для транспортных энергетических установок [3, 4], которые являются основными потребителями ископаемого топлива и загрязнителями окружающей среды (на долю транспорта приходится до 90 % атмосферных загрязнений в мегаполисах). Также в последнее время технологии водородной энергетики рассматриваются в проектах децентрализованного тепло- и электроснабжения промышленных и коммунальных объектов, а также для резервного энергообеспечения.

Для создания водородной инфраструктуры, а также для ряда областей промышленности и энергетики перспективным является внедрение электрохимических концентраторов/компрессоров водорода на

основе твердополимерного электролита. Электрохимические концентраторы/компрессоры водорода могут быть применены для очистки водорода, используемого при охлаждении турбин, выделения водорода из продуктов конверсии органического топлива, сбросных газов топливных элементов и смесей водорода с природным газом (хитан), концентрирования и разделения изотопов водорода (охлаждение ядерных реакторов) и т.п.

Сжатие водорода с помощью традиционных механических компрессоров имеет ряд недостатков, к которым относятся низкая эффективность процесса и высокие энергозатраты на его осуществление, износ и наводораживание элементов компрессора, шум, громоздкость и загрязнение водорода смазочными материалами. Электрохимические водородные компрессоры с ТПЭ лишены указанных выше недостатков. В частности, электрохимические компрессоры водорода эффективнее традиционных (мембранных и поршневых) в области низких мощностей [5]. На выходе получают высокочистый водород (возможны примеси водяного пара). Так, чистота водорода может достигать 99,72% (при начальном содержании водорода 30 % в смеси $H_2/N_2/CO_2$) [6].

Как и в других электрохимических системах с ТПЭ в водородном компрессоре (рис. 1) используются мембраны марки Nafion или их аналоги, электрокатализаторы на основе металлов платиновой группы, газодиффузионные электроды в виде пластин пористого титана, углеродной ткани или бумаги [5-8]. В случае, когда на анод подаются смеси, содержащие, помимо водорода, CO , H_2S и другие газы, отравляющие платиновый электрокатализатор, возможно применение катализатора в виде сплава PtRu на углеродном

носителе и подобных CO -стойких каталитических материалов.

Так же, как и в случае других ТПЭ-систем (топливных элементов, электролизеров воды), одной из основных характеристик водородного компрессора является его вольт-амперная кривая (рис. 2). Удельные энергозатраты на выделение/сжатие водорода определяются произведением плотности тока на напряжение водородного компрессора

$$w = iU.$$

При этом напряжение можно рассчитать по уравнению

$$U = E + E_a + E_k + iR,$$

где E – потенциал Нернста электрохимического элемента при данных температуре и давлении; E_a – анодное перенапряжение; E_k – катодное перенапряжение; iR – омические потери.

При комнатной температуре

$$E = E_0 + (RT/2F) \ln(p_k/p_a),$$

где $E_0 = 0$ – стандартное значение потенциала реакции, зависящее от температуры; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; F – постоянная Фарадея; p_k, p_a – давления газов в катодной и анодной зонах.

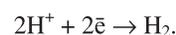
Анодная реакция (положительный электрод) имеет вид



Потенциал Нернста

$$E_{0a} = 0, E_a = (RT/2F) \ln((a_{H^+})^2/p_a).$$

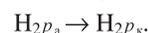
Катодная реакция (отрицательный электрод)



Потенциал Нернста

$$E_{0k} = 0, E_k = (RT/2F) \ln((a_{H^+})^2/p_k).$$

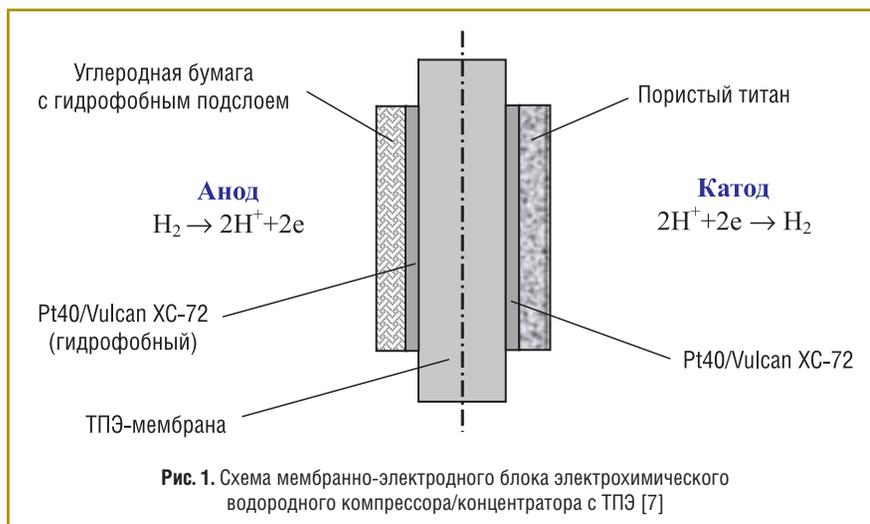
Суммарная реакция, протекающая в водородном компрессоре:

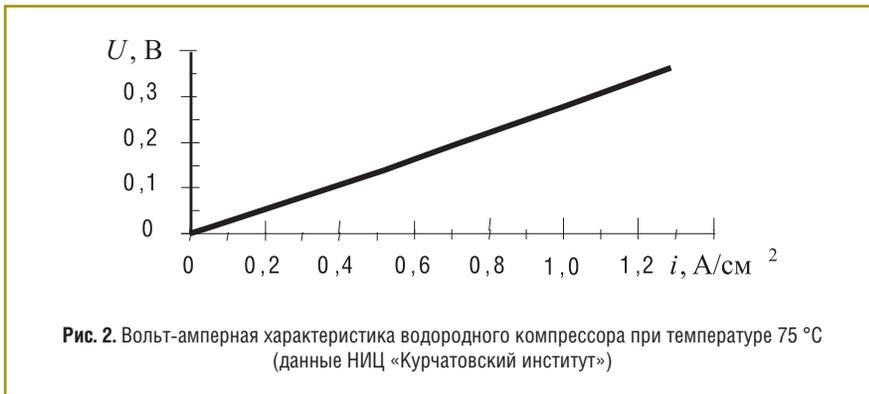


Как правило, удельные суммарные энергозатраты на очистку и компримирование водорода в электрохимическом компрессоре/концентраторе с ТПЭ составляют не более 0,6 кВт·ч/м³.

Важной характеристикой электрохимического водородного компрессора является перепад давлений между катодной и анодной камерами, то есть давление, создаваемое компрессором, которое может достигать нескольких мегапаскалей [5, 7] на одном электрохимическом элементе.

Основным фактором, сдерживающим дальнейшее повышение давления, является обратная диффузия водорода через ТПЭ-мембрану, снижающая эффективность работы системы. Для снижения перетока водорода могут быть применены газоплотные мембраны, получаемые в результате модификации стандартных мембранных материалов органическим наполнителем, например, фосфатом циркония.





Работы по созданию модифицированных мембран для электрохимических систем на основе ТПЭ ведутся НИЦ «Курчатовский институт», ЗАО «МИПФВТ» и ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ М» в сотрудничестве с ОАО «Пластполимер» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы».

Для достижения высоких давлений (до нескольких десятков мегапаскалей) может быть применена так называемая каскадная схема, согласно которой отдельные электрохимические элементы соединяются в батарею последовательно по газу. В этом случае в первый элемент батареи подается водородсодержащая смесь при низком (например, атмосферном) давлении p_0 , и элемент выдает на выходе водород под давлением p_1 . Далее газ под давлением p_1 поступает в следующий элемент, который сжимает его до давления p_2 и т.д. В результате батарея, состоящая из n элементов, способна поднять давление водорода с p_0 до np_1 . В частности, авторы патента [9] применили такую схему для достижения давления водорода 12 000 psi (≈ 84 МПа), что соответствует требованиям, предъявляемым к системам заправки газовых баллонов транспортных средств на топливных элементах.

Таким образом, электрохимические водородные компрессоры/концентраторы с ТПЭ перспективны, в первую очередь, для демонстрационных проектов водородной энергетики, предполагающих различные

технологические процессы, связанные с одновременной очисткой и сжатием водорода. Они могут применяться в энергетике и химической промышленности для высокоселективного разделения смесей на основе водорода с последующим компримированием последнего. Дальнейшая оптимизация и снижение стоимости топливных элементов и электролизеров воды с ТПЭ, использующих те же каталитические, электродные и мембранные материалы, что и водородные компрессоры/концентраторы, позволят снизить стоимость последних, способствуя их широкомасштабному внедрению.

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. **Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.Н., Самсонов Р.О., Козлов С.И.** Получение водорода электролизом воды – современное состояние, проблемы и перспективы // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3. – С. 62-69.
3. **Дугин Г.С., Григорьев С.А.** Новые возможности использования топливных элементов на транспортных средствах // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 2 (14). – С. 76-78.
4. **Янченко В.С., Григорьев С.А., Фокин Ю.И.** Перспективы применения электрохимических генераторов на основе топливных элементов в строительной и коммунальной мобильной технике // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 4 (16). – С. 71-73.
5. **Ströbel R., Oszcipok M., Fasil M., Rohland B., Jörissen L. and Garcke J.** "The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PE fuel cell design" // Journal of Power Sources, Volume 105, Issue 2, pp. 208-215.
6. **Lee H.K., Choi H.Y., Choi K.H., Park J.H., Lee T.H.** "Hydrogen separation using electrochemical method" // Journal of Power Sources, 2004, 131, (1-2), 92-98.
7. **S.A. Grigoriev, I.G. Shtatniy, P. Millet, V.I. Porembsky, V.N. Fateev** "Description and characterization of an electrochemical hydrogen compressor/concentrator based on solid polymer electrolyte technology" // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 6, March 2011, pp. 4148-4155.
8. **M.-T. Nguyen, S.A. Grigoriev, A.A. Kalinnikov, A.A. Filippov, P. Millet, V.N. Fateev** "Characterisation of a electrochemical hydrogen pump using electrochemical impedance spectroscopy" // Journal of Applied Electrochemistry, 2011, in press.
9. **Wong T.Y.H., Girard F. and Vanderhoek T.P.K.** Electrochemical SPEFC hydrogen compressor Patent WO/2003/075379, 12 September 2003, Applicant: National Research Council of Canada.

Установка для исследования рабочих процессов газовых двигателей оптическим методом

В.Ю. Рудаков,

инженер кафедры ДВС Коломенского института (филиал) Московского государственного открытого университета

Приведено описание исследовательского комплекса для изучения газодизельных процессов. В состав комплекса входят двигатель с прозрачными окнами, дополненный оптической системой и скоростной кинокамерой, система наддува с подогревателем воздуха и двухконтурная система подачи жидкого и газообразного топлива. Управление подачей двух видов топлива производится электронной аппаратурой. Имеется возможность регистрации осциллограмм давления впрыска жидкого топлива, индцирования, угла поворота коленчатого вала и ВМТ. Приведена кинограмма газодизельного процесса.

Ключевые слова: двигатель с прозрачными окнами, скоростная киносъёмка, процесс подачи и сгорания газового топлива.

Research optical unit to study processes in natural gas/diesel engines

V.Y. Rudakov

Research optical unit to study processes in natural gas/diesel engines is described. The unit includes an engine with transparent windows, an optical system and a high speed camera, a turbocharger with an air heater and a two-track gas/diesel supply system. Fuel management is done electronically. It is possible to record fuel injection pressure, angle of the crankshaft. Snapshots of the process are done.

Keywords: the engine with transparent windows, high speed snaphooting, the process of injection and combustion of gas fuel.

В последнее время повышение требований к составу отработавших газов двигателей обуславливает интерес к применению альтернативных видов топлива, в частности, природного газа – одного из наиболее чистых в экологическом отношении. В машиностроительном производстве все большее значение начинают приобретать двигатели, работающие на альтернативных видах топлива. К таким двигателям относятся, кроме прочих, среднеоборотные

дизели, выпускаемые на Коломенском тепловозостроительном заводе и переведенные на газообразное топливо. Применение газа позволяет повысить не только экологические показатели ДВС, но ведет к экономии топлива, улучшая их экономические показатели. Поэтому изучение рабочих процессов в газодизельном двигателе приобретает особую актуальность.

Наряду с традиционными методами исследования немаловажное

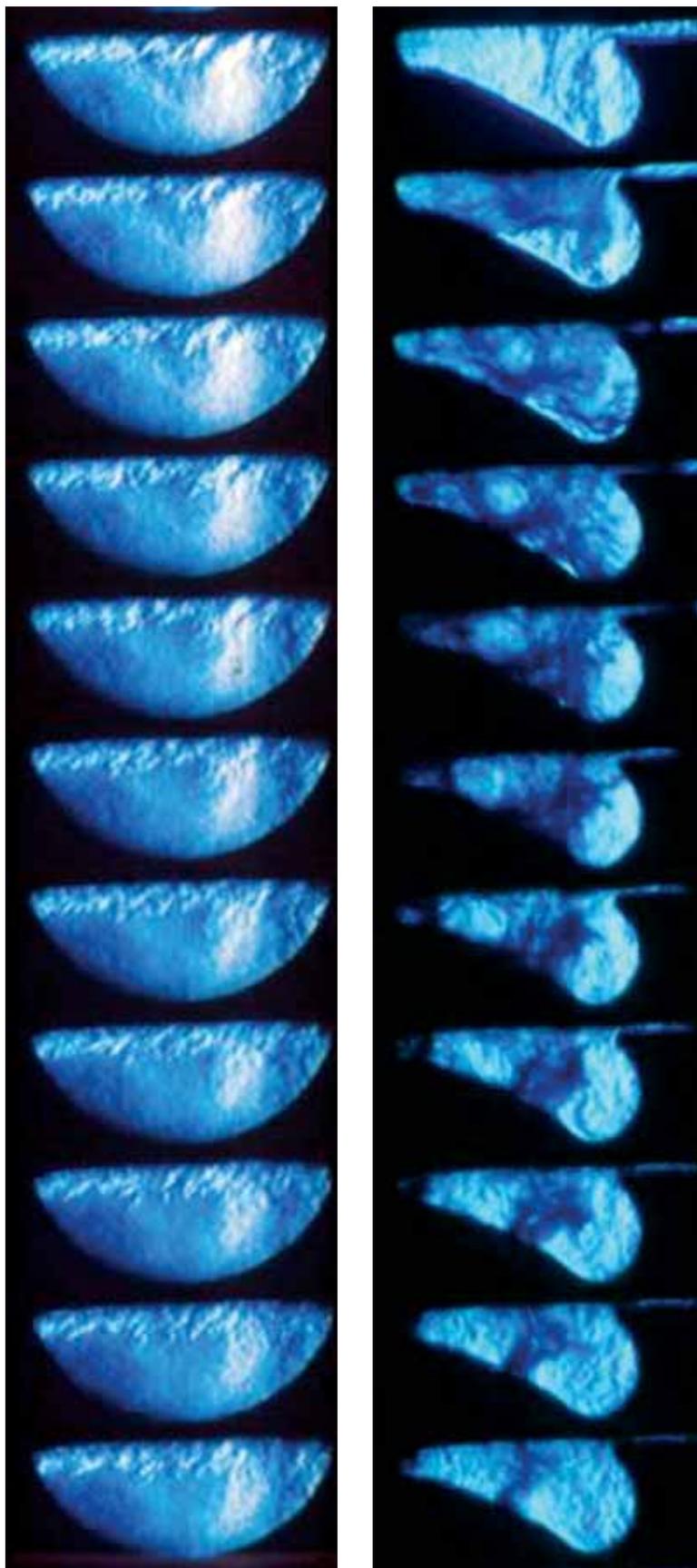
значение имеют оптические методы, позволяющие получить наглядное представление о воспламенении и сгорании топливовоздушной смеси (рисунок).

Для изучения рабочих процессов газовых двигателей на базе установки «Двигатель с прозрачными окнами» (ДПО) [1, 2] создан исследовательский комплекс, позволяющий с помощью скоростной киносъёмки регистрировать процессы, протекающие в камере сгорания. Комплекс включает двигатель с прямоугольной камерой сгорания с оппозитно установленными кварцевыми стеклами, оснащенный форкамерой, шлирен – теньевую оптическую систему ИАБ 451, системы топливоподачи, наддува и подогрева воздуха, а также управляющую и регистрирующую системы.

Для подачи газообразного топлива в установке предусмотрена специально выполненная система топливоподачи. Газ подается с помощью дозирующего электромагнитного клапана в форкамеру, расположенную за пределами оптической системы и установленную в гнездо форсунки. Поэтому процессы, протекающие в форкамере, на киноплёнку не фиксируются. Электронная система управления топливоподачей позволяет менять параметры подачи топлива в широких пределах. При этом можно оперативно устанавливать момент и длительность подачи газа на такте наполнения. Воспламеняется газ свечой, установленной в форкамеру. Свеча подключается к высоковольтному устройству зажигания, запускаемому от датчика, расположенного на маховике.

Система топливоподачи включает баллон со сжатым газом, редуктор с манометрами на входе и выходе и электромагнитный дозирующий клапан, подключаемый к электронному каналу системы управления.

Момент подачи газа определяется датчиками, расположенными на



а **б**
Кинограмма рабочего процесса газового двигателя:

а – поступление газа из форкамеры в камеру сгорания; **б** – впрыск и воспламенение запального топлива

маховике и распределительном валу ДПО. Их положение можно менять в широких пределах. Сигналы датчиков поступают в блок управления работой установки и далее в соответствующие каналы электронной системы управления.

Функции блока управления заключаются в разрешении прохождения сигналов датчиков после выхода кинокамеры на рабочую скорость кино съемки. Кинокамера разгоняется в течение 0,5...0,6 с протягиванием ракорда, приклеенного к киноплёнке. В это время подача топлива и кино съемка не проводятся.

Кроме скоростной кинорегистрации, комплекс позволяет индцировать рабочий процесс и записывать вместе с индикаторной диаграммой угол поворота коленчатого вала и метку верхней мертвой точки.

Система наддува позволяет компенсировать низкую степень сжатия, вызванную сменой головок поршня с разными объемами камер сгорания при моделировании рабочих процессов. Для этих же целей имеется встроенный в систему наддува подогреватель воздуха, поднимающий температуру до 300 °С. С помощью исследовательского комплекса проведен ряд кино съемок различных режимов работы газодизельных двигателей.

Литература

1. **Никитин Е.А., Никонов Г.В., Крупский М.Г., Куянов Ю.Ф.** Установка для исследования процессов, протекающих в камере сгорания дизеля // Двигателестроение. – 1988. – № 1. – С. 8-9.
2. **Кузин В.Е., Рудаков В.Ю.** Системы и измерительная аппаратура установки «Двигатель с прозрачными окнами» / Сб. Улучшение экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания. – М.: Изд. ВЗПИ, 1989. – С. 32-37.

Противодавление в глушителях шума выпуска автомобилей

С.А. Айрбабян,
доцент МГТУ «МАМИ», к.т.н.,
Г.И. Калабухов,
аспирант МГТУ «МАМИ»

Противодавление в глушителе шума выпуска является одной из главных нормируемых характеристик. Оно должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к современным глушителям. Высокое противодавление сказывается на мощностных показателях и эффективности глушителя. В статье рассматривается влияние противодавления на эффективность глушителя, приводится расчет противодавления в глушителе.

Ключевые слова: эффективность, перфорация, перегородка, конструкция, глушитель.

Counter-pressure in the exhaust system's muffler of automobiles

S.A. Airbabamyam, G.I. Kalabukhov

Counter-pressure in the exhaust system's muffler is one of the main normalized characteristics. It should meet requirements shown to modern mufflers. High counter-pressure affects on power indicators, efficiency of the muffler. In article authors consider influence of counter-pressure on efficiency of the muffler, counter-pressure calculation in the muffler is resulted.

Keywords: efficiency, perforation, structure, partition, muffler.

Глушитель в системе выпуска автомобиля служит для снижения уровня звука и выполняет функцию акустического фильтра. Первые глушители представляли собой простую расширительную камеру небольшого объема (10...20 л) с прямолинейным движением газов и имели малоэффективные резонансные элементы. По мере ужесточения требований, предъявляемых к глушителям, их конструкция усложнялась за счет включения в нее устройств, обеспечивающих многократный поворот газового потока и рациональную организацию его движения.

Современный глушитель состоит из 2...4 камер, перфорированных перегородок и трубок, объединенных в

расширительный элемент (корпус). Шумоподавление в глушителе обеспечивается расширением и сужением перетекающего потока, поворотом его на 90...360°, отражением и поглощением звука.

Перфорированные элементы в конструкции повышают эффективность в широком диапазоне звуковых частот, а поворот потока оказывает воздействие на средних и высоких частотах. Очень эффективным способом снижения шума является применение звукопоглощающего наполнения, увеличивающего свое влияние на высоких частотах. Использование резонансных элементов в глушителях довольно противоречиво: полной ясности об их воздействии в узкой полосе частот (как это описано в литературе) нет.

Все элементы, применяемые при проектировании глушителя шума, – перфорированные перегородки и трубки, расширительные камеры, устройства поворота потока, за исключением элементов звукопоглощения – увеличивают противодавление, влияние которого в глушителе различно.

При разработке глушителей шума выпуска следует находить правильное соотношение необходимого шумоглушения и минимального противодавления. Для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) увеличение противодавления на 3...5 кПа приводит к потере проектной мощности двигателя на 2...3%. При этом потери связаны не только с конструкцией глушителя (таблица), но и с типом двигателя (бензиновый, дизельный, с турбонаддувом).

Противодавление зависит от ряда факторов, главными из которых являются гидравлическое сопротивление глушителя, режим работы двигателя и волновое сопротивление системы выпуска. В свою очередь гидравлическое сопротивление зависит от режима работы двигателя, поэтому оценку противодавления и связанного с ним снижения мощности принято относить к ее номинальному значению.

При расчете противодавления за основу берут расчетную схему проектируемого глушителя и учитывают падение давления на входной и выходной трубах глушителя, а также на трубах, соединяющих его камеры. Учитываются потери давления за счет трения и на местных сопротивлениях у срезов труб

$$\Delta p = \frac{(K_{\text{вх}} + K_{\text{вых}} + \lambda_{\text{т}} \ell_{\text{т}} / d_{\text{т}}) \rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где $K_{\text{вх}}$ и $K_{\text{вых}}$ – коэффициенты местного сопротивления на входе потока в трубу и на выходе из нее; $\lambda_{\text{т}}$ – коэффициент трения потока газов о стенку трубы; $d_{\text{т}} = 4 S_{\text{т}} / F_{\text{т}}$ – гидравлический диаметр трубы (для трубы с круговым сечением $d_{\text{т}} = d_{\text{т}}$); $\ell_{\text{т}}$, $d_{\text{т}}$ и $F_{\text{т}}$ – длина, внутренний диаметр и внутренний периметр трубы, м; $S_{\text{т}}$ – площадь проходного сечения трубы, м²; ρ – плотность газов в трубе, кг/м³; v – средняя скорость движения газов в трубе, м/с.

Влияние конструкции глушителя на противодействие

Глушитель и его элементы	Ориентировочная эффективность, дБ	Противодействие, %
Прямой трубопровод	0	100
Расширительная камера	4-6	130
Реактивно-резонансный глушитель	1-2	110
Элементы перфорации:		
с перегородкой	8-9	210
без перегородки	6-7	160

Если срезы соединительных труб располагаются в камерах, то для вычисления коэффициентов $K_{вх}$ и $K_{вых}$ можно использовать формулы:

$$K_{вх} = (S_k / S_T - 1)^2; \tag{2}$$

$$K_{вых} = (1 - S_T / S_k)^2, \tag{3}$$

где S_k – площадь сечения камеры, м².

Для выходной трубы глушителя коэффициент местного сопротивления на выходе из нее при расчете принимается равным единице.

Коэффициент трения:

$$\lambda_T = \frac{1,01}{(\lg Re)^{2,5}} \text{ при } 2 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \tag{4}$$

где Re – число Рейнольдса.

$$Re = v d_T \rho / \mu. \tag{5}$$

Здесь μ – динамическая вязкость газов, Па·с.

Для труб глушителей шума выпуска ДВС рекомендуется принимать $\lambda_T \approx 0,02$.

Так как скорость движения газов в камерах обычно на порядок меньше, чем в трубах, и отсутствуют резкие изменения проходного сечения, то потери давления в них незначительны и поэтому ими можно в первом приближении пренебречь.

Принимая массовый расход ОГ приблизительно равным массовому расходу G_m во входном отверстии системы впуска двигателя, рассчитывают вначале

$$G_m \approx \rho_v V_{hДВС} f_1, \tag{6}$$

где ρ_v – плотность атмосферного воздуха при нормальных условиях $T=293K$ и $p_{ат}=101325$ Па, кг/м³; $V_{hДВС}$ – рабочий объем двигателя, м³; f_1 – основная частота газообмена, равная первой гармонической составляющей спектра шума выпуска, Гц.

$$f_1 = \frac{n}{30t}, \tag{7}$$

где n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; t – тактность двигателя.

Дальнейшие вычисления параметров среды в глушителе начинают с его последнего элемента – выходной трубы глушителя, статическое давление в которой на первом этапе расчета принимают равным атмосферному.

Определяют плотность

$$\rho = M_{см} p_c / (RT), \tag{8}$$

где $M_{см}$ – молярная масса смеси, кг/кмоль; p_c – статическое давление в элементе глушителя шума, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); T – температура газов в элементах выпускной системы, К.

Затем скорость газов в выходной трубе

$$v = G_m / (\rho S_T). \tag{9}$$

Определяется скорость звука в трубе

$$c = \sqrt{\frac{R\gamma T}{M_{см}}}, \tag{10}$$

где γ – показатель адиабаты ОГ.

Число Маха находят по формуле

$$M = v / c. \tag{11}$$

Затем определяют значения $K_{вх}$, $K_{вых}$, λ_T и Re соответственно по формулам (2), (3), (4) и (5). Задав геометрическими размерами трубы и последней камеры на основе расчетной схемы, вычисляют по формуле (1) падение давления на выходной трубе Δp_T и статическое давление в камере по формуле

$$p_k = p_{ат} + \Delta p_T. \tag{12}$$

Определив p_k , вычисляют параметры ρ и c по формулам (8) и (10) в камере, а также v и M по формулам (9) и (11) в ее проточной части.

Последнюю и предпоследнюю камеры обычно соединяет труба, срезы которой введены в них. Ее геометрические размеры определены на расчетной схеме. Принимают условно, что давление в соединительной трубе равно давлению в последней камере $p_T = p_k$. Затем рассчитывают ρ , v , c и M в трубе.

В зависимости от организации движения потока газов в камерах при входе и выходе их из трубы определяют $K_{вх}$ и $K_{вых}$ по соответствующим формулам. Определив Re и λ_T , находят по формуле (1) падение давления на соединительной трубе Δp_T и статическое давление в предпоследней камере глушителя по формуле (12).

Таким образом, переходя от последующего элемента к предыдущему, вычисляют параметры среды в каждом элементе глушителя, необходимые для расчета коэффициентов их матриц передачи. Определив падение давления на каждом i -м элементе глушителя Δp_i (обычно на



трубах и последовательно размещенных диссипативных элементах типа перфорированных перегородок), находят в первом приближении падение давления на глушителе или, иначе говоря, создаваемое им в выпускной системе противодействие:

$$\Delta p_{\text{гл}} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i, \quad (13)$$

где n – число принимаемых в расчет элементов глушителя от входной трубы до концевого отверстия выходной трубы глушителя шума выпуска двигателя.

Если рассчитанное противодействие, которое создаст на выпуске проектируемый глушитель, $\Delta p_{\text{гл}}$ окажется со значительным запасом меньше допустимого $\Delta p_{\text{гл доп}}$, то повторный цикл пересчета $\Delta p_{\text{гл}}$ не потребуются. В противном случае необходимо, используя данные первого цикла, выполнить повторный цикл расчета для уточнения параметров среды и, в том числе, падения давления на глушителе. Если в результате пересчета значения $\Delta p_{\text{гл}}$ мало изменилось, то его следует принять в качестве ожидаемого противодействия, создаваемого проектируемым глушителем. При выполнении в итоге условия

$$\Delta p_{\text{гл}} \leq \Delta p_{\text{гл доп}}, \quad (14)$$

можно сделать вывод о соответствии падения давления на проектируемом глушителе допустимому противодействию.

Если условие (14) выполнено, то переходят к вычислению матриц передачи элементов глушителя и других акустических величин, используя рассчитанные параметры газовой среды.

Изложенная методика позволила разработать глушитель, который при частоте вращения на максимальной мощности двигателя ($n_e = 2500$ мин⁻¹) создает противодействие в выпускном коллекторе 11,6 кПа, которое ниже допустимого для дизельных двигателей (13 кПа). При этом противодействию ожидаемое снижение максимальной мощности двигателя не превысит 2 %.

Литература

1. Айрбабамян С.А., Бангоян Э.Г. Снижение шума автопогрузчиков // Сб. матер. Второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Экология и безопасность». – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – 120 с.
2. Айрбабамян С.А., Бангоян Э.Г. Шум дизельных автопогрузчиков и методы его снижения // Сб. статей IX Международной научно-практической конференции «Экология и жизнь». – Пенза: Изд-во Пензенского университета, 2006. – 326 с.
3. Алексеев С.П., Казаков А.М., Колотилов Н.Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970.
4. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. – М.: Логос, 2008.
5. Луканин В.Н., Гуднов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. – М.: Машиностроение, 1981.
6. Старобинский Р.Н. Глушители шума. В кн. «Техническая акустика транспортных машин: Справочник». / Под ред. Н.И. Иванова. – СПб.: Политехника, 1992. – С. 194-264.

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
Сайт: www.balcity.ru



Анализ механизмов образования и методов расчета концентрации оксидов азота в поршневых двигателях (часть 1)

З.Р. Кавтарадзе,
научный сотрудник НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.,
Р.З. Кавтарадзе,
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

В статье приведен критический анализ механизмов образования оксидов азота, а также методов расчета их концентрации в камерах сгорания современных поршневых двигателей, работающих на традиционных и альтернативных топливах.

Ключевые слова: механизм образования, оксиды азота, традиционные топлива, альтернативные топлива, методы расчета.

The analysis of NO-formation and methods of calculation of NO-concentration in the piston engines working on traditional and alternative fuel

Z.R. Kavtaradze, R.Z. Kavtaradze

The paper presents a critical analysis of the NO-formation mechanisms, as well as methods of calculation of NO-concentration in the combustion chambers of modern piston engines operating on conventional and alternative fuels.

Keywords: mechanism of formation, nitrogen oxides, traditional fuels, alternative fuels, the methods of calculation.

Особенности образования оксидов азота в рабочем цикле поршневого двигателя

Первые исследования образований оксидов азота в камерах сгорания поршневых двигателей, следовательно, и первые работы по расчету концентрации NO_x в продуктах

сгорания появились в 70-х гг. прошлого века практически одновременно с введением законодательных актов по ограничению вредных выбросов для защиты окружающей среды. Естественно, что в это же время практически все крупные производители поршневых двигателей стали расширять исследования по применению различных альтернативных топлив. Однако их применение не может радикально избавить от образования оксидов азота, пока его окисление осуществляется в азотсодержащей воздушной среде при высоких температурах. Применение водорода, почти идеального (если не считать проблемы его производства и безопасной транспортировки) топлива для транспортных двигателей, показывает, что проблема снижения концентрации NO_x в выпускных газах становится не менее актуальной, чем при использовании традиционных жидких углеводородных топлив.

Образование NO_x , как и других вредных компонентов CO , CH и твердых частиц сажи, нормируемых законодательными актами, прежде всего, зависит от коэффициента избытка воздуха α_v и температуры горения. Как известно, концентрации продуктов неполного сгорания CO и CH при обогащении смеси ($\alpha_v < 1$) растут, а максимальная концентрация оксидов азота NO_x достигается при высокой температуре в цилиндре и коэффициенте избытка воздуха $\alpha_v = 1,1$. Обеднение смеси ($\alpha_v > 1,2$) приводит к снижению температуры в цилиндре при горении (при избытке воздуха, несмотря на полное сгорание, часть выделенной теплоты идет на его подогрев, температура смеси при этом невысокая), вследствие чего концентрация NO_x уменьшается. При этом концентрации CH и CO повышаются, так как сильно обедненная смесь горит относительно медленно, особенно в пристеночных слоях и при расширении, когда температура заметно падает. Образование твердых частиц сажи при гетерогенном сгорании углеводородсодержащих топлив происходит в локальных зонах, в которых $\alpha_v < 0,7$. Считается, что в области $\alpha_v = 0,8 \dots 1,2$ практически невозможно добиться одновременного снижения концентрации всех вредных веществ (ВВ), что достигается при сверхбедных смесях ($\alpha_v > 1,4$). Однако при этом, например, бензиновоздушная смесь практически не воспламеняется, если не использовать расслоение заряда в цилиндре или применять альтернативные топлива (водород с более широкими пределами воспламенения и высокими скоростями сгорания бедных смесей). В этом случае добавка водорода (5...15 % расхода бензина) может обеспечить работу при $\alpha_v = 2$ без специальных мер.

Обычно встречаются различные оксиды азота – NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 , которые, попадая в живые организмы, образуют с водой соединения азотной HNO_3 и азотистой HNO_2 кислот, разрушающе воздействующих на организм. Допустимая норма содержания оксидов азота 0,1 мг на 1 м³ воздуха, и считается, что они примерно в 10

раз опаснее, чем оксид углерода CO. Из указанных оксидов азота в продуктах сгорания поршневых двигателей доминирует NO, например, для дизелей его доля в суммарном содержании всех оксидов азота NO_x составляет 95...98 %, а доля NO₂ – 2...5 %. При этом NO дальше может окисляться в высшие оксиды азота при попадании в атмосферу. Однако их доля в суммарном содержании NO_x ничтожно мала и не учитывается. Поэтому в большинстве случаев, особенно когда речь идет о механизмах образования и расчете суммарной концентрации всех оксидов азота, все они отождествляются с оксидом азота NO, то есть принимается, что концентрация NO равна концентрации NO_x.

Для моделирования образования оксидов азота при сгорании в поршневых двигателях и вычисления их концентрации в выпускных газах необходимо знание химико-кинетического механизма их образования.

Другим важнейшим фактором для моделирования образования оксидов азота является реальная локальная температура в очаге сгорания, которая существенно отличается от условной («индикаторная») температуры рабочего тела, полученной в результате пересчета индикаторной диаграммы с использованием уравнения состояния газа. Зависимость концентрации оксида азота от температуры имеет вид экспоненциальной функции. Это указывает на то, что точность определения концентрации NO в процессе сгорания решающим образом зависит от точности определения изменений локальной температуры. Необходимость знания локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме цилиндра в течение всего рабочего цикла, обусловленная не только потребностями исследований экологических характеристик двигателя, но и определением влияния локальных тепловых нагрузок на основные детали (локальные термические граничные условия), привела к разработке нульмерных (одно-, двух- и многозонных), а также трехмерных моделей рабочего процесса [1].

Таким образом, исключительно важное значение имеет создание надежных моделей рабочего процесса и образования оксидов азота, позволяющих вычислять концентрацию NO_x и учитывать влияние основных видов воздействия на рабочий процесс, направленного на ее снижение. Это значительно снизит затраты на доводку существующих, а также на создание перспективных двигателей.

Механизмы образования оксида азота

Учеными давно было замечено, что при горении, а также при взрывах, образуются оксиды азота. Однако вплоть до середины прошлого века не существовало единой концепции механизма окисления азота.

Классический и расширенный термические механизмы Я.Б. Зельдовича. В сороковые годы прошлого столетия, к моменту выхода работы Я.Б. Зельдовича и др.,

считали, что окисление (оксидация) азота вызвано самой химической реакцией горения, в частности, возникающими активными центрами [2]. Так как во время Великой Отечественной войны возникла необходимость производства оксидов азота для оборонной промышленности, группой ученых во главе с Я.Б. Зельдовичем [2, 3] был проведен ряд экспериментов, позволяющих доказать термическую природу реакции оксидации азота и вычислить абсолютные значения скоростей реакций образования и распада NO. Таким образом, были установлены закономерности формальной кинетики, но оставался вопрос об истинном механизме реакции окисления азота. Я.Б. Зельдович и др. обнаружили, что вычисленные абсолютные значения скорости реакции не согласуются с предположением о бимолекулярном механизме реакции



Скорость этой реакции

$$\frac{d[\text{N}_2]}{d\tau} = \frac{d[\text{O}_2]}{d\tau} = -K(T)[\text{N}_2][\text{O}_2]^*, \quad (2)$$

где τ – время; $K(T)$ – константа скорости реакции согласно закону Аррениуса.

$$K(T) = K_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

где K_0 – предэкспоненциальный коэффициент Аррениуса; E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная.

С другой стороны, число соударений молекул, приводящих к химической реакции (фактор Больцмана), равно

$$z = z_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (4)$$

где $z_0 = \bar{u}\sigma n_1 n_2$ – полное число соударения молекул; \bar{u} – средняя скорость молекул; $\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$ – сечение соударения молекул; n_1 и n_2 – число молекул N₂ и O₂ в единице объема (концентрация молекул).

При этом $n_1 = [\text{N}_2]N_A$ и $n_2 = [\text{O}_2]N_A$, где N_A – число Авогадро; r_1 и r_2 – радиусы молекул, которые рассматриваются как сферы.

Расчеты Я.Б. Зельдовича и др. [2] показали, что константа скорости бимолекулярной реакции (1) соответствует эффективному сечению столкновения молекулы O₂ с молекулой N₂, то есть $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Такое сечение приблизительно в 1000 раз больше допустимого. Очевидно, что расхождение между предэкспоненциальным множителем K_0/K и газокинетическим числом z_0/z столкновений молекул азота и кислорода во много раз превышает все возможные ошибки в определении K_0 из (3).

Таким образом, определение численного значения константы скорости для реакции образования оксида азота показывает, что невозможна ее интерпретация как

* Здесь и далее квадратные скобки обозначают концентрацию данного вещества.

простой бимолекулярной реакции. Несмотря на это, в теории поршневых двигателей в ряде случаев концентрацию NO вычисляют на основе бимолекулярной реакции (см. ниже), что, как видно, не соответствует реальности.

Убедившись в несостоятельности гипотезы о бимолекулярном механизме окисления азота, Я.Б. Зельдовичем и др. был изучен цепной механизм окисления азота, предложенный Н.Н. Семеновым и состоящий из двух обратимых реакций



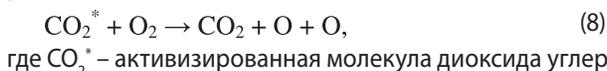
Экспериментальные исследования скорости окисления азота [2] позволили определить скорость реакции атомарного кислорода O с молекулярным азотом N_2 и энергию активации реакции $E \approx 284\,240$ Дж, которая превышает тепловой эффект эндотермической реакции (5), а предэкспоненциальный множитель, найденный Я.Б. Зельдовичем и др., соответствует сечению столкновения, которое меньше, чем указанное выше $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$.

Образование оксида азота с достаточной для практики точностью описывается термической теорией Я.Б. Зельдовича, если с этой теорией объединить механизм цепной реакции, предложенный Н.Н. Семеновым. В настоящее время механизм образования оксида азота, выраженный двумя реакциями (5) и (6), в научно-технической литературе, в том числе и зарубежной [4-6], известен как классический механизм Зельдовича. Как видно из проведенного выше анализа, сам механизм окисления азота предложен Н.Н. Семеновым, а Я.Б. Зельдовичем обоснован термический характер этого механизма. Далее будем придерживаться терминологии, принятой в научно-технической литературе.

Впоследствии классический механизм Зельдовича был расширен D.L. Vaulch и др. [7, 8], а также G.A. Lavo и др. [9] путем включения еще одной реакции



Механизм образования оксидов азота на основе трех реакций (5)-(7) известен, как расширенный механизм Зельдовича, определяющей в котором является первая реакция (5). Скорость в ней зависит от концентрации атомарного кислорода, который в зоне реакции при высоких температурах T образуется в количестве, в несколько раз превышающем количество атомарного кислорода O, образованного в результате термической диссоциации атмосферного кислорода O_2 . При этом атомарный кислород в значительном количестве образуется на промежуточных стадиях горения углеводорода CH и диоксида углерода. В частности имеет место реакция



Термический механизм Зельдовича в настоящее время является наиболее подробно изученным из всех известных механизмов образования оксидов азота. Тем не менее, при его использовании для расчетов образования оксидов азота в камерах сгорания поршневых двигателей существует опасность получения неточных результатов, связанная с экспериментальным определением или выбором констант скоростей реакций из литературных источников.

«Быстрый» оксид азота NO (Prompt-NO). Механизм образования «быстрого» NO во фронте пламени принципиально отличается от такового для термического NO. Реакция носит более сложный характер, так как тесно связана с образованием радикала CH. Образование так называемого «быстрого» NO впервые описал С.Р. Fenimore [10]. В дальнейшем этот процесс изучался С.К. Westbrook и F.L. Dryer при сжигании метанола [11]. Главное в этом механизме – быстрое образование атомов N. Скорость образования оксида азота определяется скоростью реакции между промежуточным радикалом CH и молекулой азота N_2 . В результате получается цианисто-водородная (синильная) кислота HCN, которая вступает в реакцию с радикалом N и очень быстро образует NO:



Скорость образования атомов N за счет радикала CH более высокая по сравнению со скоростью реакций (5) из классического механизма Зельдовича. Отсюда и название – «быстрый» NO. Возникновению радикала CH предшествует возникновение этина (ацетилен C_2H_2), который образуется во фронте пламени только в условиях богатой смеси. Из-за относительно низкой энергии активации образование «быстрого» оксида начинается уже при температуре $T > 1000$ К. Следует отметить, что в литературе, как это показано в [5], имеются противоречивые данные относительно константы скорости K_v реакции (9). Поэтому расчет «быстрого» NO по сравнению с термическим NO характеризуется меньшей достоверностью.

Кроме наиболее принятого [10], существуют и другие предположения об образовании «быстрого» NO. Например, P.C. Malte и D.T. Pratt [12] рассматривают иной механизм, согласно которому «быстрый» NO образуется из N_2O . При этом утверждается, что при $T < 2000$ К оксида азота из N_2O образуется больше, чем по механизму Зельдовича. Однако это предположение не находит широкого применения.

Сравнительный анализ реакций Fenimore (9) и Зельдовича (5) показывает, что образование «быстрого» NO, в отличие от термического NO, относительно мало зависит от температуры, происходит при более низких температурах и сильно зависит от локальных концентраций топлива,



то есть от локального коэффициента избытка воздуха. От последнего в значительной степени зависит возникновение радикала СН и синильной кислоты HCN. В работе [13] показано, что количество «быстрых» оксидов азота в случае сильно обогащенных смесей может превышать даже количество термических NO. Однако в реальных условиях в бензиновых двигателях, тем более в дизелях, «быстрого» оксида азота образуется не больше 10 % от суммарного NO. В связи с этим при расчетах концентрации NO_x в дизелях, работающих на традиционном или альтернативных топливах, например, на природном газе, образование «быстрого» NO не учитывается [14, 15].

Топливный оксид азота. Топливным называют оксид азота, который образуется из азота, содержащегося в топливе. Скорость его образования определяется скоростью двух реакций (7) и (5), для которых имеются константы скоростей реакций.

Преобразование азота, содержащегося в топливе, в оксид азота при сгорании в поршневых двигателях практически не играет роли, так как топливо для этих двигателей почти не содержит связанного азота. Этот механизм возникновения NO действует при горении так называемого «очищенного» угля, содержащего примерно 1 % азота.

Образование NO из N₂O. Закись азота N₂O (веселящий газ), обладающий наркотическим воздействием, обуславливает образование оксида азота NO в том случае, если обедненное топливо (воздушная смесь) ограничивает образование радикала СН, блокируя возникновение «быстрых» NO, и незначительный дальнейший рост температуры препятствует образованию термических NO. При этом N₂O образуется по схеме, аналогичной реакции (5)



Молекула M какого-либо вещества, не участвующего в реакции, способствует возникновению именно N₂O, а не NO, который образуется уже после оксидации N₂O:



Так как N₂O образуется в результате соударения трех молекул, то осуществление этой реакции наиболее вероятно при высоких давлениях. Низкие температуры не способны затормозить эту реакцию. Следует подчеркнуть, что закись азота является основным источником возникновения NO в газовых турбинах при их работе на обедненных смесях. Этот механизм может играть определенную роль и в бензиновых двигателях, работающих на значительно обедненных смесях [16].

Детальный кинетический механизм образования NO. Рассмотренные механизмы образования оксидов азота основаны, как правило, на нескольких химических реакциях, представляющих собой промежуточные элементарные акты цепного механизма химического превращения. В настоящее время существует также ряд схем образования NO, основанных на детальных кинетических механизмах. В этих схемах число промежуточных реакций достигает десятков и сотен. Рассмотрим некоторые схемы образования NO с большим количеством промежуточных реакций (табл. 1), используемых для расчета концентраций NO в поршневых двигателях.

Как видно, реакции классического или расширенного механизмов Зельдовича присутствуют во всех вариантах (см. табл. 1, жирный шрифт). В работах С.А. Чеснокова и др. [17, 18, 22] решается сопряженная задача тепломассообмена и химической кинетики реакции догорания в зоне продуктов сгорания поршневого двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыском бензина. Такой подход к определению поля температур и диффузии позволяет выявить локальные зоны в камере сгорания,

Таблица 1

Схемы образования NO в поршневых двигателях

Номер	С.А.Чесноков [17, 18, 22]	W.Kleinschmidt [19, 20]	А.И. Лушпа [21]
1	2	3	4
1	OH + H ₂ ↔ H + H ₂ O	N₂ + O ↔ NO + N	O + N₂ ↔ N + NO
2	OH + OH ↔ O + H ₂ O	O₂ + N ↔ NO + O	N ₂ + O ₂ ↔ N + NO ₂
3	OH + H ↔ H ₂ O	OH + N ↔ NO + H	N ₂ + O ₂ ↔ 2NO
4	H + O ₂ ↔ HO ₂	N ₂ + O ₂ ↔ NO + NO	2NO ↔ N ₂ + O ₂
5	OH + OH ↔ H ₂ O ₂	NO + M* ↔ N + O + M	NO + O ↔ N + O₂
6	CO + OH ↔ CO ₂ + H	N ₂ O + M ↔ N ₂ + O + M	O + N + M ↔ NO + M
7	N + NO ↔ N₂ + O	NO + NO ↔ N ₂ O + O	NO ₂ + M ↔ O + NO + M
8	N + O₂ ↔ NO + O	NO + O + M ↔ NO ₂ + M	NO ₂ + M ↔ O ₂ + N + M
9	N + OH ↔ NO + H	NO ₂ + O ↔ NO + O ₂	NO + O ₂ ↔ NO ₂ + O
10	N ₂ + O ₂ ↔ 2NO		
11	H + CO ↔ HCO		
12	OH + HCO ↔ CO + H ₂ O		
13	H + HCO ↔ H ₂ + CO		

* Буква M обозначает любую нейтральную молекулу, не участвующую в данной реакции и воспринимающую энергию возбудителя активных частиц.

где смесь интенсивно и слабо реагирует. Используется так называемая струйно-кинетическая модель (СКИН-модель) горения, в основу которой вначале была положена схема С.М. Фролова и В.Я. Басевича [23] с большим числом промежуточных реакций. На основе анализа данных СКИН-модели из схемы Фролова–Басевича определены 13 главных реакций. Эта схема дает удовлетворительные результаты для процесса горения (догорание) за фронтом пламени, где скорость химической реакции на несколько порядков ниже и содержание радикалов более стабильное, чем во фронте пламени, где горение характеризуется исключительно сильной динамикой. Поэтому схема из 13 реакций (см. табл. 1, ст. 2) не рекомендуется для моделирования горения во фронте пламени [22]. Оценка влияния отдельных реакций из 13 рассмотренных показала, что реакции 3, 4, 5, 11, 12 и 13 играют второстепенную роль для преобладающей части зон камеры сгорания (см. табл. 1, ст. 2, курсив). Очевидно, что в данной схеме определяющую роль играет расширенный механизм Зельдовича. Включение модели процессов переноса в общую модель требует определения турбулентных коэффициентов теплопроводности и диффузии, что вызывает некоторые трудности.

Две другие схемы образования NO содержат одинаковое число реакций, однако значительно отличаются друг от друга. Первая из них (см. табл. 1, ст. 3) содержит реакции расширенного, а вторая (см. табл. 1, ст. 4) – классического механизма Зельдовича (жирный шрифт). При этом в [21] подчеркивается, что наряду с двумя реакциями классического механизма Зельдовича основной является реакция № 6 (ст. 4). Константы скоростей реакции определяются по закону Аррениуса (3), и для основных реакций приведены соответствующие значения предэкспоненциального множителя K_0 и энергий активации E . Остальные реакции (курсив) согласно [21] играют второстепенную роль.

W. Kleinschmidt [19, 20] применяет схему для одновременного расчета концентраций оксида углерода CO (10 реакций) и оксида азота NO (9 реакций). К ним он добавляет еще одну $N_2 + M \leftrightarrow N + N + M$ – реакцию распада молекулярного азота. В табл. 1 приведены только реакции образования оксида азота (система реакций N–O).

Для расчета концентраций CO используются система реакций O–H–C, которая содержит реакцию разложения (диссоциация) молекулярного кислорода в атомарный, на основе которой определяется концентрация атомарного кислорода. Химическая символика (N–O и H–C–O) указывает на то, что в реакциях данной системы участвуют молекулы и радикалы, состоящие только из атомов N и O (или H, C и O), а также сами эти атомы. Присутствие в этих системах других элементарных частиц (кроме нейтральных молекул M) исключено. Заметим, что существуют разные варианты систем как N–O, так и O–H–C [16, 19].

В [24] используется система O–H–C, состоящая из трех химических реакций окисления и из двух реакций диссоциации водорода и кислорода [1]. Подчеркнем, что включение системы O–H–C в общую схему образования NO обусловлено необходимостью определения концентрации атомарного кислорода, появление которого означает зарождение цепной реакции образования NO. Действительно, последовательность реакций (5) и (6) классического механизма Зельдовича – это типичный неразветвленный путь: атом кислорода O, израсходованный в первой реакции (5), восстанавливается во второй реакции (6). Такой механизм, конечно, не может привести к образованию атома кислорода O, поэтому предполагают, что он появляется за счет диссоциации молекулярного кислорода O_2 или в результате развития процесса горения по системе O–H–C, которая, как правило, содержит реакцию диссоциации кислорода $O_2 \leftrightarrow O + O$ [16, 19, 20].

Все рассмотренные схемы образования оксидов азота являются модельными, приблизительно отражающими реальный кинетический процесс. Эти модельные схемы обычно используются для расчета образования NO в поршневых двигателях, работающих на бензине или дизельном топливе. Более подробное описание химической кинетики образования NO при горении смеси этих традиционных топлив с воздухом на современном уровне знаний невозможно. Трудность заключается в том, что дизельное топливо и бензин являются в основном соединениями углеродов и водородов $C_m H_n$, в молекулах которых содержится несколько атомов углерода. А для углеводородов с несколькими атомами углерода в молекуле, как указывает Д.А. Франк-Каменецкий [25], число возможных промежуточных реакций и продуктов сгорания столь велико, что полное кинетическое описание процесса становится невозможным, и, как уже отмечалось, остается только использовать различные модельные схемы.

Для ряда других альтернативных топлив с меньшим числом атомов C в молекуле топлива известны схемы, содержащие больше промежуточных реакций. Например, в некоторых работах, посвященных численному моделированию горения метана, используются схемы из 56 [26] и 58 [27] химических реакций. Однако и их нельзя считать полноценными, так как они не включают элементарные реакции с участием радикала CH, который играет определяющую роль в образовании «быстрых» NO. По этой причине использование этих схем для изучения образования оксидов азота становится проблематичным.

Значительно более подробный механизм был рассмотрен в работе [28], но и он не предусматривает многих реакций с участием радикалов CH и CH_2 . В работе Л.А. Ловачева и его сотрудников [29, 30] применяется схема химических реакций, разработанная специально для анализа процессов образования оксидов азота NO_x при горении метана в

воздухе и содержащая 196 реакций для 32 компонентов. В частности, было установлено, что наиболее важным для определения концентрации СН является точное моделирование реакции $\text{CH} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN} + \text{N}$, поскольку существует сильная зависимость концентрации NO от скорости реакции.

Таким образом, сложные детальные схемы, где число химических реакций достигает сотен, а число компонентов десятков, используемые для исследования образования NO_x при горении метана в воздухе, неприменимы для традиционных топлив (бензин или дизельное топливо), в молекулах которых число атомов углерода больше единицы. Наличие нескольких атомов углерода в молекуле традиционного топлива настолько увеличивает число возможных промежуточных реакций, что полного описания кинетического процесса в настоящее время не существует, и поэтому пользуются более простыми модельными схемами, рассмотренными выше.

Проведенный анализ существующих схем образования NO при сгорании топливовоздушной смеси в поршневых двигателях позволяет сделать несколько заключительных замечаний. Появление сложных схем с большим числом промежуточных реакций объясняется зависимостью образования оксидов азота от многих параметров. Для исследования этого процесса и, что особенно важно, для эффективного управления выходом NO необходимо применять более сложные схемы химических преобразований. Увеличение числа промежуточных реакций с точки зрения математического моделирования формально не создает особых затруднений, так как расчет скоростей любой реакции связан с решением обыкновенных дифференциальных уравнений типа (2). Очевидно, что в уравнениях такого типа число промежуточных реакций определяет вид правой части уравнения. Например, для расширенного механизма Зельдовича из трех реакций (5)-(7) на основе закона действующих масс следует, что скорость образования оксида азота

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = K_{1V} [\text{N}_2] [\text{O}] - K_{1R} [\text{NO}] [\text{N}] + K_{2V} [\text{O}_2] [\text{N}] - K_{2R} [\text{NO}] [\text{O}] + K_{3V} [\text{N}] [\text{OH}] - K_{3R} [\text{NO}] [\text{H}], \quad (14)$$

где индексы при константах K скоростей реакции указывают на номер и направление химической реакции, при этом V – прямая реакция, R – обратная.

Изменение правой части уравнения может влиять только на продолжительность расчета, а при современных компьютерах это не принципиально. Здесь возникает другая проблема: с увеличением числа промежуточных реакций растет число констант скоростей прямых и обратных реакций, значения которых неоднозначны, так как они зависят от условий их определения.

В настоящее время число работ, связанных с определением констант скоростей реакций, насчитывает не одну

тысячу, и этот поток литературы все увеличивается [31]. За последние годы под эгидой Международного комитета по сбору и оценке численных данных для науки и техники и соответствующих национальных комитетов ведется большая работа по сбору и, что особенно важно, оценке достоверности численных данных. Авторитетными изданиями, в которых содержатся оценочные данные, являются справочник по константам скоростей реакций академика В.Н. Кондратьева [32] и периодическое издание «High Temperature Reaction Rate Data», выходящее в Великобритании. Однако даже в таких изданиях для многих реакций приводится целый набор существенно отличающихся констант скоростей, что объясняется недостаточностью сведений о соответствующей кинетике и вытекающим отсюда отсутствием определенности в значениях констант, которые можно было бы рекомендовать для использования.

В связи с этим в теории горения в поршневых двигателях, где для расчета концентрации NO используется макрокинетический подход с применением констант скоростей реакций, необходимо следующее:

- выбирать значения констант скоростей реакций с учетом условий их получения, которые должны быть максимально приближены к условиям камеры сгорания исследуемого двигателя;
- выбранные значения констант скоростей реакций по возможности должны соответствовать механизму образования NO, принятому для поршневого двигателя;
- проводить экспериментальную проверку достоверности выбранных макрокинетических констант путем непосредственного измерения концентрации NO в продуктах сгорания поршневого двигателя.

Детальные кинематические механизмы, включающие сотни реакций и реагентов и описывающие процесс образования NO в реагирующих потоках, должны быть связаны с процессами нестационарного переноса массы, энергии и количества движения в камере сгорания. Примером такой связи является программа CHEMKIN-CFD, позволяющая моделировать образование и эмиссию оксидов азота в поршневых двигателях. Однако использование детального кинетического механизма горения, например, водорода или метана в сочетании с CFD-кодами, ограничено ресурсами вычислительной техники, поэтому решающее значение имеет определение так называемых глобальных механизмов, содержащих в основном реакции, доминирующие при образовании NO. Следует также отметить, что современные CFD-коды, предназначенные для исследования рабочего процесса поршневого двигателя, например, FIRE, успешно могут быть использованы в сочетании как детальных, так и глобальных кинетических механизмов горения и образования оксидов азота [14, 15].

Окончание в следующем номере.

The last part of the article to be published in the next issue.

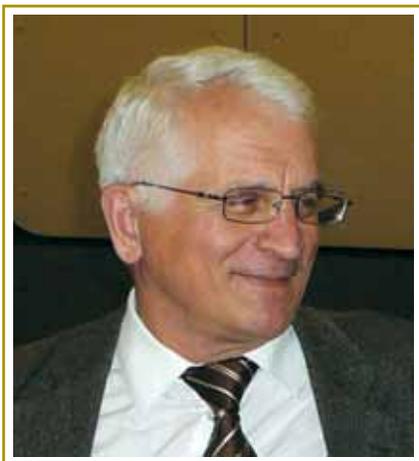
Литература

1. **Кавтарадзе Р.З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Москва, изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
2. **Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.** Окисление азота при горении. – М., Л: Изд-во АН СССР, 1947. – 148 с.
3. **Зельдович Я.Б., Воеводский В.В.** Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. – М.: Изд-во ММИ, 1947. – 294 с.
4. **Fenimore C.P.** Studies of Fuel-Nitrogen in Rich Flame Gases // 17Th Symposium Int. Combustion. – Pittsburgh, 1979. – P. 661.
5. **Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.** Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente Schadstoffentstehung. 3.Auflage. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. – S. 350.
6. **Heider G., Woshni G., Zeilinger K.** 2-Zonen Rechenmodell zur Vorausberechnung der NO-Emission von Dieselmotoren // MTZ. – 1998. – № 11. – S. 770-775.
7. **Baulch D.L., Drysdale D.D., Horne D.D., Lloyd A.C.** High Temperature Reaction Rate Data // Rep. University of Leeds Report. – 1969. – № 4. – P. 156.
8. **Baulch D.L., Cobos C.I., Cox A.M. et al.** Compilation of rate data for combustion modeling // Supplement I.J. Phys. Chem. – 1991. – Ref. Data 22, № 847. – P. 226.
9. **Lavoi G.A., Heywood J.B., Keck J.C.** Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines // Combustion Science and Technology. – 1970. – Vol. 1. – P. 313-326.
10. **Fenimore C.P.** Studies of Fuel-Nitrogen in Rich Flame Gases // 17Th Symposium Int. Combustion. – Pittsburgh, 1979. – P. 661.
11. **Westbrook C.K., Dryer F.L.** Prediction of Laminar Flame Properties of Methanol – Air Mixtures // Combust. and Flame. – 1980. – V. 37, № 2. – P. 171-192.
12. **Malte P.C., Pratt D.T.** Chemical Kinetics in Flames // Review. Combustion Science and Technology. – 1981. – V. 25, № 1-2. – P. 49-69.
13. **Dodge L.G., Kubesh J.T., Naegel D.W., Campbell R.F.** Modeling NO_x Emissions From Lean-Burn Natural Gas Engines // SAE Paper. – 1998. – № 981389. – 9 p.
14. **Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Sergeev S.S.** The influence of rotational charge motion intensity on nitric oxide formation in gas-engine cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 4308–4316.
15. **Natriashvili T., Glonti M., Kavtaradze R., Kavtaradze Z., Zelentsov A.** Solutions of Some Problems of Improvement of Ecological Characteristics of the Diesel Engine Converted in the Gas Engine // Problems of Mechanics. – 2010. – № 1 (38). – P. 13-28.
16. **Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.** Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. 2. Auflage. – Stuttgart–Leipzig–Wiesbaden: Teubner – Verlag, 2006. – 412 s.
17. **Чесноков С.А., Демидов М.И.** Моделирование тепломассообмена и химической кинетики образования окиси азота в ДВС с искровым зажиганием // Известия Тульского Госуниверситета. Автомобильный транспорт. – 2003. – Выпуск 7. – С. 255-264.
18. **Чесноков С.А.** Моделирование высокотемпературных реакций горения. – Тула: изд-во Тульского Госуниверситета, 2002. – 163 с.
19. **Kleinschmidt W.** Einflussparameter auf den Wirkungsgrad und auf die NO-Emission von Aufgeladenen Dieselmotoren // 4.Aufladetechnische Konferenz.: VDI Bericht. – Düsseldorf, 1991. – № 910. – 28 s.
20. **Pischinger R., Klell M., Sams Th.** Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. – Wien–New-York: Springer-Verlag, 1989. – 524 s.
21. **Лушпа А.И.** Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. – Москва: Машиностроение, 1981. – 240 с.
22. **Чесноков С.А. Потапов С.А.** Химический турбулентный тепломассообмен в двигателях внутреннего сгорания. – Тула: Изд-во Тульского государственного университета, 2009. – 500 с.
23. **Фролов С.М., Басевич В.Я., Беляев А.А., Гоц А.Н.** Моделирование горения и образования токсичных веществ в двигателе внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия // Химическая физика. – 2004. – № 8. – С. 50-57.
24. **Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Голосов А.С., Кавтарадзе З.Р., Скрипник А.А.** Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в поршневых двигателях с внутренним смесеобразованием на основе многозонной модели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2004. – № 1. – С. 43-59.
25. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 3-е изд. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
26. **Smoot L.D., Hecker W.C., Williams G.A.** Prediction of Propagation Methane – Air Flames // Combustion and Flame. – 1976. – V.2 6, № 3. – P. 323-342.
27. **Tsatsaronis G.** Prediction of Propagation Laminar Flames in Methane, Oxygen, Nitrogen Mixtures // Combustion and Flame. – 1978. – V. 33, № 3. – P. 217-239.
28. **Westbrook C.K., Dryer F.L.** Prediction of Laminar Flame Properties of Methanol – Air Mixtures // Combust. and Flame. – 1980. – V. 37, № 2. – P. 171-192.
29. **Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четверушкин Б.А.** Химическая кинетика образования NO_x при горении метана в воздухе // Труды Всесоюзного центра математического моделирования АН СССР. – 1992. – № 25. – С. 24.
30. **Ловачев Л.А.** Кинетика образования NO_x в метановоздушных пламенах // Химическая физика. – 1983. – № 8. – С. 1085-1091.
31. **Алексеев Б.В., Гришин А.М.** физическая газодинамика реагирующих сред. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.
32. **Кондратьев В.Н.** Константы скорости газофазных реакций. Справочник. – М.: Наука, 1971. – 351 с.

Поздравляем с юбилеем!

30 октября исполняется 60 лет члену редколлегии журнала «Транспорт на альтернативном топливе», известному ученому Ревазу Зурабовичу Кавтарадзе.

С выбором профессии Реваз Кавтарадзе определился сразу после школы, с первой попытки поступив в Грузинский политехнический институт в г. Тбилиси, который с отличием окончил в 1973 г. Способного молодого специалиста через два года



приняли в аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана (руководитель – профессор М.Г. Круглов), где он проучился в 1975-1978 гг. С 1982 г. его принимают на работу в МГТУ им. Н.Э. Баумана младшим научным сотрудником. Впоследствии он становится заведующим лабораторией, доцентом. В 1978 г. Реваз Зурабович защитил кандидатскую, а в 1991 г. – докторскую диссертации. С 1993 г. и по настоящее время он работает профессором кафедры

«Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Р.З. Кавтарадзе является выдающимся ученым в области теории поршневых двигателей и теории теплообмена, создателем научной школы локального теплообмена в поршневых двигателях. В рамках этой школы им развиты научные направления: нестационарный радиационно-конвективный теплообмен в камерах сгорания и теплофизические процессы в двигателях, конвертированных на различные газообразные топлива. В отечественной и зарубежной научно-технической литературе широко используются формулы Р.З. Кавтарадзе для расчета задержки воспламенения в двухтопливных двигателях (газодизелях).

Р.З. Кавтарадзе ведет активное сотрудничество с крупными российскими и зарубежными производителями поршневых двигателей. Его разработки нашли практическое применение на заводах КАМАЗ, ВТЗ, ЗМЗ, Daimler-Benz, MAN и др. В последние годы им выполнены исследовательские работы по конвертированию дизелей на природный газ и водород. По этой тематике им подготовлена и сдана в издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана монография, выход которой планируется в 2011 г.

Р.З. Кавтарадзе опубликовано более 150 научных работ, в том числе 9 книг: монографии, учебники и учебные пособия, получены два авторских свидетельства. Его известные учебники «Теория поршневых двигателей. Специальные главы» и «Локальный теплообмен в поршневых двигателях» (первое

издание этой монографии удостоено премии МГТУ им. Н.Э. Баумана за 2002 г.) широко используются в российских и зарубежных технических университетах. Они находят широкое применение на заводах и в КБ при проектировании новых перспективных поршневых двигателей, а также при исследовании и доводке существующих.

Реваз Зурабович ведет активную научно-исследовательскую и научно-организационную работу. Ему принадлежит большая заслуга в подготовке научных кадров. Благодаря ему защищены 12 кандидатских и три докторских диссертаций, в настоящее время является научным консультантом в подготовке двух докторских диссертаций, руководителем четырех аспирантов. Многие ученики Р.З. Кавтарадзе стали руководителями различных научных, технических и учебных подразделений российских и зарубежных университетов, исследовательских и промышленных учреждений.

Научные достижения Р.З. Кавтарадзе получили международное признание. Он неоднократно приглашался для ведения научных работ, чтения лекций и докладов в крупнейшие зарубежные университеты: Мюнхенский технический университет, Ростокский университет, Пекинский технологический институт, Брайтонский технический университет. В настоящее время проводит совместные работы с фирмой AVL (Австрия). Его научные работы опубликованы в Германии, США, КНР, Чехии и других странах мира.

Р.З. Кавтарадзе является членом Национального комитета по теплообмену РАН, членом диссертационных советов МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российского университета дружбы народов и Тульского государственного университета, членом редколлегии журнала «Транспорт на альтернативном топливе». Трижды ему была присвоена научная стипендия Немецкой службы академического обмена (DAAD), дважды – государственная стипендия в области энергетики и информатики. В 2002 г. он награжден премией МГТУ им. Н.Э. Баумана, а в 2009 г. удостоен звания «Лучший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана».

Реваз Зурабович пользуется большим авторитетом среды сотрудников и студентов университета. Его уважают как принципиального и требовательно преподавателя, прекрасного лектора, умеющего привлекать молодежь к научно-исследовательской работе.

Мы поздравляем Реваса Зурабовича с грядущим юбилеем. Здоровья вам, счастья, новых свершений на ниве научно-технического прогресса!

**Национальная газомоторная ассоциация
Редакция журнала
«Транспорт на альтернативном топливе»**



**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**

История применения газового топлива в транспортных машинах

А.С. Клементьев,

магистр техники и технологии, аспирант ИжГТУ

В статье рассматриваются проблемы использования газового топлива в транспортных машинах, начиная со светильного газа и до перехода на природный газ.

Ключевые слова: светильный газ, природный газ, газовый двигатель, машины.

History of the using gas fuel in transport machine

A.S. Klementyev

This article discusses the use of gaseous fuels in transport vehicles. Beginning with the use of gas to go to natural gas.

Keywords: coal gas, natural gas, the gas engine cars.

Процесс сухой перегонки древесины для получения углеродного газа, основу которого составлял метан, был разработан в 1799 г. французским инженером Филиппом Лебомом, и уже в начале XIX в. во Франции и Англии было начато его промышленное производство.

Газ получил название «светильный», так как использовался в то время преимущественно для освещения улиц больших городов и фабрично-заводских зданий. Основные компоненты – все тот же метан CH_4 (около 30 %), водород H_2 (50 %), угарный газ CO (9 %) [1].

В 1801 г. Ф.Лебон предложил использовать светильный газ в качестве топлива для только что изобретенного двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Однако в связи со смертью в 1804 г. он не смог реализовать свое предложение.

И только в 1858 г. бельгиец Жан-Жозеф Этьен Лемуар предложил конструкцию ДВС с искровым зажиганием, работавшего на светильном

газе, который подавался по обе стороны поршня, двигавшегося в цилиндре, и поджигался от свечи зажигания. Двигатель работал на газе и был трехтактным: в нем отсутствовал такт сжатия, поскольку газовая смесь воспламенялась сразу после наполнения ею цилиндра. По конструкции он был двустороннего действия, с золотниковыми распределителями, один из которых поочередно заряжал газоздушную смесь разделенные поршнем полости большого цилиндра, другой в это время отводил отработавшие продукты сгорания из противоположной полости. Мощность первого ДВС Лемуара составила примерно 1 л.с., а КПД был ниже, чем у паровых машин. Тем не менее, именно мотор Лемуара (а не более ранние конструкции братьев Нэпсов, Лебона, Стрита де Риваца, Дрейка) получил признание и поступил в промышленное производство [2].

В 1861 г. на светильном газе уже работали две стационарные установки с ДВС. А в 1862 г. машина



Рис. 1. Газовая повозка Лемуара

Э.Лемуара – трехколесный восьмиместный экипаж – с успехом демонстрировалась на Всемирной парижской выставке.

Самобеглая повозка (Гиппомобиль), созданная Э.Лемуаром, в 1862 г. проехала 18 км от Парижа до Жанвилля за каких-то три часа [1]. Ее двигатель на газе был рассчитан на мощность 1,5 л.с. при 100 мин^{-1} . Газовая повозка Лемуара – это прообраз не только современных газовых, но и водородомобилей [1].



Рис. 2. Дирижабль

Моторы Лемуара мощностью 4 л.с. начали производить французские и немецкие фирмы.

Техническая мысль не стояла на месте, и в 1872 г. австриец Пауль Хенлейн установил четырехцилиндровый двигатель Лемуара мощностью 5 л.с. на дирижабль, оболочка которого объемом 2400 м^3 была заполнена светильным газом. Двигатель работал на газе, забираемом из оболочки, расход топлива составлял $7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Дирижабль развил скорость 19 км/ч .

В 1864 г. немецкие инженеры Николаус Отто и Эйген Ланген усовершенствовали конструкцию двухтактного ДВС, работавшего на газе, а в 1876 г. Н.Отто создал четырехтактный газовый двигатель, получивший впоследствии широкое

распространение. Двигатель Отто с КПД 16 % быстро вытеснил двигатель Ленуара с 5%-ным КПД, который остался в истории как первый двигатель, использовавший газ в качестве моторного топлива.

Всего было построено порядка 500 двигателей Ленуара, нашедших свое применение в различных отраслях.

Не отставали от авиаторов в применении светильного газа в ДВС и железнодорожники. В 1894 г. в немецком городе Дасау, а через год во французском Сен-Дени под Парижем были проведены испытания газомоторных трамваев. Во французском эксперименте светильный газ, производимый фирмой «Ланди», закачивался под давлением 10 атм в стальной баллон, находящийся на трамвае. Баллоны заправлялись на конечной станции у завода «Ланди».

И все же вся эта техника не могла получить широкого применения, так как из-за ограниченности объема перевозимого газа она территориально была привязана к производителю газового топлива. И только с разработкой в конце 80-х гг. XIX в. малогабаритных газогенераторов это препятствие было устранено. Установка этих агрегатов на транспортное средство придала им автономность и расширила расстояния их использования.

Однако создание в 1885 г. молодым американским механиком Генри Фордом бензинового двигателя внутреннего сгорания и организация массового производства бензина отодвинули на многие годы работы по использованию газа в качестве моторного топлива.

Прошли годы, и только во время Первой мировой войны воюющие страны были вынуждены вернуться к газу, что было обусловлено нехваткой нефтяных топлив.

Положительный опыт использования газомоторных автомобилей в военные годы дал толчок к переводу

автотранспорта на газовое топливо в послевоенный период. Массовые работы по переводу автомобилей на газ развернулись во многих странах мира, а также и в России уже в 20-е гг. прошлого столетия. Началось серийное производство газомоторных автомобилей, стальных баллонов, строительство газонаполнительных станций.

К промышленно производимому светильному газу добавились колошниковый (доменный) газ металлургических заводов, коксовый газ, выделяющийся в процессе коксования угля, и биогаз городских стоков. Как правило, газ на станциях сжимался до 200 атм. Для хранения газа на автомобиле устанавливались специальные баллоны.

Пионером в те годы выступала Франция. После 1926 г. были построены газонаполнительные станции в Париже, Лионе, Камбре и ряде других городов (15 станций). Парижская станция мощностью 300 м³/ч с пятью заправочными колонками была самой крупной в Европе. Для удаленной заправки начали использоваться газовозы. На грузовике размещалось пять баллонов по 0,7 м³, в которые закачивалось 850 м³ газа под давлением 250 атм. В 1936 г. газовозами было перевезено

700 тыс. м³ сжатого светильного газа [3].

В Германии производство сжатого газа в качестве топлива для автомобилей получило развитие после организации производства синтетического аммиака, которому нужен был водород. Этот химический элемент выделялся из коксового газа, в котором оставалось до 40 % метана. Первая установка на этом газе была построена в 1934 г. в Оберхаузене, в 1935 г. установка для сжатия светильного газа была введена в эксплуатацию в Ганновере. Она обслуживала 67 автомобилей. Затем такие станции появились в Берлине и других городах. В 1940 г. в Германии на газе работало уже более 40 тыс. грузовиков и автобусов. Газовозы для заправки автомобилей перевозили газ под давлением 350 атм.

Некоторые заправочные станции (Штутгарт и др.) работали на биогазе, выделяемом из городских стоков. Этот газ дополнительно очищался от нежелательных примесей, компримировался и был готов для заполнения баллонов автомобилей.

Газовые автомобили тогда появились также в Дании, Румынии, Югославии, Норвегии, Швеции, Финляндии, Италии.



Рис. 3. Газогенераторный легковой автомобиль

Не отставала от европейских стран и Россия. Удачная конструкция газогенератора для автомобилей была разработана в 1923 г. инженером Наумовым в Ленинградской лаборатории тепловых двигателей. Этот газогенератор послужил основой для разработки автомобилей и речных судов, работавших на вырабатываемом генератором светильном газе.

В 30-е, 40-е и даже 50-е гг. у нас и за рубежом действительно выпускались автомобили, работавшие на древесных чурках. В специальной установке – газогенераторе – твердое топливо (дерево) преобразовывалось в горючий газ (газифицировалось). Такие установки были весьма громоздки, тяжелы, трудоемки в обслуживании. Поэтому применяли их только на грузовых автомобилях в районах с большими естественными запасами топлива – попросту говоря, в лесных и таежных. Генераторный газ обладает крайне малой теплотворной способностью, поэтому и мощность, развиваемая двигателем, значительно ниже, чем у бензинового. Так, газогенераторный «Урал-352» имел грузоподъемность 2,5 т и мощность 45 л.с., тогда как аналогичный бензиновый грузовик «УралЗИС-5» мог перевозить на 500 кг больше, а мотор такого же объема развивал 76 л.с. Во время войны трудности со

снабжением нефтепродуктами заставили немецкие фирмы пойти на оснащение газогенераторами некоторых легковых автомобилей. Однако ввиду низких эксплуатационных качеств заметного распространения они не получили [4].

В 1938 г. институтом НАТИ были созданы автомобили «ЗИС-5» и «ГАЗ-АА» работавшие на сжатом светильном газе, а в 1939 г. институтом НАМИ – газогенераторные автомобили «ЗИС-21» и «ГАЗ-42».

Инженеры Московской судостроительной верфи в Лужниках совместно с учеными Центрального научно-исследовательского института водного транспорта в 1934 г. перевели на газ тракторный двигатель ЧТЗ-С-60 для речных катеров. Серийные образцы деревянных катеров с гребными колесами выпускались с одним или двумя двигателями. Примечательно, что катер МСВ-33 по мощности газовой силовой установки (88 кВт) не уступал аналогичным речным буксирам, работавшим на угле или жидких нефтяных топливах.

В 1936 г. буксиры-газоходы с металлическим корпусом начали выпускать в Новосибирске. В качестве двигателя использовался стандартный мотор для трактора «Сталинец-60». Топливным баком на этом буксире служил бункер для хранения

сосновых чурок, объемом 27 м³, что обеспечивало трехсуточный запас хода. В сравнении с другими аналогичными судами силовая установка этих газоходов оказалась значительно легче и в два раза экономичней.

В 1938 г. горьковские инженеры разработали конструкцию более крупного буксира с силовой установкой 176 кВт, широко применявшегося в последующие годы на реках страны. На начало 1941 г. в речном флоте находилось 469 газоходов различной мощности, которые во время войны спасли для фронта десятки тысяч тонн нефтяных моторных топлив и обеспечили на «дровах» перевозку различных грузов.

В послевоенный период в стране к газовому топливу сохранялось повышенное внимание. В 1946 г. по предложению руководителя автомобильной лаборатории АН СССР академика Е.А. Чудакова был проведен автопробег 18 газомоторных автомобилей по маршруту Берлин – Киев – Москва. В пробеге приняли участие автомобили различных типов и марок, начиная от малолитражки с двигателем объемом 0,5 л и кончая большим автобусом с двигателем более 7 л, а также пять автомобилей ЗИС и ГАЗ-АА. На автомобилях были установлены дополнительные баллоны для хранения газа. Маршрут протяженностью 2603 км был пройден за 11 ходовых дней.

Техника на светильном газе в нашей стране использовалась практически до начала 50-х гг. прошлого столетия в различных отраслях народного хозяйства. К сожалению, открытие крупных нефтяных месторождений, массовое производство бензина и дизельного топлива, которые более удобны как моторное топливо ДВС, привели к прекращению использования газовых автомобилей и речных судов, работавших на светильном газе.



Рис. 4. «УралЗИС-5» с газогенераторной установкой



Рис. 5. Газогенераторный «ЗиС-21»

Так закончилась эпоха светильного газа на транспорте, продолжавшаяся почти 100 лет. Ему на смену пришел природный газ.

...Шел 1942 год. В разгаре – война. Враг подступал к берегам Волги. В Саратове все острее ощущался дефицит электроэнергии и топлива, которые необходимы промышленным предприятиям, работающим на оборону. Шли напряженные поиски выхода из создавшейся ситуации. И вот произошло событие, которое не только сыграло определяющую роль в решении важнейшей на тот момент задачи, но и во многом предопределило развитие Саратовской области и ряда других регионов страны в последующие годы, – в поселке Елшанка недалеко от Саратова было открыто крупное месторождение природного газа. В срочном порядке началось строительство газовой ветки к Саратовской ГРЭС, которое было завершено за несколько месяцев.

Одновременно велись разработки по использованию газа в качестве топлива на автотранспорте. Центром этой деятельности стал Саратовский автодорожный институт (ныне технический университет). Возглавил ее доцент, кандидат технических наук Георгий Бутовский.

19 сентября 1942 г. произошло знаменательное событие – в этот

день на Елшанском газопромысле от скважины № 4 был заправлен газом под давлением 36 атм первый автомобиль ЗиС-5, который совершил рейс из Елшанки в Саратов, преодолев расстояние в 30 км. Этот исторический момент и можно считать началом использования природного газа как топлива для двигателей внутреннего сгорания и для других технических целей. А спустя два месяца в Саратове приняли решение о переводе автомобильного транспорта с бензина на газ. Согласно этому документу 160 машин в течение двух месяцев были переоборудованы для работы на газе [5].

Интерес к использованию природного газа на транспорте резко возрос в 70-80-е гг. Трудно сказать, что явилось первопричиной этого интереса – то ли энергетический кризис 1973 г., то ли понимание на государственном уровне, что нефть когда-нибудь закончится. Поэтому государственные программы замены нефтяного моторного топлива природным газом в то время начали активно реализовываться в Аргентине, Австралии, Бразилии, Италии, Новой Зеландии, СССР, США. В 1980 г. в мире на природном газе работало уже около 400 тыс. автомобилей. А за последующие 20 лет их число перевалило за миллион.

В 1981 г. в СССР была принята государственная программа развития газобаллонного транспорта, а через три года еще одна, предусматривавшая использование природного газа на железнодорожном, водном и воздушном транспорте. В развитие этих программ было начато серийное производство газобаллонных грузовиков ЗИЛ, ГАЗ, а впоследствии и КамАЗ. Для обеспечения грузоперевозок в стране, в основном в крупных городах, было построено несколько сотен автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС). В 1990 г. реализация природного газа через АГНКС достигла максимума и превысила 1 млрд м³.

Современный этап развития автомобильного транспорта характеризуется стремлением к рациональному использованию энергоресурсов при одновременной минимизации вредного воздействия двигателей на окружающую среду. На сегодняшний момент этим условиям полностью удовлетворяет применение природного газа на всех видах транспортных машин.

Многие ученые считают, что история имеет вид спирали – совершив виток, она возвращается как бы на исходную позицию, но на более высоком уровне. Мир автомобилей – не исключение.

Литература

1. **Воробьев-Обухов А., Карпенков А.** На голубом газу // За рулем. – 2005. – № 5. – С. 220-224.
2. **Межибовский И.** Начало начал // АВТОМИР. – 2005. – № 3. – С. 3.
3. **Франтковский З.** Бензин – хорошо, а газ, особенно природный, лучше! // Огни Камы. – 2002. – № 146 (5895).
4. Можно ли переоборудовать легковой автомобиль так, чтобы топливом служил не бензин, а дрова? // За рулем. – 1993. – № 5. – С. 15.
5. **Поспелов В.** Газовая промышленность на метане // Газовая промышленность. – 2003. – № 4. – С. 23.

Авторы статей в журнале № 5 (23) 2011 г.

Айрбабян Сергей Аветикович,

профессор, преподаватель МГТУ МАМИ, к.т.н.,
115551, Москва, Шипиловский проезд, дом 49/1, кв. 38,
тел. (495) 343-36-03

Гнедова Людмила Анатольевна,

старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 355-90-51

Григоревич Дмитрий Николаевич,

ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИЖТ», к.т.н., (495) 602-84-36,
8 926 186-32-18, dgrig@ok.ru

Григорьев Сергей Александрович,

начальник лаборатории Института водородной энергетики и плазменных технологий ФГУ Российский Научный Центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, тел.: 8 499 196 94 44,
8 905 736-56-20, e-mail: grig@hepti.kiae.ru или sergei_grigoriev@yahoo.com

Гриценко Кирилл Александрович,

научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
8 916 681-99-61

Девянин Сергей Николаевич,

доктор технических наук, 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

Демская Ильяна Анатольевна,

инженер, ЦИАМ им. П.И. Баранова, тел. 8 916 465-55-80,
e-mail: Demskaya.Ilyana@mail.ru

Зайцев Вячеслав Петрович,

генеральный директор ОАО «Интеравиагаз», действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского,
тел.: 8 (903) 700-61-21

Заручейский Андрей Викторович,

заведующий отделением ОАО «ВНИИЖТ», к.т.н.,
раб. тел. (499) 260-42-02

Кавтарадзе Зураб Ревазович,

научный сотрудник НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.,
р. т. (499) 265-78-92

Кавтарадзе Ревас Зурабович,

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

Калабухов Глеб Игоревич,

аспирант, ассистент кафедры «Автомобильные и тракторные двигатели» МГТУ «МАМИ», 129075, Москва, Аргуновская ул. дом 10, кор. 1, кв. 5,
тел. 8 (916) 355-68-79, e-mail: flensburge@list.ru

Кириллов Николай Геннадьевич,

старший научный сотрудник Военного инженерно-технического института (ВИТИ), заслуженный изобретатель РФ, д.т.н.,
Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22,
тел. (812) 272-95-15, м. т 8 911-950-83-26, e-mail: kirillov-ng@mail.ru

Клементьев Александр Сергеевич,

магистр техники и технологии, магистрант кафедры «Автомобильный транспорт» Чайковского технологического института, филиала Ижевского государственного технического университета (ЧТИ ИжГТУ),
902 790-64-79, 8 (922) 306-50-56, e-mail: aleksandr_klemen@mail.ru

Коробцев Сергей Владимирович,

директор Института водородной энергетики и плазменных технологий РНЦ «Курчатовский институт», к.ф.м.н., тел. (499) 196-94-39,
e-mail: s.korobtsev@hepti.kiae.ru

Косушкин Константин Геннадьевич,

начальник сектора НИО-10 ФГУП «ЦАГИ», тел. (495) 556-49-86

Лазарев Александр Николаевич,

доцент Военного инженерно-технического института (ВИТИ), к.т.н.,
Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22,
тел. (812) 272-95-15, e-mail: Lazarevalnik@yandex.ru

Лапушкин Николай Александрович,

начальник лаборатории ТО АГНКС ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.,
р.т. (495) 355-90-51, м.т. 8 916 854-40-57

Маврицкий Владимир Иванович,

начальник НИО-10 ФГУП «ЦАГИ», к.т.н.,
тел.: (495) 556-49-49.

Мандрик Сергей Иванович,

генеральный директор ЗАО «Промэнергомаш»,
тел.: (812) 493-25-82, 493-25-70,
e-mail: info@promenmash.ru, mandrik@promenmash.ru

Марков Владимир Анатольевич,

профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), д.т.н.,
моб. тел. 8 917 584-49-54, р.т. (499) 263 69 18

Перетряхина Вера Борисовна,

старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
р.т. (495) 355-90-51, м.т. 8 915 118-57-42

Пронин Евгений Николаевич,

заместитель начальника Управления – начальник отдела использования газа в качестве моторного топлива ОАО «Газпром»; руководитель исследовательской группы 5.3 Международного газового союза, исполнительный директор НГА, ул. Наметкина, д. 16,
Москва, В-420, ГСП-7, р. т. 719-14-81, e-mail: E.Pronin@adm.gazprom.ru

Разносчиков Владимир Валентинович,

старший научный сотрудник, ЦИАМ им. П.И. Баранова, к.т.н., доцент,
e-mail: raznoschikov@mail.ru, тел. 8 915 214-93-36

Рудаков Владимир Юрьевич,

инженер кафедры ДВС Коломенского института (филиал) Московского государственного открытого университета.
Тел. 8 915 013-29-35. E-mail: kimgoukolonna@mail.ru

Сазонов Сергей Леонидович,

старший научный сотрудник Центра экономических и социальных исследований Китая Института Дальнего Востока Российской Академии Наук, к.э.н.,
моб. тел: 8 916 215-51-38, дом. тел: 8 (499) 723-35-08

Федотов Игорь Владимирович,

старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.,
р.т. 355-90-51

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

Шевченко Денис Владимирович,

аспирант Российского университета дружбы народов (РУДН), м.т. 8 926 561-25-40

Шишков Владимир Александрович,

начальник технического отдела ООО «Рекар», к.т.н.,
доцент Самарского Государственного Аэрокосмического Университета им. С.П. Королева,
д.т. +7 (8484) 35-29-07, м.т. + 7 927 784 71 57,
e-mail: Vladimir-Shishkov@yandex.ru

Яковлев Аркадий Васильевич,

соискатель научно-исследовательского отдела, Военный инженерно-технический институт, Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22,
тел. (812) 272-95-15, факс (812) 272-95-15

Contributors to journal issue No. 5 (23) 2011

Airbabayan Sergej A.,

Professor MSTU «MAMI», Ph. D. (Eng.),
115551, Moscow, Shipilovskij dr. 49/1-38, phone: + 7 (495) 343-36-03

Demskaya Ilyana A.,

Engineer, CIAM after P.I. Baranov,
phone: + 7 916 465-55-80, e-mail: Demskaya.Ilyana@mail.ru

Devyanin Sergey N.,

D. Sc. (Eng.), professor, head of «Tractors and Automobiles» department of the Moscow State University for Agriculture and Engineering n.a. V.P. Goryachkin, m.t. + 7 917 519-63-94

Fedotov Igor V.,

Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFS, office phone: + 7 (495) 355-90-51

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

Gnedova Lyudmila A.,

Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFS, (495) 355-90-51

Grigoriev Sergey A.,

PhD, Hydrogen Energy and Plasma Technology Institute, Federal State Institution Russian Research Center «Kurchatov Institute», Associate Professor, phone: 8 499 196 94 44, e-mail: grig@hepti.kiae.ru
sergei_grigoriev@yahoo.com

Grigorovich Dmitry,

leading research associate 'All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport', Doctor of Science, (495) 602-84-36, 8 926 186-32-18

Gritsenko Kirill A.,

Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFS, phone: + 7 916 681-99-61

Kalabukhov Gleb I.,

Graduate student, Assistant Department «Automobile and Tractor Engines» Moscow State Technical University MAMI, 129075, Moscow, Argunovskaja st. 10-1-5, phone: + 7 (916) 355-68-79, flensburge@list.ru

Kavtaradze Revaz,

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

Kavtaradze Zurab,

Research fellow of NIEM of N.E. Bauman's MGTU, Candidate of Science, office phone: (499) 265-78-92

Kirilov Nikolay G.,

PhD, Engng, the Deserved inventor of the Russian Federation, academician of ABN, Military Technical Institute, phone: + 7 (812) 272-95-15, m. phone: 8-911-950-83-26, e-mail: kirilov-ng@mail.ru

Klementyev Alexander S.,

master of the technology and technologies, phone: + 7 902 790-64-79, + 7 (922) 306-50-56, e-mail: aleksandr_klemen@mail.ru

Korobtsev Sergey,

Hydrogen Energy & Plasma Technology Institute of RRC «Kurchatov Institute», Director, tel. 499 196 94 39, e-mail: s.korobtsev@hepti.kiae.ru

Kosushkin Konstantin G.,

Head of Sector Central Aerohydrodynamic Institute (FGUP TsAGI), phone: + 7 (495) 556-49-86

Lapushkin Nikolay A.,

Head of the Laboratory of Process Equipment of AGCFS, 355-90-51, phone: + 7 916 854-40-57

Lazarev Alexander N.,

Ph. D. (Eng.), the senior lecturer, academician of MAI, Military Technical Institute, phone: + 7 (812) 719-87-86, tel./fax: +7 (812) 272-95-15, e-mail: Lazarevalnik@yandex.ru.

Mandrik Sergey Ivanovich,

General Director of «Promenergomash» CJSC, phone: +7 (812) 493-25-82, 493-25-70, e-mail: info@promenmash.ru, mandrik@promenmash.ru

Markov Vladimir A.,

PhD, Engng, professor of «Heat Physics» department of the Bauman Moscow State Technical University, phone: + 7 917 584-49-54

Mavritskiy Vladimir,

Central Aerohydrodynamic Institute (FGUP TsAGI), Ph. D. (Eng.), phone: + 7 (495) 556-49-49

Peretryakhina Vera B.,

Senior Research Associate of the Laboratory of Process Equipment of AGCFS, phone: + 7 (495) 355-90-51, + 7 915 118-57-42

Pronin Evgeny N.,

Deputy Head of Directorate, JSC Gazprom, office phone: + 7 (495) 719-14-81, e-mail: E.Pronin@adm.gazprom.ru

Raznoschikov Vladimir V.,

PhD, Senior Research Scientist, CIAM named after P.I. Baranov E-mail: raznoschikov@mail.ru, phone: + 7 915 214-93-36

Rudakov Vladimir Y.,

engineer Department of Kolomna Institute (branch) of Moscow State Open University, phone: + 7 915 013-29-35. E-mail: kimgoukolomna@mail.ru

Sazonov Sergey Leonidovich,

senior scientific researcher, Institute of Far East Studies of the Russian Federation Academy of Science, candidate of economic science, phone: + 7 916 215-51-38, (499) 723-35-08

Shevchenko Denis V.,

graduate of Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), m.t. + 7 926 561-25-40

Shishkov 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-Shishkov@yandex.ru

Yakovlev Arkadiy V.,

collaborator research section Military Engineering-technical Institute, tel./fax: +7 (812) 272-95-15

Zajtsev Vjacheslav P.,

General Director of «Interaviagaz», phone: + 7 8 (903) 700-61-21

Zarucheyky Andrey V.,

Head of the Department JSC «All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport», Ph. D. (Eng.), office phone: + 7 (499) 260-42-02

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.

