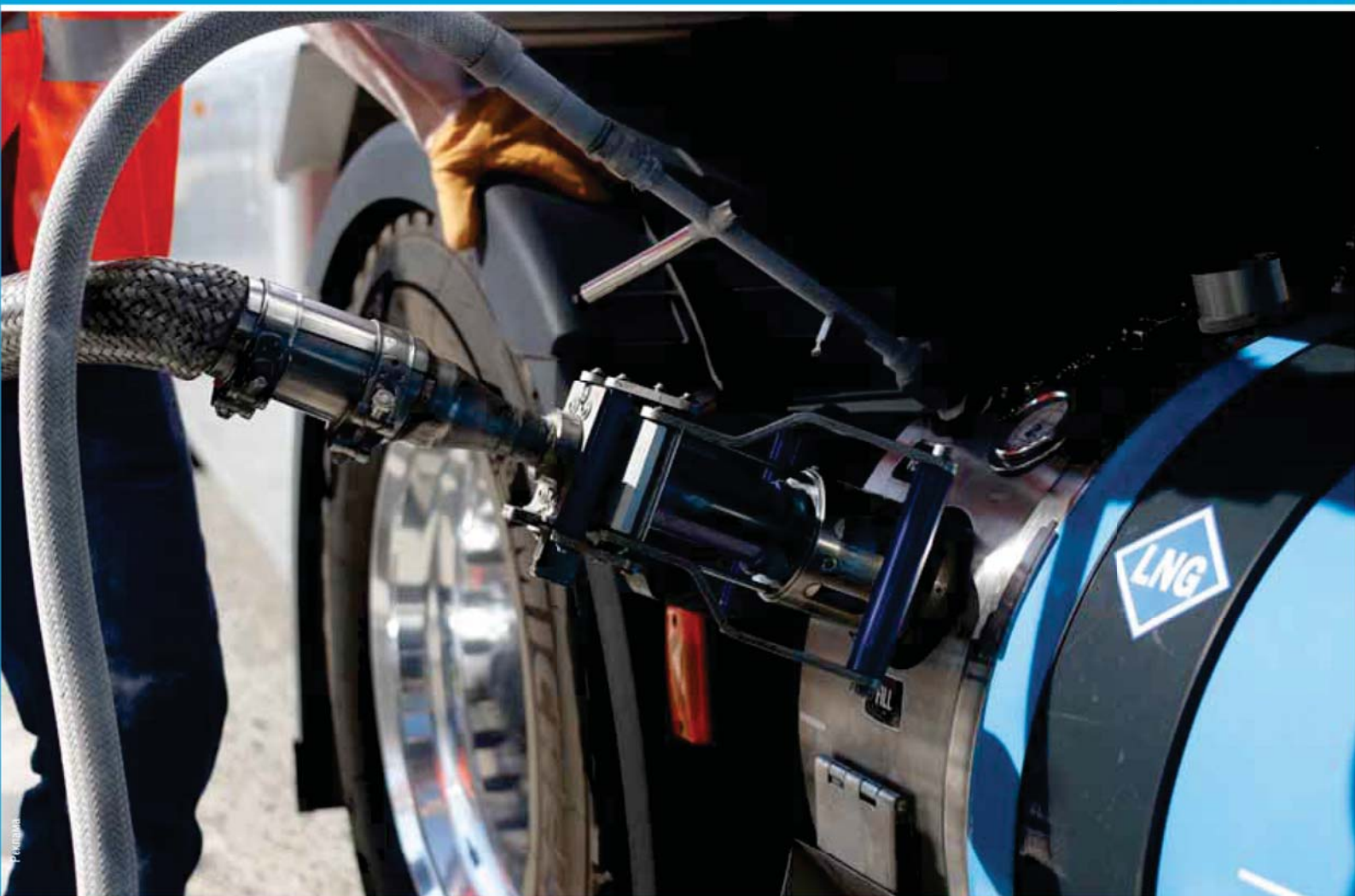




ТРАНСПОРТ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ



№ 6 (60) 2017



СПГ для магистрального и железнодорожного транспорта
Метилловый эфир рапсового масла как топливо
Сравнение выбросов загрязняющих веществ



Учредитель и издатель

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

Периодичность

6 номеров в год

Главный редактор

П.Г. Цыбульский

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

Члены редакционной коллегии

Б.В. Будзуляк

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

С.П. Горбачев

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

В.И. Ерохов

профессор «МАМИ», д.т.н.

Р.З. Кавтарадзе

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

Т.В. Климова

начальник отдела информационного обеспечения
ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Москва»,
заместитель главного редактора

С.И. Козлов

д.т.н.

С.В. Люгай

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

В.А. Марков

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

А.В. Николаенко

ректор «МАМИ», профессор, д.э.н.

Ю.В. Панов

профессор МАДИ, к.т.н.

Н.Н. Патрахальцев

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

Е.Н. Пронин

член совета НГА

В.Л. Стаивко

ветеран газовой отрасли, к.т.н.

В.Н. Фатеев

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

Редактор

О.А. Ершова

E-mail: transport.1@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 76

Отдел подписки и рекламы

E-mail: transport.2@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 77

Перевод

А.И. Хлыстова

Компьютерная верстка

И.В. Шерстюк

Адрес редакции:

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

www.ngvrus.ru

Отпечатано с представленного электронного оригинал-макета

в типографии «ТалерПринт»

109202, г. Москва, ул. 1-ая Фрезерная, д. 2/1

Номер заказа

Сдано на верстку 15.10.2017 г.

Подписано в печать 15.11.2017 г.

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

Печать офсетная, печ. л. 10,5

При перепечатке материалов ссылка на журнал

«Транспорт на альтернативном топливе» обязательна.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации,

опубликованной в рекламных материалах

На обложке: заправка тягача IVECO Stralis сжиженным природным газом

В НОМЕРЕ



Поздравление с Новым годом	3
Поздравление журналу «Транспорт на альтернативном топливе» в связи с 10-летием со дня выхода в свет первого номера	4
СПГ для автомагистрального и железнодорожного транспорта	6
VII Международный научно-практический семинар «Газомоторное топливо. Повышение эффективности производства и использования»	9
Введена в строй крупнейшая АГНКС в России и Европе	16
Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Неверова В.В., Са Бовэнь Метилвый эфир рапсового масла как дизельное топливо	17
Козлов С.И., Люгай С.В. Математическая модель действительного и теоретического циклов дизеля с высоким наддувом	31
«Газпром» расширит сеть АГНКС на ключевых автомобильных трассах	42
Евстифеев А.А. Математическое моделирование производственных процессов АГНКС	43
Капустин А.А., Раков В.А. Сравнение выбросов загрязняющих веществ от автомобилей и различных энергетических установок	53
Овсянников Е.М., Гайтова Т.Б., Фомин А.П. Эксплуатация автомобильного транспорта на водородном топливе	61
Терехов А.Л. Шум, как источник профессиональных рисков на предприятиях транспорта и потребления газа	65
Для специалистов, изучающих вопросы безопасности эксплуатации газобаллонных транспортных средств	73
GasSuf 2017: больше участников, больше посетителей	74
Пронин Е.Н. Водородная электричка	76
Abstracts of articles	78
Авторы статей в журнале № 6 (60) 2017 г.	80



Founder and Publisher

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

Published

6 issues a year

Editor-in-Chief

Tsybulsky, P.G.

Deputy General Director of Gazprom VNIIGAZ, PhD

Editorial board members

Budzulyak, B.V.

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

Erokhov, V.I.

MAMI Professor, Doctor of Engineering

Gorbachev, S.P.

Professor, Gazprom VNIIGAZ, Doctor of Engineering

Kavtaradze, R.Z.

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

Klimova, T.V.

*Head of Information support department, Engineering
and Technical center, Gazprom Transgaz Moskva LLC,
deputy chief editor*

Kozlov, S.I.

Doctor of Engineering

Lyugai, S.V.

PhD, Director of the Centre «Gas Use»,

JSC «Gazprom VNIIGAZ»,

executive director, NGVRUS

Markov, V.A.

Professor of N.E. Bauman's MGTU,

Doctor of Engineering

Nikolaenko, A.V.

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

Doctor of Science

Panov, Yu.V.

Professor of MADI (GTU), PhD

Patrakhaltsev, N.N.

Professor of People's Friendship University of Russia,

Doctor of Engineering

Pronin, E.N.

member of the Council, NGVRUS

Stativko, V.L.

The vet of gas industry, Candidate of Science

Fateev, V.N.

Deputy Director of RNC Kurchatovsky Institute,

Doctor of Chemistry

Editor

Ershova, O.A.

E-mail: transport.1@ngvrus.ru

Phone.: +7 (498) 657 29 76

Subscription and Distribution Department

E-mail: transport.2@ngvrus.ru

Phone.: +7 (498) 657 29 77

Translation by

Khlystova A.I.

Computer imposition

Sherstyuk, I.V.

Editorial office address:

PO Box 253, p. Razvilka, Leninsky r-n,

Moskovskaya obl, 142717

www.ngvrus.ru

Order number

Passed for press on 15.10.2017

Endorsed to be printed on 15.11.2017

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

New year's Greetings	3
Celebrating the 10th year anniversary of the journal.	4
LNG for highway and railway transport.	6
VII International Scientific and Practical Seminar «NGV fuel. Improving efficiency of Production and Use»	9
Largest NGV filling station in Russia and Europe is putted into service	16
Vladimir Markov, Stanislav Nagornov, Svetlana Romantsova, Vera Neverova, Sa Boven Rapeseed oil methyl ester as a diesel fuel	17
Sergey Kozlov, Stanislav Lyugay The mathematical model of the actual and theoretical cycles of a diesel with a high supercharging	31
GAZPROM to widen the network of NGV filling stations on mainstream highways.	42
Andrey Evstifeev Mathematical modeling of production processes of automobile gas filling compressor station	43
Alexander Kapustin, Vyacheslav Rakov Comparison of emissions of vehicles with various engines.	53
Evgeniy Ovsyannikov, Tamara Gaitova, Alexander Fomiv Operation of motor vehicles with hydrogen fuel	61
Alexey Terekhov Noise as a source of occupational risks at transport and gas consumption enterprises	65
New books	73
GasSuf 2017: more participants, more visitors	74
Eugene Pronin Hydrogen light rail	76
Abstracts of articles	78
Contributors to journal issue № 6 (60) 2017	80

Уважаемые читатели!

Современные тенденции развития промышленности характеризуются увеличением масштабов использования природного газа. Этот процесс, охвативший в настоящее время все передовые индустриальные страны, обусловлен, прежде всего, технологическими достоинствами природного газа, рациональное использование которого позволяет получить значительный экономический и экологический эффект.

Инновационные решения, перспективные энергоэффективные технологии и научно-технический прогресс открывают новые возможности повышения экологической безопасности, энергетической эффективности, сокращения в краткосрочной и среднесрочной перспективах бюджетной нагрузки на локальном, региональном и глобальном уровне.

Для обсуждения этих и других актуальных вопросов АОГМТ «НГА» с участием средств массовой информации, представителей производственных предприятий и научных организаций ведет просветительскую работу в рамках многочисленных семинаров, конференций, форумов, в печатных и электронных СМИ.

Наш с вами журнал «Транспорт на альтернативном топливе» уже десять лет входит в перечень цитируемых изданий ВАК и освещает широкий спектр вопросов производства и применения на транспорте традиционных и возобновляемых альтернатив бензину и дизельному топливу:

- перспективные технологии;
- современные экономические модели и бизнес-сценарии перехода к альтернативному топливу;
- социальные и экологические преимущества внедрения альтернативного топлива и негативные последствия консервативного развития;
- правовые ограничения и меры стимулирования;
- отечественный и мировой опыт.

Мы уверены, что юбилей журнала и для вас, уважаемые авторы, читатели, подписчики и рекламодатели, тоже праздник! Ведь все эти годы мы были вместе, ваши статьи, репортажи, информационные материалы помогают общему делу, направленному на улучшение жизни в нашей стране и мире!

В настоящее время в России есть огромный потенциал и предпосылки для построения системы развития рынка газомоторного топлива в масштабах всей страны, для чего необходимо консолидировать усилия всех заинтересованных сторон. Коллектив журнала во главе с Национальной газомоторной ассоциацией видит свою задачу в том, чтобы активнее популяризировать идею перевода транспорта на газовое моторное топливо. Журнал объединил ученых, научных сотрудников, специалистов разных направлений. Все эти годы мы старались донести до читателей самую актуальную информацию из различных областей, связанных с использованием газомоторного топлива. И очень хочется надеяться, что многим наше издание помогло в работе.

Мы убеждены, что и в дальнейшем сплоченный авторский коллектив во главе с редакционной коллегией журнала не ослабит своего сотрудничества с нами. Вместе с тем мы ждем новых авторов и читателей, которые, возможно, придадут новое ускорение в нашем деле.

Поздравляем всех с 10-летним юбилеем журнала и наступающим Новым годом! Желаем здоровья, счастья, новых достижений в вашей трудовой деятельности. И, конечно, ждем новых статей, идей и предложений.

*Национальная газомоторная ассоциация
Коллектив редакции*

ПОЗДРАВЛЕНИЕ журналу «Транспорт на альтернативном топливе» в связи с 10-летием со дня выхода в свет первого номера

4

От кафедры «Поршневые двигатели»
Московского государственного технического
университета им. Н.Э. Баумана

Дорогие коллеги и друзья! Прошло десять лет с момента выпуска первого номера журнала «Транспорт на альтернативном топливе», но сейчас уже трудно представить нашу отраслевую науку без этого журнала. В настоящее время он является ведущим научно-техническим изданием, публикующим статьи по такой актуальной тематике, как использование альтернативных топлив в энергетических установках различного назначения. Журнал плодотворно сотрудничает с ведущими учеными, работающими в этой области, активно цитируется авторами научных публикаций других журналов, входит в перечень ВАК, рекомендуемый для публикации результатов диссертационных исследований.

Проблематика использования топлив, производимых из альтернативных сырьевых ресурсов, имеет очень много аспектов. Это и поиск более дешевых моторных топлив, и возможность замещения нефтяных топлив энергоносителями не нефтяного происхождения, и возможность улучшения экологических показателей энергоустановок. Топлива, используемые на современных наземных, водных и воздушных транспортных средствах, оказывают существенное влияние на окружающую среду. При этом теплоту сгорания топлива надо преобразовать в полезную работу таким образом, чтобы обеспечить минимизацию как удельного расхода топлива, так и эмиссии вредных веществ, образующихся в процессе сгорания. Задача чрезвычайно актуальная с учетом значимости роли транспорта в отечественной экономике. Решением этих проблем в России, как и во всем мире, занимается большое количество научных и технических работников, конструкторов и производителей, управленцев промышленности и других специалистов, которые объединены вокруг журнала «Транспорт на альтернативном топливе». Журналу это удалось сделать благодаря, прежде всего, публикациям высокого научного уровня, освещающим актуальные задачи совершенствования энергетических установок, работающих на альтернативных топливах.

Несмотря на то, что журнал регулярно публикует статьи по своей основной тематике – использование газомоторного топлива, спектр рассматриваемых проблем достаточно широк. К ним относятся следующие: использование других альтернативных топлив; процессы в тепловых двигателях, работающих на альтернативных топливах; моделирование и экспериментальные исследования рабочих процессов; конвертирование традиционных (серийных) двигателей на альтернативные топлива; разработка новых двигателей, работающих на этих топливах; физико-химические свойства альтернативных энергоносителей; ряд других важных проблем, без решения которых невозможно широкомасштабное использование альтернативных топлив.

Среди других научно-технических изданий журнал «Транспорт на альтернативном топливе» выделяется важнейшими качествами, необходимыми для периодического издания – информативностью и оперативностью, в чем немалая заслуга редколлегии журнала и редакции в целом. Журнал оперативно откликается на новые веяния в области использования газомоторных и других альтернативных топлив, знакомит читателя с новыми достижениями и существующими проблемами, привлекая при этом в качестве авторов ведущих ученых рассматриваемого направления.

Безусловно, журнал состоялся как периодическое научно-техническое издание высокого уровня, сплотившее вокруг себя большую группу профессионалов,

одержимых одной благородной идеей – поднять на высокий технический и технологический уровень отечественный транспорт на альтернативном топливе и тем самым сделать нашу жизнь более комфортной, а окружающую среду – экологически чистой.

Нам – членам редколлегии, авторам и читателям журнала, хочется пожелать изданию дальнейшего повышения научного авторитета, расширения круга рассматриваемых проблем современной транспортной энергетики и увеличения количества публикаций, основанных на результатах глубоких и пионерских научных исследований в области инновационных транспортных энергетических установок на перспективных топливах.

Поздравляем с 10-летним юбилеем журнала главного редактора П.Г. Цыбульско-го, заместителя главного редактора Т.В. Климову, редакцию, редколлегию, технических работников, авторов и читателей – всех, кого объединяет журнал «Транспорт на альтернативном топливе». Желаем вам, дорогие коллеги, крепкого здоровья и больших творческих успехов!

Члены редколлегии журнала:

*Заведующий кафедрой «Поршневые двигатели»
д.т.н., профессор В.А. Марков
Профессор кафедры «Поршневые двигатели»
д.т.н. Р.З. Кавтарадзе*

**От авторского коллектива ФГБОУ высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский политех)**

Коллектив Московского политехнического университета (Московский политех) искренне поздравляет сотрудников редакции «Транспорт на альтернативном топливе» с 10-летием со дня выхода в свет первого номера журнала.

Своей повседневной плодотворной работой коллектив журнала оказывает неоценимую информационную помощь в подготовке высококвалифицированных специалистов по переводу автомобильного транспорта на альтернативные виды топлива. Ваш журнал – единственное в стране издание, полностью посвященное этой тематике. Публикуемые оригинальные новейшие результаты исследований представляют собой информационное обеспечение современного учебного процесса и проектной деятельности Московского политеха. За прошедшее десятилетие в Московском политехе прошли обучение 3500 слушателей по проблеме перевода традиционных наземных транспортных средств на газомоторное топливо.

Журнал достиг заметных результатов в популяризации газомоторного топлива и стал одним из ведущих периодических изданий России в этой сфере. Публикуемые материалы ведущих ученых страны, специалистов и руководителей газовой промышленности формируют правильное понимание роли и значения газомоторного топлива для обеспечения энергетической и экологической безопасности страны на национальном и международном уровне.

Высокий научный уровень журнала подтвержден включением его в перечень изданий ВАК РФ. Соискателям предоставлена возможность публиковать результаты исследований по тематике кандидатских и докторских диссертаций. Журнал имеет высокий индекс в информационной базе РИНЦ. Своевременное и оперативное информационное обеспечение способствует формированию позитивных тенденций и стимулов превращения альтернативных видов топлива в основной вид моторного топлива.

Отмечаая десятилетний юбилей журнала, желаем коллективу редакции здоровья, благополучия, творческого долголетия и успехов в освещении экологических и энергетических проблем современного транспорта, оптимизма и веры в достижение поставленных целей. Выражаем коллегам глубокую благодарность за их высокий профессиональный труд и надеемся на дальнейшее эффективное сотрудничество.

*Авторский коллектив ФГБОУ высшего образования
«Московский политехнический университет» (Московский политех)*

СПГ для автомагистрального и железнодорожного транспорта

Компания «Газпром газомоторное топливо» приступила к реализации инфраструктурных проектов



Перед стартом автопробега

В России развивается применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива. Наиболее перспективными сегментами транспорта для использования СПГ в силу его конкурентных преимуществ перед традиционными нефтяными топливами являются магистральный автомобильный (грузовые тягачи грузоподъемностью свыше 12 тонн, междугородные автобусы) и железнодорожный (магистральные газотурбовозы, маневровые газотепловозы) виды транспорта. По маркетинговым оценкам, потенциальный спрос на СПГ в Российской Федерации к 2022 году составит 460 тыс. тонн в сегменте магистрального автотранспорта и 140 тыс. тонн в сегменте железнодорожного транспорта¹.

¹ Подробнее см.: Кондратенко С.Е. Перспективы применения сжиженного природного газа в качестве моторного топлива в России // Газовая промышленность. – 2017. – № 4. – С. 76-82.

В октябре в рамках Петербургского Международного Газового Форума финишировал XI международный автопробег «Голубой коридор–2017», в котором приняла участие техника, работающая на криогенном топливе.

Старт одиннадцатому «Голубому коридору» был дан в Лиссабоне, маршрут автопробега прошел по территориям 12 стран: Португалии, Испании, Франции, Италии, Швейцарии, Лихтенштейна, Германии, Польши, Литвы, Латвии, Эстонии, России. Всего участники автопробега проехали более 5,3 тыс. км за 19 дней.

В автопробеге участвовали грузовые автомобили на СПГ автоконцернов «Группа ГАЗ», «КАМАЗ», «МАЗ», Iveco. Заправку автомобилей на европейской части обеспечили криогенные автозаправочные станции (КриоАЗС) компаний-партнеров ПАО «Газпром», а на

территории России – компания «Газпром газомоторное топливо» на собственных объектах в Калининграде и Петергофе.

Автопробег «Голубой коридор» продемонстрировал наличие потенциала газомоторных коридоров между Европой и Россией. В перспективе инфраструктура СПГ должна появиться на всем протяжении международного транспортного коридора «Европа – Западный Китай», который является ключевым маршрутом для грузоперевозок между европейскими и азиатскими странами.

В настоящее время усилиями ПАО «Газпром» реализуется пилотный проект комплексного создания газозаправочной инфраструктуры на маршруте «Москва – Санкт-Петербург» по федеральной автодороге М-10, предусматривающий строительство восьми КриоАЗС до 2021 года.

Кроме того, на международном транспортном маршруте «Европа – Западный Китай» в рамках Дорожной карты, подписанной на Петербургском Международном Газовом Форуме ПАО «Газпром» и ГК «Автодор», предусматривается создание 14 КриоАЗС. Также на этом маршруте в рамках программы ПАО «Газпром» о развитии малотоннажного производства и использования СПГ будут построены шесть комплексов сжижения природного газа (КСПГ). Строительство сбытовой инфраструктуры СПГ на российском участке международного транспортного маршрута обеспечит компания «Газпром газомоторное топливо». Производство СПГ будут осуществлять шесть малотоннажных комплексов по сжижению природного газа в Тверской и Ленинградской областях, республиках Татарстан и Башкортостан.

Еще одним важнейшим проектом для «Газпрома» по расширению применения СПГ в качестве моторного топлива является строительство производственно-



Газотурбовоз ГТ1h-002

сбытовой инфраструктуры для железнодорожного транспорта. С 2013 года ОАО «РЖД» на Свердловской железной дороге эксплуатирует маневровый локомотив ТЭМ19 и два магистральных газотурбовоза ГТ1h. В качестве перспективного полигона для использования железнодорожного транспорта на СПГ определен участок Войновка – Новый Уренгой, протяженность которого составляет около 1500 км. На территориях ГРС города Тобольска, ГРС-ЗСК города Сургута и ГРС-70 города Ноябрьска определены перспективные участки для строительства трех комплексов сжижения природного газа производительностью 3-5 тонн в час, а также пунктов экипировки СПГ на станциях Войновка, Тобольск, Демьянка, Сургут, Ноябрьск, Лимбей, Коротчаево.

На железнодорожной линии Обская – Бованенково запланирован перевод на СПГ парка локомотивов Ямальского филиала ООО «Газпромтранс». Для этого на ГРС Обская предусмотрено строительство комплекса проектной производительностью 1,5 тонны в час, а также экипировочных пунктов на станциях Обская, Разъезде 15, Карская. Создание инфраструктуры СПГ обеспечит «Газпром газомоторное топливо» и совместное предприятие «Газпром СПГ технологии».

Отдел внешних коммуникаций
ООО «Газпром газомоторное топливо»



ЛенПромАвтоматика

ТОПЛИВОРАЗДАТОЧНАЯ КОЛОНКА ДЛЯ ЗАПРАВКИ АВТОМОБИЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ЛПА-СПГ-К

Краткие технические характеристики

Характеристика	Значение
Количество постов заправки, шт.	1
Диапазон расхода газа, кг/мин	1...200
Давление заправки, МПа	до 1,6
Давление испытания, МПа	2
Диапазон рабочих температур, °С	от -40 до +40
Межповерочный интервал, лет	2
Погрешность измерения заправленного количества газа, не более, %	1
Габаритные размеры, мм	1700×600×2200
Потребляемая мощность, не более, Вт	400
Вес, кг	350
Интерфейс связи с системой учета	RS-485
Протокол обмена	Топаз 2.0
Обмен данными с крионасосом	С.К./Modbus RTU

- 100% рентгеновский контроль сварных швов.
- Отечественный электронный блок управления и программное обеспечение.



Топливораздаточная колонка ЛПА-СПГ-К

- Настраиваемое максимальное давление заправки.
- Различные способы сопряжения с системой управления крионасосом: дискретные сигналы или по протоколу Modbus RTU.
- Возможность установки различных типов заправочных устройств.
- Шланг с обдувочным пистолетом для удаления излишков влаги с заправочных устройств и приемных горловин бака автомобиля перед началом заправки.
- Предохранительные разрывные муфты.
- Система контроля заземления автомобиля.

Основные особенности топливораздаточных колонок ЛПА-СПГ-К

- **Современный, эффективный способ заправки.** ЛПА-СПГ-К – колонка, выполняющая заправку с контролем массы заправленного газа. Принцип заправки – без учёта возвращаемой газовой составляющей. Такой подход позволяет упростить конструкцию колонки, увеличить надёжность и уменьшить стоимость.
- **Универсальность и удобство.** Тип заправочных устройств по умолчанию: JC Carter. По запросу Заказчика колонки могут быть укомплектованы заправочными устройствами других стандартов – Macrotech или Parker Kodiak.
- **Расширенный температурный диапазон.** ЛПА-СПГ-К работает при температуре окружающей среды от -40 до +40°C.
- **Интегрируемость.** ЛПА-СПГ-К легко устанавливается на существующие АЗС/АГНКС/МАЗС. Возможность сопряжения колонки с наиболее распространенными системами учета топлива по стандартному протоколу.
- **Привлекательный дизайн.** Колонка имеет современный внешний вид, по запросу Заказчика выполняется брендирование для поддержания фирменного стиля заправочной станции.
- **Возможность приема бесконтактных proxi-карт.** ЛПА-СПГ-К позволяет реализовать лимитную схему отпуски топлива, идентифицируя клиента по предъявленной proxi-карте.

VII Международный научно-практический семинар «Газомоторное топливо. Повышение эффективности производства и использования»

Вопросы повышения эффективности эксплуатации автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС), безопасной эксплуатации газобаллонных автомобилей (ГБА), нормативно-технического обеспечения, производства и использования сжиженного природного газа в качестве моторного топлива обсудили участники VII Международного научно-практического семинара «Газомоторное топливо. Повышение эффективности производства и использования», который прошел в столице Белоруссии Минске 28 сентября 2017 г. Семинар организован Ассоциацией организаций в области газомоторного топлива «Национальная газомоторная ассоциация» (АОГМТ «НГА») и ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Соорганизаторами выступили ООО «Газпром газомоторное топливо» и ПАО «Газпром автоматизация». Мероприятие проходило в Национальной библиотеке Республики Беларусь.



В работе семинара приняли участие представители ПАО «Газпром», дочерних обществ ПАО «Газпром», ООО «Газпром газомоторное топливо», производители газозаправочного оборудования, топливной аппаратуры, автомобильной и тракторной техники, а также представители научных кругов из России и Белоруссии. Руководил работой семинара директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительный директор Национальной газомоторной ассоциации С.В. Люгай.



С вступительным словом к участникам семинара обратились генеральный директор ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» В.В. Майоров, председатель совета партнерства Д.Д. Гайдт и директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительный директор НГА С.В. Люгай.

В начале работы семинара председатель Ассоциации Д.Д. Гайдт вручил благодарственные дипломы за большой личный вклад в организацию и проведение семинара генеральному директору ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» В.В. Майорову, главному инженеру – заместителю генерального директора ООО «Газпром газомоторное топливо» В.С. Хахалкину и заместителю генерального директора по метрологии ПАО «Газпром автоматизация» С.В. Алимову.



Вручение благодарственных дипломов

На семинаре были представлены доклады по актуальным темам, вызвавшие большой интерес аудитории:

- «Использование СПГ в качестве моторного топлива» (Д.Д. Гайдт, председатель совета АОГМТ «НГА»);
- «Газомоторное топливо в Республике Беларусь: состояние, тенденции, перспективы» (Д.М. Аннюк, заместитель генерального директора по реализации газа ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», член совета АОГМТ «НГА»);
- «Газомоторное топливо. Инфраструктурные проекты» (В.С. Хахалкин, главный инженер – заместитель генерального директора ООО «Газпром газомоторное топливо», заместитель председателя совета АОГМТ «НГА»);
- «Повышение эффективности использования газомоторного топлива за счет внедрения системы моноподачи на дизельных двигателях» (А.Г. Малюга, заместитель генерального директора по стратегическому развитию АО «РариТЭК Холдинг»);
- «Особенности эксплуатации газобаллонного оборудования для ТС на территории Российской Федерации в соответствии с требованиями ФНИП по промышленной безопасности» (В.И. Строганов, генеральный директор Регионального центра сертификации и мониторинга качества);
- «Вопросы безопасности при эксплуатации ТС, работающих на газомоторном топливе» (Ю.В. Панов, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета);

- «Дополнительные возможности повышения эффективности работы АГНКС» (Н.П. Акимова, председатель совета директоров ООО «Региональная газовая компания»);
- «Инновационные технические решения газомоторного зерноуборочного комбайна GS4118K» (Г.В. Ермольчик, ведущий инженер-конструктор научно-технического центра комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»);
- «ГАЗ-У: Комплекс коммерческого отпуска и учета газа в сети АГНКС, ПАГЗ и БЗП ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». 20-летний опыт работы и перспективы развития» (В.А. Шалатонин, заместитель директора ООО «Аксиома»).

Давид Давидович Гайдт рассказал о применяемых в ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» технологиях производства сжиженного природного газа (СПГ), к которым относятся следующие: производство СПГ на комплексах частичного сжижения, расположенных на ГРС, по циклу среднего давления с использованием турбодетандера; на комплексах частичного сжижения с внешним подводом холода, технологически связанных с ГРС, со сбросом газовой фазы в распределительные сети; на мобильных комплексах сжижения, расположенных на АГНКС. Кроме этого, докладчик сообщил о практическом опыте применения СПГ в качестве моторного топлива на Свердловской железной дороге, автомобильной, специальной и строительно-дорожной технике, а также для газоснабжения котельных и населения, потребителей при производстве ремонтных работ с использованием СПГ на объектах магистральных газопроводов.



На выставке газобаллонной техники на площади перед библиотекой

О том, как развивается в Белоруссии рынок газомоторного топлива (ГМТ), доложил заместитель генерального директора по реализации газа ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» Д.М. Аннюк. В частности, он отметил, что подписанное ПАО «Газпром» и правительством Республики Беларусь соглашение о сотрудничестве и разработанный Министерством экономики «Комплекс мероприятий по расширению применения природного газа в качестве моторного топлива»



Выступает Д.М. Аннюк

субъектов хозяйствования, эксплуатирующих экологически чистую технику.

В ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» ведется работа по организации первого на территории республики комплекса малотоннажного производства СПГ, что позволит расширить проводимую работу по применению СПГ на транспорте, обеспечить развитие внутреннего рынка СПГ, активизировать разработку и испытание транспорта и техники, использующих СПГ.

В.С. Хахалкин, главный инженер – заместитель генерального директора ООО «Газпром газомоторное топливо», выступая с докладом, подчеркнул, что стратегическая цель компании – закрепиться в качестве отраслевого лидера и комплексно развивать рынок газомоторного топлива России. Для реализации этой задачи компания развивает различные направления своей деятельности: производственная и коммерческая деятельность; реализация функций заказчика; взаимодействие с федеральными и региональными органами власти; реализация проектов на зарубежных рынках.



Выступает В.С. Хахалкин

способствовали повышению внимания производителей транспорта и техники республики к ГМТ и освоению серийного выпуска транспортных средств с газобаллонным оборудованием.

Для синхронизации намерений по применению газомоторного топлива с возведением газомоторной инфраструктуры при правительстве Республики Беларусь создана рабочая группа. Реализация поставленных целей может быть достигнута при следующих условиях:

- актуализация нормативной базы с учетом уровня развития современной техники и технологий;
- снижение стоимости газомоторной техники до конкурентного уровня по отношению к дизельным аналогам;
- установление предпочтений для

для субъектов хозяйствования, эксплуатирующих экологически чистую технику.

В.С. Хахалкин представил также прогноз замещения традиционного топлива сжиженным природным газом по всем целевым сегментам к 2030 г. и мирового объема малотоннажного производства СПГ к 2020 г.

А.Г. Малюга, заместитель генерального директора по стратегическому развитию АО «РариТЭК Холдинг», рассказал о новых моделях грузовых транспортных средств и специализированной техники на ГМТ. Продукция «РариТЭК» используется на автобусах, грузовой, сельскохозяйственной и коммунальной технике.



Трактор К-702 с двигателем RGK производства «РариТЭК»

Двигатели этой компании позволяют расширить парк экологичной и надежной техники.



Выступает В.И. Строганов

В.И. Строганов, генеральный директор Регионального центра сертификации и мониторинга качества, представил в докладе обширную информацию о нормативных документах, регулирующих деятельность, связанную с использованием газомоторной техники. Также рассказал о пробелах в нормативно-правовом регулировании, которые заставляют участников рынка заниматься вопросами саморегулирования в области безопасности газобаллонного оборудования. В.И. Строганов считает, что необходимо разрабатывать единую программу маркировки/идентификации баллонов, позволяющую быстрое считывание информации о состоянии баллона при его заправке на АГНКС. По его мнению, еще сложнее ситуация

с эксплуатационными нормами для криогенных емкостей. Решение этих проблем возможно при условии доработки нормативных документов.

О комплексе разработок МАДИ для повышения эффективности эксплуатации газовых автобусов, проведенных при участии вуза, рассказал профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Московского

автомобильно-дорожного государственного технического университета Ю.В. Панов. Также в МАДИ ведется разработка методического обеспечения для обучения специалистов по эксплуатации, ТО и ремонту автобусов, работающих на КПП.

С большим интересом был встречен доклад Н.П. Акимовой, председателя совета директоров ООО «Региональная газовая компания». Докладчик представила аудитории основные факторы, влияющие на экономическую эффективность АГНКС. Также Н.П. Акимова рассказала о дополнительных возможностях повышения экономической эффективности работы АГНКС. Кроме этого, докладчик обратила внимание на необходимость снижения капитальных и эксплуатационных затрат, что позволит снизить себестоимость производства газомоторного топлива. Одним из вариантов решений данной задачи является выбор оборудования АГНКС с низкими удельными энергозатратами.

Об интересном проекте ОАО «Гомсельмаш» рассказал ведущий инженер-конструктор научно-технического центра комбайностроения Г.В. Ермольчик (Белоруссия). Докладчик представил газомоторный зерноуборочный комбайн GS4118K, который уже прошел испытания. Самоходный зерноуборочный комбайн создан на базе шасси серийно выпускаемого комбайна КЗС-1218А-1 и предназначен для прямой и раздельной уборки зерновых, колосовых, крупяных культур и семенников трав, а с применением специальных приспособлений – и для уборки зерновой части кукурузы, подсолнечника, зернобобовых и рапса на равнинных полях с уклоном до 8°. Комбайн производит скашивание и подбор зерновых или семенных культур, обмолот, сепарацию, очистку зерна, накопление зерна в бункере с последующей выгрузкой в транспортное средство, а также обеспечивает уборку незерновой части урожая. Были показаны основные инновационные решения моторной установки новой сельскохозяйственной техники.



Самоходный зерноуборочный комбайн GS4118K на газомоторном топливе

В.А. Шалатонин, заместитель директора ООО «Аксиома» (Белоруссия), рассказал, как в течение 20 лет шло развитие комплекса ГАЗ-У, как внедрялись новые интеллектуальные технологии в соответствии с требованиями сегодняшнего времени.

После завершения докладов состоялся обмен мнениями участников семинара. Представители различных организаций России и Белоруссии активно высказывали свою точку зрения, внимательно слушали своих оппонентов. Все это подтвердило актуальность тематики семинара, полезность и необходимость проведения мероприятий, направленных на обмен опытом, знаниями и консолидацию заинтересованных участников газомоторного рынка.

После семинара его участники посетили АГНКС «Минск-4» ОАО «Газпром трансгаз Беларусь».



АГНКС «Минск-4» ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»



Участники семинара: фото на память

Введена в строй крупнейшая АГНКС в России и Европе

16

16 ноября в Москве состоялся торжественный ввод в эксплуатацию новой АГНКС «Газпрома» – самой крупной в России и Европе. В мероприятии приняли участие председатель совета директоров ПАО «Газпром» Виктор Зубков, заместитель Министра энергетики Российской Федерации Кирилл Молодцов, мэр Москвы Сергей Собянин, заместитель председателя правления ПАО «Газпром» Виталий Маркелов и генеральный директор ООО «Газпром газомоторное топливо» Михаил Лихачев.



Новая АГНКС в Москве на улице Левобережной

Приветствие участникам мероприятия направил Президент Российской Федерации Владимир Путин.

Проектная производительность новой АГНКС составляет 29,8 млн кубометров природного газа в год. На станции расположено 12 заправочных постов и колонка для наполнения передвижных автомобильных газозаправщиков. Современное надежное оборудование, состоящее преимущественно из отечественных комплектующих, позволяет ежедневно обслуживать около 2000 единиц техники.

Станция размещена в Северном административном округе Москвы на улице Левобережной рядом с эксплуатационной площадкой Зеленоградского автокомбината ГУП «Мосгортранс» (ранее – 11-й автобусный парк), эксплуатирующего 155 автобусов на природном газе.

«Россия обладает самыми большими

в мире запасами природного газа. Наличие такого потенциала позволило нам несколько лет назад начать масштабную работу по развитию инфраструктуры снабжения автомобилей экономичным и экологически чистым топливом, – сказал Виктор Зубков. – За последние три года общий объем инвестиций «Газпрома» в газозаправочные комплексы превысил 10 млрд руб. Построены 43 новые современные станции в 24 регионах страны. Москва – это огромный мегаполис, крупнейший транспортный и логистический узел. В столице к чемпионату мира по футболу мы дополнительно запустим еще четыре новые станции. Они будут оборудованы по самым высоким стандартам качества и безопасности. В ближайшие два года «Газпром» планирует создать в регионе полноценную газозаправочную сеть. Важно, что расширение рынка газомоторного топлива создает основу для развития смежных отраслей промышленности. Это, в свою очередь, будет способствовать созданию новых рабочих мест и улучшению социально-экономической ситуации не только в отдельных регионах, но и в стране в целом. Актуальность использования газа на транспорте будет только возрастать».

Между «Газпромом» и правительством Москвы действует Соглашение о сотрудничестве в области расширения использования газомоторного топлива. Документ направлен на подготовку и реализацию в Москве инвестиционных проектов по строительству газомоторной инфраструктуры, а также на увеличение городского парка техники на природном газе.

В настоящее время на территории Москвы и Московской области действуют две АГНКС «Газпрома» (с учетом станции на ул. Левобережной), еще восемь АГНКС эксплуатирует ФГУП «Мосавтогаз».

Управление информации ПАО «Газпром»

Метилловый эфир рапсового масла как дизельное топливо

В.А. Марков, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), д.т.н.,
С.А. Нагорнов, профессор, зам. директора по научной работе федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН), г. Тамбов, д.т.н.,
С.В. Романцова, доцент кафедры биохимии и фармакологии Медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» (ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г.Р. Державина»), ведущий научный сотрудник ФГБНУ ВНИИТиН, г. Тамбов, к.х.н.,
В.В. Неверова, доцент кафедры «Английский язык для машиностроительных специальностей» факультета «Лингвистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.,
Са Бовэнь, аспирант кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены особенности применения в дизелях биотоплив, получаемых с использованием рапсового масла. Исследованы пространственные конфигурации молекул субстрата и реагента, участвующих в синтезе компонентов биотоплива из растительного масла. Получены вязкостные характеристики смесей дизельного топлива с метиловым эфиром рапсового масла. Представлены результаты экспериментальных исследований транспортного дизеля типа Д-245.12С, работающего на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла. Показана зависимость показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов от состава биотоплива.

Ключевые слова:

дизельный двигатель, дизельное топливо, биодизельное топливо, метиловый эфир рапсового масла, смесевое биотопливо, топливная экономичность, токсичность отработавших газов.

Истощение мировых запасов нефти, нарастающий дефицит нефтепродуктов, повышение цен на традиционные моторные топлива, постоянно ужесточающиеся требования к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания обуславливают продолжающиеся поиски альтернативных энергетических ресурсов. Евросоюзом планируется к 2020 г. перевести около четверти (23 %) всего автомобильного парка Европы на альтернативные моторные топлива [1]. Среди наиболее перспективных рассматриваются различные синтетические топлива, биодизельное топливо (Biodiesel или биодизель), биоэтанол, природный газ, биогаз, водород [1, 2]. Динамика изменения мирового использования альтернативных моторных топлив, в том числе получаемых из возобновляемых источников энергии, приведена на рис. 1.

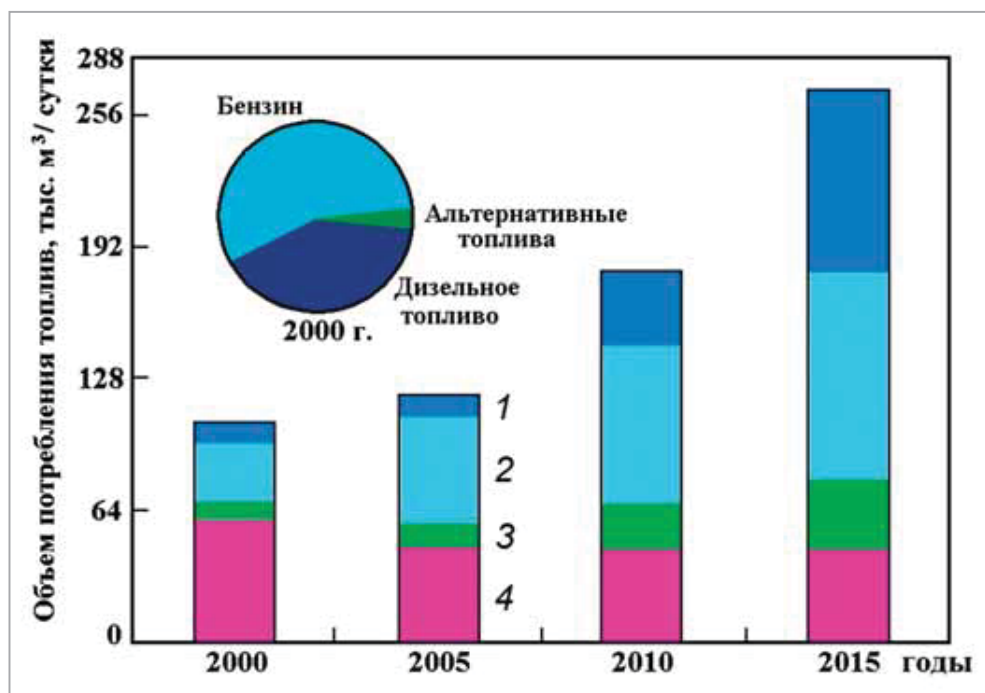


Рис. 1. Динамика изменения мирового использования альтернативных топлив:
 1 – синтетические топлива (продукты переработки по технологии GTL – Gas to Liquid);
 2 – этанол; 3 – биодизельное топливо (метиловый эфир рапсового масла);
 4 – МТБЭ (метил-трет-бутиловый эфир)

Все более широкое применение в качестве топлива для дизелей находят топлива, производимые из растительных масел [2-4]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания (КС) дизеля. Сопоставление себестоимости производства рапса, биодизельного топлива (метиловый эфир рапсового масла), биоэтанола, биогаза, синтетического топлива и водорода, приведенное в работе [3], подтверждает экономическую целесообразность использования на транспорте топлив, получаемых из растительных масел. Благодаря государственным налоговым льготам производителям биотоплив в Европе отпускная цена этого вида ниже отпускной цены традиционных нефтяных топлив: цена бензина составляет 1,19-1,27 евро/л, нефтяного дизельного топлива – 1,09-1,10 евро/л, биодизельного топлива – около 1 евро (цены 2010 г.) [3].

В Европе биодизельное топливо производится, в основном, из рапсового масла. На долю метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) приходится более 85 % производимого биодизельного топлива. Перспективно производство этого вида топлива и в условиях России. Известно множество работ, посвященных исследованию дизелей, работающих на метилом эфире рапсового масла и его смесях с дизельным топливом (ДТ) [1-10]. Вместе с тем необходимы дополнительные исследования как процессов производства этих биотоплив, так и проблем адаптации двигателей внутреннего сгорания к работе на этих топливах.

Биодизельное топливо представляет собой смесь метиловых эфиров высших алифатических кислот, получаемых путем алкоголиза триацилглицеринов растительного масла. Основой производства сложных эфиров растительных масел являются реакции этерификации, представляющие собой реакции взаимодействия жирных кислот

растительных масел со спиртами. В общем случае получение эфиров из кислот может быть выражено уравнением химической реакции этерификации, представленным на рис. 2 [3, 4]. При протекании данной реакции отделившийся от спирта атом водорода Н соединяется с гидроксильной группой ОН кислоты с образованием воды, а при взаимодействии оставшихся радикалов кислоты и спирта образуется эфир. При этерификации жирных кислот растительных масел могут быть использованы различные спирты – метанол, этанол, пропанол, бутанол.

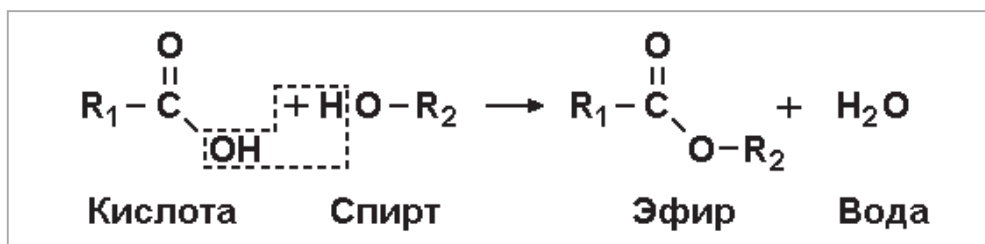


Рис. 2. Реакция этерификации кислоты спиртом с образованием эфира

Возможно производство из растительных масел различных сложных эфиров – метилового, этилового, пропилового, бутилового. Указанные эфиры получают в результате реакции этерификации растительного масла соответствующим спиртом в присутствии катализатора, в качестве которого обычно используют различные щелочи – КОН, NaOH и др.

Реакция этерификации рапсового масла метиловым спиртом (метанол) CH_3OH в присутствии катализатора (едкий калий КОН) протекает по механизму, представленному на рис. 3 [3, 4], в три стадии – с распадом триацилглицеридов с образованием диацилглицеридов, затем моноацилглицеридов и, наконец, с расщеплением последних с образованием метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла и глицерина.

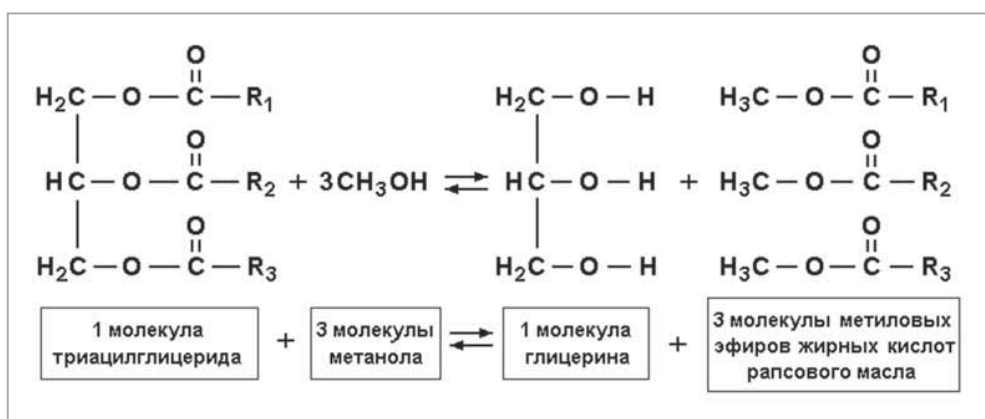


Рис. 3. Реакция этерификации рапсового масла метанолом

Реакцию получения биотоплива из растительного масла часто называют переэтерификацией или трансэтерификацией (transesterification). Под этой реакцией понимают взаимный обмен радикалами R_1 , R_2 , R_3 между двумя сложными эфирами. Переэтерификация может происходить между различными триацилглицеридами, между триглицеридом и каким-либо другим сложным эфиром, а также внутри молекулы одного и того же триглицерида. Пример такой реакции показан на рис. 4 [3].

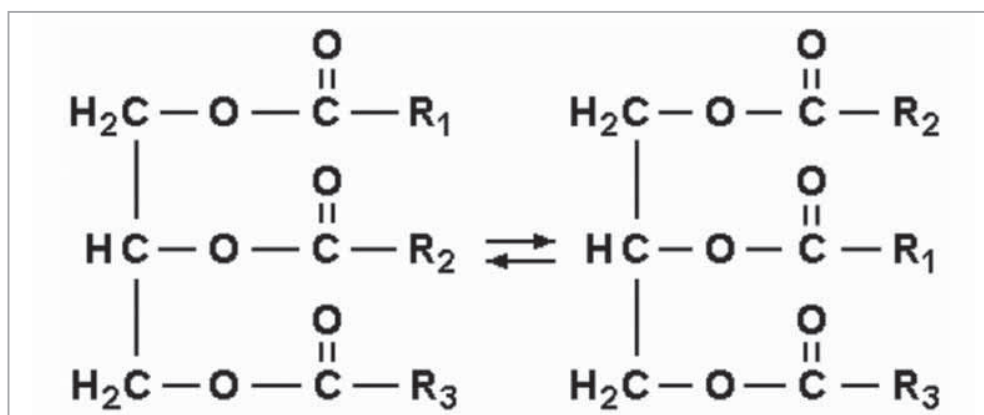


Рис. 4. Реакция переэтерификации внутри триацилглицерида

Реакции переэтерификации относятся к реакциям с участием сложноэфирных групп, характерных для любых сложных эфиров, и представляют собой реакцию нуклеофильного замещения. Реакциями переэтерификации называют реакции, в процессе которых происходит обмен ацильных групп, приводящий к образованию новых молекул сложных эфиров. Если этот обмен происходит между сложными эфирами различного строения, то такие реакции называют собственно реакциями переэтерификации.

Различают межмолекулярную и внутримолекулярную переэтерификацию [11, 12]. Если обмен происходит между сложными эфирами (например, триацилглицеридами) и спиртами, то такие реакции называют реакциями алкоголиза (или более конкретно по названию спирта – реакции метанолиза и т.п.) [11, 12]. Реакция алкоголиза является частным случаем реакции переэтерификации. Для объяснения особенностей протекания реакции алкоголиза был проведен квантово-химический расчет молекулы субстрата – триацилглицерида, в состав которого входят радикалы самых распространенных высших алифатических кислот – олеиновой, линолевой и линоленовой, а также возможных реагентов – метилового спирта, метилатов калия и натрия.

Электронная структура исследуемых молекул рассчитана с использованием программного комплекса (ПК) HyperChem (версия 7), построенного на полуэмпирических методах расчета. В этих методах уравнение Шредингера для молекул решается с использованием ряда приближений и упрощений. Все методы этой группы предполагают проведение расчета только для валентных электронов, пренебрегая интегралами определенных взаимодействий. При этом используются стандартные неоптимизированные базисные функции электронных орбиталей и некоторые параметры, полученные экспериментально. Использование этих экспериментальных параметров позволяет избегать расчетов ряда величин и корректировать ошибочные результаты приближений. Большинство доступных в ПК HyperChem полуэмпирических методов (CNDO, INDO, MINDO 3, MNDO, AM 1, PM 3, ZINDO, TNDO) включают схему для устранения вычислений, которые проходят со значительными затратами процессорного времени, в основном расчета ряда интегралов перекрытия. Практически все полуэмпирические методы в своем алгоритме опираются на метод Хартри – Фока или метод самосогласованного поля. В этом методе полагается, что каждый электрон движется в поле атомных ядер, положение которых фиксировано в пространстве, и в эффективном (усредненное) поле других электронов. Поскольку в исследуемых молекулах отсутствуют атомы переходных элементов и не решалась задача прогнозирования спектров, расчеты проводили методом AM 1.

Результаты проведенных исследований показывают, что при использовании в качестве нуклеофильных реагентов метилового и этилового спиртов, метилатов калия CH_3OK и натрия CH_3ONa и этилата калия $\text{C}_2\text{H}_5\text{OK}$ наибольшая скорость алкоголиза наблюдается при использовании метилата калия, наименьшая – в случае применения метанола CH_3OH .

Расчет молекул метанола, метилата калия и метилата натрия (рис. 5а,б,в) показал, что пространственная конфигурация этих молекул практически идентична. Распределение электронной плотности в молекулах реагентов представлено на рис. 6. Как и следовало ожидать, в молекуле спирта самый маленький заряд имеет место на атоме кислорода ($-0,326$). В молекулах алкоголятов этот заряд выше из-за большей разности в электроотрицательности связи «кислород–металл» по сравнению со связью «кислород–водород». В молекуле метилата калия на атоме кислорода сосредоточен несколько больший отрицательный заряд, чем в молекуле метилата натрия ($-0,732$ и $-0,709$ соответственно), что объясняет большую активность метилата калия как нуклеофильного реагента в реакции алкоголиза.

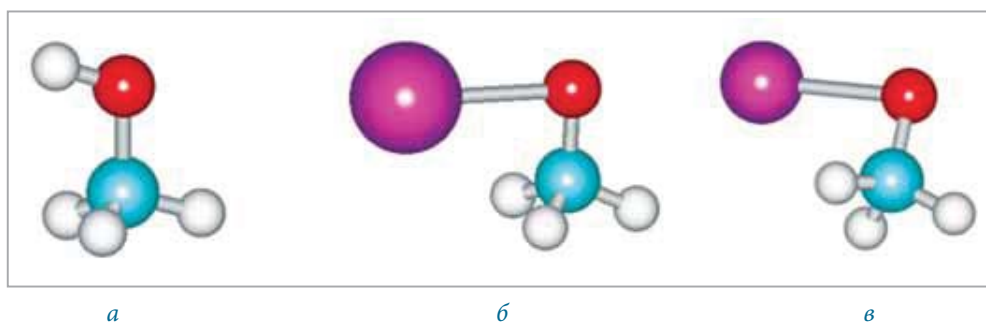


Рис. 5. Шаростержневые модели метанола (а), метилата калия (б), метилата натрия (в). Синим цветом отмечены атомы углерода, красным – кислорода, серым – водорода, фиолетовым – металлов

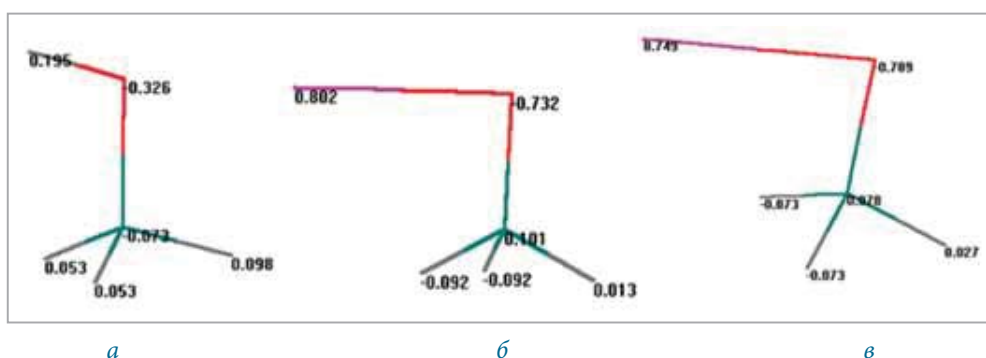


Рис. 6. Распределение электронной плотности в молекулах метанола (а), метилата калия (б), метилата натрия (в)

При моделировании молекулы субстрата (1-олеил-2-линолеил-3-линоленилглицерида) программа по умолчанию представляет радикалы непредельных кислот в *транс*-конфигурации. Шаростержневая модель *транс*-триацилглицерида представлена на рис. 7а. Однако в природных жирах непредельные кислоты находятся преимущественно в *цис*-конфигурации [11-13]. Пространственная конфигурация молекулы исследуемого субстрата в *цис*-конфигурации представлена на рис. 7б.

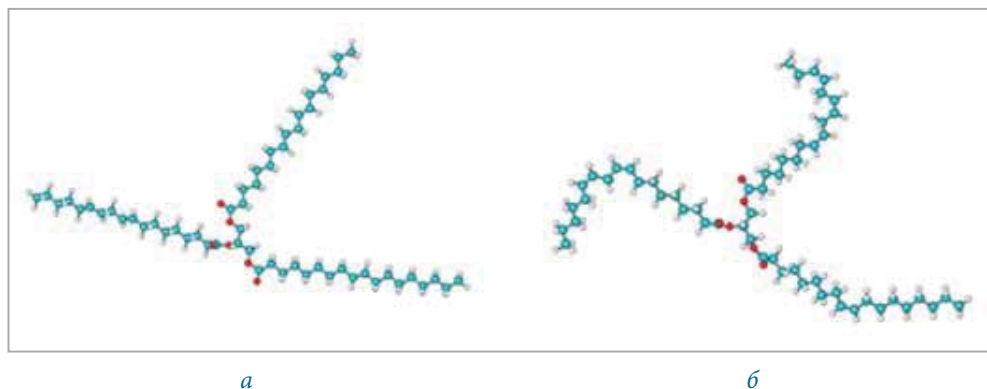


Рис. 7. Шаростержневые модели 1-олеил-2-линолеил-3-линоленилглицерида в *транс*- (а) и *цис*- (б) конфигурациях

Для *транс*-конфигурации характерно укорачивание углеводородных радикалов кислот и уменьшение размеров молекулы. Так, максимальная длина рассматриваемой молекулы в *транс*-конфигурации составляет 46,18 Å, в *цис*-конфигурации – 39,57 Å. По данным расчета молекула триацилглицерида несимметрична. Как следует из рис. 7, более доступны для атаки нуклеофила атомы, связанные с β-атомом углерода глицеринового фрагмента. Вместе с тем известно, что атака нуклеофильных частиц при ферментативном гидролизе триацилглицеридов происходит в первую очередь по α-атому углерода карбонильной группы. Поэтому при описании механизма алкоголиза считается, что атакуются в первую очередь 1-й и 3-й атомы углерода глицеринового фрагмента [1]. Распределение зарядов в центральной части рассматриваемой молекулы позволяет более точно судить о направлении атаки нуклеофила.

Распределение электронной плотности в молекуле субстрата показано на рис. 8. Здесь представлены только атомы углерода и кислорода, так как заряды на атомах водорода несущественны и не имеют значения для реакции нуклеофильного замещения. В молекуле субстрата присутствуют sp^3 - и sp^2 -гибридные атомы углерода. В состоянии sp^2 -гибридизации находятся атомы углерода карбонильной группы (3 атома) и атомы, связанные двойной связью (12 атомов). Атомы углерода, находящиеся в состоянии sp^2 -гибридизации, имеют несколько большую электроотрицательность, чем sp^3 -гибридные. Однако эта разница невелика ($\Delta = 0,08$ ед. по Поллингу), и значительного смещения электронной плотности связи $C(sp^3) \rightarrow C(sp^2)$ не происходит.

Как показали данные квантово-химического расчета, заряд на sp^2 -гибридном атоме углерода кислотного радикала несколько выше (в среднем $-0,170$ по сравнению с $-0,157$) за счет сдвига электронной плотности, в основном, от связанного с ним атома водорода. Таким образом, углеводородные радикалы высших алифатических кислот представляют собой малополярную часть молекулы триацилглицерида.

Более полярной частью молекулы является ее центральная часть, содержащая атомы углерода и три сложноэфирные группы. Так, заряд на карбонильном атоме углерода колеблется от $+0,296$ до $+0,318$, на карбонильном атоме кислорода от $-0,287$ до $-0,325$. Заряд на эфирном атоме кислорода несколько ниже: от $-0,250$ до $-0,286$. При этом самый высокий положительный заряд приходится на карбонильный атом углерода в β-положении молекулы триацилглицерида (на рис. 8 – слева), что облегчает атаку нуклеофила именно по этому положению.

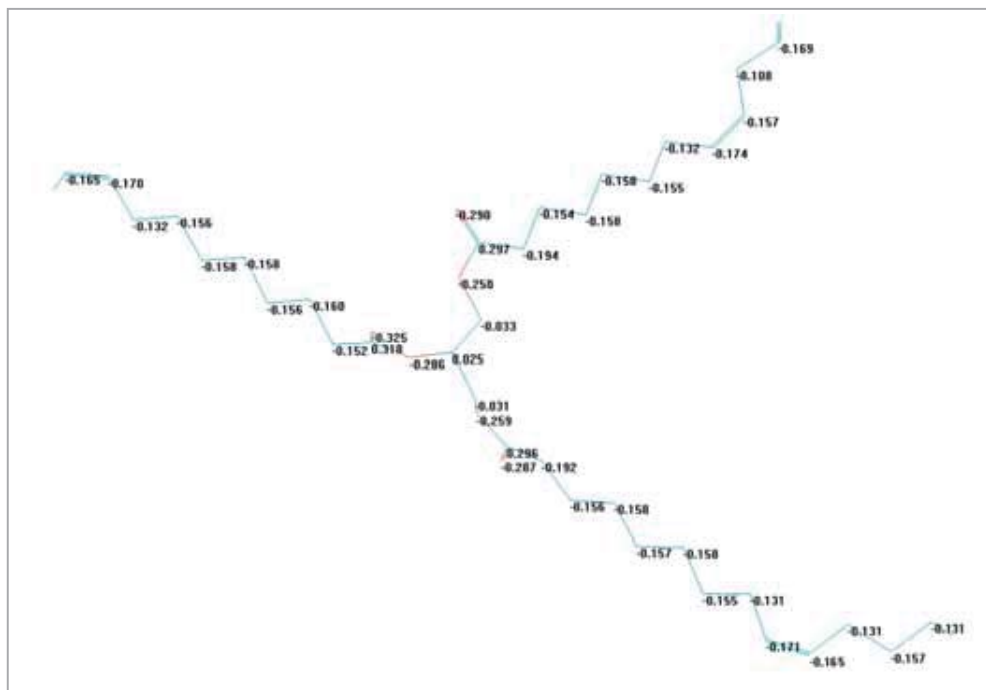


Рис. 8. Распределение электронной плотности в молекуле 1-олеил-2-линолеил-3-линоленилглицерида

Самое заметное различие в распределении электронной плотности приходится на глицериновые атомы углерода. Если в α -положениях 1 и 3 на них сосредоточен небольшой отрицательный заряд ($-0,033$ и $-0,032$), то в β -положении на атоме углерода имеет место недостаток электронной плотности (заряд $+0,025$). Нуклеофильная частица в реакции алкоголиза атакует карбонильные атомы углерода, на которых сосредоточен наибольший положительный заряд. По расчету это β -положение как по величине заряда, так и в соответствии со стерическими факторами.

Проведенный анализ позволил выявить некоторые особенности протекания реакции алкоголиза при синтезе компонентов биотоплива из растительного масла по реакции нуклеофильного замещения. Показаны преимущества и недостатки того или иного нуклеофильного реагента (метиловый и этиловый спирты, метилаты калия и натрия, этилат калия) в указанной реакции.

Важным аспектом, который необходимо учитывать при адаптации дизелей к работе на метиловом эфире рапсового масла, является повышенная вязкость МЭРМ. Отличия вязкости нефтяного ДТ и МЭРМ приводят к трансформации процессов топливоподачи, впрыскивания и распыливания топлива, что, в свою очередь, сказывается на показателях топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля. В связи с этим актуальными представляются исследования вязкости и вязкостно-температурных характеристик как самого метилового эфира рапсового масла, так и его смесей с нефтяным дизельным топливом.

В уже проведенных исследованиях вязкостных характеристик смесевых жидкостей использованы различные теоретические подходы, основанные на описании взаимодействия компонентов смеси [14-16]. Но получение полностью теоретических формул, описывающих вязкостные характеристики смесей нефтяного ДТ с другими топливами, практически невозможно в связи с их сложным составом. Поэтому для описания вязкостных характеристик смесевых топлив обычно

используют полуэмпирические формулы [16]. В предлагаемом исследовании использованы известный логарифмический и предложенный авторами алгебраический аппроксимационные подходы для аппроксимации зависимостей кинематической вязкости смесевых биотоплив от их температуры и состава [17]. К первому подходу относится метод Ниссана и Грюнберга [16], позволяющий определить кинематическую вязкость смеси в виде:

$$\ln \nu = \sum_i^n x_i \ln \nu_i + \sum_i^n \sum_{j>i}^n x_i x_j D_{ij} + \sum_i^n \sum_{j>i}^n \sum_{k>j}^n x_i x_j x_k D_{ijk} + \dots + D_{ij\dots n} \prod_i^n x_i, \quad (1)$$

где x_i, x_j, x_k – объемные концентрации компонентов смеси (в данном исследовании рассматриваются смеси только двух компонентов: МЭРМ с его концентрацией в смеси x_1 и нефтяного ДТ с концентрацией x_2); ν_i – вязкость i -го компонента (ν_1 – вязкость МЭРМ, ν_2 – вязкость нефтяного ДТ); ν – вязкость смесового топлива; $D_{ij}, D_{ijk}, \dots, D_{ij\dots n}$ – коэффициенты, зависящие от температуры и концентрации компонентов в смеси.

Значения коэффициента D_{ij} рассчитывались по следующим формулам:

$$D_{ij} = \frac{A_{ij}}{t} + B_{ij}, \quad D_{ijk} = \frac{A_{ijk}}{t^2} + B_{ijk}, \quad D_{ij\dots n} = \frac{A_{ij\dots n}}{t^n} + A_{ij\dots n}. \quad (2)$$

Коэффициенты $A_{ij}, A_{ijk}, \dots, A_{ij\dots n}$ и $B_{ij}, B_{ijk}, \dots, B_{ij\dots n}$, входящие в выражения (2), определялись методом наименьших квадратов. Они могут быть заданы либо постоянными, либо зависящими от концентрации компонентов в смеси. Их взаимосвязь с концентрацией МЭРМ в нефтяном ДТ определяется коэффициентом корреляции R . В этом случае описание зависимости вязкости смеси от температуры может быть задано в виде нелинейной суммы:

$$\ln \nu_t = A_t + \frac{B_t}{t} + \frac{C_t}{t^2} + D_t t \quad \text{или} \quad \nu_t = e^{A_t + \frac{B_t}{t} + \frac{C_t}{t^2} + D_t t}, \quad (3)$$

где коэффициенты A_t, B_t, C_t и D_t также могут быть заданы либо постоянными, либо зависящими от концентрации компонентов в смеси.

Во втором, предложенном авторами, методе аппроксимации кинематической вязкости смесового топлива использована следующая формула:

$$\nu = \sum_i^n \left[x_i \left(A_i + \frac{B_i}{t} + C_i \right) + \frac{x_i}{2 - x_i} \left(D_i + \frac{E_i}{t} \right) \right], \quad (4)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i, E_i – постоянные коэффициенты, относящиеся к i -му компоненту и определяемые методом наименьших квадратов.

С использованием этих двух методов получены аппроксимационные формулы для вязкости смесей МЭРМ и нефтяного ДТ различного состава.

При аппроксимации кинематической вязкости двухкомпонентных смесей МЭРМ и нефтяного ДТ использованы экспериментальные данные табл. 1 по кинематической вязкости ν смесей МЭРМ (с вязкостью ν_1) с нефтяным ДТ (с вязкостью ν_2) и при различных температурах [3].

С использованием рассмотренных методов аппроксимации экспериментальных данных определены зависимости кинематической вязкости смесового топлива от его состава и температуры. При аппроксимации кинематической вязкости смесей МЭРМ и нефтяного ДТ логарифмическим методом формула (1) получает вид:

$$\ln \nu = x_1 \ln \nu_1 + x_2 \ln \nu_2 + x_1 x_2 D_{12} \quad \text{или} \quad \nu = \nu_1^{x_1} \nu_2^{x_2} e^{x_1 x_2 D_{12}}, \quad (5)$$

где коэффициент D_{12} зависит от температуры t :

$$D_{12} = \frac{A}{t} + B.$$

Коэффициенты A и B для каждой из рассматриваемых смесей определены с использованием метода наименьших квадратов (табл. 2). Полученные значения коэффициентов A и B являются функцией концентрации МЭРМ x_1 в смеси с ДТ. Зависимость коэффициентов A и B от x_1 определяется следующими полиномами второго порядка:

$$A = KA_1 x_1^2 + KA_2 x_1 + KA_3 \quad \text{и} \quad B = KB_1 x_1^2 + KB_2 x_1 + KB_3.$$

Коэффициенты KA_1 , KA_2 , KA_3 и KB_1 , KB_2 , KB_3 вычислены с использованием полученных значений коэффициентов A и B методом наименьших квадратов и оказались равными: $KA_1 = 75,23$; $KA_2 = 67,29$; $KA_3 = 9,46$; $KB_1 = -0,03$; $KB_2 = -0,19$; $KB_3 = 0,3$. Коэффициент корреляции коэффициента A и x_1 равен 0,7882, а коэффициент корреляции B и x_1 равен $-0,9998$ (см. табл. 2).

Для определения кинематической вязкости смесового топлива логарифмическим методом при различных температурах с использованием формул (5) сначала необходимо получить коэффициенты формулы (3) для вязкостно-температурных характеристик МЭРМ и ДТ. Эти коэффициенты рассчитаны методом наименьших квадратов на основе исходных данных табл. 1 по вязкости чистых топлив. Полученная формула для определения кинематической вязкости МЭРМ при различных температурах имеет вид:

$$\ln \nu_1 = 1,9809 + 7,4315/t - 0,013t.$$

Таблица 1

Кинематическая вязкость смесей МЭРМ и нефтяного ДТ

Температура, °С	Топлива				
	ДТ	30% МЭРМ +70% ДТ	50% МЭРМ +50% ДТ	75% МЭРМ +25% ДТ	МЭРМ
20	3,83	4,87	5,62	6,93	8,00
50	2,11	2,67	2,97	3,68	4,25
70	1,67	2,10	2,38	2,74	3,10

Таблица 2

Коэффициенты A и B для рассматриваемых смесей

Коэффициент	Смеси			Коэффициент корреляции
	30% МЭРМ +70% ДТ	50% МЭРМ +50% ДТ	75% МЭРМ +25% ДТ	
A	-3,9563	-5,3790	1,3056	0,7882
B	0,2446	0,2021	0,1453	-0,9998

Аналогично получена формула для кинематической вязкости нефтяного ДТ:

$$\ln v_2 = 0,9387 + 11,4511/t - 0,084t.$$

При этом формула (5) для аппроксимации кинематической вязкости смеси МЭРМ и нефтяного ДТ логарифмическим методом принимает вид:

$$\ln v = x_1 \ln v_1 + x_2 \ln v_2 + x_1 x_2 (A/t + B), \quad (6)$$

где

$$A = 75,23x_1^2 + 67,29x_1 + 9,46 \text{ и } B = -0,03x_1^2 - 0,19x_1 + 0,3.$$

Полученная логарифмическим методом по формуле (6) зависимость кинематической вязкости смеси МЭРМ и нефтяного ДТ от температуры представлена на рис. 9. Отклонение аппроксимационных кривых от исходных экспериментальных данных сравнительно невелико – полученные логарифмическим методом зависимости вязкости смесей от температуры хорошо совпадают с экспериментальными точками. Представленные в табл. 3 оценки точности полученных аппроксимационных вязкостных характеристик исследуемых смесевых биотоплив показывают, что квадратичная ошибка этих характеристик составляет 0,0701 мм²/с, а относительная максимальная погрешность не превышает 3,24 %. Таким образом, полученные логарифмическим методом аппроксимационные кривые могут быть использованы для описания вязкостно-температурных характеристик исследуемых смесевых топлив.

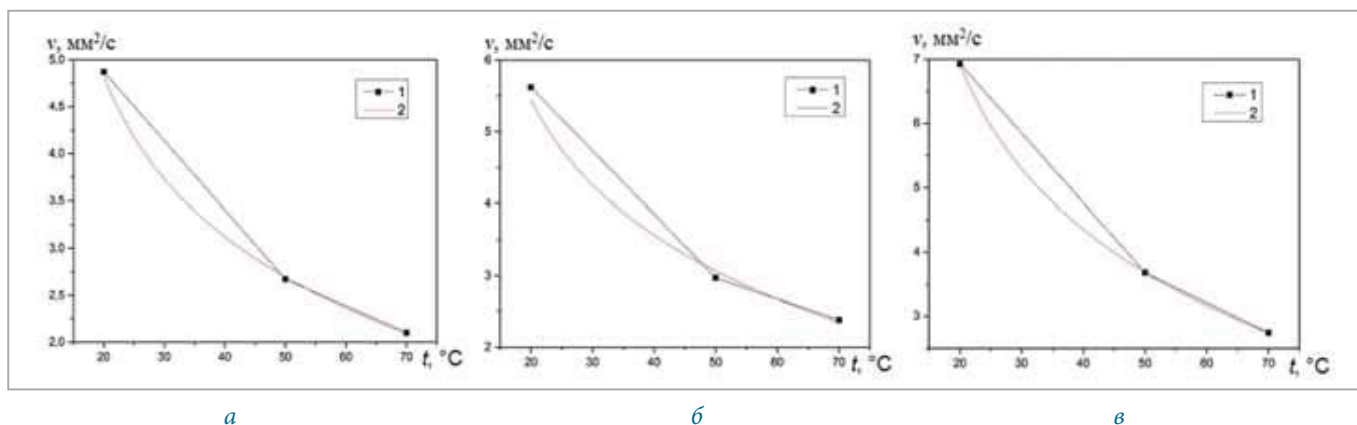


Рис. 9. Экспериментальные (1) и полученные логарифмическим методом (2) аппроксимационные вязкостно-температурные характеристики смесей МЭРМ и ДТ различного состава: а – 30 % МЭРМ и 70 % ДТ; б – 50 % МЭРМ и 50 % ДТ; в – 75 % МЭРМ и 25 % ДТ

Таблица 3

Оценка точности аппроксимации вязкостно-температурных характеристик исследуемых смесевых биотоплив различными методами

Метод аппроксимации	Виды погрешностей		
	Относительная максимальная погрешность, %	Среднее отклонение, мм ² /с	Средняя квадратичная ошибка, мм ² /с
Логарифмический	3,24	0,0441	0,0701
Алгебраический	3,54	0,0349	0,0431

При аппроксимации вязкостно-температурных кривых рассматриваемых смесей алгебраическим методом использована формула (4) в виде:

$$\nu = x_1 \left(A_1 + \frac{B_1}{t} + C_1 \right) + \frac{x_1}{2 - x_1} \left(D_1 + \frac{E_1}{t} \right) + x_2 \left(A_2 + \frac{B_2}{t} + C_2 \right) + \frac{x_2}{2 - x_2} \left(D_2 + \frac{E_2}{t} \right). \quad (7)$$

Коэффициенты формулы (7) определены методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных табл. 1. Результаты этих расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов формулы (7)

A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2
2,8712	141,9076	-0,0269	0,7195	-42,6620	1,9956	-17,9412	-0,0036	-0,8338	72,9984

С использованием формулы (7) и данных табл. 4 построены зависимости кинематической вязкости смесей МЭРМ и нефтяного ДТ от температуры. На рис. 10 представлены исходные экспериментальные данные по вязкости исследуемых смесей и полученные для них алгебраическим методом зависимости $\nu = f(t)$ по формуле (7). Наилучшее приближение к экспериментальным данным дает вязкостно-температурная кривая, рассчитанная для смеси 50 % МЭРМ и 50 % нефтяного ДТ. Наибольшее отклонение аппроксимационного значения от экспериментальных данных отмечено при температуре 50 °С, однако разница между ними составляет всего 0,105 мм²/с. Для смесей 30 % МЭРМ с 70 % ДТ и 75 % МЭРМ с 25 % ДТ полученные аппроксимационные зависимости также хорошо совпадают с экспериментальными точками.

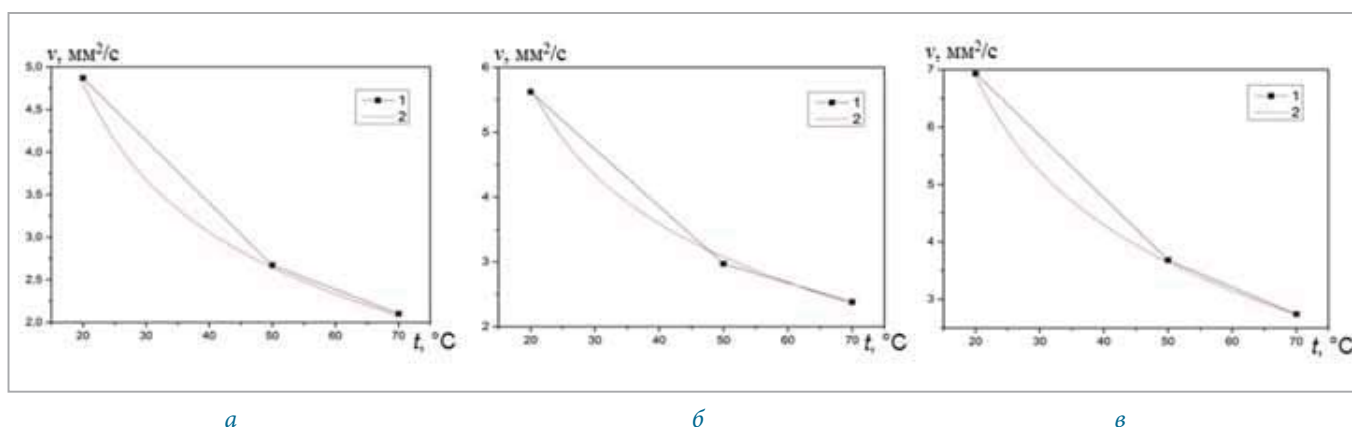


Рис. 10. Экспериментальные (1) и полученные алгебраическим методом (2) аппроксимационные вязкостно-температурные характеристики смесей МЭРМ и ДТ различного состава: а – 30 % МЭРМ и 70 % ДТ; б – 50 % МЭРМ и 50 % ДТ; в – 75 % МЭРМ и 25 % ДТ

Представленные в табл. 3 данные о точности такой алгебраической аппроксимации экспериментальных данных по вязкости смесей МЭРМ и нефтяного ДТ показывают, что средняя квадратичная ошибка этой аппроксимации равна 0,0431 мм²/с, а относительная максимальная погрешность не превышает 4,54 %. При этом следует отметить, что точность аппроксимации экспериментальных точек логарифмическим и алгебраическим методами сопоставима.

Рассмотренные физико-химические свойства МЭРМ и его смесей с нефтяным ДТ, несомненно, оказывают влияние на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля, работающего на этих топливах. Об этом свидетельствуют данные работ [3, 4] по дизелю Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), работающему на смесях нефтяного ДТ и МЭРМ с объемным содержанием последнего от 0 (чистое ДТ) до 60 %. Результаты испытаний этого дизеля на рассматриваемых смесевых топливах на режимах внешней скоростной характеристики и 13-режимного испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН представлены в табл. 5. Они свидетельствуют о том, что увеличение содержания МЭРМ в смесевом биотопливе $C_{\text{МЭРМ}}$ от 0 до 60 % приводит к некоторому росту часового расхода топлива G_p , но из-за меньшей теплоты сгорания МЭРМ и его смесей с ДТ крутящий момент дизеля M_e при этом изменяется незначительно.

Таблица 5

Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на различных смесевых топливах

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

При увеличении содержания МЭРМ в смесевом топливе $C_{\text{МЭРМ}}$ отмечен рост удельного эффективного расхода топлива g_e , вызванный меньшей теплотой сгорания МЭРМ. Однако при увеличении $C_{\text{МЭРМ}}$ в диапазоне от 0 до 20 % изменение

эффективного КПД η_e не превышало 1 %, что соизмеримо с точностью измерения расхода топлива. Дальнейший рост $C_{MЭPM}$ (до 40 и 60 %) сопровождался увеличением значения η_e , свидетельствующим о повышении эффективности сгорания таких смесевых топлив.

Увеличение концентрации МЭРМ в смесевом топливе $C_{MЭPM}$ приводило к значительному снижению дымности ОГ K_x . Так, при росте $C_{MЭPM}$ с 0 до 60 % дымность K_x монотонно снижалась: на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ – примерно в 2,6 раза (с 18 до 7 % по шкале Хартриджа), на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ – в 2,5 раза (с 21 до 8,5 %), на режиме минимальной частоты вращения с $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$ – в 2 раза (с 36 до 18 %). Такое снижение дымности ОГ обусловлено наличием в составе МЭРМ атомов кислорода, участвующего в процессе окисления углеводородов нефтяного дизельного топлива.

Использование смесевых топлив оказывает влияние на выбросы с ОГ оксидов азота NO_x и монооксида углерода CO. При увеличении содержания МЭРМ в смесевом топливе $C_{MЭPM}$ с 0 до 20 % интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы оксидов азота e_{NO_x} снизились с 7,286 до 6,542 г/(кВт·ч), то есть на 10,2 %, а при дальнейшем увеличении $C_{MЭPM}$ до 40 и 60 % отмечен некоторый рост e_{NO_x} соответственно до 7,441 и 7,759 г/(кВт·ч).

Эти значения превышают показатели выбросов при работе на нефтяном ДТ – 7,286 г/(кВт·ч), что объясняется увеличением максимальных температур сгорания, вызванным указанным выше ростом эффективности сгорания рассматриваемых смесевых биотоплив.

При росте содержания МЭРМ в смесевом топливе $C_{MЭPM}$ с 0 до 60 % отмечено монотонное снижение удельных массовых выбросов монооксида углерода e_{CO} с 2,834 до 1,932 г/(кВт·ч), или почти в 1,5 раза.

Зависимость выбросов углеводородов СН от содержания МЭРМ в смесевом топливе имеет более сложный характер. При увеличении $C_{MЭPM}$ с 0 до 5 % выброс e_{CH} уменьшился с 0,713 до 0,626 г/(кВт·ч), или на 12,2 %, а при дальнейшем увеличении $C_{MЭPM}$ до 20 % выброс e_{CH} возрос до 0,727 г/(кВт·ч), то есть практически до исходного значения $e_{CH} = 0,713 \text{ г/(кВт·ч)}$. С ростом $C_{MЭPM}$ до 40 и 60 % выброс e_{CH} вновь несколько уменьшился до значений 0,692 и 0,681 г/(кВт·ч) соответственно. Но в целом влияние содержания МЭРМ в смесевом топливе на выброс углеводородов незначительно.

Проведенные испытания показали возможность существенного улучшения показателей дизеля при его работе на рассматриваемых смесях. Даже незначительная добавка МЭРМ в нефтяное дизельное топливо (в количестве 5 или 10 %) позволяет заметно улучшить показатели токсичности ОГ дизеля практически без внесения в их конструкцию каких-либо изменений. Поэтому с учетом регулярного ужесточения требований к токсичности ОГ дизелей перспектива использования МЭРМ в качестве кислородсодержащей присадки к ДТ становится более чем реальной.

Литература

1. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 791 с.

2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.
3. Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. – 536 с.
4. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания / В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Зыков и др. – М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. – 292 с.
5. Техника и технологии производства и переработки растительных масел: Учебное пособие для вузов / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», 2010. – 96 с.
6. Карташевич А.Н., Плотников С.А., Товстыка В.С. Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях. – Киров: «Авангард», 2014. – 144 с.
7. Савельев Г.С. Производство и использование биодизельного топлива из рапса. – М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2007. – 96 с.
8. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. – 240 с.
9. Семёнов В.Г. Биодизель. Физико-химические показатели и эколого-экономические характеристики работы дизельного двигателя. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 251 с.
10. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орстик, Н.Т. Сорокин, В.Ф. Федоренко и др. Под ред. В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ «Росинформгротех», 2008. – 404 с.
11. Стопский В.С., Ключкин В.В., Андреев Н.В. Химия жиров и продуктов переработки жирового сырья: Учебник для вузов. – М.: Колос, 1992. – 285 с.
12. Тютюнников Б.Н., Гладкий Ф.Ф., Бухштаб З.И. Химия жиров: Учебник для вузов. – М.: Колос, 1992. – 448 с.
13. Березов Т.Т., Коровкин Б.Ф. Биологическая химия: Учебник для вузов. – М.: Медицина, 1998. – 704 с.
14. Eyring H. Viscosity, Plasticity and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates // The Journal of Chemical Physics. – 1936. – Vol. 4. – №. 4. – P. 283-291.
15. McAllister R.A. The Viscosity of Liquid Mixtures // AIChE Journal. – 1960. – Vol. 6. – №. 3. – P. 427-431.
16. Dominguez M., Pardo J.I., Gascon I.G., Royo F.M., Urieta J.S. Viscosities of the Ternary Mixture (2-butanol+n-hexane+1-butylamine) at 298.15 and 313.15 K // Fluid Phase Equilibria. – 2000. – Vol. 169. – №. 2. – P. 277-292.
17. Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Са Бовэнь. Вязкостные характеристики многокомпонентных смесевых биотоплив на основе растительных масел // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 6. – С. 33-49.

Математическая модель действительного и теоретического циклов дизеля с высоким наддувом

С.И. Козлов, доктор технических наук,

С.В. Люгай, директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

В статье предлагается новый способ аналитического интегрирования дифференциального уравнения баланса теплоты в цилиндре дизеля при сгорании топлива. Получены уравнения, устанавливающие непосредственную связь давления и температуры газа с углом поворота коленчатого вала и характеристикой топливоподачи, в том числе уравнения для расчета максимальных давления и температуры сгорания и индикаторных параметров дизеля – индикаторного КПД и среднего индикаторного давления. Показана определяющая роль характеристики топливоподачи в развитии процесса тепловыделения. Получены обобщенные эмпирические зависимости, устанавливающие связь относительного количества теплоты, выделившейся за основной период сгорания, и продолжительности всего процесса сгорания с фактором динамичности цикла.

Ключевые слова:

баланс теплоты, давление и температура в цилиндре дизеля, фактор динамичности цикла, количество теплоты, индикаторные показатели дизеля.

В практике современного двигателестроения широкое распространение получили методы расчета параметров рабочего процесса и выходных показателей двигателя (N_e , g_e , T_t и др.) с использованием различных экспоненциальных уравнений, описывающих скорость тепловыделения в цилиндре дизеля [1-4]. Практическое использование таких уравнений делает необходимым априорно задавать целый ряд параметров (показатели качества сгорания m , углы поворота коленчатого вала, соответствующие окончанию тепловыделения φ_e , максимальным скоростям сгорания по кинетическому и диффузионному механизмам, и т.д.), достоверная оценка которых с опорой на статистический материал реальна лишь для двигателей средней быстроходности ($n = 1000 \dots 1500 \text{ мин}^{-1}$), работающих с давлениями наддува $p_k = 0,2 \dots 0,3 \text{ МПа}$. В современной теории ДВС отсутствуют какие-либо надежные сведения о протекании процесса тепловыделения в цилиндре быстроходного дизеля при высоких давлениях наддува $p_k = 0,4 \dots 0,7 \text{ МПа}$ и сопротивлениях на впуске и выпуске, поэтому использование таких методик при проектировании высокофорсированных транспортных турбопоршневых двигателей (ТПД) требует известной осторожности.

Уравнения для расчета индикаторного процесса обычно дополняются уравнениями квазистатического определения показателей газообмена [3].

Использование таких методик расчета выходных показателей проектируемого ТПД неудобно и затруднительно (особенно на начальной стадии проектирования),

так как необходима привязка к конструктивным параметрам двигателя (S , D , фазы газораспределения, диаграммы время-сечения клапанов и др.). Эти параметры, вообще говоря, на этом этапе проектирования относятся к варьируемым параметрам, а при изменении хотя бы одного геометрического размера все расчетные работы необходимо повторять заново.

Отметим также, что методы расчета индикаторных показателей дизеля с использованием экспоненциальных зависимостей $\frac{dx}{d\varphi} \frac{dx}{d\varphi} = ff(\varphi\varphi)$ предполагают,

что за время задержки воспламенения τ , вся цикловая подача топлива подана в цилиндр и подготовлена к сгоранию, что явно противоречит действительной физической картине процесса [4]. Эти методы совершенно не учитывают влияние на процесс тепловыделения продолжительности топливоподачи и показателя динамичности цикла, которые в быстроходных дизелях являются решающими факторами для получения достаточно высокого индикаторного КПД [3]. Единственный применяемый в инженерной практике метод расчета, учитывающий факторы, управляющие индикаторным процессом, предложен профессором Разлейцевым Н.Ф. [5]. Но и этот метод требует задания большого количества априорной информации (включая геометрические размеры КС, место установки форсунки и пр.), и его применение целесообразно на стадии разработки технического проекта двигателя.

В теории двигателей с воспламенением от сжатия [6], наддувом и противодействием на выпуске в качестве действительного принимают цикл, составленный из двух политроп сжатия и расширения со средними показателями соответственно n_1 и n_2 , кривой $p(V)$, отвечающей конкретному закону активного тепловыделения $x(V)$, и изохоры $V=\text{const}$ с изменением давления в процессе выпуска от p_b до p_r . В четырехтактном двигателе в действительный цикл входит также диаграмма насосных ходов, однако затрачиваемую на совершение этих ходов работу обычно включают в потери, учитываемые механическим КПД двигателя, и при расчете индикаторной работы цикла во внимание не принимают [6].

В данной работе для определения численных значений параметров и коэффициентов (продолжительность сгорания топлива, относительное количество теплоты, выделившейся за основной период сгорания, коэффициент использования теплоты, характеризующий тепловые потери вследствие теплообмена со стенками камеры и недогорания топлива, и др.) использованы индикаторные диаграммы, полученные экспериментально при испытании специального опытного одноцилиндрового дизеля.

На стадии эскизного проектирования должны быть проработаны основные системы ТПД, в частности, система топливоподачи. Для определения возможных путей получения индикаторного КПД, который необходим для обеспечения проектных параметров и характеристик будущего ТПД, надо знать расчетное значение требуемой продолжительности подачи топлива, диапазон изменения $\varphi_{\text{впр}}$, вид кривой топливоподачи и связь ее параметров с кривой тепловыделения. Кроме того, диаграмма изменения давления и температуры рабочего тела в цилиндре дизеля необходима для проведения расчетов прочности конструкции будущего двигателя.

Существующие теоретические методы расчета индикаторных диаграмм с экспоненциальными кривыми скорости тепловыделения не позволяют получить эту информацию для дизелей с высоким наддувом. Поэтому возникла

необходимость в разработке метода расчета индикаторного процесса транспортного дизеля, который более полно отражал бы влияние основных факторов на развитие процесса тепловыделения в цилиндре и, кроме того, был бы нагляден для проведения анализа рабочего процесса.

Прежде всего надо сказать, что регистрация давления в цилиндре и анализ полученных индикаторных диаграмм – пока единственный доступный способ изучения процесса тепловыделения в дизеле. При этом сигнал датчика давления, расположенного в определенной точке камеры сгорания, отождествляется со средним мгновенным давлением газа в текущем объеме цилиндра. Обоснованием этого служит тот факт, что скорость распространения газодинамических возмущений, обусловленных самовоспламенением неравномерно распределенной в камере сгорания рабочей смеси, достаточно велика (500...600 м/с), процесс выравнивания давления в объеме камеры сгорания происходит быстро, и распределение давления принимается равномерным. Допущение о постоянстве давления во всем объеме камеры сгорания в каждый момент времени является по существу основой для построения современной теории рабочего процесса и применяемых в практическом двигателестроении методов расчета рабочего процесса дизеля. Только в таком аспекте приобретают физический смысл закон тепловыделения, определяемые из индикаторных диаграмм и используемые при анализе рабочего процесса и теплонапряженности конструкции дизеля максимальное давление сгорания, скорость нарастания давления и др.

Зависимость давления газа от изменения объема цилиндра на участке сгорания топлива в действительном цикле дизеля описывается дифференциальным уравнением баланса теплоты в цилиндре [3]

$$\frac{dp}{dV} = V_h g_{цл} H_u \psi \frac{k-1}{V} \frac{dx}{dV} - \frac{kp}{V}. \quad (1)$$

Изменение скорости тепловыделения $dx/dV = f(\varphi)$ обычно задают в виде экспоненциальных функций угла поворота коленчатого вала φ . Расчет ведут путем численного интегрирования этого уравнения на небольших участках изменения объема dV (примерно один градус по углу поворота коленчатого вала). Вследствие чего такой способ расчета малоудобен для аналитического исследования особенностей протекания процесса тепловыделения в цилиндре дизеля и определения на основе этого индикаторных показателей двигателя (p_p , η_i), а также максимальных давления и температуры сгорания, которые важно знать для оценки тепловой и механической напряженности деталей и узлов двигателя.

Уравнение (1) можно проинтегрировать в квадратурах и получить решение, устанавливающее в явном виде зависимости давления, температуры и удельной работы газа от угла поворота коленчатого вала. Для этого всю кривую тепловыделения $x = f(\varphi)$ разобьем на три характерных участка (рис. 1).

Участок $s - d$ – от начала воспламенения топлива до ВМТ; участок $d - h$ – от ВМТ до начала резкого замедления скорости тепловыделения $dx/d\varphi$ (точка h); $h - f$ – участок замедленного горения топлива (то есть от точки h до окончания тепловыделения в точке f). Затем кривую тепловыделения на каждом участке аппроксимируем уравнением вида

$$x = a\varepsilon_x + b\varepsilon_x^m, \quad (2)$$

где ε_x – текущее значение степени сжатия (на участке $s-d$) или степени расширения

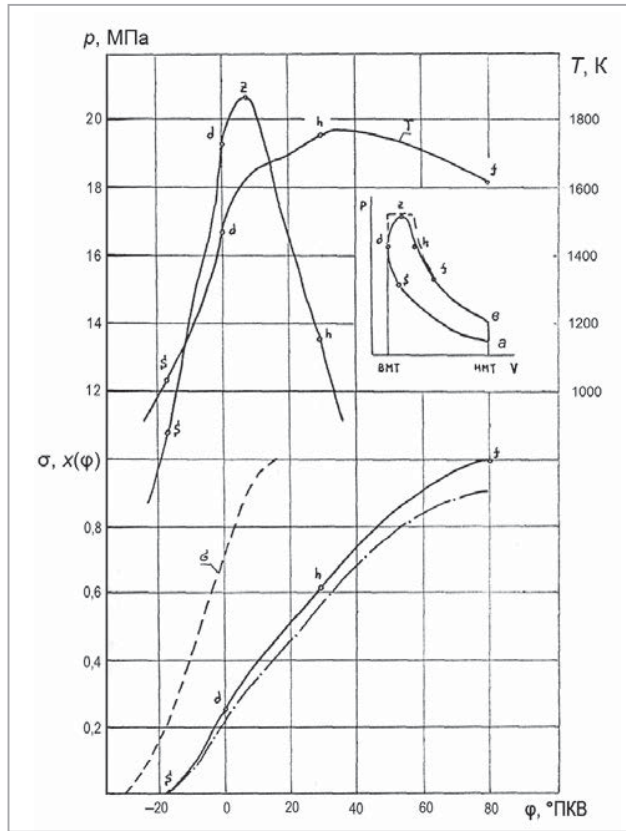


Рис. 1. Индикаторные диаграммы $p(\varphi)$ и $T(\varphi)$, кривые подачи топлива и тепловыделения опытного дизеля с высоким наддувом: $\epsilon = 10, n = 2200 \text{ мин}^{-1}, p_k = 0,589 \text{ МПа}, \alpha = 1,88$, s, d, h, z, f – характерные точки цикла; - - - - характеристика подачи топлива $\sigma(\varphi)$; — кривая тепловыделения $x(\varphi)$; - - - - кривая теплоиспользования $x_i(\varphi)$

для участка $s - d$

$$\epsilon_s^{m_1} \left(\frac{x_{cp}}{x_d} - \epsilon_{cp} \right) + \epsilon_s \epsilon_{cp}^{m_1} = \epsilon_s \frac{x_{cp}}{x_f};$$

для участка $d - h$

$$\epsilon_h^{m_2} (x_{cp} - x_d \epsilon_{cp}) + \epsilon_{cp}^{m_2} (x_d \epsilon_h - x_h) = x_{cp} \epsilon_h - \epsilon_{cp};$$

для участка $h - f$

$$\left(\frac{\epsilon_h}{\epsilon_f} \right)^{m_3} \cdot (x_{cp} \epsilon_f - x_f \epsilon_{cp}) + \left(\frac{\epsilon_{cp}}{\epsilon_f} \right)^{m_3} \cdot (x_f \epsilon_h - x_h \epsilon_f) = x_{cp} \epsilon_h.$$

Эти уравнения трансцендентны и при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм решаются относительно m_1, m_2, m_3 каким-либо методом

(на участках за ВМТ), равное отношению рабочего объема цилиндра в данный момент времени к объему камеры сгорания V_c при положении поршня в ВМТ.

Правомерность такой аппроксимации иллюстрирует сопоставление расчетных и экспериментальных кривых тепловыделения $x = f(\epsilon_x)$ на разных участках сгорания (рис. 2), проведенное для экспериментального одноцилиндрового двигателя с высоким наддувом.

Величины a и b , постоянные для каждого участка кривой тепловыделения, рассчитываются по следующим уравнениям:

участок $s - d$

$$a = -x_d \frac{\epsilon_s^{m_1}}{\epsilon_s - \epsilon_s^{m_1}}; b = x_d \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - \epsilon_s^{m_1}};$$

участок $d - h$

$$a = \frac{x_h - x_d \epsilon_h^{m_2}}{\epsilon_h - \epsilon_h^{m_2}}; b = x_d \frac{\epsilon_h - x_h}{\epsilon_h - \epsilon_h^{m_2}};$$

участок $h - f$

$$a = \frac{x_h \epsilon_f^{m_3} - x_f \epsilon_h^{m_3}}{\epsilon_h \epsilon_f^{m_3} - \epsilon_f \epsilon_h^{m_3}}; b = \frac{x_f \epsilon_h - x_h \epsilon_f}{\epsilon_h \epsilon_f^{m_3} - \epsilon_f \epsilon_h^{m_3}}.$$

Здесь m_1, m_2, m_3 – показатели степени в уравнении (2) на первом, втором и третьем участках кривой $x = f(\epsilon_x)$, величины которых вычисляются по координатам крайних ($x_d, x_h, x_f, \epsilon_s, \epsilon_h, \epsilon_f$) и средних (x_{cp}, ϵ_{cp}) точек экспериментальных кривых тепловыделения на каждом участке. Из уравнения (2) получим:

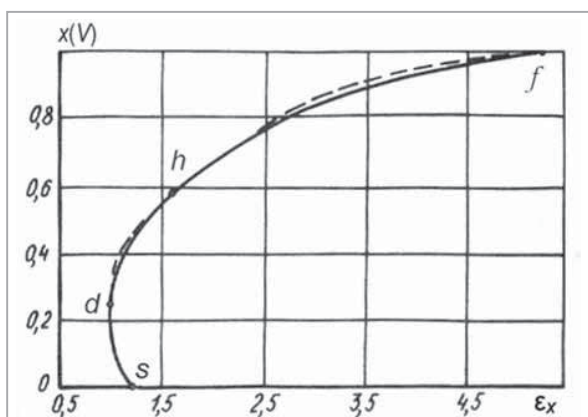


Рис. 2. Аппроксимация кривой тепловыделения в дизеле:
 $\varepsilon = 10$; $p_x = 0,589$ МПа; $\alpha = 1,88$; $\theta = 46^\circ$;
 ——— эксперимент;
 - - - - - расчет при $m_1 = -10$, $m_2 = -100$, $m_3 = 1,1$

итерационного поиска. Обобщенные уравнения для расчета m_1 , m_2 , m_3 , а также для определения границ участков сгорания будут получены позже.

Значения степеней сжатия и расширения ε_s , ε_h , ε_f находятся с помощью функции

$$f(\varphi) = 0,5 \left(\frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} - \cos \varphi + \frac{\lambda_{ш}}{2} \sin^2 \varphi \right),$$

где $\lambda_{ш}$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Углы φ отсчитываются от ВМТ, причем процессу сжатия воздуха в цилиндре соответствуют углы $\varphi < 0$, а процессу расширения газа – углы $\varphi > 0$.

Полагая в последнем равенстве угол φ последовательно равным φ_s , φ_h , φ_f найдем, что

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= (\varepsilon - 1)f(\varphi_s); \\ \varepsilon_h &= (\varepsilon - 1)f(\varphi_h); \\ \varepsilon_f &= (\varepsilon - 1)f(\varphi_f). \end{aligned}$$

Для двухтактных двигателей с клапанно-щелевой и петлевой продувками функция $f(\varphi)$ вычисляется как

$$f(\varphi) = \frac{0,5}{1-\psi_{п}} \left(\frac{\varepsilon_r+1}{\varepsilon_r-1} - \cos \varphi + \frac{\lambda_{ш}}{2} \sin^2 \varphi \right),$$

где $\psi_{п}$ – относительная доля хода поршня, занятая продувочными и выпускными окнами;

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon - 1}{1 - \psi_{п}} + 1 \text{ – геометрическая степень сжатия дизеля.}$$

Началу сжатия воздуха в цилиндре двухтактного дизеля с впускными окнами соответствует угол поворота коленчатого вала, определяемый уравнением

$$\varphi_a \varphi_a = \arccos \left\{ \frac{1}{\lambda_{ш}} \left[-1 + \sqrt{1 - 2\lambda_{ш} \left(1 - 2\psi_{п} - \frac{\lambda_{ш}}{2} \right)} \right] \right\}.$$

При всех значениях угла $\varphi \leq \varphi_a$ давление и температура воздуха в цилиндре двухтактного дизеля остаются примерно постоянными и равными p_a , t_a .

Подставим в уравнение (1) значение производной с учетом (2)

$$\frac{dx}{dV} = \frac{1}{V_c} \cdot \frac{dx}{d\varepsilon_x} = \frac{1}{V_c} (a + bm\varepsilon_x^{m-1})$$

и преобразуем исходное дифференциальное уравнение к виду

$$d(PV^k) = F(\varepsilon_x) d\varepsilon_x.$$

После интегрирования этого уравнения получим расчетные формулы для определения давления газов в любой момент сгорания топлива в следующем виде:

для участка $s - d$

$$p = A_p \frac{k_r - 1}{k_r} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_x} \right)^{k_r} \right] + \frac{B_p (k_r - 1) m_1}{k_r + m_1 - 1} \left[\varepsilon_x^{m_1 - 1} - \frac{\varepsilon_s^{k_r + m_1 - 1}}{\varepsilon_x^{k_r}} \right] + P_s \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_x} \right)^{k_r}, \quad (3)$$

где $p_s = p_a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \right)^{n_1}$;

для участка $d - h$

$$p = A_p \frac{k_r - 1}{k_r} (1 - \varepsilon_x^{-k_r}) + \frac{B_p (k_r - 1) m_2}{k_r + m_2 - 1} (\varepsilon_x^{m_2 - 1} - \varepsilon_x^{-k_r}) + p_d \varepsilon_x^{-k_r}, \quad (4)$$

где p_d – давление в точке d , вычисляемое по уравнению (3) при $\varepsilon_x = 1$;

для участка $h - f$

$$p = A_p \frac{k_r - 1}{k_r} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_x} \right)^{k_r} \right] + \frac{B_p (k_r - 1) m_3}{k_r + m_3 - 1} \left(\varepsilon_x^{m_3 - 1} - \frac{\varepsilon_h^{m_3 - 1 + k_r}}{\varepsilon_x^{k_2}} \right) + p_h \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_x} \right)^{k_r}, \quad (5)$$

где p_h – давление в точке h , вычисляемое по уравнению (4) при $\varepsilon_x = \varepsilon_h$.

В уравнениях (3)...(5) показатель адиабаты k_r и постоянные A_p и B_p рассчитываются отдельно для каждого участка по формулам

$$A_p = a g_{\text{цл}} H_u \Psi (\varepsilon - 1),$$

$$B_p = b g_{\text{цл}} H_u \Psi (\varepsilon - 1),$$

где $g_{\text{цл}}$ – цикловая подача топлива, отнесенная к одному литру рабочего объема цилиндра (в граммах);

$$\Psi = 0,9 \left(\frac{\alpha}{1,9} \frac{433}{T_k} \right)^{0,125} \left(1,1 - \frac{0,1}{\left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^{0,63}} \right)$$

– коэффициент, характеризующий степень использования выделившейся теплоты в действительном цикле дизеля (учитывает потери теплоты вследствие диссоциации продуктов сгорания, теплоотдачи в стенки цилиндра и недогорания топлива).

Средние показатели адиабат расширения газа для каждого участка рассчитываются по формуле, аппроксимирующей зависимости k_r от температуры и состава продуктов сгорания жидкого углеводородного топлива в камере сгорания дизеля [7]

$$k_r = 1,259 - \frac{0,041}{\alpha} x_{\text{cp}} + \frac{0,0766 - 0,0055 \frac{x_{\text{cp}}}{\alpha}}{10^{-3} T_{\text{cp}}}, \quad (6)$$

где x_{cp} , T_{cp} – средние значения относительного тепловыделения и температуры газа на рассматриваемом участке сгорания.

Значение α рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{p_k}{RT_k} \cdot \frac{\eta_v}{g_{\text{цл}} l_0} = \frac{p_a}{RT_a} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{\xi}{1 + \gamma_r} \cdot \frac{1}{g_{\text{цл}} l_0}.$$

Коэффициент дозарядки $\xi = 1 + 0,04 \left(\frac{n}{2000} \right)^{2,4}$ в этом уравнении характеризует

относительное приращение количества воздуха при наполнении за период запаздывания закрытия впускного клапана, а параметр $\gamma_r \gamma_r$ – коэффициент остаточных газов в цилиндре двигателя.

Для четырехтактных двигателей в работе [6] получено аналитическое соотношение для расчета величины $\frac{1}{1 + \gamma_r}$

$$\frac{1}{1 + \gamma_r} = \frac{1}{\varepsilon \cdot k} \left[\varepsilon - \nu \frac{p'_p}{p_a} + (k - 1) \beta' (\varepsilon - 1) \mu_{\text{вп}} \right],$$

где ν – коэффициент уменьшения внутренней энергии остаточных газов вследствие продувки; β' – относительное увеличение объема, занимаемого воздухом, из-за поджатия остаточных газов; p'_p – давление в цилиндре в начале продувки; $\mu_{\text{вп}}$ – коэффициент работы наполнения.

Коэффициент β' практически не зависит от p_k и T_k и в среднем равен $\beta' = 1,07 \dots 1,1$.

Согласно опытным данным, коэффициент ν в зависимости от p_k изменяется в соответствии с уравнением

$$\nu = 0,83 - 4,119 \cdot 10^{-3} \cdot p_k + 6,732 \cdot 10^{-4} \cdot p_k^2 - 1,226 \cdot 10^{-5} \cdot p_k^3$$

при $p_k < 0,343$ МПа;

$\nu = 0,97$ при $p_k \geq 0,343$ МПа.

Данные, полученные при высоком наддуве опытного одноцилиндрового двигателя указывают на то, что с ростом p_k и T_k уменьшаются относительные потери давления на впуске в цилиндр, то есть возрастает отношение p_a/p_k . Так, при увеличении p_k с 0,344 до 0,707 МПа отношение p_a/p_k увеличилось примерно на 2 %. Заметно увеличивается и коэффициент работы наполнения $\mu_{\text{вп}}$ с повышением p_k и T_k . Закономерность изменения $\mu_{\text{вп}}$ в зависимости от p_k соответствует уравнению

$$\mu_{\text{вп}} = 0,806 + 1,373 \cdot 10^{-3} \cdot p_k + 5,771 \cdot 10^{-5} \cdot p_k^2 - 9,432 \cdot 10^{-7} \cdot p_k^3$$

при $p_k \leq 0,49$ МПа;

$\mu_{\text{вп}} = 0,905$ при $p_k > 0,49$ МПа.

Для двухтактных дизелей профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана С.Г. Рогован предложил формулу для определения коэффициента очистки η_s (следовательно, и γ_r)

[8]. Коэффициент очистки $\eta_s = \frac{1}{1 + \gamma_r}$ характеризует относительное содержание

продувочного воздуха в рабочем заряде цилиндра двигателя после продувки.

$\gamma_r = \frac{1}{\eta_s} - 1$ – коэффициент остаточных газов.

В теоретическом цикле двигателя $\xi = 1$, а $\gamma_r = 0$, поэтому

$$\alpha = \frac{p_a}{RT_a} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{g_{\text{цл}} l_0}.$$

Текущие значения температуры газа на каждом участке сгорания топлива определяются из уравнения состояния, написанного для произвольных точек x и a :

$$T_x = \frac{p_x}{p_a} \cdot \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon} \cdot \frac{T_a}{1 + \frac{x}{\alpha l_0}}. \quad (7)$$

С помощью уравнения (4) определим степень расширения и соответствующий ей угол поворота коленчатого вала, при которых давление в процессе сгорания достигает своего максимального значения (то есть p_2). Для этого

продифференцируем уравнение (4) по ε_x и приравняем нулю производную $dp/d\varepsilon_x$. Решив полученное уравнение относительно $\varepsilon_x = \varepsilon_z$, найдем

$$\varepsilon_z = \left\{ -\frac{k_2}{m_2 - 1} + B_p \frac{k_2 - 1 + m_2}{(k_2 - 1)m_2(m_2 - 1)} [p_d k_2 - A_p(k_2 - 1)] \right\}^{\frac{1}{m_2 - 1 + k_2}} \quad (8)$$

и угол φ_z , соответствующий этой степени сжатия (то есть моменту достижения p_z). Если двучлен в фигурных скобках меньше нуля, принимают $\varepsilon_z = 1$.

Подставив найденное значение $\varepsilon_x = \varepsilon_z$ в уравнение (4), вычислим максимальное давление сгорания p_z и степень повышения давления при сгорании:

$$p_z = A_p \frac{k_2 - 1}{k_2} (1 - \varepsilon_z^{-k_2}) + \frac{B_p(k_2 - 1)m_2}{k_2 + m_2 - 1} (\varepsilon_z^{m_2 - 1} - \varepsilon_z^{-k_2}) + p_d \varepsilon_z^{-k_2}; \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{p_z}{p_a \varepsilon^{n_1}}.$$

Процесс сжатия от точки a до точки s считаем политропным, показатель которого вычисляется по уравнению баланса теплоты в ходе сжатия воздуха с остаточными газами [3]

$$n_1 = 1 + R \frac{T_s - T_a}{c_{vs}T_s - c_{va}T_a - \xi_a \frac{H_u}{(1 + \gamma_r)\alpha L_0}},$$

где $R=8,31 \cdot 10^{-3}$ МДж/моль; $L_0=0,495$ моль/кг.

$$\xi_a = 0,02 \left(\frac{P_k}{0,6}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{T_k}{433}\right)^{2,6} \cdot \left(\frac{\alpha}{1,8}\right)^{-2,1} \cdot \left(\frac{180 - \varphi_{впр}}{150}\right)^2 \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^{1,8}$$

– коэффициент, характеризующий теплообмен в цилиндре в процессе сжатия.

В теоретическом цикле принимается $n_1=k_1$ на участке $a - s$:

$$k_1 = 1,438 - 0,104 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ас\text{ ср}};$$

$$T_{ас\text{ ср}} = 0,5 (T_a + T_s).$$

Процесс расширения газов в цилиндре дизеля, начиная с точки f , предполагается также политропным с показателем [3]

$$n_2 = 1 + R \frac{T_f - T_b}{c_{vs}T_f - c_{vb}T_b - \xi_b \frac{H_u}{M_2 + \alpha L_0 \gamma_r}},$$

где $\xi_b = 0,035 \cdot \left(\frac{P_k}{0,6}\right)^{-0,55} \cdot \left(\frac{T_k}{433}\right)^{2,8} \cdot \left(\frac{\alpha}{1,8}\right)^{-2,3} \cdot \left(\frac{180 - \varphi_{впр}}{150}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^{1,8}$

– коэффициент, характеризующий теплоотвод в процессе расширения от точки f до точки b ;

$M_2 = \frac{c}{12} + \frac{H}{2} + (\alpha - 0,21)L_0$ – число молей продуктов сгорания.

Давление и температура газа в точке b цикла следующие:

$$p_b = P_f \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon}\right)^{n_2},$$

$$T_b = T_f \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon} \right)^{n_2 - 1}.$$

В теоретическом цикле показатель политропы n_2 принимают равным среднему показателю адиабаты расширения k_r на этом участке, вычисляемому по формуле (6) при $x_{cp} = 1$ и $T_{cp} = 0,5(T_f + T_b)$.

Проинтегрируем общее дифференциальное уравнение работы газа $dL = pdV$ на каждом участке с использованием уравнений (3)...(5) и получим уравнения удельных работ, отнесенных к одному литру рабочего объема цилиндра, на характерных участках цикла двигателя:

участок $a - s$ – сжатие газа с давления p_a до давления в момент воспламенения топлива p_s ,

$$L_{as} = - \frac{P_a \varepsilon}{(n_1 - 1)(\varepsilon - 1)} \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \right)^{n_1 - 1} - 1 \right]; \quad (10)$$

участок $s - d$ – сгорание топлива с поджатием рабочего тела от давления p_s до давления p_d

$$L_{sd} = - \frac{1}{\varepsilon - 1} \left[A_L (\varepsilon_s - 1) + (p_s - A_L - B_L \varepsilon_s^{m_1 - 1}) \frac{\varepsilon_s^{k_r} - \varepsilon_s}{k_r - 1} + \frac{B_L}{m_2} (\varepsilon_s^{m_1} - 1) \right]; \quad (11)$$

участок $d - h$ – сгорание топлива с повышением давления рабочего тела на линии расширения от p_d до p_h и последующим снижением до p_h

$$L_{dh} = \frac{1}{\varepsilon - 1} \left[A_L (\varepsilon_h - 1) + (p_d - A_L - B_L) \frac{1 - \varepsilon_h^{1 - k_r}}{k_r - 1} + \frac{B_L}{m_2} (\varepsilon_h^{m_2} - 1) \right]; \quad (12)$$

участок $h - f$ – сгорание топлива при понижении давления газа на линии расширения от p_h до p_f

$$L_{hf} = \frac{1}{\varepsilon - 1} \left[A_L (\varepsilon_f - \varepsilon_h) + (p_h - A_L - B_L \varepsilon_h^{m_3 - 1}) \frac{\varepsilon_h - \varepsilon_f^{1 - k_r} \varepsilon_h^{k_r}}{k_r - 1} + \frac{B_L}{m_3} (\varepsilon_f^{m_3} - \varepsilon_h^{m_3}) \right]; \quad (13)$$

участок $f - b$ – расширение газа после завершения сгорания с давления p_f до давления p_b

$$L_{fb} = \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{P_f \varepsilon_f}{n_2 - 1} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^{1 - n_2} \right]. \quad (14)$$

Знак минус перед правой частью уравнений (10) и (11) означает, что на данных участках работа в цикле двигателя отрицательна.

В уравнениях (11)...(13) постоянные A_L и B_L вычисляются отдельно для каждого участка сгорания по формулам

$$A_L = A_p \frac{k_r - 1}{k_r},$$

$$B_L = \frac{B_p m (k_r - 1)}{k_r + m - 1}.$$

Суммарные удельные работы сжатия и расширения за цикл равны

$$L_{сж} = L_{as} + L_{sd} \text{ и } L_{рас} = L_{dh} + L_{hf} + L_{fb}.$$

Поскольку значения работ сжатия и расширения, получаемые за цикл, были отнесены к 1 л рабочего объема V_h , то

$$P_i = L_i = L_{рас} + L_{сж}. \quad (15)$$

Индикаторный КПД двигателя

$$\eta_i = \frac{p_i}{g_{цл} H_u} \quad (16)$$

Полагая, что $n_1=k_1$, $n_2=k_p$, а коэффициент использования теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, $\psi=1$, получим уравнения для расчета удельной работы, среднего индикаторного давления и термического КПД теоретического цикла двигателя с рассматриваемой кривой тепловыделения $x(V)$, но без тепловых потерь (так называемый «адиабатный» двигатель).

Для теоретического цикла двигателя с подводом теплоты при $V = \text{const}$, а затем при $p = \text{const}$, при котором достигаются максимально возможные значения среднего индикаторного давления и индикаторного КПД цикла при рассматриваемых значениях ε , α и λ , уравнения работ сжатия и расширения приобретают следующий вид:

$$L_{сж} = L_{ac} = -\frac{P_k}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k_1 - 1} (\varepsilon^{k_1} - 1) \quad (17)$$

Работа расширения на участке $c - f$ (при $p = \text{const}$)

$$L_{cf} = \frac{P_f}{\varepsilon_f - 1} (\varepsilon_f - 1), \quad (18)$$

где $p_f = p_z = p_k \varepsilon^{k_1 \lambda}$;

$\varepsilon_f = \frac{\mu_0 T_z}{T_c \lambda}$ – степень предварительного расширения газа;

$\mu_0 = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32}}{\alpha L_0}$ – коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси.

Для дизельного топлива среднего состава $C=0,870$; $H=0,126$; $O=0,004$

$$\mu_0 = 1 + \frac{0,064}{\alpha}$$

Зная ε_f , определим с помощью кривой зависимости $\varepsilon_x = f(\varphi_x)$ и угол φ_f , соответствующий точке f , то есть концу тепловыделения в цикле $V = \text{const}$, $p = \text{const}$.

Максимальная температура цикла находится из уравнения баланса теплоты в камере сгорания при положении поршня, соответствующем углу φ_f :

$$c'_{pf} \mu_0 T_z = c'_{pz} \mu_0 T_z = \frac{H_u}{\alpha l'_0} + [c'_{pc} + R(\lambda - 1)] \cdot T_c, \quad (19)$$

где

$$T_c = T_k \varepsilon^{k_1 - 1};$$

$$c'_{pc} = (6,63 + 0,61 \cdot 10^{-3} T_c) \cdot 4,187 \cdot 10^{-3};$$

$$c'_{pz} = \left[6,49 + \frac{0,88}{\alpha} + 10^{-3} \cdot T_z \left(0,67 - \frac{0,09}{\alpha} \right) \right] \cdot 4,187 \cdot 10^{-3}.$$

Уравнение (19) решается итерационным методом; в первом приближении

$$c'_{pc} = 29 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \text{ а } c'_{pz} = 32 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

При анализе экспериментальных индикаторных диаграмм установлено, что угол поворота коленчатого вала, соответствующий температуре $T_{z \max}$, равен $\varphi_z = (1,4 \dots 1,6) \varphi_h$.

Работа расширения на участке $f-b$ (см. рис. 1)

$$L_{fb} = \frac{P_z \varepsilon_f}{(k_2 - 1)(\varepsilon - 1)} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^{1-k_1} \right]. \quad (20)$$

Суммарная работа расширения

$$L_{\text{рас}} = L_{cf} + L_{fb}. \quad (21)$$

Среднее индикаторное давление и индикаторный КПД теоретического цикла с подводом теплоты при $V = \text{const}$ и $p = \text{const}$:

$$P_t = (L_{cf} + L_{fb}) + L_{ac}, \quad (22)$$

$$\eta_t = \frac{P_t}{g_{\text{цпл}} H_u}. \quad (23)$$

Выразив в уравнениях (17), (18) и (20) давления в характерных точках цикла через соответствующие температуры с помощью уравнения состояния газа $p_x = \frac{p_k}{T_k} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_x} \cdot T_x$, получим выражение для термического КПД теоретического цикла с подводом теплоты при $V = \text{const}$, $p = \text{const}$ в другой, более распространенной в теории двигателей внутреннего сгорания форме [3]:

$$\eta_t = \frac{R \alpha l_0}{H_u} \left[\frac{\mu_0 T_z}{k_1 - 1} (k_1 - \delta^{1-k_1}) - \lambda T_c - \frac{T_c - T_k}{k_1 - 1} \right], \quad (24)$$

где

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon T_c \lambda}{\mu_0 T_z} - \text{степень последующего расширения газа.}$$

Приведенные выше уравнения получены для четырехтактного цикла дизеля. Они же используются и в расчетах зависимостей $p(V)$, $T(V)$ и индикаторных параметров p_i и η_i двухтактного дизеля.

Окончание в следующем номере журнала.

Литература

1. Теория двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Дьяченко Н.Х. – М.: Машиностроение, 1974. – 552 с.
2. Жуков В.П., Павличенко А.М. Исследование характеристик тепловыделения ДВС по нагрузочной характеристике с помощью методов нелинейного программирования. Труды НКИ, вып. 12. – Николаев: НКИ, 1976. – С. 50-55.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учеб. для ВТУЗов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
4. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 275 с.

5. Разлейцев Н.Ф., Семёнов Н.Г., Левкович С.А. Расчет процесса сгорания в тепловозном дизеле: Респ. межвед. науч.-техн. сборник, вып. 27. – Харьков: Выща школа, 1978. – 82 с.
6. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. – М.: Машгиз, 1963. – 638 с.
7. Толстов А.И. Процессы смесеобразования и сгорания в быстроходных двигателях с воспламенением от сжатия при наддуве. Труды ВНИТОЭ. – Машгиз, 1954.
8. Роганов С.Г. Аналитическое определение коэффициента остаточных газов в двухтактных двигателях // Известия вузов. – 1964. – № 7. – С. 15-18.

«Газпром» расширит сеть АГНКС на ключевых автомобильных трассах

В рамках VII Петербургского международного газового форума заместитель председателя правления ПАО «Газпром» Виталий Маркелов и председатель правления Государственной компании «Российские автомобильные дороги» («Автодор») Сергей Кельбах подписали план мероприятий (Дорожную карту) по развитию газозаправочной инфраструктуры на федеральных автомобильных дорогах, входящих в зону ответственности «Автодора».

В соответствии с Дорожной картой «Газпром» планирует построить новые автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС, осуществляют заправку сжиженным природным газом) и криогенные автозаправочные станции (КриоАЗС, заправка как сжиженным, так и компримированным природным газом) на автотрассах с большими грузо- и пассажирскими потоками, а также рядом с крупными транспортными узлами. «Автодор» будет предоставлять земельные участки для газозаправочных объектов «Газпрома».

На первом этапе (до 2021 г.) планируется строительство газозаправочной инфраструктуры на автотрассе М-11 «Москва – Санкт-Петербург» (является участком международных транспортных маршрутов «Север – Юг» и «Европа – Западный Китай»). Создание АГНКС и КриоАЗС также предполагается на трассах М-1 «Беларусь», М-4 «Дон» и Центральной кольцевой автомобильной дороге в Москве и Московской области (ЦКАД). В результате может быть создано до 32 газозаправочных объектов.

На втором этапе (2021-2030 гг.) предусмотрено строительство газозаправочных станций на трассах М-1 «Беларусь», М-3 «Украина», ЦКАД, участках маршрутов «Европа – Западный Китай» (по направлению Москва – Казань – российско-казахстанская граница) и «Запад – Восток» (по направлению Казань – Омск – Дальний Восток). Таким образом, планируется создание еще до 29 газозаправочных объектов.

В тот же день Виталий Маркелов и Сергей Кельбах подписали Соглашение о сотрудничестве по созданию газозаправочной инфраструктуры на строящейся в Москве и Московской области Центральной кольцевой автомобильной дороге. Документ содержит план-график строительства сети газозаправочных объектов на ЦКАД. Они могут быть размещены как на территории многотопливных автозаправочных станций, так и отдельно. Всего к 2025 году «Газпром» планирует построить девять таких объектов. В свою очередь «Автодор» обеспечит выделение земельных участков.

Стороны также договорились о разработке предложений по строительству и эксплуатации на трассе ЦКАД многофункциональных зон дорожного сервиса, включая инфраструктуру для развития велоспорта и велотуризма.

Справка

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

Государственная компания «Автодор» создана в 2009 году. Цель компании – развитие сети скоростных платных магистральных автомобильных дорог, привлечение внебюджетных инвестиций, развитие объектов дорожного сервиса.

Управление информации ПАО «Газпром»

Математическое моделирование производственных процессов АГНКС

А.А. Евстифеев, начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», к.т.н.

В процессе проектирования и реконструкции объектов заправки транспорта компримированным природным газом возникает необходимость выбора наиболее рациональной конструкции автомобильной газонаполнительной компрессорной станции. В данной работе предложен математический аппарат, позволяющий оценить различные варианты компоновочных решений станции с соблюдением принципа объемного газового баланса, заключающегося в формировании единого непрерывного газового канала с постоянной или переменной производительностью. Для достижения поставленной задачи были разработаны математические модели основных технологических блоков станции и газопроводов. Предложены правила формирования итоговой математической модели станции.

Ключевые слова:

компримированный природный газ,
автомобильная газонаполнительная компрессорная станция,
математическая модель, эффективность производственного процесса.

Одним из применяемых при проектировании методов выбора оптимальной конструкции АГНКС является принцип объемного газового баланса, заключающийся в формировании единого непрерывного газового канала с постоянной или переменной производительностью.

В ряде работ и патентов, опубликованных научными коллективами проектных и научно-исследовательских организаций [1-28], предлагается применять концепцию заправки передвижных автомобильных газовых заправщиков (ПАГЗ) и крупных потребителей на АГНКС по остаточному принципу. Эта концепция сформулирована в работах [15-18]. Суть ее заключается в применении на АГНКС новых методов и средств организации процесса выдачи сжатого газа на заправочные колонки. Наиболее подробно такой подход описан в работе [16]. Исходя из необходимости соблюдения уравнения баланса природного газа в развитие этого подхода были предложены новая схема коммутации газораздаточных линий на АГНКС, алгоритмы управления компрессорным оборудованием станции и технические решения по организации динамического секционного аккумулятора газа с регулировкой по объему.

В процессе принятия решения по наиболее эффективной конструкции АГНКС необходимо выполнить следующие задачи:

- сформировать эквивалентную обобщенную структурную схему производственного объекта с выделением ключевых элементов и линий коммутации;
- построить интегральную математическую модель объекта производства компримированного природного газа (КПГ), используя формализованные

привила построения;

- провести моделирование режимов работы для предлагаемых конструктивных решений станции;
- выполнить процедуру принятия решения, используя принципы эффективности.

В этой статье приводятся данные по математическому моделированию режимов работы элементов возможных конструктивных решений производства КПП на станции.

В общем виде схема большинства действующих АГНКС представлена на рисунке.

В данной схеме можно выделить газовый канал, состоящий из последовательно соединенных блоков сжатия и аккумуляции газа, заправочных колонок и газопроводов высокого давления с запорной арматурой. В рамках разработки интегральной математической модели необходимо провести моделирование отдельных блоков и газопроводов высокого давления, что позволит сформировать наиболее полную и адекватную модель производственных процессов.

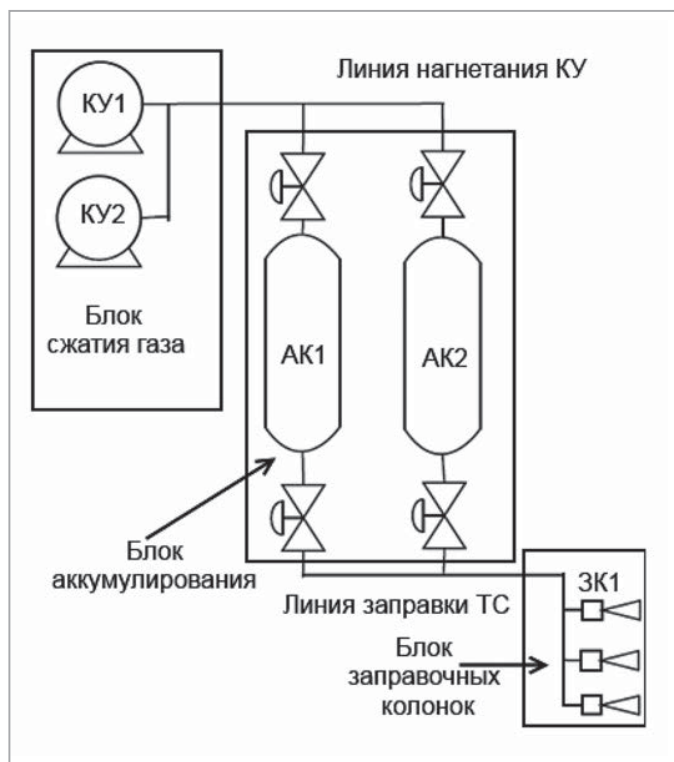
Математическая модель рабочего процесса линии нагнетания с использованием многоступенчатых поршневых компрессоров

Математическая модель рабочего процесса многоступенчатого поршневого компрессора представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих изменение параметров газа

в проточной части ступеней и межступенчатых коммуникациях.

Основы системы дифференциальных уравнений, характеризующих изменение параметров газа в отдельных полостях ступеней, описаны и проанализированы в работе Б.С. Фотина [1]. В данной работе при рассмотрении процессов, связанных с линией нагнетания, из-за изменения параметров в межступенчатых коммуникациях, соединяющих следующие друг за другом ступени, и сложности процессов, происходящих в межступенчатых коммуникациях, будут приняты следующие допущения:

- в межступенчатых коммуникациях перемещается газ, подчиняющийся законам идеального газа;
- движение газа в трубопроводах и аппаратах коммуникаций одномерное и дозвуковое;
- коэффициенты трения газа о стенки и местных сопротивлений, определенные в стационарном потоке, справедливы и для нестационарного течения;



Обобщенная модель классической АГНКС с общей линией нагнетания и общей линией заправки

- коэффициенты теплоотдачи, определяемые из критериальных уравнений, полученных для стационарного потока, справедливы и для нестационарного течения;
 - внешнее воздействие на поток газа происходит только через границы системы.
- Исходные уравнения для математической модели процессов в многоступенчатом компрессоре приведены ниже.

1. Уравнение неразрывности потока сжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{c}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа; τ – время; c – скорость; x – координата вдоль оси трубопровода; A – площадь поперечного сечения трубопровода.

2. Уравнение изменения количества движения с учетом гидравлического трения и местных сопротивлений:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + c \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\Phi, \quad (2)$$

где $\Phi = \left(\lambda + \zeta \frac{D}{\Delta x} \right) (c |c| / 2D)$; λ – коэффициент гидравлического трения;

ζ – коэффициент местного сопротивления, D – гидравлический диаметр.

Потери давления на трение $\Delta p = \lambda \rho l c^2 / 2D$ и местное сопротивление $\Delta p_{\zeta} = \zeta \rho l c^2 / 2$.

Потери давления от местных сопротивлений учитываются как потери от гидравлического трения на шаге сетки Δx путем ввода условного эквивалентного коэффициента трения λ_{ζ} , который определяется из условия равенства потерь давления на гидравлическое трение на участке Δx потерям на местные сопротивления.

Величина λ_{ζ} определяется по формуле

$$\lambda_{\zeta} = \zeta D \Delta x.$$

3. Уравнение энергии:

$$q + c \Phi = \frac{du}{d\tau} + p \frac{d}{d\tau} \left(\frac{1}{\rho} \right). \quad (3)$$

Здесь u – удельная внутренняя энергия газа; $c\Phi$ – подвод тепла трения к газу; q – удельный тепловой поток, который определяется по формуле

$$q = \frac{\alpha \Pi_{\text{пер}} dx (T_{\text{ст}} - T)}{\rho A dx} = \frac{\alpha \Pi_{\text{пер}} (T_{\text{ст}} - T)}{\rho A},$$

где α – коэффициент теплоотдачи; $\Pi_{\text{пер}}$ – периметр поперечного сечения трубы; $T_{\text{ст}}$ – температуры стенки (определяется по эмпирическим формулам: для трубопроводов всасывания $T_{\text{ст}} = 1,1 T_{\text{н}}$; для трубопроводов нагнетания $T_{\text{ст}} = 0,9 T_{\text{н}}$; по длине холодильника температура изменяется по линейному закону). Значение α определяется из критериальных уравнений типа

$$\text{Nu} = 0,13 \text{Re}^{0,33} \text{Gr}^{0,1} \quad (\text{при ламинарном течении}),$$

$$\text{Nu} = 0,018 \text{Re}^{0,8} \quad (\text{при турбулентном течении}),$$

где Re – определяется по мгновенным скоростям; Nu , Re , Gr – критерии Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа.

Числа Re и величины α в нестационарном потоке отличаются от квазистационарного из-за пульсации давлений и скоростей газа. Однако для практических расчетов

температуры газа с учетом и без учета влияния пульсаций на теплообмен оказывались в конечном итоге очень близкими.

4. Уравнение состояния:

$$p = \rho RT . \tag{4}$$

Система уравнений (1)...(4) включает в себя нелинейные дифференциальные уравнения с частными производными. Для ее решения использовался конечно-разностный метод Куранта, Изакона и Риса, или, как его еще называют, метод «пространственных разностей вперед и назад». Разности во времени берутся вперед, а разности по пространству для каждого уравнения выбираются вперед и назад согласно наклону соответствующей характеристики. Этот метод требует приведения уравнений к характеристическому виду. Система уравнений в характеристической форме запишется в следующем виде:

$$\text{для } \frac{\partial x}{\partial t} = c + a$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + (c + a) \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a \left[\frac{\partial c}{\partial \tau} + (c + a) \frac{\partial c}{\partial x} \right] = (q + c\Phi)\rho(k - 1) - \rho a\Phi - \rho a^2 \frac{cdA}{Adx};$$

$$\text{для } \frac{\partial a}{\partial t} = c - a$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + (c - a) \frac{\partial p}{\partial x} - \rho a \left[\frac{\partial c}{\partial \tau} + (c + a) \frac{\partial c}{\partial x} \right] = (q + c\Phi)\rho(k - 1) + \rho a\Phi - \rho a^2 \frac{cdA}{Adx};$$

$$\text{для } \frac{\partial x}{\partial t} = c$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + c \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} + c \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (q + c\Phi)\rho(k - 1);$$

где $\rho = p / RT$.

Если система дифференциальных уравнений в частных производных принадлежит к гиперболическому типу и записана в характеристическом виде

$$\sum_{i=1}^{i=n} a^{ij} (c_j^i + H^j c_x^i) = B^j ,$$

то она аппроксимируется разностной схемой.

В конечных разностях уравнение колебаний в коммуникациях примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{P_{k,i+1} - P_{k,i}}{\Delta \tau} + (c_{k,i} + a_{k,i}) \frac{P_{k,i} - P_{k-1,i}}{\Delta x} + \rho_{k,i} a_{k,i} \left[\frac{c_{k,i+1} - c_{k,i}}{\Delta \tau} + (c_{k,i} + a_{k,i}) \frac{c_{k,i} - c_{k-1,i}}{\Delta x} \right] = \\ & = [q + c_{k,i} \Phi_{k,i}] \rho_{k,i} (k - 1) - \rho_{k,i} a_{k,i} \Phi_{k,i} - \rho_{k,i} a_{k,i}^2 \frac{c_{k,i}}{A_{k,i}} \frac{A_{k,i} - A_{k,i+1}}{\Delta x}; \\ & \frac{P_{k,i+1} - P_{k,i}}{\Delta \tau} + (c_{k,i} - a_{k,i}) \frac{P_{k+1,i} - P_{k,i}}{\Delta x} - \rho_{k,i} a_{k,i} \left[\frac{c_{k,i+1} - c_{k,i}}{\Delta \tau} + (c_{k,i} - a_{k,i}) \frac{c_{k+1,i} - c_{k,i}}{\Delta x} \right] = \\ & = (k - 1) \rho_{k,i} [q + c_{k,i} \Phi_{k,i}] - \rho_{k,i} a_{k,i} \Phi_{k,i} - \rho_{k,i} a_{k,i}^2 \frac{c_{k,i}}{A_{k,i}} \frac{A_{k-1,i} - A_{k,i}}{\Delta x}. \end{aligned} \tag{5}$$

Для уравнения (5) будет два аналога, так как коэффициент H может менять свой знак в зависимости от величины $c_{k,i}$:

при $c_{k,i} \geq 0$

$$\frac{p_{k,i+1} - p_{k,i}}{\Delta \tau} + c_{k,i} \frac{p_{k,i} - p_{k-1,i}}{\Delta x} - a_{k,i}^2 \left(\frac{\rho_{k,i+1} - \rho_{k,i}}{\Delta \tau} + c_{k,i} \frac{\rho_{k,i+1} - \rho_{k,i}}{\Delta x} \right) =$$

$$= (q_{k,i} + c_{k,i} \Phi_{k,i}) \rho_{k,i} (k-1); \quad (6)$$

при $c_{k,i} \leq 0$

$$\frac{p_{k,i+1} - p_{k,i}}{\Delta \tau} + c_{k,i} \frac{p_{k+1,i} - p_{k,i}}{\Delta x} - a_{k,i}^2 \left(\frac{\rho_{k,i+1} - \rho_{k,i}}{\Delta \tau} + c_{k,i} \frac{\rho_{k+1,i} - \rho_{k,i}}{\Delta x} \right) =$$

$$= (q_{k,i} + c_{k,i} \Phi_{k,i}) \rho_{k,i} (k-1). \quad (7)$$

Разностные уравнения относительно $p_{k,i+1}$, $c_{k,i+1}$, $\rho_{k,i+1}$ записаны в неявной форме. Для удобства дальнейшего расчета решим их относительно искомым величин:

$$p_{k,i+1} = p_{k,i} - \frac{c_{k,i} + a_{k,i}}{2} [p_{k,i} - p_{k-1,i} + \rho_{k,i} a_{k,i} (c_{k,i} - c_{k-1,i})] \frac{\Delta t}{\Delta x} - \frac{c_{k,i} - a_{k,i}}{2} \times$$

$$\times [p_{k+1,i} - p_{k,i} - \rho_{k,i} a_{k,i} (c_{k+1,i} - c_{k,i})] \frac{\Delta t}{\Delta x} + (q_{k,i} + c_{k,i} \Phi_{k,i}) \rho_{k,i} (k-1) \Delta t -$$

$$- \rho_{k,i} a_{k,i}^2 \frac{c_{k,i}}{A_{k,i}} \frac{\Delta A_{k,i}}{\Delta x} \Delta t; \quad (8)$$

$$c_{k,i+1} = c_{k,i} - \frac{c_{k,i} + a_{k,i}}{2} \left(\frac{p_{k,i} - p_{k-1,i}}{\rho_{k,i} a_{k,i}} + c_{k,i} - c_{k-1,i} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{c_{k,i} - a_{k,i}}{2} \times$$

$$\times \left(\frac{p_{k+1,i} - p_{k,i}}{\rho_{k,i} a_{k,i}} + c_{k+1,i} - c_{k,i} \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} - \Phi_{k,i} \Delta t. \quad (9)$$

Математическая модель движения газа в линии высокого давления

Физико-математическая модель гидравлического расчета движения газа по всей области турбулентного режима в газопроводе среднего и высокого давления рассчитывается по формуле:

$$\frac{(p_{\text{абсн}}^2 - p_{\text{абск}}^2)}{l} = 1,4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{k_s}{d} + \frac{1922vd}{Q_n} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{Q^2 \rho}{d^5} \right),$$

где $p_{\text{абсн}}$ – абсолютное давление в начале газопровода, МПа; $p_{\text{абск}}$ – абсолютное давление в конце газопровода, МПа; l – длина рассчитываемого участка газопровода, м.

Местные гидравлические сопротивления в газопроводах и вызываемые ими потери давления обусловлены изменением значений и направления движения газа, а также наличием мест разделения и слияния потоков. Источниками местных сопротивлений являются переходы с одного размера газопровода на другой, колена, отводы, тройники, крестовины, компенсаторы, запорная, регулирующая и предохранительная арматура, а также другие устройства, приводящие к сжатию, расширению и изгибу потоков газа. Падение давления в местных сопротивлениях, перечисленных выше, допускается корректировать путем увеличения

расчетной длины газопровода на 5...10 %. Расчетная длина наружных надземных и внутренних газопроводов определяется по формуле

$$l = l_d + \sum \zeta l_3$$

где l_d – действительная длина газопровода, м; $\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений участка газопровода длиной l_d ; l_3 – условная эквивалентная длина (м) прямолинейного участка газопровода, потери давления на котором равны потерям давления в местном сопротивлении со значениями коэффициента $\zeta=1$.

Эквивалентная длина газопровода в зависимости от режима движения газа в нем определяется по формулам, приведенным в таблице.

Режим движения газа	Эквивалентная длина, м
Ламинарный	$l_3 = 5,5 \cdot 10^{-6} \frac{Q}{v}$
Критический	$l_3 = \sqrt[3]{\frac{1794 \cdot d^4 v}{Q}}$
Турбулентный	$l_3 = \frac{d}{11 \cdot \left(\frac{k_3}{d} + \frac{1922vd}{Q_H} \right)^{0.25}}$

В работе [3] приведены таблицы с коэффициентами местных сопротивлений при турбулентном движении газа и номограммы получения коэффициентов для различных диаметров и давлений газа в газопроводе. В проектах АГНКС в линии подачи газа используются трубы с внутренним диаметром 40 и 14 мм.

Математическая модель заправки транспортных средств КПП

1. Уравнение работы сжатия при заправке

Минимальная работа сжатия подаваемого на заправочное устройство природного газа в ходе заполнения баллона транспортного средства (ТС) при наличии блока охлаждения КПП, обеспечивающего поддержание постоянной температуры ($T_r = \text{const}$), и постоянном геометрическом объеме заполняемого баллона ТС ($V_{\text{бал}} = \text{const}$), может быть вычислена по формуле

$$L_{\min} = \frac{k}{k-1} \frac{RT_{\text{вс}}}{z} \left[\left(\frac{p_p}{p_{\text{вс}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

где L_{\min} – минимальная возможная работа сжатия, необходимая для заправки транспортного средства; k – показатель адиабаты сжимаемого газа; R – универсальная газовая постоянная; $T_{\text{вс}}$ – температура на входе компрессорной установки; z – коэффициент сжимаемости природного газа при температуре T_r и давлении p_p ; $p_{\text{вс}}$ и p_p – давления всасывания компрессора и рабочее газобаллонной установки.

При использовании аккумуляторного блока АГНКС работа, затрачиваемая на заполнение аккумуляторной емкости с давлением $p_{ак}$, выражается формулой

$$L_{ак} = \frac{k}{k-1} \frac{RT_{вс}}{z} \left[\left(\frac{p_{ак}}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

Поскольку, как показано в работе [1], использование общего аккумулятора приводит к непроизводительному расходованию 50 % затрачиваемой энергии, используется двух- или трехступенчатая заправка транспортных средств. При этом давление в аккумуляторных емкостях поддерживается на меньшем уровне в сравнении с рабочим давлением транспортного средства. На практике широкое распространение получила многоступенчатая заправка, предполагающая наличие нескольких аккумуляторных блоков с разным объемом и рабочим давлением. Заправка сначала производится из аккумулятора большей емкости с меньшим давлением, а затем из аккумулятора меньшей емкости и большим давлением.

Применение такого подхода позволяет значительный объем заправляемого в транспортное средство природного газа сжимать до меньшего (промежуточного) давления, вследствие чего уменьшаются затраты энергии на сжатие. При условии соблюдения ограничений, описанных выше, работа по сжатию для многоступенчатого способа заправки описывается выражением вида

$$L_{мс} = \frac{k}{k-1} \frac{RT_{вс}}{z} \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\left(\frac{p_i}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\},$$

где $L_{мс}$ – минимальная возможная работа сжатия при многоступенчатой заправке, необходимая для заправки ТС; n – число ступеней заправки; p_i – давление в аккумуляторной емкости i -й ступени заправки.

Известны работы, предлагающие использовать при заправке до семи ступеней аккумуляторов с разным давлением, что позволяет при повышении давления в аккумуляторах до 32 МПа получить коэффициент опорожнения, равный 0,72.

2. Система уравнений газовой динамики при заправке транспортного средства

Несмотря на внешнюю простоту процесса заправки ТС он характеризуется резко выраженной нестабильностью, значительными перепадами давления и температуры потока газа, высокими скоростями, достигающими скорости звука. Таким образом, процесс заправки относится к области газовой динамики, в том числе газовой динамики высоких скоростей. В процессе заправки транспортного средства можно рассматривать выпуск газа из сосуда большого объема с постоянным давлением p_0 через сужающийся трубопровод в баллоны ТС с давлением p_a . В данном случае при выполнении условия $V_{ак} \gg V_{ТС}$ скорость течения газа определяется по формуле Сен-Венана – Венцеля:

$$v = \sqrt{\frac{2K}{k-1} gRT_0 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где K – показатель адиабаты; g – ускорение свободного падения; T_0 – температура газа в сосуде.

Для перепада давлений в 10 МПа при температурах от -50 до 50 °С и режиме выпуска сжатого газа из сосуда через трубопровод в случае адиабатического течения

максимальная скорость, равная местной скорости звука, может быть достигнута в самом узком сечении или при постоянном сечении трубопровода на месте среза (окончания). При заправке транспортных средств критическая скорость течения и скорость звука достигаются либо в сужении линии заправки, либо на входе газа в баллон.

Из раздела физики по газовой динамике известно, что при критической скорости удельный массовый расход газа через трубопровод максимален и определяется выражением $v_{кр} = \rho v$.

Скорость звука для природного газа характеризуется сжимаемостью и определяется выражением

$$c = \sqrt{\frac{kgRT \frac{z^2}{z - pT \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)}}{k+1}} \approx \sqrt{\frac{2k}{k+1} gRT_0}.$$

В процессе заправки транспортного средства существуют два основных источника газодинамического сопротивления – арматура и газопровод газораздаточной колонки со шлангом выносного заправочного устройства и обвязка бортовой системы питания транспортного средства.

Сущность процесса заправки на начальном этапе соответствует адиабатическому течению с критической скоростью, что описывается уравнениями состояния для критического давления, температуры и плотности:

$$\left. \begin{aligned} p_{кр ад} &= \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_0 \\ T_{кр ад} &= \frac{2}{k+1} T_0 \\ \rho_{кр ад} &= \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \rho_0 \end{aligned} \right\},$$

зависимость которых от состояния газа определяется коэффициентом Пуассона (показатель адиабаты) k для смеси идеальных газов, являющимся в соответствии с уравнением Майера функцией изобарной и изохорной теплоемкости:

$$k = \frac{C_p}{C_v}.$$

Для природного газа в интервале давлений 0,1...25 МПа и температур от –50 до 60 °С k изменяется в интервале от 1,3 до 3,0.

В системе газовой динамики при заправке транспортного средства ключевым является определение минимального сечения, которое будет создавать основное сопротивление, влияя на скорость течения газа и объемный расход. Определение минимального сечения производится с использованием следующего выражения:

$$d_p = \min \left\{ \sum_{i=1}^O d_{сбi}; d_{СОгс}; d_{СОзк+зу} \right\},$$

где O – число баллонов, установленных на ТС; $d_{сбi}$ – диаметр проходного сечения баллонного вентиля; $d_{СОгс}$ – минимальный диаметр проходного сечения линии высокого давления в газовой части топливной системы газобаллонного ТС; $d_{СОзк+зу}$ – минимальный диаметр проходного сечения арматуры заправочной колонки и заправочного устройства.

Правила построения интегральной математической модели объекта производства КПП

В процессе обобщения результатов математического моделирования отдельных технологических процессов необходимо обеспечивать следующее:

- соответствие модели схеме коммутации элементов производства сжатого газа и анализ наличия разветвлений в обвязке газопровода высокого давления;
- соответствие производительности и вместимости моделируемых вариантов основного и вспомогательного оборудования существующим образцам, производимым промышленностью.

Литература

1. Фотин Б.С., Пирумов И.Б. Поршневые компрессоры. – М.: Машиностроение, 1987.
2. Евстифеев А.А., Люгай С.В. Основы логико-вероятностного анализа безопасности транспортных средств на газовом топливе. – М.: ВНИИГАЗ, 2017.
3. Евстифеев А.А., Ермолаев А.Е. Влияние холостых пробегов газовых городских автобусов на показатели производственно-хозяйственной деятельности // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 4 (52). – С. 23-30.
4. Люгай С.В., Балашов М.Л., Евстифеев А.А. Оценка времени ожидания заправки транспортного средства на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 6 (54). – С. 50-54.
5. Евстифеев А.А., Заева М.А., Сергеев М.С. Метод обеспечения работоспособности системы управления питанием газового транспортного средства // Транспорт на альтернативном топливе. – 2016. – № 3 (51). – С. 51-60.
6. Евстифеев А.А., Заева М.А., Хетагуров Я.А. Методы и средства оптимизации размещения объектов производственно-сбытовой инфраструктуры / В книге: Научная сессия НИЯУ МИФИ–2015. Аннотации докладов: в 3-х томах. Отв. ред. О.Н. Голотюк. – 2015. – С. 74.
7. Попов М.А., Егорова А.Н., Евстифеев А.А. Моделирование и оптимизация мест размещения объектов газовой заправки транспорта / В книге: Научная сессия НИЯУ МИФИ–2015. Аннотации докладов: в 3-х томах. Отв. ред. О.Н. Голотюк. – 2015. – С. 97а.
8. Евстифеев А.А., Дрыгина Ю.Н., Ермолаев А.Е. Моделирование и оптимизация процесса развития производственно-сбытовой сети газовых заправочных станций // Газовая промышленность. – 2015. – № S3 (728). – С. 30-33.
9. Евстифеев А.А. Математическая модель определения численности и производительности заправочных колонок на АГНКС // Газовая промышленность. – 2015. – № 8 (726). – С. 95-97.
10. Евстифеев А.А. Размещение объектов инфраструктуры газовой заправки транспорта // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 6 (48). – С. 26-39.
11. Евстифеев А.А. Анализ эффективности производственного процесса на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 5 (47). – С. 27-33.
12. Евстифеев А.А. Метод формирования адекватной стоимости газового моторного топлива // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 2 (44). – С. 41-46.
13. Евстифеев А.А. Современные подходы к выбору производительности основного технологического оборудования объектов заправки природным газом //

Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 4 (46). – С. 48-54.

14. Evstifeev A., Zaeva M., Krasnikova S., Shuvalov V. Multi-criteria equipment control in complex engineering systems // Asian Journal of Applied Sciences. – 2015. – Т. 8. – № 1. – P. 86-91.

15. Евстифеев А.А. Структурный синтез и алгоритмы решения для математической модели системы газовой заправки транспорта и газоснабжения автономных потребителей // Вести газовой науки. – 2015. – № 1 (21). – С. 79-85.

16. Евстифеев А.А. Обеспечение муниципальных автобусных парков мегаполиса газовым моторным топливом // Газовая промышленность. – 2014. – № 2 (702). – С. 86-89.

17. Евстифеев А.А. Математическая модель процесса заправки транспортных средств КПП на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 1 (37). – С. 24-31.

18. Евстифеев А.А. Многокритериальное управление технологическим оборудованием сложных технических систем с использованием методов получения нечетких выводов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 5 (41). – С. 44-48.

19. Евстифеев А.А. Методология рационального построения и непрерывного совершенствования региональной сети АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 3 (39). – С. 53-60.

20. Евстифеев А.А. Математическая модель анализа потребности в КПП и СПГ на вновь газифицируемых территориях // Газовая промышленность. – 2013. – № 1 (685). – С. 87-88.

21. Люгай С.В., Евстифеев А.А., Тимофеев В.В., Балашов М.Л., Дрыгина Ю.Н. Сравнение экономических показателей при использовании жидкого моторного и газомоторного топлив // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 5 (35). – С. 14-19.

22. Евстифеев А.А. Модель прогнозирования потребления газового моторного топлива в населенном пункте // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 3 (33). – С. 43-47.

23. Евстифеев А.А., Балашов М.Л. Методика определения границы экономической эффективности перехода на природный газ в качестве моторного топлива // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 2 (32). – С. 4-5.

24. Евстифеев А.А. Расчет надежности системы поставок газового моторного топлива потребителям // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 4 (34). – С. 61-65.

25. Евстифеев А.А., Заева М.А., Хетагуров Я.А. Применение математического моделирования при испытаниях и отработке сложных технических систем // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2013. – Т. 2. – № 1. – С. 115.

26. Евстифеев А.А., Заева М.А. Автоматизированная система единого государственного реестра газобаллонного оборудования // В книге: Научная сессия НИЯУ МИФИ–2012. Аннотации докладов: в 3-х томах. – 2012. – С. 285.

27. Дедков В.К., Евстифеев А.А. Методика оценивания надежности технической системы по результатам испытаний // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2010. – № 12. – С. 215-221.

28. Евстифеев А.А., Северцев Н.А. Модели минимизации направленного ущерба транспортной системы при отсутствии информации // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2009. – № 11. – С. 137-145.

Сравнение выбросов загрязняющих веществ от автомобилей и различных энергетических установок

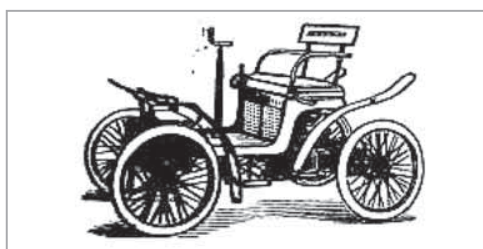
А.А. Капустин, профессор Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, д.т.н.,

В.А. Раков, доцент Вологодского государственного технического университета, к.т.н.

В данной статье представлены результаты исследований авторов по сопоставлению объемов выбросов загрязняющих веществ автомобилями с бензиновыми, дизельными, газовыми и гибридными двигателями на этапах их производства, эксплуатации и рециклинга.

Ключевые слова:

экологическое воздействие, автомобили, расход топлива, выбросы загрязняющих веществ, энергетическая установка.



«Автомобиль – экипаж, который движется при помощи электричества, бензина, пара и т.п., и потому кажется, какъ бы движущимся самъ по себе».

*Энци. словарь Ф. Павленкова
(С.-Петербург, 1905)*

В самом начале своего появления на дорогах автомобили за их особенность выбрасывать в воздух странно пахнущее облако стали называться «вонючками».

Развитие автомобилизма изначально было связано со снижением расхода энергии на движение, уменьшением вреда окружающей природной среде и безопасностью поездок. Для этого законодатели устанавливали (и будут устанавливать) все более строгие экологические нормативы, а конструкторы их выполняли, совершенствуя тем самым эксплуатационные свойства автомобилей.



Рисунок из архива журнала Motor, 1901 год.
Так видели борьбу с выбросами от автомобилей в будущем

Например, постепенные ограничения выбросов отработавших газов двигателями внутреннего сгорания (ДВС) привели к существенному снижению содержания таких веществ, как оксид углерода (СО), оксиды азота (NO_x), углеводороды (СН). Это несколько снизило напряженность в обществе по отношению к бензиновым и дизельным автомобилям. Однако новые нормативы, которые вступят в России к 2020 году и уже действуют в Евросоюзе, должны обеспечить снижение выбросов углекислого газа (CO_2) до 95 г/км (при действующей норме в 130 г/км).

Чтобы выполнить эти требования, недостаточно системы нейтрализации отработавших газов, необходимо уменьшить расход топлива ДВС. Для решения этой задачи инженеры пошли на снижение рабочего объема двигателя с повышением его КПД за счет увеличения степени сжатия, применения турбонаддува и непосредственного впрыска топлива, а также применения гибридных энергетических установок (ЭУ) с более рациональным расходом топлива и меньшим выбросом загрязняющих веществ.

Для вновь выпускаемых сегодня автомобилей в отношении их выбросов разработаны Правила № 83 ЕЭК ООН. Следует заметить, что указанные Правила не учитывают выбросы вредных веществ в двух этапах жизненного цикла автомобиля: при производстве и рециклинге (утилизации).

Автомобиль, как основной источник выбросов парниковых газов, создал экологические проблемы для окружающей среды во многих странах мира, о чем также свидетельствуют материалы 21 Всемирного климатического саммита в Париже (2015 г.). Желание уменьшить загрязнение воздуха в крупных городах связано с проявляющимися процессами изменения климата на планете. Очевидной стала необходимость снижения расхода углеводородного

топлива автомобилями, мировой парк которых уже сейчас составляет более 1 млрд единиц, а к середине 21 века, по прогнозам экспертов, может удвоиться.

Основными направлениями решения поставленных задач являются совершенствование конструкции ДВС, развитие производства гибридных и электрических установок. При этом основной уклон делается в сторону именно снижения вредных выбросов с отработавшими газами, а экологические преимущества, ради которых усложняются конструкции более экологичных автомобилей и соответственно растет их цена, на этапе их производства не затрагиваются.

В исследовании авторами выполнено сравнение выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду автомобилями с различными типами энергетических установок. В оценке использованы легковые автомобили с бензиновым, дизельным, газовым ДВС и гибридной ЭУ (ДВС + электромотор).

В качестве основных загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие от указанных автомобилей на окружающую среду, рассматривались выбросы оксида углерода (СО), оксидов азота (NO_x) и углекислого газа (CO_2). Тепловое воздействие и вред от отработанных технических жидкостей не оценивались.

Исходными данными для оценки воздействия на этапе производства принята масса автомобилей и их компонентов, а за период эксплуатации – расход топлива и нормативные значения загрязняющих веществ в отработавших газах. Для сравнительного анализа были выбраны популярные в России легковые автомобили с различными типами энергетических установок: Hyundai Solaris 1.6 (бензиновый ДВС); Peugeot 408 (дизельный ДВС); Лада Ларгус 1.6 (газовый ДВС); Toyota Prius с гибридной ЭУ (ДВС + электромотор).

Этап производства

Этот этап в жизненном цикле автомобиля связан с добычей и переработкой материалов. На данном этапе сырье (металл, пластик, стекло, резина и др. материалы) используется для изготовления комплектующих, что неизбежно оказывает воздействие на окружающую среду. Размер этих выбросов будет зависеть от применяемых материалов и их массы. Данные по массе выбранных автомобилей приведены в табл. 1.

Энергозатраты на производство одного автомобиля с ДВС составляют 8,06 ГДж [1], а удельные выбросы

вредных веществ $m_{уд}$ в пересчете на 1 кг его массы m_a [2] следующие:

- оксид углерода (CO) – 0,0122 кг;
- оксиды азота (NO_x) – 0,00750 кг;
- углекислый газ (CO₂) – 3,172 кг.

Масса загрязняющих веществ будет рассчитываться по формуле

$$M_{зв} = m_a \cdot m_{уд},$$

где m_a – масса автомобиля; $m_{уд}$ – масса удельных выбросов вредных веществ.

Результаты проведенной оценки негативного воздействия на окружающую среду при производстве для каждого из указанных выше автомобилей представлены в табл. 2.

Таблица 1

Выбросы загрязняющих веществ на этапе производства автомобилей

Тип ЭУ / модель автомобиля	Масса автомобиля, т	Масса выбросов вредных веществ, т		
		CO	NO _x	CO ₂
Бензиновый / Hyundai Solaris 1.6	1,13	0,014	0,0085	3,584
Дизельный / Peugeot 408	1,39	0,017	0,01	4,241
Газовый / Лада Ларгус 1,6, всего автомобиль	1,38			
газобаллонное оборудование	1,33 0,05	0,017	0,01	4,377
Гибридный / Toyota Prius, всего автомобиль*	1,49	0,017	0,01	4,674
Ni-MH батарея	1,43 0,06	0,017 –	0,01 –	4,564 0,09

* Без учета массы батареи.

Таблица 2

Характеристики автомобилей и расход топлива

Тип ЭУ / модель автомобиля	Расход топлива, л/100 км	
	Заводская норма	Норма Минтранса РФ с учетом поправочных коэффициентов [3]*
Бензиновый / Hyundai Solaris 1.6	6,5	10,55
Дизельный / Peugeot 408	7,4	10,0
Газовый / Лада Ларгус 1,6	7,5	13,7**
Гибридный / Toyota Prius	3,9	6,0

* Учитывается население города, работа кондиционера, частые запуски и прогревы двигателя, эксплуатация при низкой температуре окружающей среды согласно рекомендованным коэффициентам.

** Для автомобилей, работающих на сжиженном углеводородном газе (СУГ), рекомендовано устанавливать норму из расчета 1 л бензина соответствует 1,32 л СУГ.

Экологически более безопасные гибридные автомобили содержат электрохимический источник постоянного тока – высоковольтную батарею. Поэтому выбросы при производстве высоковольтной батареи гибридного автомобиля авторами рассмотрены отдельно. Как правило, в таких автомобилях батарея состоит из никель-металлгидридных (Ni-MH) аккумуляторов. На гибридном автомобиле Toyota Prius, участвующем в сравнительной оценке, масса высоковольтной Ni-MH батареи равна 53 кг. Согласно исследованиям, при производстве 1 кг Ni-MH аккумулятора выбрасываются загрязняющие вещества в объеме 1,69 кг эквивалента CO₂ [2]. Данные значения также включены в расчеты и представлены в табл. 1, из которой хорошо видно, что наименьшие выбросы загрязняющих веществ достигаются при производстве автомобилей малого класса с бензиновыми двигателями. Это легко объясняется хорошо отработанной простой конструкцией, низкими ценами на материалы для изготовления и низкой энергоемкостью технологий сборки автомобиля. Составить таким автомобилям конкуренцию со стороны более сложных гибридных автомобилей в ближайшем будущем будет сложно.

Этап эксплуатации

Этот этап является основным в жизненном цикле автомобилей при рассмотрении количества и качества выбросов загрязняющих веществ с отработавшими газами, получаемых от энергетических установок. Наиболее значимые из них CO, CO₂, NO_x, объемы которых зависят, в первую очередь, от количества израсходованного топлива и его типа. Нормативные данные по расходу топлива получены из «Рекомендаций Министерства транспорта РФ» от 14.03.2008 г. (см. табл. 2).

В проведенном исследовании негативные воздействия на окружающую среду при замене вышедших из строя

деталей автомобилей и отработавших технологических жидкостей авторами не рассматриваются. Зарядка гибридных автомобилей от внешней электросети не предусмотрена.

По данным о среднем расходе топлива автомобилями авторы определили общий объем его потребления за условно принятый ресурсный пробег – 250 тыс. км, что позволило вычислить объемы загрязняющих веществ энергетическими установками и подсчитать их массу за период эксплуатации. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Для расчета выбросов загрязняющих веществ автомобилями в предыдущих исследованиях [4-5] авторы использовали нормативные значения, указанные в «Техническом регламенте о безопасности колесных транспортных средств» № 720 от 10.09.2009 г. Однако последующие исследования показали, что ранее проведенная оценка оказалась ошибочной, так как при сгорании топлива часть образующегося соединения CO₂ является массой не только сгоревшего топлива, а всей топливовоздушной смеси. Для устранения неточностей расчетов в настоящей работе авторы использовали «Инструкцию (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух» от 17.11.2006 г. (табл. 3.1-3.3) [6]. Результаты расчета показаны в табл. 3.

Таким образом, количество выбросов всех загрязняющих веществ на этапе эксплуатации значительно превосходит выбросы, связанные с производством автомобилей.

Самая большая масса выбросов оксидов углерода, действующего на кровь человека, как и следовало ожидать, пришлась на автомобили с бензиновыми и газовыми двигателями (рис. 1). Значительно меньше CO выбрасывают гибридные автомобили и еще меньше – автомобили с дизельным двигателем. С выбросами CO в автомобиле успешно борется система

Таблица 3

Масса выбросов загрязняющих веществ автомобилями на этапе эксплуатации

Тип ЭУ/ модель автомобиля	Расход топлива за период эксплуатации, кг/л*	Выбросы загрязняющих веществ					
		CO		NO _x		CO ₂	
		г/кг	Всего, кг	г/кг	Всего, кг	г/кг	Всего, кг
Бензиновый / Hyundai Solaris 1.6	20 045 / 26 375	21,5	431	5,8	116	3120	62500
Дизельный / Peugeot 408	21 000 / 25 000	7,5	158	30	630	3100	65100
Газовый / Лада Ларгус 1,6	18 153 / 34 250	21,5	390	5,8	105	2970	53900
Гибридный / Toyota Prius	11 400 / 15 000	21,5	245	5,8	66	3120	35600

* С учетом плотности топлива: АИ-95 – 0,76 кг/л; ДТ – 0,86 кг/л; СУГ – 0,53 кг/л.

Цветом выделены максимальные (красный) и минимальные (зеленый) значения.

снижения токсичности, включающая катализатор и датчики кислорода, при условии, что все они работают исправно. Целесообразности дальнейшего снижения доли CO в отработавших газах специалисты-экологи не видят – уровень его содержания согласно нормам Евро-4,5,6 не менялся и составляет для легковых автомобилей 1,0 г/км.

Оксиды азота (NO_x) образуются при сгорании бедных смесей и характерны, прежде всего, для дизельных двигателей. Попадая в атмосферу, они могут вызывать раздражение слизистых поверхностей организма человека. У автомобилей с бензиновыми, газовыми и гибридными ДВС эти выбросы находятся на достаточно низком уровне. У автомобилей же с дизельными ДВС они значительно превосходят все остальные. За период эксплуатации дизельный двигатель выбросит в атмосферу 630 кг NO_x. Для сравнения: у бензинового их будет всего 116 кг (рис. 2).

Для снижения выбросов NO_x в дизельных двигателях применяется система рециркуляции отработавших газов и впрыск мочевины, в результате чего снижается температура камеры сгорания двигателя. Согласно экологическим

нормам Евро-6, содержание этих выбросов у легковых дизельных автомобилей должно быть снижено с 0,18 до 0,06 г/км, то есть в 3 раза.

Углекислый газ (CO₂) в значительной степени влияет на глобальное потепление климата. При сгорании 1 кг углеводородного топлива происходит образование около 3 кг соединений CO₂. Автомобиль с бензиновым ДВС и традиционной силовой установкой за период эксплуатации в 250 тыс. км выбросит 62,5 т CO₂, с дизельным ДВС – 65 т (рис. 3).

При эксплуатации газового автомобиля на более легком СУГ выбросы CO₂ снизятся до 54 т. Автомобиль с гибридной энергетической установкой за счет более низкого расхода топлива выбросит всего 35,6 т CO₂, что меньше чем у бензинового на 43 %.

Этап рециклинга (утилизация) является обязательным в жизненном цикле автомобилей. Выбросы загрязняющих веществ вызваны переработкой комплекующих для повторного использования материалов и сжиганием отходов, идущих на утилизацию. Эти операции требуют затрат энергии для обезвреживания опасных компонентов, таких как резина и полимерные материалы.

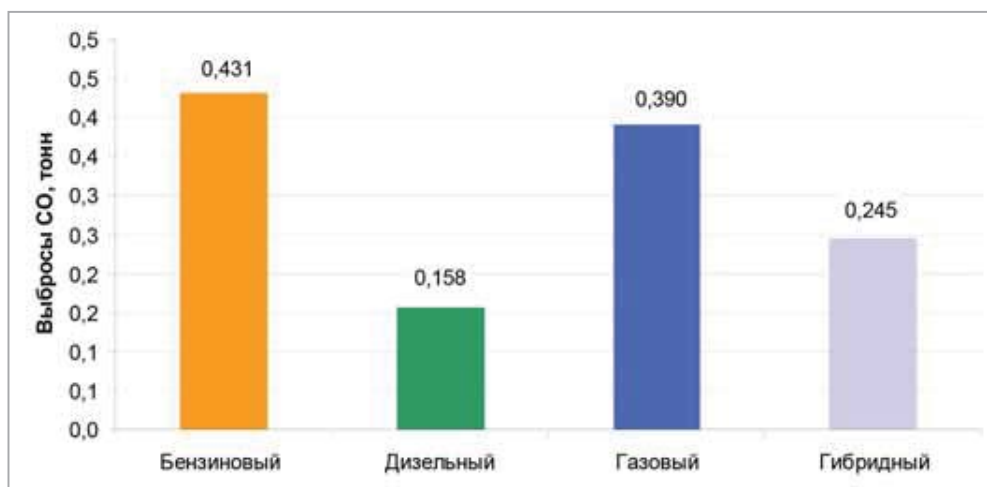


Рис. 1. Выбросы оксида углерода (CO) автомобилями с ЭУ различных типов

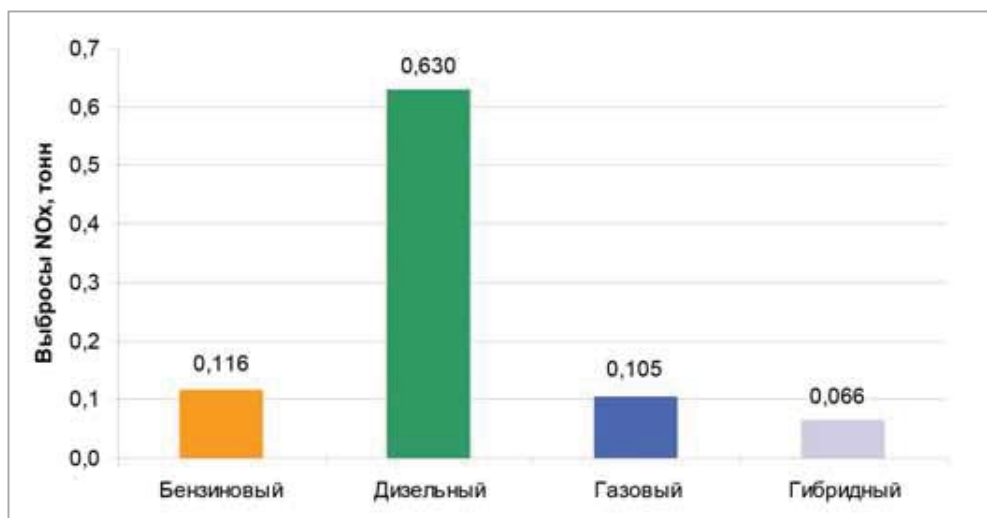


Рис. 2. Выбросы оксидов азота (NO_x) автомобилями с ЭУ различных типов

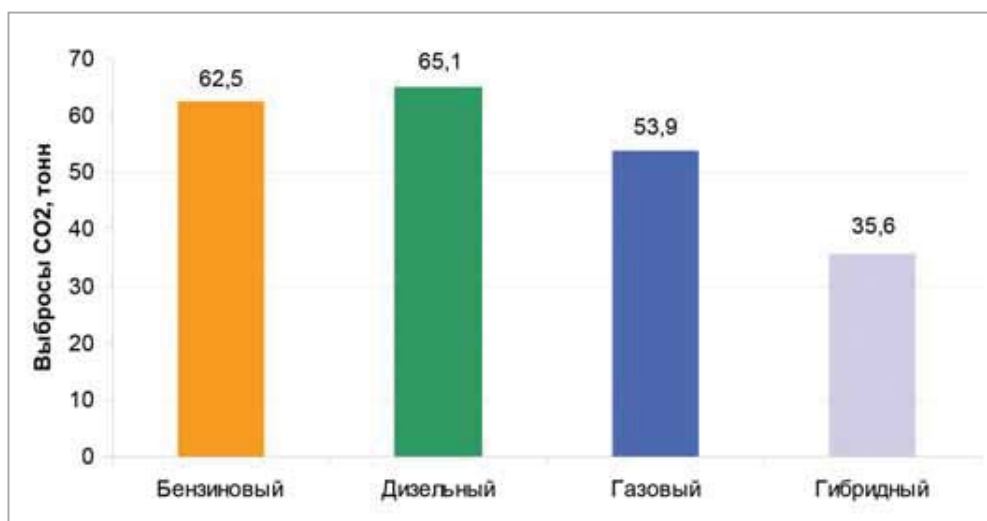


Рис. 3. Выбросы углекислого газа (CO₂) автомобилями с ЭУ различных типов

При используемых технологиях удастся восстановить до 75 % материалов от начальной массы автомобиля. Остальные не перерабатываемые материалы обезвреживаются и подлежат захоронению. По данным производителей перерабатывающего оборудования, в среднем на рециклинг одной тонны автомобиля расходуется около 50 кВт·ч электроэнергии. При почти одинаковой массе сравниваемых автомобилей в проведенной оценке этот показатель не учитывался ввиду несущественности.

Особо необходимо отметить, что рециклинг Ni-MH аккумуляторных батарей гибридных автомобилей проходит по технологии без выбросов токсичных вредных веществ. При этом получаемые в процессе переработки никель и кобальт используются повторно [7].

Суммарные объемы выбросов на этапах производства и эксплуатации сравниваемых автомобилей представлены в табл. 4.

Анализ результатов проведенного исследования, как и ожидалось, показал, что основная доля выбросов всех загрязняющих веществ приходится на период эксплуатации. Однако следует обратить внимание на выбросы

парникового газа CO₂, которые на этапе производства составляют около 5...10 % от выбросов на всем жизненном цикле автомобиля.

Исходя из полученных в исследовании результатов, можно сделать следующие выводы:

- частое обновление автомобилей со значительным снижением их среднего срока службы ускорит загрязнение окружающей среды;
- более безвредными для человека и окружающей среды на всех этапах жизненного цикла являются автомобили с гибридными двигателями даже несмотря на то, что при их производстве требуется больше затрат энергии и сырья;
- при оценке влияния негативного воздействия автомобилей с различными энергетическими установками на окружающую среду и, в первую очередь, на потепление климата основное внимание необходимо уделять выбросам вредных веществ на этапе эксплуатации автомобиля;
- выбросы токсичных компонентов CO и NO_x, причиняющие вред здоровью человека, также можно значительно снизить при использовании автомобилей с гибридным двигателем.

Таблица 4

Выбросы загрязняющих веществ автомобилем на этапе производства и эксплуатации

Тип ЭУ / модель автомобиля	Выбросы загрязняющих веществ, кг		
	CO	NO _x	CO ₂
Бензиновый / Hyundai Solaris 1.6	445	125	66 084
Дизельный / Peugeot 408	175	640	69 341
Газовый / Лада Ларгус 1,6	407	115	58 277
Гибрид / Toyota Prius	262	76	40 264

Цветом выделены максимальные (красный) и минимальные (зеленый) значения.

Будущее

Все популярнее становятся автомобили с электромеханическими гибридными энергетическими установками. Инженеры постоянно совершенствуют их. Интересные разработки имеет компания Toyota, выпускающая самый популярный в мире гибридный автомобиль Prius. Продолжаются работы с водородной энергетической установкой для гибрида Mirai, что по-японски означает «будущее». Электрическую энергию в нем вырабатывают топливные элементы, где водород окисляется кислородом в специальных топливных элементах, выбросами которых является вода – H₂O. Пока общественность воспринимает эти автомобили, как «зелёные». Хотя исследования воздействия инфраструктуры производства

водорода и качества сбрасываемой воды, прошедшей физическую и химическую обработку в водородном генераторе, на организм человека не проводились.

Mirai при 5 кг водорода в баллонах имеет запас хода 500...550 км. На полную заправку водородом требуется до 5 мин времени. Для сравнения: электромобиль от электрической сети заряжается до 12 часов. Автомобиль при максимальной мощности энергетической установки в 113 кВт и крутящем моменте 335 Н·м разгоняется водителем до 100 км/ч за 9,6 с.

Попытки создания автомобилей с гибридной электромеханической силовой установкой за последние несколько лет значительно активизировались, что позволяет считать их перспективными экологичными автомобилями ближайшего будущего.

Литература

1. Котиков Ю.Г. Транспортная энергетика (2006). – Эл. ресурс: <http://www.studfiles.ru/preview/4385265/page:20/>
2. Pistoia G. Electric and hybrid vehicles. Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. / G Pistoia. – Oxford: The Netherlands Linacre House, 2010.
3. Распоряжение Минтранса РФ от 14 марта 2008 г. № АМ-23-р «О введении в действие методических рекомендаций «Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте» с изменениями от 14.05.2014 г. № НА-50-р.
4. Капустин А.А. Методика оценки влияния типа двигателя гибридных автомобилей на их экономичность и экологическую безопасность / А.А. Капустин, В.А. Раков // Организация безопасности движения в крупных городах: сборник трудов участников двенадцатой междунар. науч.-практ. конф. – СПбГАСУ. – СПб., 2016. – С. 639-645.
5. Kapustin A. Methodology to Evaluate the Impact of Hybrid Cars Engine Type on their Economic Efficiency and Environmental Safety / A. Kapustin, V. Rakov // Transportation Research Procedia: 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia. – 20 (2017). – Pp. 247-253.
6. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух: утв. ОАО «НИИАТ» 17.11.2006 / Министерство транспорта РФ. – Москва, 2006. – 55 с.
7. Капустин А.А. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 116 с.

Эксплуатация автомобильного транспорта на водородном топливе

Е.М. Овсянников, профессор кафедры «Электротехника»
 ФГБОУ высшего образования «Московский политехнический университет», д.т.н.,
Т.Б. Гайтова, профессор, зав. кафедрой «Электротехника»
 ФГБОУ высшего образования «Московский политехнический университет», д.т.н.,
А.П. Фомин, доцент кафедры «Электротехника»
 ФГБОУ высшего образования «Московский политехнический университет», к.т.н.

Рассмотрены способы получения, хранения и использования водородного топлива в автомобильном транспорте. Предложен новый способ производства водорода на борту автомобиля с использованием энергии выхлопного газа.

Ключевые слова:

водородное топливо, электролизер, энергоноситель, альтернативная энергия, электроводородный генератор.

В связи с истощением традиционных ресурсов для производства электроэнергии и мировым кризисом в последние годы в мире все больше внимания уделяется возобновляемым источникам энергии. При этом учитывается проблема экологической чистоты ее производства.

Одним из препятствий использования электроэнергии на транспорте является невозможность ее хранения в больших количествах (таблица).

Из этих данных следует, что при выработке и распределении электричества только 28 % содержащейся в природных

ресурсах энергии поступает потребителю, а, например, при использовании газа – 93 %.

Ведутся исследования по хранению получаемой от автономных источников электроэнергии или в гидроаккумуляторах, или в виде вырабатываемого из воды электролизом водорода [2]. Использование водорода как энергоносителя позволяет решить энергетические проблемы в тесной связи с экологическими. Кислород, получаемый при разложении воды, может использоваться не только как окислитель в энергетике, но и для удаления отходов жизнедеятельности.

Сравнение КПД энергоснабжения потребителя при сопоставлении электроэнергии и газа как теплоносителей [1]

Источник энергии	КПД термический		КПД энергоснабжения потребителя
	Производства энергии	Транспортировки и распределения энергии	
Электроэнергия	0,325	0,86	0,28
Газ	0,97	0,96	0,93

Транспорт на водороде

Особенностью водорода по сравнению с традиционным ископаемым топливом является то, что при огромных запасах на Земле водород существует практически только в связанном виде, и его получение требует затрат энергии. Это накладывает ограничения на возможности применения водорода в энергетике и на транспорте.

Весьма привлекательно для решения этой проблемы выглядит использование водорода в виде топлива для автомобилей, работающих на водороде, или в качестве добавки к топливу (рис. 1). Это становится особенно актуальным с учетом того, что более 30 % энергии при работе теплового двигателя выбрасывается в атмосферу с выхлопными газами.

Эта идея привлекает исследователей уже в течение многих лет. Однако до сих пор многие вопросы остаются нерешенными, наиболее важными из которых являются создание инфраструктуры для заправки автомобилей и производство самого водорода. Дело в том, что затраты энергии для производства водорода сопоставимы с энергией, получаемой от произведенного водорода. Наряду с исследованиями компаний Honda, General Motors, Toyota, Ford, BMW, Daimler, Hyundai, Nissan, Volkswagen по созданию водородных автомобилей ведутся разработки заправочных комплексов, в том числе и с использованием альтернативной энергии: солнечной, энергии ветра. Такие исследования проводятся и в России.

Обычно стоимость производства топлива в долларах относят к гигаджоулям (ГДж) выделяемой тепловой энергии. Производство водорода электролизом воды на основе современных технологий оценивается по затратам от 10 до 20 долл./ГДж. Аналогичные цифры дают оценки, полученные для термохимического производства водорода из воды с использованием энергии высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). В ближайшей перспективе водород, получаемый из воды в процессе паровой конверсии метана с помощью энергии ВТГР, может производиться в стране при затратах ниже 7 долл./ГДж, что эквивалентно стоимости бензина 0,24 долл./л. В настоящее время наиболее рентабельный способ производства водорода – паровая конверсия.

Самая низкая стоимость получения водорода из природного газа составляет 6...12 долл./ГДж [3], самая высокая при электролизе воды – 40 долл./ГДж. При этом стоимость природного газа сегодня всего 2,9 долл./ГДж, бензина – 5,25 долл./ГДж. В среднем затраты электроэнергии при электролизе воды 5...10 кВт·ч/м³H₂.

Помимо затрат энергии на получение водорода, необходимо учитывать расходы на его хранение и транспортировку.

Если производство водорода в общих расходах составляет 29,2 %, то его сжижение – 48 %, хранение жидкого водорода – 10 %, а доставка этого топлива трубопроводом на 1800 км – 6 % [4, 5].



Рис. 1. Водородная автозаправочная станция

Стоимость жидкого водорода в 1,5-2,5 раза выше стоимости газообразного.

Преимущества хранения и транспортировки к потребителю водорода, а также экологическая чистота работающих на нем энергоустановок и двигателей подталкивает конструкторов к его более широкому применению. Проблемой остается высокая стоимость получения водорода. Поэтому перспективно использовать для этой цели энергию возобновляемых источников.

Известен многолетний опыт Германии: в 1990 г. там было принято решение о проведении исследований перспективной солнечной водородной энергоустановки в г. Нойнбург. Электроэнергия в количестве 39000 кВт·ч/год вырабатывается с помощью солнечных батарей, а затем используется для производства водорода из воды с помощью электролизеров [2]. Водород хранится в жидком и газообразном видах и используется для питания автомобилей различного типа.

Испытаны различные типы электролизеров и систем хранения водорода. Осуществлены испытания автомобилей на жидком и газообразном водороде. Проводившиеся в течение 13 лет в Германии исследования различных электроводородных установок, средств хранения и использования водорода вызвали большой интерес. За это время исследовательский центр в Нойнбурге посетило 130 тыс. человек из 100 стран. Накоплен большой опыт эксплуатации и модернизации испытанных установок – от систем фотоэлектрического получения электроэнергии до автомобилей, потребляющих полученный водород.

С 1997 г. в университете прикладных наук в Германии успешно прошла испытания весьма перспективная энергоустановка, состоящая из ветряной установки мощностью 5 кВт, электрогенератора, щелочного электролизера и баллонов для хранения получаемого водорода [6]. Произведенный водород сжимается

до 2,5 МПа и хранится в баллонах. Баллон вместимостью 2,0 м³ заполняется за 50 часов (эффективность электролизера $5 \cdot 50,2 \cdot 25 = 5$ кВт·ч/м³Н₂). Достоинством такой установки является возможность хранения получаемого водорода с малыми потерями энергии.

У специалистов фирм Германии имеется большой опыт использования ветряных установок для производства электроэнергии. Известен даже факт, что в ветреную погоду ветряные станции приходится останавливать из-за перепроизводства электроэнергии. Предлагается хранить вырабатываемую ветряными станциями энергию с помощью водорода, который получается из воды после ее электролиза [5, 7].

В работе [8] для получения водорода из воды предложен электроводородный генератор с магнитным ускорителем (ЭВГМ) ионов во вращающемся электролите ЭВГМ. Для разложения воды вместо электростатического поля в электролизерах предлагается использовать центробежное и магнитное поля. Таким образом, вместо дорогой электроэнергии используется более дешевая кинетическая энергия вращающегося электролита и магнитное поле, в которое помещен электролит.

Корпус вместе с электролитом вращается со скоростью 3000...9000 мин⁻¹.

Магнитная индукция величиной около 1 Тесла наводится в электролите постоянным магнитом (или электромагнитом, как показано на рис. 2). Вращение корпуса ЭВГМ обеспечивается электромотором. Эффективность работы ЭВГМ оценивается $\eta_{\text{ЭВГМ}} = 0,5$.

Излишнюю электроэнергию хранят в аккумуляторной батарее (АБ), откуда ее позднее можно забрать с потерями не менее 30 %. Общая эффективность получения электроэнергии с помощью ветряной установки ($\eta_e = \eta_r \cdot \eta_g \cdot \eta_k = 0,51$) складывается из эффективности генератора $\eta_r = 0,8$, эффективности системы хранения энергии в АБ $\eta_6 = 0,7$

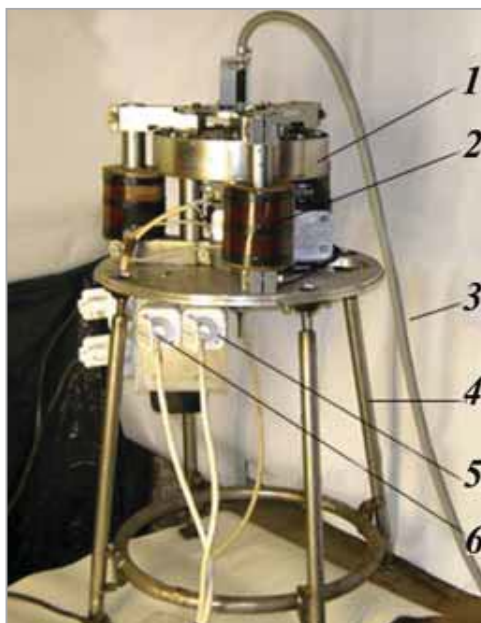


Рис. 2. Электроводородный генератор с магнитом:

1 – ротор; 2 – соленоид; 3 – шланг для отвода газа; 4 – рама; 5 – питание электродвигателя; 6 – питание электромагнита

и эффективности преобразования постоянного тока от АБ в переменный с помощью конвертора $\eta_k=0,9$. Общая эффективность получения водорода

в электролизере с КПД около $\eta_e=0,4$ снижается до

$$\eta_{H_2} = \eta_e \eta_e = 0,4 \cdot 0,51 = 0,2.$$

Замена генератора и электролизера на ЭВГМ позволяет увеличить эффективность получения водорода до $\eta_{H_2} = \eta_{ЭВГМ} \eta_p = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45$ ($\eta_p=0,9$ – КПД повышающего редуктора) и оставляет возможность получения в случае необходимости требуемого количества электроэнергии с помощью топливного элемента. Однако топливные элементы пока обладают рядом серьезных недостатков. И прежде всего, имеют высокую стоимость (около 3500 долл./кВт) и короткий срок службы (около 5 лет).

Поставщиком энергии может служить также энергия отработавших газов автомобиля. Ее использование для разложения воды в электроводородном генераторе с постоянными магнитами позволяет существенно удешевить процесс получения водорода в автономных условиях. Авторы в настоящий момент занимаются исследованиями и разработкой реальных образцов электроводородных генераторов для грузового транспорта.

Литература

1. Wind hjwer-Wikipedia, the free encyclopededia, may 25, 2012.
2. Дорош И.А. Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг». Самые мощные проекты возобновляемой энергетики. Аналитический обзор АК 1-2012, итоги-2011, 2012.
3. The Solar Hydrogen Project of Neunburg vorm Wald, German, <http://www.solar-hydrogen.com.1996-2011>.
4. Lehmann Jochen, Luschtinetz Thomas and Menz Frank. The wind – hydrogen-fuel cell chain, The hydrogen Planet, June 9-13, 2002, 14th World Hydrogen Energy Conference, Canada.
5. Справочник. Водород, свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Под ред. Гамбургера Д.Ю., Дубовкина Н.Ф. – М.: «Химия», 1989. – 672 с.
6. Germany Invests in Hydrogen Technology for Renewable Storage, Vehicles, 2012. <http://www>.
7. The Demonstration project RH₂-Werder / Kessin / Altentreptow (RH₂-WKA), 2012. <http://www>.
8. Овсянников Е.М., Долбилин Е.В., Кошеляев Е.М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. – М.: «Палеотип», 2010. – 363 с.

Шум, как источник профессиональных рисков на предприятиях транспорта и потребления газа

А.Л. Терехов, профессор, начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.

Рассмотрено состояние условий труда по шуму на предприятиях ПАО «Газпром». Приведены сведения о негативном влиянии шума на персонал, уровне профессиональных рисков и мероприятиях по управлению этими рисками. Содержится алгоритм разработки мероприятий по снижению шума технологического оборудования с прогнозированием результатов внедрения. Описан опыт внедрения мероприятий на предприятиях транспорта газа.

Ключевые слова:

интенсивность излучения шума, трубопроводный транспорт, безопасность технологических процессов, снижение шума.

Актуальность проблемы

Более 30 % рабочих мест на предприятиях добычи и транспортировки углеводородов характеризуются вредными условиями труда [1-3]. Одним из основных вредных факторов, воздействующих на работников предприятий ТЭК, является шум.

Как видно из данных рис. 1, рабочие места с вредными условиями труда по

шуму составляют более 60 % от всех рабочих мест с вредными условиями труда [4].

Неблагоприятные условия труда ремонтного и эксплуатационного персонала предприятий из-за рассеянного внимания работников под воздействием интенсивного шума, а также возникновение незамеченного из-за шума инцидента на технологическом оборудовании могут привести к производственным травмам и перерасти в техногенную аварию [5].

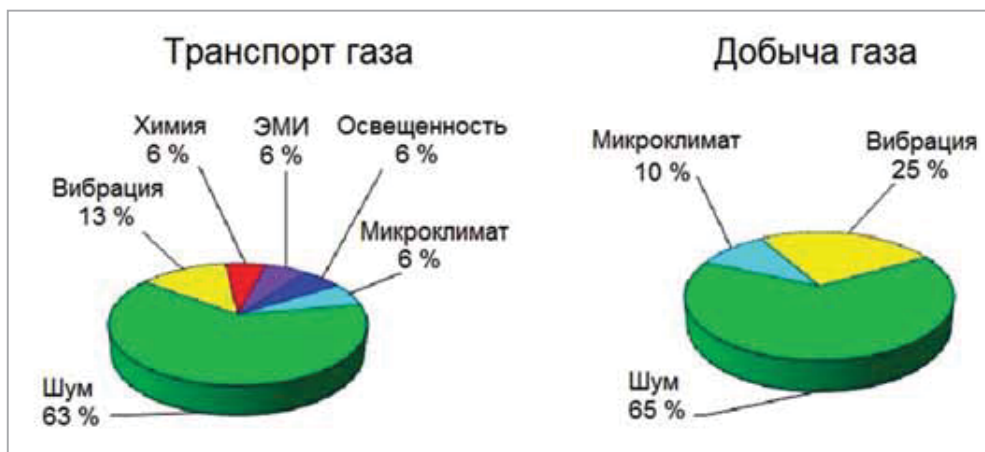


Рис. 1. Вредные факторы, воздействующие на работников газовой отрасли

Влияние шума на организм

Публикации в медико-биологической литературе [6, 7] позволяют установить высокую эколого-гигиеническую значимость шума как вредного производственного фактора. Шум относится к группе факторов физической природы и имеет специфические особенности влияния на живой организм человека, которое проявляется в функциональных и морфологических изменениях различных систем, органов, тканей и клеток. Это влияние зависит от уровня и времени воздействия шума. Экспертиза результатов специальной оценки условий труда на основных производствах ПАО «Газпром» показала, что на многих рабочих местах основных профессий компании условия труда по шуму классифицируются как класс 3.3 [2, 3].

В руководстве [8] приведены сведения о том, что в условиях класса 3.3 в период трудовой деятельности работников у них развивается профессиональная болезнь легкой и средней тяжести с потерей трудоспособности, растет хроническая патология.

Шум, как вредный производственный фактор, включен в Перечень производств, профессий и работ с вредными условиями труда [9], персонал, работающий в условиях интенсивного шума, получает компенсации и льготы за вредные условия труда [10].

Оценка профессиональных рисков

Для решения вопроса о целесообразности внедрения мероприятий по снижению шума необходимо произвести оценку профессиональных рисков для работающих в условиях повышенного шума и в случаях недопустимых рисков принять меры по управлению этими рисками.

В ПАО «Газпром» принята методика количественной субъективной оценки

профессиональных рисков в виде обязательного к применению отраслевого стандарта СТО Газпром 18001002–2014 [11], который определяет порядок идентификации опасностей, оценки рисков, оформления результатов оценки рисков и разработки мероприятий, направленных на снижение или исключение рисков в структурных подразделениях, дочерних обществах и организациях ПАО «Газпром».

При оценке рисков последовательно выполняются следующие процедуры: идентификация опасностей, определение уровня риска, оценка риска на предмет его допустимости, выбор дополнительных мер по управлению рисками, анализ результатов оценки рисков, документирование и хранение информации. Серьезность возможных последствий идентифицированных опасных событий оценивается экспертами с помощью Матрицы определения уровня риска на предмет принадлежности к одной из пяти категорий тяжести риска.

Оценка вероятности проводится с учетом существующих мер управления, на основании опыта за последние 10 лет и мнения группы экспертов о возможности того или иного последствия опасного события. С помощью Матрицы определяется уровень (рейтинг) риска как сочетание тяжести и вероятности последствий конкретного опасного события. Если требуются дополнительные меры управления рисками (необходимость таковых определяется через процедуру доказательства практически целесообразного низкого уровня), то их выбор осуществляется исходя из принципа иерархии (приоритет), начиная от полного устранения опасности, когда это практически возможно, и заканчивая применением средств индивидуальной защиты.

В результате оценки профессиональных рисков для основных профессий на объектах добычи и транспортировки газа было установлено, что интенсивный шум

создает недопустимые уровни риска как при работе в освоенных традиционных районах добычи нефти и газа, так и в экстремальных условиях арктического шельфа, Дальнего Востока и Камчатки [12]. Таким образом, управление профессиональными рисками, обусловленными интенсивным шумом, является актуальной задачей, решение которой приносит значительный материальный и социальный эффект за счет снижения уровня производственного травматизма, профессиональных заболеваний, вероятности техносерьезных аварий и катастроф [13].

Обзор мероприятий по снижению шума

Многолетние работы автора статьи позволяют рекомендовать проверенные на практике мероприятия по снижению шума в источнике его возникновения, на путях распространения, а также по снижению неблагоприятного воздействия шума на персонал с помощью средств индивидуальной защиты [3, 14-16].

Задачу защиты от шума необходимо решать путем внедрения комплекса мероприятий с учетом технических возможностей и затрат на его снижение (рис. 2).

Заказчик строительства объекта выдает техническое задание на его проектирование проектной организации, которая на основании результатов акустического расчета прогнозирует акустические характеристики помещений на объекте и спады уровней звукового давления на селитебной территории. Необходимые для расчетов шумовые характеристики принимаются по каталогу [17] или прогнозируются по методике работы [3] с учетом известных характеристик оборудования по данным завода-изготовителя. Методика прогнозирования шумовых характеристик газотранспортного оборудования приведена в работе [3]. Измерение шумовых характеристик проводится в натурных условиях по методикам, приведенным в работах [18, 19]. Расчет ожидаемых спадов уровней звукового давления (УЗД) на местности проводится по методике, приведенной в работах [3, 20] с учетом влияния рельефа местности, импеданса земной поверхности и метеоусловий. Прогнозирование акустических характеристик помещений выполняется по регламенту.

Определенные шумовые характеристики оборудования, акустические характеристики помещений и известные



Рис. 2. Алгоритм разработки мероприятий по снижению шума

спады УЗД позволяют определить ожидаемые условия труда и прогнозируемое загрязнение окружающей среды [3]. Если условия труда ожидаются не соответствующими санитарным нормам или шумовое загрязнение окружающей среды не удовлетворяет требованиям СП 51.13330 [21], то необходимое улучшение шумовых характеристик оборудования рассчитывается по СП 51.13330 или по методике, приведенной в работе [3].

Для улучшения шумовых характеристик оборудования следует использовать

методы, которые успешно применялись на объектах ПАО «Газпром» и описаны в работах [3, 14-16].

На основании теоретических исследований и результатов анализа экспериментальных данных [3, 14-16] разработаны алгоритмы и полуэмпирические зависимости для прогнозирования шумовых характеристик основных источников шума газоперерабатывающих агрегатов (ГПА): тракты всасывания и выхлопа, нагнетатель, технологическая обвязка нагнетателей.

Строительно-акустические мероприятия по снижению шума в производственных помещениях

Мероприятие	Акустическая эффективность, ДБ	Целесообразный этап внедрения	Условия, влияющие на акустическую эффективность
Противошумные архитектурно-планировочные мероприятия	5...10	На стадиях разработки технологической и строительной частей проекта при новом строительстве и реконструкции	Характер технологического процесса, вид и количество шумного оборудования, требуемые по условиям технологии объемно-планировочные параметры помещений и др.
Группирование оборудования и отдельных участков по степени шумности	5...10	То же	Объемно-планировочные параметры помещения, разница в уровнях шума оборудования, положения расчетных точек относительно источников звукопоглощающих поверхностей ограждений и др.
Звукоизоляция помещения и отдельных участков помещения	10...15	То же	То же
Снижение шума средствами звукопоглощения	6...10	На стадии проектирования строительной части проекта при новом строительстве и реконструкции	То же
Экранирование оборудования и отдельных участков	5...10	То же	То же
Комплексное применение строительно-акустических мер	10...20	На всех стадиях проектирования и реконструкции	Характер технологического процесса, вид и количество оборудования, разница в его уровнях, объемно-планировочные параметры помещений, звукопоглощение поверхностей ограждений, положение рабочих мест относительно источников и др.

В практике снижения шума газотранспортных предприятий на основании результатов работы [15], устанавливающей требования к шумовым характеристикам газотранспортного оборудования, используются архитектурно-планировочные и строительно-акустические методы. Перечень основных акустических мер по снижению шума в помещениях с источниками шума приведен выше в таблице [3].

Выбор конкретного мероприятия и его эффективность зависят от производственных условий: характера технологического процесса; характеристик шума; требуемого снижения шума; характеристик помещения [3, 14-16].

Эффективность применения строительно-акустических методов снижения шума зависит от следующих факторов: частотного состава и уровней шума, их распределения по помещению, объемно-планировочных и акустических характеристик помещений, наличия площадок обслуживания оборудования, расположения систем вентиляции, технологических коммуникаций, подъемно-транспортного оборудования и т.д.

Выполненные исследования показали, что применение только одного из выше приведенных методов не приводит к снижению шума до требований санитарных норм. Оптимальным решением является комплексное применение методов.

Рациональная акустическая планировка производственных зданий должна осуществляться путем группирования технологических процессов по шумности. Для разработки рекомендаций по рациональной планировке компрессорных станций (КС) на основании теоретических и экспериментальных исследований [3] определено влияние импеданса земной поверхности, особенностей источников шума КС, поглощения звука в воздухе, фактора направленности излучения шума газотурбинных установок (ГТУ), неоднородности воздуха, древесной растительности на затухание звука.

Установлено, что наибольшее влияние на рассеяние шума от КС на местности имеет взаимодействие звука с физическими характеристиками земной поверхности, что обуславливает

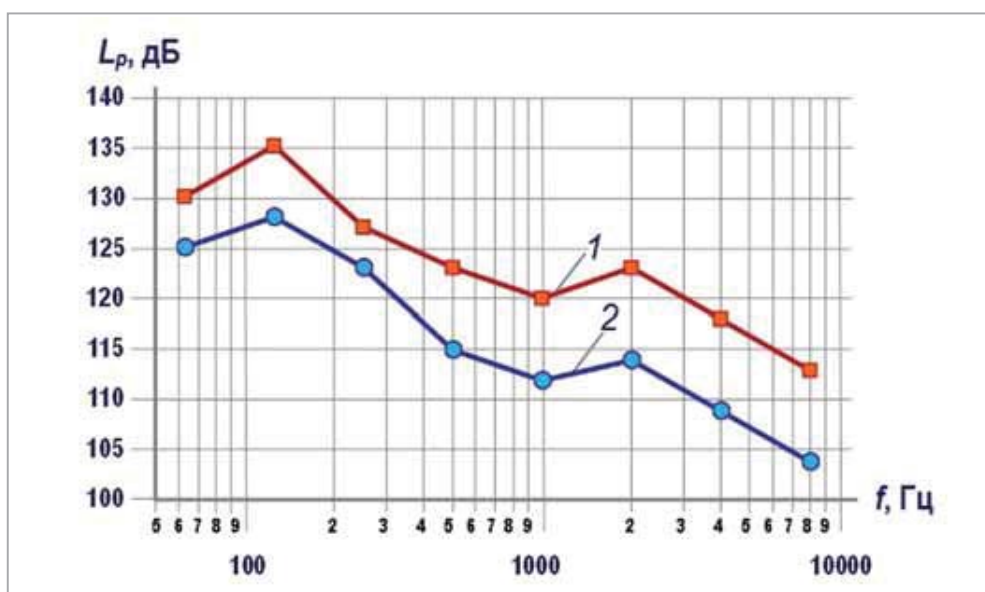


Рис. 3. Уровни звуковой мощности агрегата ГПА Ц 6,3:

1 – до установки дополнительных устройств шумоглушения;

2 – после установки дополнительных устройств шумоглушения

существенные изменения в значениях наблюдаемых уровней шума в расчетных точках.

В работе [3] рассмотрена базовая расчетная модель для прогнозирования распространения звука на местности.

Внедрение нормативно-технических документов позволило получить значительный экономический эффект за счет сокращения санитарно-защитных зон (СЗЗ) по шуму и уменьшения протяженности шлейфа КС. Дальнейшее снижение размеров СЗЗ было достигнуто благодаря внедрению звукоизолирующих конструкций на шумных трубопроводах, которые рассчитываются с помощью методики работы [22]. Методы расчета средств шумоглушения подробно рассмотрены в работе [23].

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты снижения шума наиболее распространенного в газовой промышленности типового агрегата.

Снижение шума звукоактивных трубопроводов достигнуто применением теплозвукоизолирующих конструкций на основе нового материала (рис. 4). Эффективность от применения подобных конструкций – снижение громкости шума в 1,7 раза, гарантированная защита от коррозии трубопровода.

Преимущества нового материала

Использование тех или иных материалов при звукоизоляции звукоактивных трубопроводов диктуется конкретными свойствами материалов, применяемых для этой цели. При широкополосном спектре шума звукоизоляция минераловатными и стекловатными утеплителями может не дать ощутимого эффекта. Исследования, проведенные в НИИСФ РААСХН, хорошо иллюстрируют ситуацию (рис. 5).

Согласно проведенному анализу полученных данных, все испытанные материалы обладают незначительным акустическим эффектом в области шумов частотного диапазона ниже 500 Гц, что не покрывает необходимую область превышения уровня звукового давления для большинства единиц технологического оборудования на КС.

Комбинированные системы материалов на основе пеностекла обладают недостаточным акустическим эффектом при довольно внушительных расходах на приобретение и монтаж конструкции. В последнее время в качестве звукоизолирующих конструкций были предложены новые системы на основе эластомерных материалов, эффективность которых

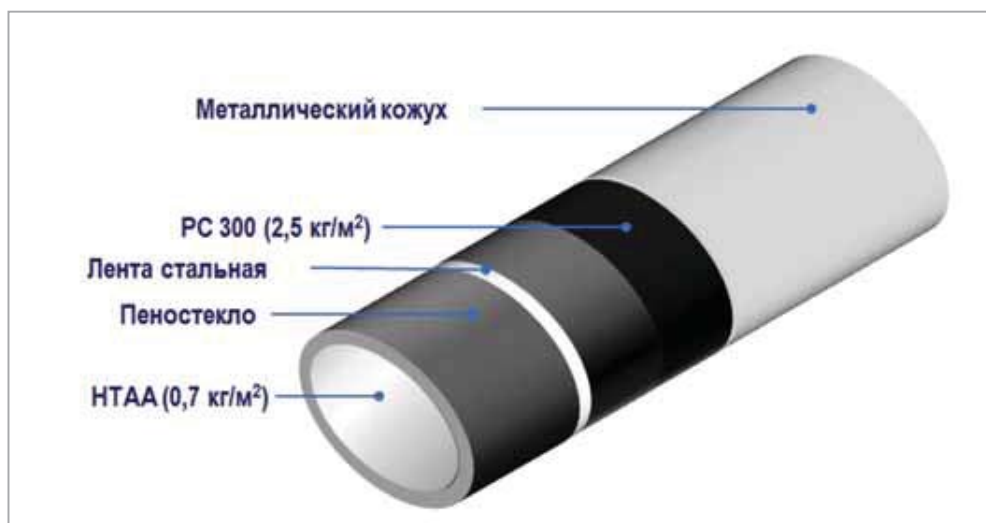


Рис. 4. Типовая схема теплозвукоизолирующей конструкции на основе нового материала

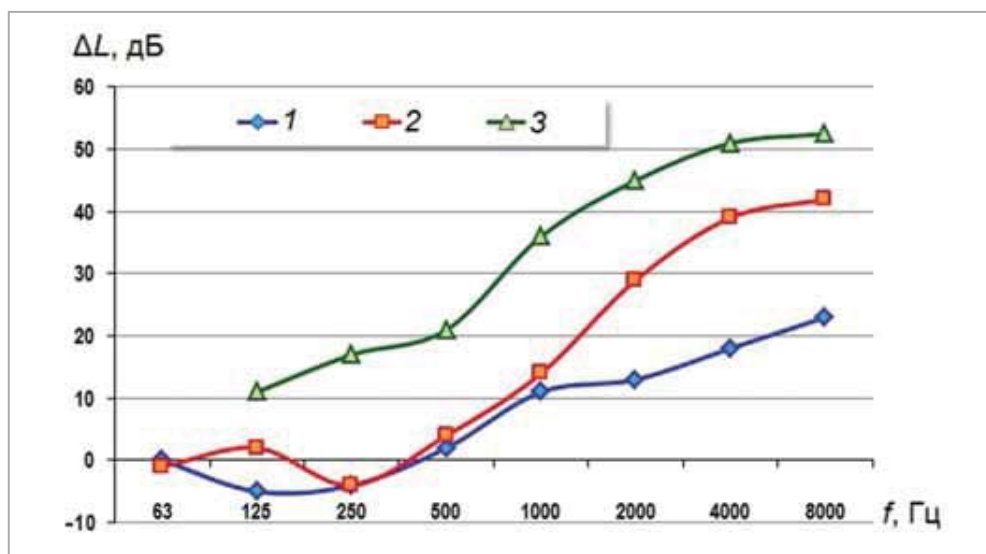


Рис. 5. Эффективность различных по составу покрытий на основе пеностекла, волокнистых материалов и эластомеров:

1 – маты из стеклянно-штапельного волокна (толщина 100 мм, плотность 22 кг/м³);

2 – пеностекло (50 мм, 170 кг/м³), минеральная вата (50 мм, 120 кг/м³),

сталь оцинкованная (толщина 1 мм); 3 – пеностекло типа FOAMGLAS T4 (50 мм),

базальтовый мат (80 мм), antivибрационный слой (3 мм), оцинкованный лист (0,55 мм)

заметно выше традиционных материалов, давно присутствующих на рынке.

Существенным преимуществом при изоляции звукоактивных трубопроводов эластомерными материалами является возможность моделировать звукоизолирующие конструкции согласно поставленной задаче.

На АГНКС основными источниками шума являются свечи рассеяния высокого давления, компрессорные установки, блоки осушки, транспортный поток. Наиболее оптимальным мероприятием по снижению шума на АГНКС является установка акустического экрана, конструкция и габариты которого определяются из данных работы [23], а при расположении АГНКС вблизи жилой

застройки – и другие мероприятия из приведенной выше таблицы.

Выводы

В работе рассмотрено состояние условий труда по шуму и обоснована необходимость управления рисками по этому фактору на предприятиях ПАО «Газпром». Приведен алгоритм разработки мероприятий по шумоглушению и описан опыт их внедрения на объектах ПАО «Газпром». Также в работе содержатся результаты испытаний нового звукопоглощающего материала на основе эластомеров и доказывается его эффективность и требуемые свойства защиты от коррозии.

Литература

1. Терехов А.Л. Управление профессиональными рисками на шумных предприятиях ПАО «Газпром» // Защита от повышенного шума и вибрации / Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 49-63.

2. Терехов А.Л., Щепочкин С.В., Каширин А.Б. Анализ результатов экспертизы неустранимости вредных производственных факторов на рабочих местах ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2012. – № 9. – С. 81-83.
3. Терехов А.Л., Дробаха М.Н. Современные методы снижения шума ГПА / Под ред. Р.О. Самсонова. – СПб.: 2008. – 368 с.
4. Терехов А.Л., Сулин В.А., Котишевский Г.В. и др. Обзор технических решений по снижению шума на предприятиях добычи и транспорта газа. Материалы международной акустической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Е.Я. Юдина. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – С. 257-267.
5. Терехов А.Л., Сафонов А.Л. Повышение безопасности производственных процессов путем снижения шума трубопроводов // Труд и социальные отношения. – 2016. – № 4. – С. 163-174.
6. Райцелис И.В. Профессиональная тугоухость у рабочих газоперерабатывающего производства // Гигиена и санитария. – 2009. – № 4. – С. 39-40.
7. Пыстина Н.Б., Терехов А.Л., Зинкин В.Н., Драган С.П. Шум и инфразвук как вредные производственные факторы на предприятиях газовой промышленности // Газовая промышленность. – 2012. – № 1. – С. 68-71.
8. Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Роспотребнадзор, 2005.
9. Перечень производств, профессий и работ с вредными и (или) опасными условиями труда организаций ОАО «Газпром», которые дают право производить оплату по повышенным тарифным ставкам или устанавливать доплаты работникам в зависимости от условий труда. – М.: ИРЦ Газпром, 2006.
10. Трудовой кодекс РФ (ТК РФ) 2016, статья 219.
11. СТО Газпром 18000.1–2014. Единая система управления охраной труда и промышленной безопасностью в ОАО «Газпром». Положение по идентификации опасностей и управлению рисками. – М., ИРЦ Газпром, 2014. – 34 с.
12. Терехов А.Л., Сохилл С. Создание здоровых и безопасных условий труда при работе на добычных нефтегазовых платформах арктического шельфа // Газовая промышленность. – 2011. – № 11. – С. 92-96.
13. Лесных В.В. Управление рисками – путь к устойчивому развитию ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2008. – № 11. – С. 52-55.
14. Власов Е.Н., Дедиков Е.В., Терехов А.Л., Цулимов С.В. Исследование шума лопаточных машин на компрессорных станциях магистральных газопроводов и способы его снижения. – М.: ИРЦ Газпром, 1998. – 287 с.
15. Терехов А.Л. Исследования и снижение шума на компрессорных станциях магистральных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – 303 с.
16. Терехов А.Л. Шум газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистральных газопроводов. – М.: ВНИИГАЗ, 2003. – 499 с.
17. СТО Газпром 2-3.5-041–2005. Каталог шумовых характеристик газотранспортного оборудования. – М.: ВНИИГАЗ, 2005. – 7 с.
18. Р51-00158623-26–96. Методика измерения шумовых характеристик газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – 27 с.
19. Р51-00158623-18–92. Типовая методика акустических испытаний опытных и серийных образцов ГПА. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – С. 17.
20. Методика расчета уровня шума от КС на местности. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – 24 с.
21. СП 51.13330.2011 Защита от шума.
22. Терехов А.Л., Демин В.М. Инженерная методика расчета эффективности средств звукоизоляции и вибропоглощения трубопроводов обвязки на компрессорных станциях // НТС сер. «Транспорт и подземное хранение газа». – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – № 1. – С. 12-18.
23. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. – М.: Логос, 2013. – 432 с.

Для специалистов, изучающих вопросы безопасности эксплуатации газобаллонных транспортных средств

В издательстве ООО «Газпром ВНИИГАЗ» вышла в свет новая книга «Основы логико-вероятностного анализа безопасности транспортных средств на газовом топливе». Авторы – кандидат технических наук, начальник лаборатории прогнозирования и экономики газомоторного топлива Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ» А.А. Евстифеев и кандидат технических наук, директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительный директор Национальной газомоторной ассоциации С.В. Люгай.

В книге изложены в новой постановке вопросы безопасности транспортных средств на газовом моторном топливе. При анализе применены методы и подходы, используемые при анализе надежности и безопасности сложных технических систем. Показана связь безопасности и отказоустойчивости с надежностью. Представлена методология логико-вероятностного анализа безопасности транспортных средств на газовом топливе. Предложены новые средства повышения безопасности применения газового моторного топлива на общественном транспорте крупных городов. Проведен анализ роли оператора и предложены критерии и показатели надежности объектов газовой заправки и транспортных средств на ГМТ, управляемых человеком. Книга предназначена для преподавателей и студентов высших учебных заведений, изучающих вопросы безопасности жизнедеятельности, а также инженеров и технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией газобаллонных транспортных средств.



Евстифеев Андрей Александрович
кандидат технических наук, начальник лаборатории прогнозирования и экономики газомоторного топлива Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», директор кафедры «Инженерное образование. Методы и инструменты инженерных расчетов» Самарского государственного технического университета

Люгай Станислав Владимирович
кандидат технических наук, директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительный директор АНПАТ «Национальная газомоторная ассоциация»

А.А. Евстифеев, С.В. Люгай
ОСНОВЫ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

GasSuf 2017: больше участников, больше посетителей

74

С 17 по 19 октября в Москве с успехом прошла 15-я Юбилейная Международная выставка газобаллонного, газозаправочного оборудования и техники на газомоторном топливе GasSuf. Организатором этого мероприятия выступила Группа компаний ITE, лидер рынка выставочных услуг России.

В этом году число участников выставки GasSuf увеличилось на 10 % – это 52 компании из 11 стран мира, которые продемонстрировали технологические разработки в области газомоторного топлива и тенденции развития рынка ГМТ в России. Общая площадь экспозиции составила почти 3000 м². За три дня работы выставку посетило около 1800 человек из 22 стран мира и 65 регионов России. По сравнению с прошлым годом, рост числа посетителей составил 13 %, при этом 1289 человек из них – это потенциальные байеры.

В церемонии торжественного открытия выставки приняли участие заместитель директора департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации Сергей Егоршев, депутат Московской городской Думы, заместитель председателя комиссии по науке и промышленности Александр Сметанов, представители министерства транспорта РФ, министерства транспорта и дорожной инфраструктуры Московской области, а также другие почетные гости.

Традиционно участники представили множество новинок техники на ГМТ.

В этом году в выставке вновь участвовали два подразделения Группы ГАЗ – «Коммерческие автомобили – Группа ГАЗ» и «Русские автобусы – Группа ГАЗ». На стендах были представлены грузовики ГАЗон NEXT CNG. Машины этой серии демонстрируются на выставке GasSuf уже третий год. Но если два года назад это был перспективный образец, то теперь такие автомобили можно приобрести.

Каждый год Группа ГАЗ демонстрирует грузовики ГАЗон в разных исполнениях. В этом году компания представила аварийно-ремонтную мастерскую «ГАЗон NEXT CNG» с двигателем, работающим на сжатом природном газе, предназначенную для ремонта и обслуживания газораспределительных станций, а также мусоровоз. Помимо этого, Группа ГАЗ показала на выставке автобус ПА3-320412 CNG среднего класса для городских и пригородных перевозок.

Автопарк № 1 «Спецтранс» представил на выставке мусоровоз с задней загрузкой на базе автомобиля ISUZU, работающий на смешанном топливе – газодизеле. Используя технологию смешанной подачи топлива в городах, можно значительно снизить выбросы в атмосферу твердых частиц и вредных веществ.

Компания «Д.В.С. Эко» предложила специалистам автобус ДВС-4293 «ВИХРЬ», работающий на газе и оснащенный 250-сильным двигателем CUMMINS на компримированном природном газе (КПГ).

Компания «Русские цилиндры» продемонстрировала линейку инновационных газотранспортных решений для транспортировки и хранения природного и промышленных газов в сжатом состоянии. Особого внимания специалистов удостоилась мобильная газотранспортная система ГАЗДОКЕР (GASDOCKER), состоящая из нескольких специализированных док-контейнеров повышенной вместимости и док-полуприцепа, способного проводить замену пустых контейнеров без использования подъемных кранов или специализированных перегрузочных терминалов.

Впервые в выставке GasSuf приняла участие итальянская компания LANDI RENZO, предлагающая на российском рынке широкий ассортимент газовых систем для переоборудования автомобиля на СПГ и КПГ.



На стенде Группы ГАЗ

«Кировский завод Газовые технологии» представил технологические разработки в области газомоторного топлива собственного производства – газозаправочную колонку КЗГТ-КСМ для установки на АГНКС, приспособленную для удобной и безопасной заправки КПП, и автоматизированную систему управления АГНКС АСУ ТП.

Компания «РЕЗОЛ Автогаз», официальный дистрибьютор Lovato, обладающая собственным центром исследований, предложила специалистам полный спектр систем и компонентов газобаллонного оборудования своей разработки для использования пропана и метана как альтернативы бензину и дизелю.

Компания «Газпарт 95» провела на выставке презентацию первой в России федеральной сети газовых сервисов «Газовая точка». Представители компании рассказали о философии этого проекта и его бизнес-модели, а также о численности открытых сервисов и планах на будущее. На стенде компании было представлено 7-е поколение газобаллонного оборудования, установленного на реальную машину.

Компания «Мир газа» представила на своем стенде газобаллонное оборудование ведущих мировых производителей: Poletron, BRC, OMB и других.

Завод GRAF S.p.A. в этом году презентовал компрессор, созданный непосредственно по запросам российского рынка. Это оборудование небольшой производительности (до 600 м³), работающее

на входящем давлении от 0,1 до 1,2 МПа, а также стандартную газораздаточную колонку разработки GRAF.

На стенде НПК «Ленпромавтоматика», специализирующейся в проектировании, изготовлении и поставке технологического оборудования для АГНКС и Крио-АЗС, были представлены первая в своем роде отечественная топливораздаточная колонка ЛПА-СПГ-К для заправки различного транспорта СПГ и стационарная газозаправочная колонка ЛПА-ГЗК для заправки КПП на АГНКС.

В рамках деловой программы GasSuf 17 октября состоялась конференция «Инновационные проекты в области расширения использования природного газа в качестве моторного топлива для пассажирского транспорта, автотранспортных средств, дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин», организованная при содействии СПГО. Ставшая традиционным событием на выставке конференция в этом году собрала спикеров из всех заинтересованных российских ведомств – Минэнерго РФ, ГУОБДД МВД РФ, муниципальных комитетов по пассажироперевозкам, а также представителей науки (НАМИ, МАДИ, НИИАТ), ведущих испытательных лабораторий (Трансдекра, ИЛ-16, Респект-авто), бизнеса (как в области поставок и производства ГБО, так и установочных производств) и пользователей газомоторного транспорта. В конференции приняли участие около 100 специалистов.

В 2018 году 16-я Международная выставка газобаллонного, газозаправочного оборудования и техники на газомоторном топливе будет проходить с 23 по 25 октября в КВЦ «Сокольники».

Водородная электричка

76

Е.Н. Пронин, координатор проекта «Голубой коридор»

В декабре 2021 года транспортное управление земли Нижняя Саксония (Германия) и компания Alstom планируют начать регулярную эксплуатацию пригородных электропоездов на водородных топливных элементах Coradia iLint по маршруту Куксхафен – Бремерхафен – Бремерфёрде – Букстехуде. Опытная эксплуатация поезда «с нулевыми выбросами» должна начаться весной 2018 года. Разрешительная документация на электричку должна быть оформлена до конца 2017 года. Французская компания Alstom имеет богатый опыт строительства локомотивов. В общей сложности она продала 2400 единиц различных модификаций этой техники.



Электропоезд на водородных топливных элементах Coradia iLint

Новые электрички Coradia iLint должны заменить старые поезда на дизельном топливе, что полностью уберет выбросы в атмосферу. Однако экологическая чистота водорода – относительна. Поезд не будет производить выбросов в движении. Но общий углеродный след проекта будет зависеть от технологии получения водорода. При сегодняшней структуре производства электроэнергии в Германии и применении гидролиза для получения водорода проект по экологическим показателям проигрывает дизельному топливу.

И все же компания Alstom рассчитывает, что к 2020 году водород «позеленеет», а стоимость эксплуатации водородного поезда станет сопоставима с дизельной версией. Президент компании Анри Пупар-Лафарж отметил, что идея проекта заключается в том, чтобы затраты на поезд с нулевыми выбросами были меньше, чем на электрификацию железной дороги. Компания утверждает, что значительные участки железных дорог в Европе останутся неэлектрифицированными. Для них-то и пригодятся поезда iLint. Только в Германии, по данным экспертов, работают более 4000 дизельных локомотивов.

9 ноября 2017 года компания Alstom получила контракт на строительство 14 таких поездов. Заправку электричек сжатим водородом обеспечит компания Linde. Первый пункт обслуживания водородом, а также текущего обслуживания и ремонта будет построен в Бремерфёрде. Стоимость его строительства оценена в 10 млн евро. Правительство ФРГ выделяет застройщику



Схема расположения узлов в водородной электричке

грант на сумму 8,4 млн евро. Участники проекта обязуются осуществлять техническое обслуживание и заправку поездов в течение 30 лет.

Водород (скорее всего под давлением 70 МПа) будет храниться в сосудах 4-го типа X-STORE®, выпускаемых компанией XPERION (с октября 2016 года входит в группу Hexagon Composites). Баллоны из композиционных материалов, так же как и топливные элементы, располагаются на крыше. Каждый вагон будет нести по 94 кг водорода. Одной заправки водородом должно хватать на перегон длиной 1000 км. Максимальная скорость поезда 140 км/ч. В поезде 150 мест для сидения, всего же он может перевозить до 300 пассажиров.

Водородная электричка будет иметь такие же характеристики при ускорении и торможении, что и базовая модель на дизельном топливе Coradia Lint 54. Краткосрочные большие нагрузки будут обеспечиваться аккумуляторными батареями, а длительные – топливными элементами. Накопление энергии от топливных элементов (поставщик компания Hydrogenics) будет осуществляться в литиево-ионных аккумуляторах повышенной эффективности (поставщик фирма Akasol). Интересно, что Штефан Шранк, руководитель проекта Coradia iLint, оценивает степень его технологического совершенства на уровне дизельных двигателей 100 лет назад.



В вагоне нового поезда

В России локомотивы на водороде, возможно, менее интересны и перспективны, чем те, которые работают на сжиженном природном газе (СПГ). Во всяком случае на данном этапе развития. Работы по газификации подвижного состава в РЖД ведутся давно, и сейчас, кажется, выходят на этап масштабного внедрения. Вообще в России, с ее запасами природного газа, нужно концентрироваться именно на этой альтернативе нефтяному топливу. Водород, электричество, биометан не будут конкурентоспособны еще в течение длительного времени. Нужно также понимать, что дизельное топливо и бензин будут доминировать на топливном рынке еще многие десятилетия. Это нормально. Невозможно и не нужно все переводить на альтернативные виды горючего. Они должны внедряться разумно. А среди альтернатив природный газ, безусловно, является выбором номер один.

По материалам Alstom, GFS Corp, <http://www.francetvinfo.fr>,
<http://www.hexagonxperion.com>, <http://www.ngvjourn.com>,
<http://www.raillynews.com>, <http://www.railwaygazette.com>,
<http://www.renewableenergyfocus.com>, <https://www.globalrailnews.com>,
<https://www.railengineer.uk>, International Railway Journal - <http://www.railjournal.com>,
 Mass Transit Magazine - <http://www.masstransitmag.com>,
 Rail Express - <https://www.railexpress.com>

Abstracts of articles

P. 17

Rapeseed oil methyl ester as a diesel fuel

Vladimir Markov, Stanislav Nagornov, Svetlana Romantsova, Vera Neverova, Sa Boven

Characteristic features of using biofuels with rapeseed oil in diesel engines have been considered. Spatial configurations of the substrate and the reagent molecules involved in the synthesis of components of the biofuel from vegetable oil are investigated. Viscosity characteristics of mixtures of diesel fuel with rapeseed oil methyl ester are obtained. Results of experimental research of a vehicle diesel engine of the type D-245.12S running on diesel fuel and rapeseed oil methyl ester multipropellant mixtures have been shown. Dependence of fuel efficiency and exhaust gases emissions characteristics on biofuels components has been shown.

Keywords: diesel engine, diesel fuel, biodiesel fuel, rapeseed oil methyl ester, mixture biofuel, fuel efficiency, toxicity of exhaust gases.

References

1. Alternative fuels for internal combustion engines / A.A. Aleksandrov, I.A. Arkharov, V.A. Markov et al. Ed. A.A. Alexandrov, V.A. Markov. – M.: OOO SIC «Engineer», LLC «Oniko-M», 2012. – 791 p.
2. Lyotko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. Application of alternative fuels in internal combustion engines. – M.: PH MADI (TU), 2000. – 311 p.
3. Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. Use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines. – M.: OOO SIC «Engineer», LLC «Oniko-M», 2011. – 536 p.
4. Biofuel for internal combustion engines / V.A. Markov, S.N. Devyanin, S.A. Zykov et al. – M.: SRC «Engineer» (Union of NIO), 2016. – 292 p.
5. Technology and technology of production and processing of vegetable oils: A manual for universities / S.A. Nagornov, D.S. Dvoretzkiy, S.V. Romantsova, V.P. Tarov. – Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University, 2010. – 96 p.
6. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Tovstyka V.S. Application of fuels based on rapeseed oil in tractor diesel engines. – Kirov: «The Vanguard», 2014. – 144 p.
7. Saveliev G.S. Production and use of biodiesel from rape. – M.: GNU VIM Rossselhozakademii, 2007. – 96 p.
8. Vasiliev I.P. The effect of vegetable fuels on the environmental and economic performance of the diesel. – Lugansk: Publishing house of the East Ukrainian University. V. Dal, 2009. – 240 p.
9. Semenov V.G. Biodiesel. Physicochemical indicators and ecological and economic characteristics of the diesel engine. – Kharkov: NTU «KhPI», 2002. – 251 p.
10. Bioenergy: World experience and development forecasts / L.S. Orsik, N.T. Sorokin, V.F. Fedorenko and others. Ed. V.F. Fedorenko. – M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2008. – 404 p.
11. Stopsky V.S., Klyuchkin V.V., Andreev N.V. Chemistry of fats and products of processing of fatty raw materials: Textbook for high schools. – M.: Kolos, 1992. – 285 p.
12. Tyutyunnikov B.N., Gladky F.F., Bukhshtab Z.I. Chemistry of Fats: A Textbook for High Schools. – M.: Kolos, 1992. – 448 p.
13. Berezov T.T., Korovkin B.F. Biological chemistry: Textbook for high schools. – M.: Medicine, 1998. – 704 p.
14. Eyring H. Viscosity, Plasticity and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates // The Journal of Chemical Physics. – 1936. – Vol. 4. – No. 4. – P. 283-291.
15. McAllister R.A. The Viscosity of Liquid Mixtures // AIChE Journal. – 1960. – Vol. 6. – No. 3. – P. 427-431.
16. Dominguez M., Pardo J.L., Gascon I.G., Royo F.M., Urieta J.S. Viscosities of the Ternary Mixture (2-butanol + n-hexane + 1-butylamine) at 298.15 and 313.15 K // Fluid Phase Equilibria. – 2000. – Vol. 169. – No. 2. – P. 277-292.
17. Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Sa Boven. Viscous characteristics of multicomponent mixed biofuels based on vegetable oils // Transport on alternative fuel. – 2016. – No. 6. – P. 33-49.

P. 31

The mathematical model of the actual and theoretical cycles of a diesel with a high supercharging

Sergey Kozlov, Stanislav Lyugay

A new way of analytical integration of the differential heat balance equation in the diesel cylinder during fuel combustion is proposed in the article. Equations are obtained that establish a direct relationship between the pressure and temperature of the gas with the angle of rotation of the crankshaft and the characteristics of the fuel supply, including equations for calculating the maximum pressure and combustion temperature and the indicator parameters of the diesel-indicator efficiency and mean indicator pressure. The decisive role of the fuel supply characteristic in the development of the heat release process is shown. Generalized empirical relationships are obtained, which establish the relationship between the relative amount of heat released during the main combustion period and the duration of the entire combustion process with the cycle dynamics factor.

Keywords: heat balance, pressure and temperature in the diesel cylinder, the factor of dynamic cycle, the amount of heat, indicator value of the diesel.

References

1. Theory of internal combustion engines / Ed. Dyachenko N.Kh. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – 552 p.
2. Zhukov V.P., Pavlichenko A.M. Investigation of the characteristics of the heat release of ICE by the load characteristic using nonlinear programming methods. Trudy NKI, vol. 12. – Nikolaev: NCI, 1976. – P. 50-55.
3. Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines: Proc. for VTUZ specialty «Engines of internal combustion» / Vyrbubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. and others. Ed. A.S. Orlin, M.G. Kruglov, 4th ed., Renewed, and additional. – M.: Mechanical Engineering, 1983. – 372 p.
4. Voinov A.N. Burning in high-speed reciprocating engines. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – 275 p.
5. Razletsev N.E., Semyonov N.G., Levkovich S.A. Calculation of the combustion process in diesel locomotive: Resp. interd. collection, issue. 27. – Kharkov: High School, 1978. – 82 p.
6. Portnov D.A. High-speed turbo piston engines with compression ignition. – M.: Mashgiz, 1963. – 638 p.
7. Tolstov A.I. Processes of mixture formation and combustion in high-speed engines with compression ignition during supercharging. Proceedings of VNITOE. – Mashgiz, 1954.
8. Roganov S.G. Analytical determination of the coefficient of residual gases in two-stroke engines // Izvestiya Vuzov. – 1964. – No. 7. – P. 15-18.

P. 43

Mathematical modeling of production processes of automobile gas filling compressor station

Andrey Evstifeev

In the process of design and reconstruction of refueling facilities with compressed natural gas, there is a need to choose the most rational design of an automobile gas filling compressor station. In the given work the mathematical device allowing to estimate various variants of station decisions of station with observance of a principle of the volumetric gas balance consisting in formation of a uniform continuous gas channel with constant or variable productivity is offered. To achieve this goal, mathematical models of the main technological blocks of the station and gas pipelines were developed. The rules for forming the final mathematical model of the station are proposed.

Keywords: compressed natural gas, automobile gas filling compressor station, mathematical model, efficiency of the production process.

References

1. Fotin B.S., Pirumov I.B. Reciprocating compressors. – M.: Mechanical Engineering, 1987.
2. Evstifeev A.A., Lyugay S.V. Fundamentals of the logical and probabilistic analysis of the safety of vehicles on gas fuel. – M.: VNIIGAZ, 2017.
3. Evstifeev A.A., Ermolaev A.E. Influence of idle runs of gas city buses on indicators of industrial and economic activity // Transport on alternative fuel. – 2016. – No. 4 (52). – P. 23-30.
4. Lyugay S.V., Balashov M.L., Evstifeev A.A. Estimating the waiting time for filling the vehicle with CNG stations // Transport on alternative fuel. – 2016. – No. 6 (54). – P. 50-54.
5. Evstifeev A.A., Zaeva M.A., Sergeev M.S. Method to ensure the robustness of the power supply control system of a gas vehicle // Transport on alternative fuels. – 2016. – No. 3 (51). – P. 51-60.
6. Evstifeev A.A., Zaeva M.A., Khetagurov Ya.A. Methods and tools for optimizing the location of production and supply infrastructure objects / In the book: Scientific session of NNRNU MEPhI-2015. Annotations of reports: in 3 volumes. Ed. O.N. Golotyuk. – 2015. – P. 74.
7. Popov M.A., Egorova A.N., Evstifeev A.A. Modeling and optimization of the locations of the objects of gas refueling of transport. / In the book: Scientific session of NNRNU MEPhI-2015. Annotations of reports: in 3 volumes. Ed. O.N. Golotyuk. – 2015. – P. 97a.
8. Evstifeev A.A., Drygina Yu.N., Ermolaev A.E. Modeling and optimization of the development process of the production and distribution network of gas filling stations // Gas industry. – 2015. – No. S3 (728). – P. 30-33.
9. Evstifeev A.A. Mathematical model for determining the number and productivity of refueling columns at CNG stations // Gas industry. – 2015. – No. 8 (726). – P. 95-97.
10. Evstifeev A.A. Placement of the infrastructure of gas refueling transport // Transport on alternative fuel. – 2015. – No. 6 (48). – P. 26-39.
11. Evstifeev A.A. Analysis of the efficiency of the production process at CNG stations // Transport on alternative fuels. – 2015. – No. 5 (47). – P. 27-33.
12. Evstifeev A.A. The method of formation of adequate cost of gas motor fuel // Transport on alternative fuel. – 2015. – No. 2 (44). – P. 41-46.
13. Evstifeev A.A. Modern Approaches to the Selection of the Performance of the Main Process Equipment for Gas-Filling Facilities // Transport on Alternative Fuels. – 2015. – No. 4 (46). – P. 48-54.
14. Evstifeev A., Zaeva M., Krasnikova S., Shuvalov V. Multi-criteria equipment control in complex engineering systems // Asian Journal of Applied Sciences. – 2015. – T. 8. – No. 1. – P. 86-91.
15. Evstifeev A.A. Structural synthesis and solution algorithms for a mathematical model of a gas refueling system for transport and gas supply to autonomous consumers // Vesti gazovoy nauki. – 2015. – No. 1 (21). – P. 79-85.
16. Evstifeev A.A. Provision of municipal bus fleets of the megalopolis with gas motor fuel // Gas industry. – 2014. – No. 2 (702). – P. 86-89.
17. Evstifeev A.A. Mathematical model of the process of fueling vehicles KPG on gas filling stations // Transport on alternative fuel. – 2014. – No. 1 (37). – P. 24-31.
18. Evstifeev A.A. Multicriteria control of technological equipment of complex technical systems using methods of obtaining fuzzy inferences // Transport on alternative fuels. – 2014. – No. 5 (41). – P. 44-48.

19. Evstifeev A.A. Methodology of rational construction and continuous improvement of the regional network of CNG stations // Transport on alternative fuel. – 2014. – No. 3 (39). – P. 53-60.
20. Evstifeev A.A. A mathematical model for analyzing the demand for CNG and LNG in newly gasified territories // Gas industry. – 2013. – No. 1 (685). – P. 87-88.
21. Lyugay S.V., Evstifeev A.A., Timofeev V.V., Balashov M.L., Drygina Yu.N. Comparison of economic indicators when using liquid motor and gas engine fuels // Transport on alternative fuel. – 2013. – No. 5 (35). – P. 14-19.
22. Evstifeev A.A. Model of forecasting the consumption of gas motor fuel in the village // Transport on alternative fuel. – 2013. – No. 3 (33). – P. 43-47.
23. Evstifeev A.A., Balashov M.L. A technique for determining the border of the economic efficiency of the transition to natural gas as a motor fuel // Transport on alternative fuel. – 2013. – No. 2 (32). – P. 4-5.
24. Evstifeev A.A. Calculation of the reliability of the supply system of gas motor fuel to consumers // Transport on alternative fuel. – 2013. – No. 4 (34). – P. 61-65.
25. Evstifeev A.A., Zaeva M.A., Khetagurov Ya.A. Application of mathematical modeling in testing and development of complex technical systems // Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI. – 2013. – T. 2. – No. 1. – P. 115.
26. Evstifeev A.A., Zaeva M.A. Automated system of the unified state register of gas-cylinder equipment // In the book: Scientific session of the NNIU MEPhI–2012. Annotations of reports: in 3 volumes. – 2012. – P. 285.
27. Dedkov V.K., Evstifeev A.A. Methodology for assessing the reliability of a technical system based on test results. // Problems of safety theory and system stability. – 2010. – No. 12. – P. 215-221.
28. Evstifeev A.A., Sevrtsev N.A. Models for minimizing the directional damage to the transport system in the absence of information // Questions of the theory of safety and stability of systems. – 2009. – No. 11. – P. 137-145.

P. 53

Comparison of emissions of vehicles with various engines

Alexander Kapustin, Vyacheslav Rakov

This article presents the results of the authors' research on the emission of pollutants by cars with gasoline, diesel, gas and hybrid engines at the stages of their production, operation and recycling.

Keywords: environmental impact, cars, fuel consumption, emissions of pollutants, power facility.

References

1. Kotikov Yu.G. Transport power engineering (2006). – Electronic resource: <http://www.studfiles.ru/preview/4385265/page:20/>
2. Pistoia G. Electric and hybrid vehicles. Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. / G Pistoia. – Oxford: The Netherlands Linacre House, 2010.
3. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. AM-23-r dated March 14, 2008 «On the implementation of the methodological recommendations» Norms for the consumption of fuels and lubricants for motor vehicles », as amended on May 14, 2014 No. NA-50-r.
4. Kapustin A.A. Method for assessing the effect of the hybrid engine type on their economy and environmental safety / A.A. Kapustin, V.A. Rakov // The organization of traffic safety in large cities: a collection of works of participants of the twelfth international. scientific-practical. Conf. – SPbGASU. – St. Petersburg, 2016. – P. 639-645.
5. Kapustin A. Methodology to Evaluate the Impact of the Hybrid Cars Engine Type on their Economic Efficiency and Environmental Safety / A. Kapustin, V. Rakov // Transportation Research Procedures: 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities» SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg Petersburg, Russia. – 20 (2017). –Pp. 247-253.
6. Settlement instruction (methodology) for the inventory of emissions of pollutants by vehicles in the air: approved. OJSC «NIAT» November 17, 2006 / Ministry of Transport of the Russian Federation. – M.: 2006. – 55 p.
7. Kapustin A.A. Hybrid Cars: A Training Manual / A.A. Kapustin, V.A. Rakov; Ministry of Education and science of the Russian Federation, Vologod. state University. – Vologda: Voronezh State University, 2016. – 116 p.

P. 61

Operation of motor vehicles with hydrogen fuel

Evgeniy Ovsyannikov, Tamara Gaitova, Alexander Fomiv

The methods of producing, storage and using the hydrogen fuel are considered. The new way of producing hydrogen on board with exhaust energy using is suggested.

Keywords: hydrogen fuel, electrolyzer, energy resource, alternative energy, electro hydrogen generator (EHG).

References

1. Wind hjwer-Wikipedia, the free encyclopedic, may 25, 2012.
2. Dorosh I.A. Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine «Transmag». The most powerful renewable energy projects. Analytical review of AK 1-2012, results-2011, 2012.
3. The Solar Hydrogen Project of Neunburg vorm Wald, German, <http://www.solar-hydrogen.com.1996-2011>.
4. Lehmann Jochen, Luschitinetz Thomas and Menz Frank. The wind – hydrogen-fuel cell chain, The Hydrogen Planet, June 9-13, 2002, 14th World Hydrogen Energy Conference, Canada.
5. Reference book. Hydrogen, properties, production, storage, transportation, application. Ed. Hamburg D.Yu., Dubovkina N.F. – M.: «Chemistry», 1989. – 672 p.
6. Germany Invests in Hydrogen Technology for Renewable Storage, Vehicles, 2012. <http://www>.
7. The Demonstration project RH2-Werder / Kessin / Altentreprow (RH2-WKA), 2012. <http://www>.
8. Ovsyannikov E.M., Dolbilin E.V., Koshelyaev E.M. Electrical equipment of vehicles with traction electric drives. – M.: «Paleotype», 2010. – 363 p.

P. 65

Noise as a source of occupational risks at transport and gas consumption enterprises

Alexey Terekhov

The state of working conditions for noise at the enterprises of PAO «Gazprom» is considered. Information on the negative impact of noise on personnel, the level of occupational risks and measures to manage these risks is provided. The algorithm for developing measures to reduce the noise of technological equipment with forecasting of the results of implementation is contained. Experience of implementing measures at gas transportation enterprises is described.

Keywords: noise emission intensity, pipeline transport, safety of technological processes, noise reduction.

References

1. Terekhov A.L. Managing professional risks at noisy enterprises PAO Gazprom // Protection against increased noise and vibration / Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. – St. Petersburg, 2017. – P. 49-63.
2. Terekhov A.L., Shchepochkin S.V., Kashirin A.B. Analysis of the results of examination of the unavoidability of harmful production factors at the workplaces of Open Joint Stock Company Gazprom // Gas industry. – 2012. – No. 9. – P. 81-83.
3. Terekhov A.L., Drobakha M.N. Modern methods of noise reduction GPA / Ed. RO Samonov. – St. Petersburg: 2008. – 368 p.
4. Terekhov A.L., Sulin V.A., Kotishevsky G.V. and others. A review of technical solutions for noise reduction at gas production and transportation enterprises. Materials of the international acoustic conference dedicated to the 100th anniversary of E.Ya. Yudin. – M.: PH Bauman MSTU, 2014. – P. 257-267.
5. Terekhov A.L., Safonov A.L. Improving the safety of production processes by reducing the noise of pipelines // Labor and Social Relations. – 2016. – No. 4. – P. 163-174.
6. Rayzelis I.V. Professional Hearing Loss in Workers of Gas-Processing Production // Hygiene and Sanitation. – 2009. – No. 4. – P. 39-40.
7. Pystina N.B., Terekhov A.L., Zinkin V.N., Dragan S.P. Noise and infrasound as harmful production factors at gas industry enterprises // Gas industry. – 2012. – No. 1. – P. 68-71.
8. R.2.2.2006-05. Guidance on hygienic assessment of working environment factors and the work process. Criteria and classification of working conditions. – M.: Rospotrebnadzor, 2005.
9. A list of industries, professions and jobs with harmful and (or) hazardous labor conditions of OAO Gazprom's organizations that give the right to pay at higher tariff rates or set additional payments to employees depending on working conditions. – M.: IRTS Gazprom, 2006.
10. Labor Code of the Russian Federation (LC RF) 2016, article 219.
11. STO Gazprom 18000.1–2014. Unified Occupational Safety and Industrial Safety Management System in OAO Gazprom. Regulation on hazard identification and risk management. – M.: IRTS Gazprom, 2014. – 34 with.
12. Terekhov A.L., Sohili S. Creation of healthy and safe working conditions while working on the oil and gas platforms of the Arctic shelf // Gas industry. – 2011. – No. 11. – P. 92-96.
13. Lesnykh V.V. Risk management is the way to sustainable development of OAO Gazprom // Gas industry. – 2008. – No. 11. – P. 52-55.
14. Vlasov E.N., Dedikov E.V., Terekhov A.L., Tsulimov S.V. Investigation of the noise of blade machines at compressor stations of main gas pipelines and ways to reduce it. – M.: IRTS Gazprom, 1998. – 287 p.
15. Terekhov A.L. Research and noise reduction at compressor stations of main gas pipelines. – M.: IRTS Gazprom, 2002. – 303 p.
16. Terekhov A.L. Noise of gas-compressor units at compressor stations of main gas pipelines. – M.: VNIIGAZ, 2003. – 499 p.
17. STO Gazprom 2-3.5-041–2005. Catalog of noise characteristics of gas transmission equipment. – M.: VNIIGAZ, 2005. – 7 with.
18. P51-00158623-26-96. Method for measuring the noise characteristics of gas-pumping units with a gas-turbine drive. – Moscow: VNIIGAZ, 1999. – 27 p.
19. P51-00158623-18-92. Typical technique of acoustic testing of experimental and serial GPA samples. – M.: VNIIGAZ, 1999. – P. 17.
20. Method of calculating the noise level from the COP on the ground. – M.: VNIIGAZ, 1999. – 24 p.
21. SP 51.13330.2011 Protection from noise.
22. Terekhov A.L., Demin V.M. Engineering technique for calculating the effectiveness of sound insulation and vibration absorption of piping piping at compressor stations // NTS ser. «Transport and underground storage of gas». – M.: IRTS Gazprom, 2002. – No. 1. – P. 12-18.
23. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: a textbook. – Moscow: Logos, 2013. – 432 p.

Авторы статей в журнале №6 (60) 2017 г.

Гайтова Тамара Борисовна,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электротехника»
ФГБОУ высшего образования «Московский политехнический
университет», тел.: (495) 276-32-20, e-mail: ekems@yandex.ru

Евстифеев Андрей Александрович,
начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
доцент Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», к.т.н., 115583, Москва, а/я 130,
тел.: (910) 460-78-86, +7 (498) 657-43-82,
e-mail: A_Evstifeev@vniigaz.gazprom.ru

Капустин Александр Александрович,
д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного
архитектурно-строительного университета,
г. Санкт-Петербург, ул. Новочеркасский пр., д. 25,
индекс 195112, e-mail: professor-gaz@mail.ru

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

Люгай Станислав Владимирович,
к.т.н., директор Центра использования газа
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», р.т. (498) 657-4205,
e-mail: S_Lyugai@vniigaz.gazprom.ru

Марков Владимир Анатольевич,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
«Поршневые двигатели» Московского государственного техни-
ческого университета им. Н.Э. Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана), тел. 917 584-49-54,
р.т. (499) 263-69-18, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru

Нагорнов Станислав Александрович,
д.т.н., заместитель директора по научной работе федерального
государственного бюджетного научного учреждения
«Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов
в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН), г. Тамбов,
м.т. 915 670-58-29, e-mail: snagornov@yandex.ru

Неверова Вера Владимировна,
к.т.н., доцент кафедры «Английский язык
для машиностроительных специальностей» факультета
«Лингвистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
тел. 985 125-82-04, e-mail: markova_vera@bk.ru

Овсянников Евгений Михайлович,
д.т.н., чл.-корр. Академии электротехнических наук РФ,
профессор кафедры «Электротехника»
ФГБОУ высшего образования
«Московский политехнический университет»,
тел.: (495) 962-12-95, e-mail: ovsiannikov48@mail.ru

Пронин Евгений Николаевич,
координатор проекта «Голубой коридор»,
руководитель РК5 Международного газового союза,
e-mail: e.pronin@mail.ru

Раков Вячеслав Александрович,
к.т.н., доцент ГОУ ВПО Вологодский государственный техниче-
ский университет, г. Вологда, Дальняя 186-16, инд. 160024,
м.т. 8 911 502-15-86, e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Романцова Светлана Валерьевна,
к.х.н., доцент кафедры биохимии и фармакологии Медицин-
ского института федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Там-
бовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
(ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г.Р. Державина»), ведущий научный
сотрудник лаборатории организации нефтехозяйств и экономно-
го расходования нефтепродуктов ФГБНУ ВНИИТиН,
г. Тамбов, тел. 8-915-667-13-60, e-mail: svromantsova@yandex.ru

Са Бовэн,
аспирант кафедры «Поршневые двигатели»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
тел. 926 344-28-32, e-mail: bowensa@yandex.ru

Терехов Алексей Леонидович,
д.т.н., профессор, главный научный сотрудник центра информ-
матизации и автоматизации ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
тел. 8 905 526-48-68, e-mail: A_Terekhov@vniigaz.gazprom.ru

Фомин Александр Павлович,
к.т.н., доцент кафедры «Электротехника»
ФГБОУ высшего образования
«Московский политехнический университет»,
тел. 8 917 567-89-71

Contributors to journal issue No 6 (60) 2017

Evstifeev Andrey,
PhD, Head of laboratory, JSC «Gazprom VNIIGAZ»,
p/o 130, Moscow, Russia, 115583,
e-mail: A_Evstifeev@vniigaz.gazprom.ru

Fomiv Alexander,
candidate of technical science, professor
of the Moscow state technical university (MAMI),
phone: + 7 917 567-89-71

Gaitova Tamara,
Doctor of Engineering, professor
of the department «Electrical engineering»
of Moscow Polytechnic University,
phone: + 7 (495) 276-32-20,
e-mail: ekems@yandex.ru

Kapustin Alexander,
Doctor of engineering sciences, professor, Saint-Petersburg State
University of Architecture and Civil Engineering,
e-mail: professor-gaz@mail.ru

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

Lyugay Stanislav,
PhD, Director of the Centre «Gas Use», JSC «Gazprom VNIIGAZ»,
tel.: +7 (498) 657-4205, email: S_Lyugai@vniigaz.gazprom.ru

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

Nagornov Stanislav,
Dr. Sci. Tech., Deputy Director for Science of the Russian Research
Institute for the use of technology and products Roselkhosakademia
(Tambov), Prof., Tambov State Technical University,
m.t. + 7 915 670-58-29

Neverova Vera,
Associate professor of the department «English language
for mechanical engineering profession», Faculty of Linguistics,
Bauman Moscow State Technical University, Candidate of engineer-
ing sciences, phone: + 7 985 125-82-04, e-mail: markova_vera@bk.ru

Ovsyannikov Evgeniy,
Doctor of Engineering, professor, Federal State Budget Educational
Institution (FGBU) of higher education
«Moscow Polytechnic University»,
phone: + 7 (495) 962-12-95, e-mail: ovsiannikov48@mail.ru

Pronin Eugene,
IGU WOC5 Chairman, coordinator of the «Blue Corridor» project,
e-mail: e.pronin@mail.ru

Rakov Vyatcheslav,
Ph.D., Associate Professor, Vologda State Technical University,
phone: +7 964-668-75-02, e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Romantsova Svetlana,
Candidate of chemical sciences, Associate professor
of the department of biochemistry and pharmacology,
Medical Institute, Tambov state university named after
G.R. Derjavin, Leading research worker, VNIITiN, Tambov,
phone: +7 915-667-13-60, e-mail: svromantsova@yandex.ru

Sa Bowen,
Post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University,
phone: + 7 (926) 344-28-32, e-mail: bowensa@yandex.ru

Terekhov Alexey,
ООО Gazprom VNIIGAZ, Professor,
Doctor of Engineering Science, Chief Researcher,
Center of Informational and Energy Support,
e-mail: A_Terekhov@vniigaz.gazprom.ru