АГЗК + АТ «АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо»
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 17. № 4. 2018 г. Издается с января 2002 г. Периодичность – ежемесячно

Журнал включён в Перечень изданий ВАК Минобрнауки РФ

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА

Ерохов В.И.

Физико-химические и моторные свойства газового топлива. Лекция № 2. Часть 2. Физико-химические и моторные свойства компримированного природного газа . . . 147

Разработана классификация и приведены марки компримированного газа. Изложена общая технология использования ПГ в качестве моторного топлива. Приведены физико-химические и моторные показатели ПГ. Обобщены технико-эксплуатационные требования к газовому топливу. Изложены стандарты и ТУ на производство ПГ. Приведены характеристики природного, коммунально-бытового, искусственного и биологического газа. Изложены особенности измерения расхода газа в эксплуатации. Изложен метод нормирования расхода газа. Приведены нормы расхода КПГ.

Лебедев М.С., Быков Д.О.

Исследование процесса очистки газа на входе в турбодетандер на комплексе СПГ на ГРС и рациональной утилизации отделяемых компонентов 166

В данной работе представлены анализ компонентного состава магистрального газа в целях определения тенденции увеличения концентрации углеводородов в газе и выбора оптимального состава для расчета, исследование компонентного состава отделяемой на входе в турбину жидкости в зависимости от параметров потока, а также возможные варианты рациональной утилизации этой смеси.

Азизбейли Г.Р.

Теоретический скрининг экстрагирующей способности ионных жидкостей с помощью COSMO-RS метода для разделения нефтяных фракций от ароматических углеводородов 173

Представлены данные по скринингу (выбору) квантово-химическим методом COSMO-RS ионных жидкостей (ИЖ), содержащих в составе различные катионы и анионы, а также широкоиспользуемых в промышленности растворителей (N-метилпирролидон – NMP, N-формилморфолин – NFM) для разделения алифатических, нафтеновых, ароматических углеводородов полициклического и гибридного строения, нафтеновых кислот, асфальтенов и т.д., содержащихся в масляных дистиллятах Бакинских нефтей. Представлен ряд ионных жидкостей эффективных по ароматической емкости и селективности.

Капустин А.А., Раков В.А.

Экологическая безопасность электромобилей с точки зрения выбросов CO_2 178

В статье сделана оценка безопасности электромобилей по выбросам парникового газа CO_2 в атмосферу. Выполнено сравнение выбросов парникового газа автомобиля с бензиновым двигателем внутреннего сгорания и электромобилей с учетом экологичности производства топлива и электричества.

Грушников В.А.

Современные возможности предотвращения дорожных столкновений 183

Результаты проводимых в разных странах исследований проблемы безопасности дорожного движения свидетельствуют об острой необходимости ее решения возможностями искусственного интеллекта, поддерживающего человека за рулем колесного транспортного средства.

ИНФОРМАЦИЯ

Савченко А.С.

Концепты на выставке CES-2018 188

За последнее время автопроизводители все чаще привозят свои передовые модели в Лас-Вегас (штат Невада, США) на выставку Consumer Electronics Show. Обычно специфика новинок соответствует духу CES: автомобильные компании стараются показать там свои наиболее инновационные разработки и на этот раз их оказалось немало.

Новости 191–192

Учредитель
ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"

Главный редактор
В.Ф. Третьяков – академик РАИН, д-р хим. наук, профессор

Зам. главного редактора
А.С. Савченко

Председатель редакционного совета
В.Ф. Корнюшко – д-р техн. наук, Заслуженный деятель науки и техники РФ

Состав редакционного совета:
член-корр. АН РТ **Г.С. Дьяконов** (Респ. Татарстан, г. Казань)
д.т.н. **В.И. Ерохов** (Московский Политехнический университет, г. Москва)
д.т.н. **Н.Г. Кириллов** (ООО "ИИЦ Стирлинг-Технологии", г. Санкт-Петербург)
д.т.н. **И.М. Коклин** (ООО "Газпром Трансгаз Ставрополь")
член-корр. НАН **Ю.Н. Литвишков** (Азербайджан, г. Баку)
академик НАН **И.И. Лиштван** (Беларусь, г. Минск)
д.т.н. **В.А. Марков** (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
академик РАЕН **С.В. Мещеряков** (МИНГП, г. Москва)
д.э.н. **А.В. Николаенко** (МГТУ МАМИ, г. Москва)
О.Н. Румянцева (ООО "Издательство "Инновационное машиностроение")
д.х.н. **Р.М. Талышинский** (РАН ИНХС, г. Москва)
академик НАН РК, **Е.М. Шайхутдинов** (Респ. Казахстан, г. Алматы)

Редактор
И.Л. Сильченкова

Компьютерная верстка
С.А. Жиркина

Адрес и телефон редакции:
107076, г. Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел. 8 (499) 268-41-77
E-mail: info.agzk-at@mashin.ru
info.agzk.at@gmail.com
www.mashin.ru
Подписано в печать 23.03.2018 г.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88.
Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу "Пресса России"– индекс **39543**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). **Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–63954**

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", "АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо", 2018

АГЗК + АТ «AutoGas Filling Complex + + Alternative fuel»
AN INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL MAGAZINE

Vol. 17. № 4. 2018 г. Published from January, 2002 Periodicity – monthly

A magazine is plugged in List of editions of VAK Minobrnauki Russian Federation

CONTENTS

SCIENCE

Erokhov V.I.

Physico-chemical, and motor properties of the gas fuel. Lecture 2. Part 2. Physico-chemical, and motor properties of compressed natural gas 147

The developed classification and the brand of the compressed gas. Outlines the general technology of using NG as a motor fuel. The physico-chemical and motor scores PG. Summarizes the technical-operational requirements for gas fuel. Set out the standards and specifications for the production of PG. The characteristics of natural, household, artificial and biological gas. The particular measurement of gas flow to operate.The method of normalization of the flow of gas. Given the rate of flow of CNG.

Lebedev M.S., Bykov D.O.

Investigation of gas purification process at the turboexpander inlet in LNG complex at GDS and the rational utilization of the separated components 166

This paper presents the analysis of the component composition of the pipeline gas in order to determine the trend of increasing the concentration of hydrocarbons in the gas and to choose the optimal composition for the calculation, to study the component composition of the liquid to be separated at the inlet to the turbine, depending on the flow parameters, and possible uses for this mixture.

Azizbeyli G.R.

Theoretical screening of the extraction capacity of ionic liquids using the COSMO-RS method for separating petroleum fractions from aromatic hydrocarbons 173

Data on screening (selection) by the quantum-chemical method of COSMO-RS ionic liquids (IL) containing various cations and anions, as well as widely used industrial solvents (N-methylpyrrolidone - NMP, N-formylmorpholine - NFM) for separation of aliphatic, naphthenic, aromatic hydrocarbons of polycyclic and hybrid structure, naphthenic acids, asphaltenes, etc. contained in oil distillates of Baku oils. A number of ionic liquids effective in aromatic capacity and selectivity are presented.

Kapustin A.A., Rakov V.A.

Ecological safety of electric vehicles from the point of view of CO_2 emissions 178

The article assesses the safety of electric vehicles in terms of greenhouse gas CO_2 emissions into the atmosphere. A comparison of the greenhouse gas emissions of a car with a gasoline internal combustion engine and electrical means is performed taking into account the ecological safety in the production of fuel and electricity.

Grushnikov V.A.

Modern possibilities of preventing road collisions 183

The results of studies of road safety in different countries with different levels of economic development testify to the urgent need and the possibility of solving it by the possibilities of artificial intelligence supporting a person at the wheel of a wheeled vehicle.

INFORMATION

Savchenko A.S.

Concepts at CES-2018 188

In recent years, automakers are increasingly bringing their advanced models to Las Vegas (Nevada, USA) at the Consumer Electronics Show. Usually, the specifics of the novelties correspond to the spirit of CES: autocompanies try to show their most innovative developments there and this time there were a lot of them.

News 191–192

Founder
LLC "Publishers "Innovative mashinostroenie"

Editor-in-chief
V.F. Tretyakov – academician of RAES, doctor of chemical sciences, professor

Deputy editor
A.S. Savchenko

Chairman of the editorial board
V.F. Kornyushko – doctor of technical sciences, honored scientist of the Russian Federation

The editorial board:
corresponding member of the AS RT **G.S. D'yaconov** (Tatarstan Resp., Kazan)
doct. of techn. sc. **V.I. Erohov** (Moscow Polytech, University, Moscow)
doct. of techn. sc. **N.G. Kirillov** (LLC "IPC Stirling-Technology", St. Petersburg)
doct. of techn. sc. **I.M. Koklin** (LLC "Gazpom Transgaz Stavropol")
corresponding member of the ANAS **Yu.N. Litvishkov** (Azerbaijan, Baku)
academician of the NAS **I.I. Lishtvan** (Belarus, Minsk)
academician of the RANS doct. of techn. sc. **V.A. Markov** (Bauman MSTU, Moscow)
S.V. Meshcheryakov (MINGP, Moscow)
doct. of econom. sc. **A.V. Nikolaenko** (MSUME, Moscow)
O.N. Rumyantseva (LLC "Innovative mashinostroenie" Publishers)
doct. of chem. sc. **R.M. Talyshinsky** (TIPS RAS, Moscow)
Academician of the NAS RK **E.M. Shaikhutdinov** (Kazakhstan Resp., Almaty)

Editor
I.L. Silchenkova

Computer Design
S.A. Zhirkina

Address and phone edition:
107076, Moscow, Kolodezniy per., 2a, str. 2
Tel.: 8 (499) 268-41-77
E-mail: info.agzk-at@mashin.ru
info.agzk.at@gmail.com
www.mashin.ru

The magazine is distributed by subscription, which can be obtained at any post office indexe "The Russian Press" – **39543**

The magazine is registered with the Federal agency for Supervision of Communications, Information Technology and Communications (Roskomnadzor), **Registration certificate PI N FS77–63954**

Reprint is possible only with the reference to the journal "Autogas filling complex + alternative fuel"

© LLC "Innovative mashinostroenie" Publishers, "Autogas filling complex + alternative fuel", 2018

УДК 621.436.7.013

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МОТОРНЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ЛЕКЦИЯ № 2. Часть 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МОТОРНЫЕ СВОЙСТВА КОМПРИМИРОВАННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

В.И. Ерохов, д-р техн. наук, Московский политехнический университет, г. Москва

Разработана классификация и приведены марки компримированного газа. Изложена общая технология использования ПГ в качестве моторного топлива. Приведены физико-химические и моторные показатели ПГ. Обобщены технико-эксплуатационные требования к газовому топливу. Изложены стандарты и ТУ на производство ПГ. Приведены характеристики природного, коммунально-бытового, искусственного и биологического газа. Изложены особенности измерения расхода газа в эксплуатации. Изложен метод нормирования расхода газа. Приведены нормы расхода КПГ.

Ключевые слова: *компримированный (метан); коммунально-бытовой, биологический и искусственный газ; стандарты на газовое топливо; физико-химические и моторные характеристики; расход и нормирование газа; задержка воспламенения; топливный эквивалент; октановое, цетановое и метановое число.*

PHYSICO-CHEMICAL, AND MOTOR PROPERTIES OF THE GAS FUEL LECTURE № 2. PART 2. PHYSICO-CHEMICAL, AND MOTOR PROPERTIES OF COMPRESSED NATURAL GAS

Erokhov V.I., Ph.D. of technical sciences, Moscow Polytechnic University, Moscow

The developed classification and the brand of the compressed gas.Outlines the General technology of using NG as a motor fuel. The physico-chemical and motor scores PG. Summarizes the technical-operational requirements for gas fuel. Set out the standards and specifications for the production of PG. The characteristics of natural, household, artificial and biological gas.The particular measurement of gas flow to operate.The method of normalization of the flow of gas. Given the rate of flow of CNG.

Keywords: *compressed (methane); municipal waste, biological and artificial gas; standards for gas fuel; physico-chemical and engine performance; consumption and rationing of gas; the ignition delay; the fuel equivalent; of octane, cetane, and methane number.*

Классификация газообразного моторного топлива. Современное газомоторное топливо представляет собой компримированный природный, биологический и искусственные горючие газы. Компримированные газы при нормальной температуре и любых давлениях находятся в газообразном состоянии.

Компримированный природный газ – многокомпонентная смесь различных углеводородов и неорганических примесей [1].

Биологический газ получают в результате водородного или метанового брожения биомассы различного происхождения. Источником биогаза является растительное сырье, очистные сооружения, полигоны бытовых отходов в результате водородного или метанового брожения биомассы [2].

Искусственный горючий газ представляет собой горючий газ, получаемый при переработке углеводородного сырья, содержащий компоненты, нехарактерные для природного газа или типичные, но в отличных от природного газа пропорциях [3].

Искусственный горючий газ получают при переработке углеводородного сырья путем высокотемпературной перегонки при нагревании твердого топлива без доступа воздуха (коксогазовый и газосланцевый газ) и нагревании твердого топлива при наличии воздуха и водяного пара (доменный, генераторный газ).

При использовании ПГ в качестве моторного топлива не требуется существенной технологической переработки.

Использование газа в качестве моторного топлива. Основными критериями выбора газомоторного топлива считают уровень вредных выбросов, затраты на топливо, сложившуюся и перспективную инфраструктуру, а также стоимость НТС. Природный газ отечественных месторождений состоит в основном из метана – 80–98 % (по объему) с небольшими примесями углеводородов и инертных газов. Оставшаяся часть объема в порядке убывания приходится на этан – 1,8–8,0; пропан – 1,5 % и бутан – до 1 % и углекислый газ – 1,8 %, кислород и азот [4].

При добыче ПГ непредельные углеводороды направляют на нефтехимическое производство, а предельные углеводороды – в магистральный трубопровод потребителям.

Термодинамические характеристики метана. Уравнение состояния идеального газа устанавливает зависимость между давлением, молярным объемом и абсолютной температурой идеального газа:

$$pV = \frac{m}{\mathrm{M}}RT, \qquad (1)$$

где p – давление, Па; V – объем, м^3; m – масса, кг; М – молярная масса, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К.

Плотность газа может быть представлена абсолютным или относительным его значением. Абсолютная плотность ПГ соответствует массе газа

в единице объема (кг/м^3). Величину, обратную плотности, называют удельным объемом и измеряют в м^3/кг.

Плотность ПГ представляет собой физическую величину, определяемую как отношение массы газа к занимаемому объему:

$$\rho = \frac{m}{v}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м^3,

$$\rho = \frac{pM}{RT}. \qquad (3)$$

Плотность метана при давлении p = 20 МПа и температуре t = +20 °С можно представить:

$$\rho = \frac{20 \cdot 101325 \cdot 0{,}016}{8{,}31451 \cdot (20 + 273{,}15)} \approx 133 \text{ кг / м}^3.$$

Масса идеального газа в 100-литровом баллоне ρV = 133·0,1 = 13,3 кг.

Изменение плотности метана в зависимости от давления и температуры приведена на рис. 1.

Основные расчеты теплофизических свойств проводят для диапазона давлений 5–40 МПа. В диапазоне давлений 5–20 МПа изменение показателей метана имеет непропорциональный характер. Заштрихованная область представляет собой жидкое состояние СПГ. Штриховая линия характеризует граничные условия перехода КПГ в СПГ (критические состояния СПГ P = 4,52 МПа и T = 82,5 К). Плотность КПГ в диапазоне давлений 0,1–20 МПа при температуре +20 °С изменяется в диапазоне 0,71–152 кг/м^3 .

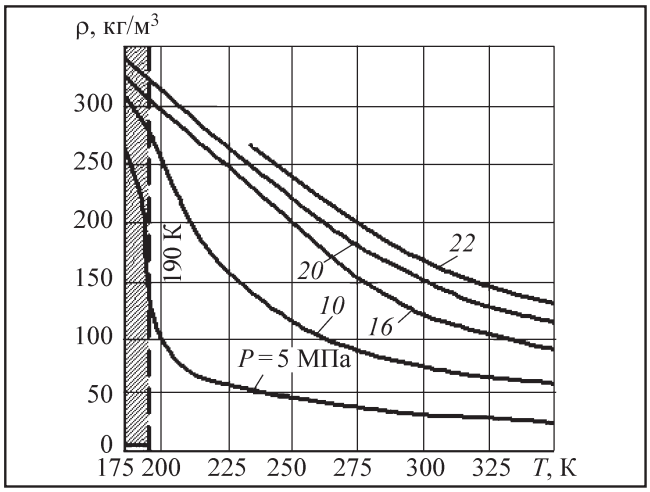

Рис. 1. Изменение плотности метана в зависимости от давления и температуры

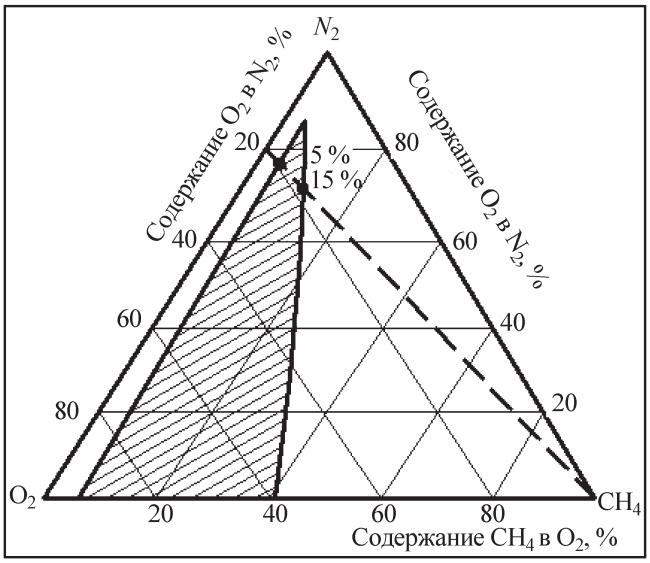

Рис. 2. Диаграмма воспламеняемости тройной газовоздушной смеси (кислород – азот – метан)

Диаграмма воспламеняемости тройной смеси (кислород – азот – метан) приведена на рис. 2.

Область воспламенения газовоздушной смеси заштрихована. Верхнюю ее часть пересекает прямая, характеризующая состояние метановоздушной смеси. С увеличением концентрации азота область воспламенения смеси сужается. По мере удаления от границ заштрихованной области к ее центру скорость сгорания смеси увеличивается, а температура воспламенения снижается [5].

Стандарты и ТУ на КПГ. ПГ представляет собой газообразное топливо без цвета и запаха, удельный вес которого в два раза ниже воздуха. Основным компонентом ПГ является метан, представляющий продукт биохимического и термического разложения органических веществ. Основные показатели индивидуального метана представлены в табл. 1.

Метан относят к предельным углеводородам, молекула которого состоит из углерода (С) и водорода (Н). Молекула метана содержит максимальное количество (25,3 %) водорода, приходящегося на один атом углерода. Газовое топливо имеет более благоприятное по сравнению с традиционным топливом углеродное число (С/Н). Для современных бензинов составляет около 6,0, а СУГ и ПГ – соответственно 4,9 и 2,96.

Таблица 1

Термохимические показатели метана

Наименование показателя	Величина	Метод испытания
Химическая формула	CH_4	–
Молекулярная масса, кг/моль	16,04	–
Элементарный состав, %:		–
C	74,57	
H	25,3	
O	0	
Температура кипения, К	111,1	–
Теплота испарения, кДж/кг	514,1	–
Теплотворная способность горючей смеси при α = 1,0 кДж/м^3	3200	–
Плотность при нормальных условиях:		ГОСТ 31369
газовой фазы, кг/м^3	0,717	
жидкой фазы, кг/м^3	415	
Теплота сгорания (низшая, парообразная фаза):		ГОСТ 31369
МДж/м^3 (объемная, парообразная фаза),	35,8	
МДж/кг (массовая, жидкая фаза),	49,9	
кДж/л (объемная, жидкая фаза)	20,64	
Относительная плотность газа к воздуху, не менее	0,554	ГОСТ 31369
Концентрационные пределы распространения пламени, в объемных долях, %:		–
нижний	4,4	
верхний	17,0	
Метановое число	100	–
Цетановое число	8	–

Наименование показателя	Величина	Метод испытания
Углеродное число (C/H)	2,96	–
Октановое число газа, не менее:		–
моторный метод	110	
исследовательский метод	120	
Нормальная скорость распространения пламени в газовоздушной смеси, м/с	0,28	–
Относительная плотность к воздуху, не менее	0,554	ГОСТ 31369
Температура самовоспламенения газовоздушной смеси, °C	537	–
Минимальная энергия зажигания, МДж	0,28	–
Максимальное давление взрыва, МПа	7,06	–
Максимальная температура пламени газовоздушной смеси, °C	1880	–
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода, объемная доля, %:		–
разбавитель CO_2	11,0	
разбавитель N_2	11,0	
Максимальный безопасный экспериментальный зазор, мм	1,14	–
Стехиометрический коэффициент, l_o:		–
массовый, кг/кг	17,4	
объемный, м^3/м^3	9,5	
Границы устойчивой работы двигателя:		–
$\alpha_н$	0,65	
$\alpha_в$	2,0	

Высокое содержание водорода в газовом топливе обеспечивает более полное сгорание топлива в цилиндрах двигателя. При сгорании ПГ на единицу выделенной теплоты образуется на 25 % меньше CO_2 по сравнению с базовым жидким топливом. Метан классифицируют как нетоксичное вещество.

Коэффициент избытка воздуха, соответствующий верхнему пределу воспламеняемости, равен $\alpha_в$ = 2,0, а нижнему – $\alpha_н$ = 0,65. Коррозионная активность метана отсутствует.

Максимальная величина давления метана в замкнутом объеме при начальной величине давления, равной 0,1 МПа, достигает 0,7 МПа, а для пропана и бензина соответственно 0,79 и 0,90 МПа. Величина давления метана заметно меньше по сравнению с аналогичными величинами, характерными для других углеводородов, но она достаточна для значительного разрушения конструкции здания.

При утечке метан улетучивается и скапливается в верхних частях конструкции помещения. Пока-

затель пожаровзрывоопасности метана характеризуется величиной максимального безопасного экспериментального зазора, равного 1,14 мм. В практике пожарной профилактики его называют тушащим зазором. Величину зазора для исследуемой метановоздушной смеси определяют расчетно-экспериментальным методом. Расчетная формула определения тушащего зазора имеет вид:

$$\delta_{экс} = \frac{\lambda \mathrm{Pe}}{\rho c_p U_{пл}}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Pe – критерий Пекле; ρ – плотность горючей смеси, кг/м; c_p – удельная теплоемкость горючей смеси, Дж/(кг·К); $U_{пл}$ – скорость распространения пламени, м/с.

Предел гашения пламени соответствует критерию Пекле, величина которого постоянна и равна 65. В зависимости от полученной расчетно-экспериментальной величины тушащего зазора устанавливают категорию взрывоопасной среды производственных помещений.

По степени чувствительности горючих веществ метан относится к самому безопасному 4-му классу (слабо чувствительные вещества).

Метановое число представляет собой показатель, характеризующий детонационную стойкость газообразного топлива и отражающий объемное содержание метана (%) в метановодородной смеси. Метановое число газового топлива можно определить по формуле [3]:

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

где MOH (motoroctanenumber, MON) – октановое число по моторному методу, вычисляемое по формуле:

$$\begin{aligned} \text{MOH} &= (137{,}78 X\mathrm{CH_4}) + (29{,}948 X\mathrm{C_2H_6}) + \\ &+ (-18{,}193 X\mathrm{C_3H_8}) + (-167{,}062 X\mathrm{C_4H_{10}}) + \\ &+ (181{,}233 X\mathrm{CO_2}) + (26{,}994 X\mathrm{N_2}), \end{aligned} \quad (6)$$

где X – молярная доля соответствующих компонентов метана, этана, пропана, бутана, CO_2 и N_2.

При расчете MOH эмпирические коэффициенты перед молярными долями компонентов, не входящих в расчетную формулу, принимают нулевые значения. В большинстве стран стандарты на КПГ для газобаллонных автомобилей отсутствуют. Для индивидуального метана это число составляет 100 ед. Метановое число 90 означает, что он имеет такую же детонационную стойкость, как и смесь из 90 % метана и 10 % водорода.

Метан, обладающий высокой детонационной стойкостью, обеспечивает мягкую работу двигателя при использовании ПГ и позволяет форсировать двигатель по степени сжатия, достигающей ε = 12 ед. Октановое число метана достигает 120 ед., что позволяет повысить степень сжатия газовых двигателей на 23–25 % по сравнению с базовыми бензиновыми двигателями.

ПГ относят к группе веществ, способных образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Нижний концентрационный предел воспламенения по метану в смеси с воздухом (по объему) составляет 4,4 %, а верхний – 17 %. Эти пределы для природного газа конкретного состава определяют в соответствии с ГОСТ 12.1.044–84. Метан представляет собой наиболее безопасное моторное топливо. Содержание в окружающей среде 25 % метана вызывает удушье.

Нижний предел самовоспламенения метана значительно выше по сравнению с нефтяными моторными топливами. Высокие концентрационные пределы обеспечивают необходимые уровни безопасности эксплуатации ГБА.

Подаваемый в магистральные газопроводы различных месторождений ПГ несколько отличается своим компонентным составом и качественными показателями, что обуславливает необходимость применения для заправки двух марок КПГ – А и Б, отличающихся компонентным составом.

В качестве моторного топлива до 1987 г. применяли КПГ, соответствующий требованиям ТУ 51-166-83 и предусматривающий две марки газа А и Б.

Основные показатели компримированного природного газа как моторного топлива приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели компримированного природного газа марки А и Б

Показатели	КПГ	
Компонентный состав газа:	Марка А	Марка Б
Метан, %	95±5	90±5
Этан, %, не более	4	4
Пропан, %, не более	1,5	1,5
Бутаны, %, не более	1,0	1,0

Окончание табл. 2

Показатели	КПГ	
Пентаны + высшие, %, не более	0,3	0,3
Диоксид углерода, %, не более	1,0	1,0
Кислород, %, не более	1,0	1,0
Азот, %	4	4...7
Сероводород, г/м^3, не более	0,02	0,02
Низшая теплотворность, кДж/м^3	33 896	33 657
Меркаптановая сера, г/м^3, не более	0,016	0,016
Сероводородная и меркаптановая сера, г/м^3, не более	0,1	0,1
Механические примеси, г/м^3, не более	0,001	0,001
Влагосодержание, г/м^3, не более	0,009	0,009
Температура воспламенения, °С	624,7	608
Октановое число	103	102
Относительная плотность по воздуху (при 20 °С)	0,5864	0,6105
Теплота сгорания стехиометрической смеси, МДж/м^3	3,5	3,383

Содержание углеводородов C_2H_6–C_5H_{12} благоприятно сказывается на характеристике КПГ. Повышенное (до 10 %) содержание азота не оказывает заметного влияния на работу двигателя, так как значительная часть азота (75 %) поступает с воздухом в камеру сгорания. В последующих редакциях ГОСТ признано нецелесообразным регламентировать комнонентный состав газа по углеводородам, ограничившись указанием теплоты сгорания с воздухом, ее октановое число и плотность газа.

Температура газа, подаваемого на заправку, для умеренной климатической и холодной зоны не более +40 °С, для жаркой климатической зоны не более 45 °С для марок А и Б.

В Германии в качестве моторного топлива применяют две марки газа. Высококалорийный природный газ марки Н (High) содержит 87–99 % метана. Низкокалорийный природный газ марки L (Low) содержит 80–87 % [6, 7].

Россия располагает в достаточном количестве запасами высококачественного газа для современных НТС. Конечному потребителю ПГ высокого качества не требуется дополнительная его переработка.

Физико-химические показатели природного газа. КПГ, используемый в качестве моторного топлива для автомобилей, регламентирован ГОСТ 27577–2000 [1]. Основные показатели КПГ представлены в табл. 3.

Содержание метана в КПГ предположительно составляет 60–90 %. Объемная теплота сгорания горючей смеси при α = 1,0 соответствует 31 800 кДж/м^3. Установленная стандартом объемная теплота сгорания по желанию потребителя в ограниченном количестве ПГ производителем может быть увеличена. Компонентный состав ГОСТ 27577–2000 не регламентируется.

Таблица 3

Физико-химические показатели компримированного природного газа

Наименование показателя	Величина	Метод испытания
Объемная теплота сгорания, низшая, кДж/м^3, не менее	31 800	ГОСТ 22667–82
Относительная плотность к воздуху, не менее	0,55–0,70	ГОСТ 22667–82
Расчетное октановое число газа, не менее: моторный метод / исследовательский метод	105 / 110	п. 3.4
Концентрация сероводорода, г/м^3, не более	0,02	ГОСТ 22387.2
Концентрация меркаптановой серы, г/м^3, не более	0,036	ГОСТ 22387.2
Масса механических примесей, мг/м^3, не более	1,0	ГОСТ 22387.4
Суммарная объемная доля негорючих компонентов, %, не более	7,0	ГОСТ 23781
Объемная доля кислорода, %, не более	1,0	ГОСТ 23781
Содержание паров воды, мг/м^3, не более	9,0	ГОСТ 20060, разд. 2

Примечание. Величины показателей установлены при температуре 293 К (20 °С) и давлении 0,1013 МПа.

Октановое число представляет собой числовой показатель стойкости газа к детонации. Расчетную величину октанового числа КПГ (РОЧ) вычисляют по формуле:

$$\text{РОЧ} = (\sum_{i=1}^{n_г} \text{ОЧ}_i c_i) / (\sum_{i=1}^{n_г} c_i), \quad (7)$$

где ОЧ_i – октановое число i-го горючего компонента, КПГ; c_i – объемная доля i-го горючего компонента смеси; $n_г$ – количество горючих компонентов КПГ.

КПГ не требует применения антидетонационных присадок. Октановое число КПГ, благодаря наличию высокого содержания метана, достигает 105 ед. (по моторному методу). Высокая антидетонационная стойкость газовых топлив и хорошая их смешиваемость с воздухом позволяют форсировать газовые двигатели по степени сжатия с 9,5 до 12,0.

Требования безопасности. Компримированный природный газ относится к веществам 4-го класса опасности по ГОСТ 12.1.007–76.

Одоризация КПГ. Для определения органами обоняния человека возможных утечек при транспортировке, хранении и использовании газа в него добавляют незначительное количество сильно пахнущего вещества.

В качестве одоранта применяют этилмеркаптан (C_2H_5SH), представляющий собой неприятно пахнущую жидкость плотностью 0,839 кг/л и с точкой кипения 35 °С. Порог чувствительности запаха составляет 0,00019 мг/л, а предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны – 1 мг/м^3.

При массовой доле меркаптановой серы менее 0,001 % КПГ должен быть одорирован. При одоризации на 1 м^3 добавляют 0,016 г меркаптановой серы.

Норма по содержанию общей и органической серы – менее 60 мг/м^3 (0,01 % масс) (сероводород и меркаптаны) обеспечивается заводской и промысловой подготовкой газа при подаче его в магистральные газопроводы.

Во время эксплуатации автомобиля одорант может накапливаться в топливной аппаратуре, выпускном тракте автомобиля и на открытых поверхностях его деталей. Ощущение одоранта может происходить даже при полностью герметичной газовой системе питания, при заправке автомобиля, сливе конденсата из редуктора и ОГ. Попадание одоранта в салон автомобиля может происходить из атмосферы на стоянках через открытые окна и двери.

Влага с сернистыми соединениями образует кислоты, вызывающие коррозию баллонов и трубопроводов. Сернистые соединения снижают долговечность работы редуктора из-за старения мембран и резиновых уплотнений. В случае нормальной эксплуатации запах одоранта практически не ощущается.

Определение температуры КПГ при заправке определяют по требованию потребителей. Избыточное давление КПГ в момент окончания заправки автомобилей должно быть 19,0–19,6 МПа. Его определяют с помощью манометров, установленных на газонаполнительных колонках АГНКС.

Осушка газа – одна из наиболее важных проблем эффективного использования КПГ на автомобильном транспорте. Количество влаги в КПГ не должно превышать 9 мг/м^3.

Точка росы при давлении 20 МПа равна 303 К, а при нормальном давлении 201 К. При этой величине температуры образование льда в любой точке газовой аппаратуры практически невозможно.

Несоблюдение этого условия приводит к образованию льда (ледяных пробок) в газовых редукторах при дросселировании КПГ.

Точка росы КПГ на входе линии высокого давления АГНКС соответствует температуре 221 К, а на ее выходе – 243 К.

Точка росы ОГ при работе двигателя при $\alpha = 1,3$ (на метане) наступает при температуре 42–48 °С. В случае холодного двигателя влага конденсируется на его деталях, имеющих температуру ниже точки росы. Изменение точки росы зависит от количества образующейся влаги.

Из неосушенного газа, находящегося под давлением, равным 20 МПа, при низкой температуре выпадают капли влаги. Величину давления газа первоначально понижают до 1,0 МПа, поэтому его температура резко снижается и приводит к образованию гидратов.

Избыточное содержание влаги в газовом топливе при определенных условиях может привести к закупориванию каналов топливной системы автомобиля образующимися гидратами или ледяными пробками.

Выделение теплоты на единицу массы газа несколько больше по сравнению с бензином. Однако выделение теплоты на единицу горючей смеси оказывается несколько меньше. При снижении давления метана в газовом редукторе высокого

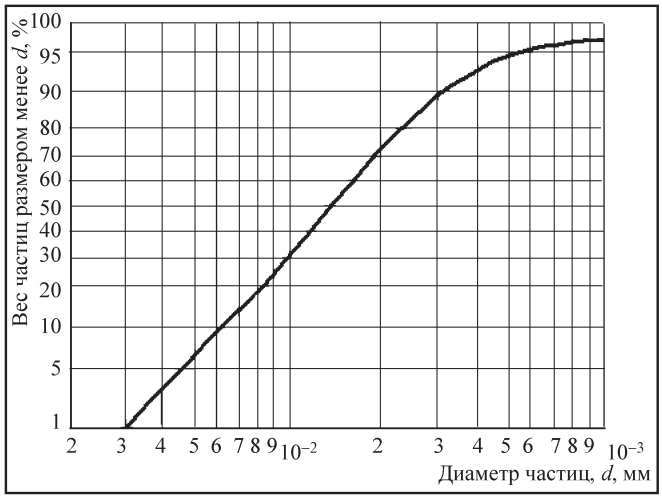

Рис. 3. *Дисперсный состав пыли компримированного газа в магистральном газопроводе*

давления температура резко снижается (эффект Джоуля–Томпсона). Например, при снижении давления с 10,0 до 1,0 МПа падение температуры газа составит около 30 °С. Даже в летний период влага может образовать кристаллы льда и стать препятствием при подаче газа в двигатель [8].

Приемка газа, поступающего на АГНКС, осуществляется в соответствии с требованиями ГОСТ 5542–87. Периодичность контроля сжатого газа на АГНКС должна быть не менее одного раза в сутки. Давление газа в баллонах определяют после окончания каждой заправки автомобиля. Температуру КПГ при заправке определяют по требованию потребителя. Масса механических примесей, мг/м^3, не более 1,0.

Фильтр расположен за регулятором давления и предназначен для снижения содержания масел в газе и предотвращения залипания клапанов впуска (наддува).

Дисперсный состав пыли, содержащейся в газе магистрального трубопровода, приведен на рис. 3.

Механические примеси представляют собой смолу, пыль и труднолетучие жидкости в капельном виде, содержащиеся в природном газе. Перспективы качественного газа приведены в [8].

Узкий предел горения является причиной сравнительно высокой степени безопасности КПГ. Компонентный состав газа действующего стандарта КПГ не нормируется. Применение коммунально-бытового газа приведено в табл. 4.

Энергетические свойства природных газов характеризуются числом Воббе, представляющим

Таблица 4

Физико-химические свойства коммунально-бытового газа

Наименование показателя	Величина	Метод испытания
Теплота сгорания низшая, МДж/м^{3}при 20 °С и 101,325 кПа не менее	31,8	ГОСТ 27193–86
Область значений числа Воббе (высшего), МДж/м^3	41,2–54,5	ГОСТ 22667–82
Допустимое отклонение числа Воббе от номинального значения, %, не более	±5,0	–
Массовая концентрация сероводорода, г/м^3, не более	0,02	ГОСТ 22387.2–83
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м^3, не более	0,036	ГОСТ 22387.2–83
Масса механических примесей, г/м^3, не более	0,001	ГОСТ22387.4–72
Объемная доля кислорода, %, не более	1,0	ГОСТ 23781–83
Интенсивность запаха при объемной доле 1 % в воздухе, балл, не более	3	–
Примечание. Величины показателей установлены при температуре 20 °С и давлении 0,1013 МПа.		

отношение теплоты сгорания (низшей или высшей) к корню квадратному из относительной (по воздуху) плотности газа [9]:

$$W_о = Q_н / d_в, \quad (8)$$

где $W_о$ – число Воббе; $Q_н$ – теплота сгорания; $d_в$ – относительная плотность газа,

$$d_в = \sqrt{\rho_г / \rho_в}, \quad (9)$$

где $\rho_г$ – плотность газа при нормальных условиях; $\rho_в$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

Число Воббе характеризует постоянство теплового потока, получаемого при сжигании газа и

представляющего собой расчетную величину для контроля и регулирования тепловой мощности газовых форсунок. Диапазон изменения числа Воббе достаточно значителен. Для каждой газораспределительной системы (по согласованию между поставщиком газа и потребителем) необходимо установить номинальное значение числа Воббе с отклонением от него не более ±5 %, позволяющее учесть неоднородность и непостоянство состава природных газов. Газы с одинаковым числом Воббе при равном давлении истечения обычно могут использоваться один вместо другого без замены газовых форсунок.

Применение биогаза. В отдаленной перспективе запасы ПГ в природе ограничены. В качестве его заменителя может быть использован биологический газ стестенного и промышленного происхождения. Биогаз – продукт микробиологического разложения (сбраживания) определенных фракций практически любых твердых и жидких органических отходов.

Биогаз получают методом брожения органических отходов главным образом сельскохозяйственного производства, а также в коммунально-бытовой сфере.

При промышленном производстве биогаза происходят те же процессы, что и в природе, но только в анаэробной (без доступа воздуха) среде. Это производят в специальных биореакторах.

Физико-химические и экологические свойства очищенного биогаза и природного газа практически идентичны. Для применения биогаза используют одну и ту же аппаратуру.

Состав биогаза во многом зависит от характера процесса его сбраживания. Биогаз на 30–70 % по объему состоит из метана и на 20–55 % из углекислого газа. В небольших количествах, до 0,05 %, в биогазе содержатся пары воды, до 0,15 % – сернистый ангидрид (H_2S), водород – до 0,15 и менее 1 % – азот. Состав биогаза близок к природному газу. Биогаз по сравнению с ПГ содержит значительное количество инертных составляющих. Теплота сгорания массового содержания биогаза составляет 15–30 кДж/кг, а газовоздушной смеси при стехиометрическом составе – 3,38 кДж/м^3. Биогаз перед применением в ДВС подвергают обогащению до уровня содержания метана в газе 95 %, очистке, осушке и компримированию. Энергетический эквивалент газа составляет 9–10 кВт/м^3.

Оценка пригодности биогаза для применения его в двигателях производится на основе сравнения показателей его сгорания и метана, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Физико-химические и моторные свойства биогаза

Показатели	Вид топлива	
	Биогаз	Метан
Теплота сгорания, МДж/кг	9,8–30,1	49,90
Теплота сгорания стехиометрической смеси, МДж/м^3	3,0–3,3	3,38
Потребность воздуха при α = 1,0 кг/кг	3,5–10,2	17,2
Граница воспламенения смеси по α:		
богатой	0,66–0,70	0,70
бедной	1,80–1,95	2,10
Максимальная скорость сгорания, м/с	0,20–0,37	0,40
Метановое число (МЧ), ед.	135	100

Применение биогаза позволяет использовать взаимозаменяемую газовую аппаратуру КПГ. Уровень шума, работающего на биогазе, на 5–10 дБА ниже дизельного аналога. Преимущества применения биогаза в качестве моторного топлива связаны с возобновляемостью, наличием местных источников сырья для его получения, снижением парникового эффекта, снижением экологического ущерба от систем сбора органических отходов.

Биогаз обладает низкой теплотворной способностью, не превышающей 23 МДж/м^3. При использовании биогаза в качестве топлива для газовых двигателей можно преобразовать его энергию в механическую работу с высоким КПД. Итальянская фирма Tessari использует биогаз в качестве моторного топлива как для конвертированных, так и газовых двигателей.

Высокое метановое число обеспечивает высокие антидетонационные качества, что позволяет получить высокий КПД двигателя.

Физико-химические и моторные свойства горючих газов. Основным компонентом КПГ является метан, обладающий высоким углеродным числом (соотношение С/Н).

Физико-химические газообразные топлива оказывают заметное влияние на конструкцию и эксплуатацию ГБА. Агрегатное состояние газа зависит от физико-химических свойств его компонентов, температуры и давления в баллоне.

Основные физико-химические, теплофизические и эксплуатационные показатели основных углеводородных газов, входящих в состав газовых топлив для автомобильного транспорта, представлены в табл. 6.

КПГ обладают высокой теплотворной способностью, достаточно широкими пределами воспламеняемости и относительно низким содержанием токсичных компонентов [9, 10].

Таблица 6

Физико-химические свойства компонентов газовых топлив

Показатели	КПГ	Коммунально-бытовой газ	Биогаз	Дизтопливо	Бензин
Химическая формула	C_xH_y	C_xH_y	C_xH_y	$C_{14}H_{30}$	$C_{13}H_{24}$
Молекулярная масса, кг/мол	22,5	21,1	21,1	155,0	144,0
Компонентный состав (молярная доля, %):					
метан CH_4, не менее	90	90	65	–	–
диоксид углерода, CO_2, не более	2,5	2,5	35	–	–
кислород, O_2, не более	0,02	0,02	0,01	–	–
азот, N_2, не более	5,0	5,0	1,0	–	–
водород, H_2, не более	2,0	2,0	0,15	–	–
пропан	1,5	1,5	1,0	–	–
бутан	1,0	1,0	1,0	–	–
этан	4,0	4,0	4,0	–	–
Элементарный состав, %:					
C	74,57	79,5	76,6	86,0	85,4
H	25,3	22,6	21,2	13,0	14,4
O	0	0	0	1,0	0,10
Суммарная объемная доля негорючих компонентов не более, %	7,0	9,5	1–5	–	–
Теплота сгорания (низшая):					
МДж/м^3 (объемная)	35,8	31,8	9,8–30,1	36,5	35,51
МДж/кг (удельная)	49,7		15–30	41,5	43,90
Теплота сгорания стехиометрической смеси при α =1,0, МДж/м^3	3,38	3,2	3,0–3,3	3,7	3,56
Октановое число:					
моторный метод	103	102	102	21	66–85
исследовательский метод	110				80–100
Метановое чило	80	85	135	–	–
Цетановое число	8	3	3	45	12
Углеродное число (C/H)	2,96	3,2	3,2	–	6,0
Плотность при нормальных условиях 20 °C:					
газовой фазы, кг/м^3	0,798	1,1	1,158	–	5,0
жидкой фазы, кг/м^3	415	450	450	828	735
Стехиометрический коэффициент, l_o:					
массовый, кг/кг	17,4	17,4	3,5–10,2	14,5	14,9
объемный, м^3/м^3	9,5	9,5	9,5	58,6	58,6
Температура кипения, °C	–161,6	–161,6	–161,6	280	Не ниже +35

Окончание табл. 6

Показатели	КПГ	Коммунально-бытовой газ	Биогаз	Дизтопливо	Бензин
Массовая концентрация сероводорода, г/м^3, не более	0,02	0,02	0,02	–	–
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м^3, не более	0,036	0,016	0,016	–	–
Массовая доля концентрации сероводородной и меркаптановой серы, %, не более	0,1	0,1	0,1	–	–
Масса механических примесей , г/м^3, не более	0,001	0,001	0,001	–	–
Объемная доля кислорода, %, не более	1,0	1,0	1,0	–	–
Максимальная скорость сгорания, м/с	0,41	0,36	0,27	0,45	0,48
Границы устойчивой работы двигателя:					
$\alpha_н$	0,65	0,7	0,66–0,7	1,0	0,7
$\alpha_в$	2,0	1,9	1,8–1,95	5,0	1,65
Степень сжатия	12	12	12	14–16	9–10
Температура воспламенения при атмосферном давлении, °С	640–680	640–680	640–680	300	400
Относительная плотность газовой фазы (по воздуху)	0,586	0,586	0,586	3,6	3,78
Критическое давление (абсолютное), МПа	4,58	4,58	4,58	–	–
Топливный эквивалент КПГ:					
$м^3_{кпг}/л_{бен}$	–	–	–	–	1,07
$м^3_{кпг}/л_{диз}$	–	–	–	1,1	–
Критическая температура кипения, °С	–82,0	–82,0	–82,0	–	–
Содержание паров воды, мг/м^3, не более	9,0	9,0	9,0	–	–
Пределы воспламеняемости в смеси с воздухом (объемные), %:					
нижний	5,0	5,0	5,0	0,6	1,5
верхний	15,0	15,0	15,0	6,5	6,0
Температура горения, К	2065	–	–	–	2335
Минимальная энергия зажигания, МДж	0,29	0,29	0,29	0,25	0,21
Теплота парообразования, кДж/кг	514,1	514,1	514,1	260	330
ПДК КПГ и паров, мг/м^3	300	300	300	100	100

Безопасность КПГ. По токсикологической характеристике КПГ в соответствии с ГОСТ 12.1.005–76 отнесен к веществам 4-го класса опасности. Он не оказывает вредного воздействия на человека, но повышенная его концентрация в воздухе может вызвать раздражение кожных покровов, слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Предельно допустимая концентрация КПГ на рабочих местах и в рабочих зонах не должна превышать 300 мг/м^3 (в пересчете на углерод), что существенно выше по отношению к традиционным топливам.

Предельно допустимая концентрация сероводорода в воздухе рабочей зоны не должна превышать 10 мг/м^3 сероводорода в смеси с углеводородами для C_1–C_5 составляет 3 мг/м^3.

Эксплуатация ГБА значительно безопасна по сравнению с традиционными топливами. В основу положены объективные физико-химические свойства газов – температурные и концентрационные пределы самовоспламенения, которые у газов существеннее выше, чем у бензина и ДТ. В баллонах газ находится под давлением, исключающим возможность попадания воздуха, необходимого для

воспламенения или взрыва. В баках с бензином или ДТ постоянно присутствует смесь их паров с воздухом. Газовые баллоны имеют многократный запас прочности и устанавливаются в наименее уязвимые места в автомобиле.

Для тушения газа при его возгорании широко применяют углекислотные, пенные и порошковые огнетушители, песок, землю, асбестовую кошму, специальные огнегасящие вещества типа "хладон" и т.д.

Различают верхний и нижний пределы воспламенения.

Пределы воспламеняемости зависят от состава горючего газа и определяются по выражению

$$L_{\text{н.в}} = \sum_{1}^{n} r_i \Big/ \sum_{1}^{n} \frac{r_i}{l_i}, \qquad (10)$$

где $L_{\text{н.в}}$ – верхний или нижний предел воспламеняемости, %, горючего газа в газовоздушной смеси; l_i – верхний или нижний концентрационный предел воспламеняемости i-го горючего компонента в газовоздушной смеси; r_i – процентное содержание i-го горючего вещества в горючем газе.

Балластные компоненты повышают значения как нижнего, так и верхнего предела воспламеняемости и несколько увеличивают диапазон воспламеняемости газа.

Пример. Определить нижний и верхний пределы воспламеняемости горючего газа следующего состава: CH_4 – 90,0 %; H_2 – 2,0 %; C_3H_8 – 1,0 %; C_4H_{10} – 1,0 %; N_2 – 5,0 % и O_2 – 0,02 %.

Пренебрегаем наличием азота и кислорода, являющихся балластом, несколько повышающих пределы воспламеняемости.

По табл. 6 и 7 определяем пределы воспламеняемости горючих компонентов:

$$L_{\text{н}} = \frac{90{,}0+2{,}0+1{,}0+1{,}0}{\frac{90{,}0}{5{,}0}+\frac{2{,}0}{4{,}0}+\frac{1{,}0}{2{,}6}+\frac{1{,}0}{2{,}0}} = 4{,}79\ \%;$$

$$L_{\text{н}} = \frac{90{,}0+2{,}0+1{,}0+1{,}0}{\frac{90{,}0}{15{,}0}+\frac{2{,}0}{74{,}2}+\frac{1{,}0}{7{,}4}+\frac{1{,}0}{6{,}2}} = 14{,}9\ \%.$$

Категория и группа взрывоопасной смеси по ГОСТ 12.1.011–78 соответствует ПА–Tl.

Экологичность. ПГ по своей природе является экологически чистым топливом.

Сгорание 1 м^3 метана при сгорании сопровождается образованием 1,6 кг водяных паров [11]. Сгорание метана может быть представлено формулой:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + 35{,}9\ \text{МДж/м}^3. \qquad (11)$$

Химическая энергия, заключенная в молекулах газа, освобождается и превращается в тепловую, т.е. в кинетическую энергию молекул углекислого газа и водяного пара. При недостаточном количестве кислорода (воздуха) газообразное топливо сгорает неполностью, образуя CO.

В этом случае реакция горения метана имеет следующий вид:

$$CH_4 + 1{,}5O_2 = CO + 2H_2O + 23{,}3\ \text{МДж/м}^3. \qquad (12)$$

При неполном сгорании метана выделяется не 35,9 МДж/м^3, а 23,3 МДж/м^3 теплоты. Остальная часть теплоты остается химически связанной, так как представляет химическую энергию CO, способную соединиться с кислородом и сгорать с выделением оставшейся теплоты.

Для полного сгорания 1 м^3 метана требуется 2 м^3 кислорода. Поскольку содержание кислорода в воздухе по объему составляет 21 % (по массе 23,2 и азот 76,8), то для полного сгорания 1 м^3 метана требуется (2×100)/21 = 9,5 м^3 (по объему) воздуха или по массе (2×100)/23,3 = 8,6 кг воздуха.

Количество продуктов сгорания 10 м^3. При работе на газе оптимальному расходу топлива соответствует более высокий α.

Автомобили, работающие на КПГ, характеризуются низким содержанием CO_2 в ОГ благодаря хорошему соотношению водорода и углерода (H/C), равному почти 4:1 (для бензина – 2,3:1). Параметры технологической безопасности применения КПГ определяются температурой самовоспламенения и концентрационные пределы воспламенения газовой смеси в окружающей среде. Концентрационные пределы характеризуются коэффициентом (степенью) риска ($R_{\text{КПГ}}$) применения газового топлива. Величина коэффициента риска может быть представлена зависимостью:

$$R_{\text{КПГ}} = (K_{\text{ВКП}} - K_{\text{НКП}}) / K_{\text{НКП}}, \qquad (13)$$

где $R_{\text{КПГ}}$ – величина риска; $K_{\text{ВКП}}$ и $K_{\text{НКП}}$ – верхний и нижний концентрационный пределы воспламенения газовоздушной смеси, %.

Концентрационный предел горючей смеси характеризует численное значение индекса величины коэффициента риска. Чем выше его значение, тем выше степень риска.

В диапазоне, ограниченном этими верхним и нижним пределами, газовая смесь горит. Однако внутри этого диапазона имеется диапазон, где происходит взрывное сгорание смеси. Границы этого диапазона называют пределом взрывного сгорания. Метан при сжигании в двигателе полностью сгорает в двуокись углерода.

По энергетическим параметрам 1 м^3 природного газа (метана) эквивалентен 1 л бензина. Повышение эксплуатационных характеристик КПГ не требует применения антидетонационных присадок.

Поэтому КПГ обладает высокой теплотворной способностью, достаточно широкими пределами воспламеняемости и относительно низким содержанием токсичных компонентов.

Теплотехнические показатели. Выделение тепла на единицу массы метана на 12 % больше по сравнению с традиционным топливом. Однако по тепловыделению при сгорании горючей смеси он несколько уступает дизельному топливу. Низшая удельная теплота сгорания газовоздушной смеси бензина и дизельного топлива на 9,5–10 % меньше по сравнению с традиционными топливами.

Смесеобразование. Объемный стехиометрический коэффициент l (м^3/м^3) рассчитывают по формуле:

$$L_{\text{м}} = \sum_{i=1}^{n} L_i d_i c_i , \qquad (14)$$

где L_i – объемный стехиометрический коэффициент i-го компонента, м^3/м^3; d_i – относительная плотность i-го компонента; c_i – объемная доля i-го компонента в газе; n – число компонентов КПГ, определенных анализом.

Температура воспламенения метана составляет 640–680 °С, а дизельного топлива – 240 °С, т.е. превышает в 2,1–2,2 раза параметры базового топлива. Такая высокая температура воспламенения КПГ затрудняет пуск двигателя, особенно при пониженных температурах окружающего воздуха.

Энергетические показатели. Минимальная энергия зажигания метана, пропана и бензина составляет соответственно 0,28, 0,25 и 0,15 МДж, поэтому они воспламеняются хуже. Высокое метановое число обеспечивает высокие антидетонационные качества, что позволяет получить высокий КПД двигателя.

Метан имеет высокую детонационную стойкость и позволяет форсирование двигателя по степени сжатия, равной 9,5–12,0.

В проекте ГОСТ Р (окончательная редакция) [3] учтен положительный опыт эксплуатауции НТС на компримированном природном газе. С учетом сложившейся номенклатуры газомоторного топлива в новом ГОСТ Р введено широкое понятие – компримированное газовое моторное топливо (КГМТ).

Качественные показатели КГМТ при его использовании на газобаллонных НТС обеспечат получение более высоких технико-эксплуатационных качеств (табл. 7).

Для оценки детонационной стойкости КГМТ применяют расчетную методику, приведенную в международном стандарте [12, 13] по компонентному составу.

Показатели пожаровосприимчивости компонентов компримированного газового моторного топлива природного газа приведены в табл. 8.

Влияние компонентов на эксплуатационные показатели газомоторного топлива. Метан является основным компонентом двухтопливной смеси газодизеля. Особенностью технологии использования газа в дизелях является определение топливного эквивалента газового топлива по отношению к дизельному топливу. Обобщенный топливный эквивалент для пересчета газового топлива на дизельное получен в соответствии с уравнениями энергетического и мощностного баланса работы двигателя и автомобиля и может быть представлен как

$$\tau_{\text{г}}^{\text{д}} = (H_{\text{м}}^{\text{г}} / H_{\text{и}} \rho_{\text{т}}), \qquad (15)$$

где $H_{\text{м}}^{\text{г}}$ – теплотворная способность газа, кДж/кг; $H_{\text{и}}$ – теплотворная способность дизельного топлива; $\rho_{\text{т}}$ – удельная плотность ДТ.

В процессе эксплуатации для замещения 1 т дизельного топлива требуется 1230 м^3 КПГ.

На практике качественные показатели КПГ улучшают путем добавки водорода в природный газ. Влияние присадки водорода в метане на ламинарную скорость сгорания метановодородной смеси приведено на рис. 4.

При содержании водорода в смеси с метаном до 5 % скорость сгорания не увеличивается. При содержании H_2 = 10 коэффициент α может быть рас-

Таблица 7

Показатели качества КГМТ

Наименование показателя	Значение	Метод испытания
Компонентный состав (молярная доля,%):		
метан CH_4, не менее	90	ГОСТ 31371.1–ГОСТ 31371.7
диоксид углерода CO_2, не более	2,5	
кислород O_2, не более	0,02	
азот N_2, не более	5,0	
водород H_2, не более	2,0	ГОСТ 14920
Массовая концентрация сероводорода, г/м^3, не более	0,007	ГОСТ 22387.2; ГОСТ Р 53367
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м^3, не более	0,016	ГОСТ 22387.2; ГОСТ Р 53467
Массовая концентрация общей серы, г/м^3, не более	0,030	ГОСТ 22374; ГОСТ Р 53367
Массовая концентрация механических примесей, г/м^3, не более	0,001	ГОСТ 22387.4
Плотность при стандартных условиях, г/м^3, не более	Не нормируется, определение обязательно	ГОСТ 31369
Объемная теплота сгорания низшая, МДж/м^3	31,8	ГОСТ 31369; ГОСТ Р 8.668
Расчетное метановое число газа, не менее	70	–
Температура точки росы по воде при рабочем давлении в точке отбора пробы, не выше	На 10 °С ниже минимальной температуры ОС	ГОСТ 20060

Таблица 8

Показатели пожароопасности компонентов компримированного газа

Параметр	Компонент			
	Метан	Этан	Пропан	Н-Бутан
Химическая формула	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_8
Концентрационные пределы распространения пламени, в объемных долях, %	4,4–17,0	2,9–15,0	2,3–9,4	1,8–9,1
Стехиометрическая концентрация в объемных долях, %	9,48	5,79	4,03	3,13
Нормальная скорость распространения пламени в газовоздушной смеси, м/с	0,28	0,32	0,31	0,30
Минимальная энергия зажигания, МДж	0,28	0,24	0,25	0,25
Температура самовоспламенения газовоздушной смеси, °С	537	472	468	405
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	49,9	47,42	46,80	47,33
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода в объемных долях, %:				
разбавитель CO_2	11,0	13,8	14,9	14,9
разбавитель N_2	11,0	11,3	12,0	12,0

Окончание табл. 8

Параметр	Компонент			
	Метан	Этан	Пропан	Н-Бутан
Максимальный безопасный экспериментальный зазор, мм	1,14	0,91	0,92	0,98
Максимальное давление взрыва, кПа	706	675	843	843
Максимальная скорость нарастания давления при взрыве, МПа/с	18	17,2	24,8	–
Минимальная температура пламени газовоздушной смеси, °С	1880	1900	1930	1890
Концентрационные пределы детонации в смеси с воздухом , в объемных долях, %:				
нижний	6,3	2,9	2,6	2,0
верхний	14,0	12,2	7,4	6,2

ширен до $\alpha = 2{,}0$ и лишь при содержании $H_2 > 10$ % можно достичь крайне низких показателей вредных веществ.

Выбор газомоторного топлива предопределяет последующие эксплуатационные характеристики НТС. Скорость распространения пламени для различных газов приведена на рис. 5.

Скорость пламени зависит от α. Наличие в топливе инертных газов азота CO_2 способно существенно снизить скорость горения газовоздушной смеси.

Ламинарная скорость пламени дает лишь первое представление о возможности сгорания того или иного газа в газовом ДВС. В реальном ДВС достаточно турбулизирован.

Для двигателей с искровым зажиганием критической зоной, за которой смесь перестает воспламеняться, является ламинарная скорость пламени ниже 4–5 см/с.

Применение газодизельных НТС существенно повышает замещение традиционного топлива природным газом.

Определение ЦТ смесевого топлива газодизеля. Величина ЦТ смесевого топлива газодизеля может быть определена по известным соотношениям цетановых его чисел отдельных компонентов и объемных их долей в смесевом топливе:

$$ЦТ_{см} = [ЦТ_1 V_1 + ЦТ_2 V_2 + \ldots + ЦТ_n V_n] / [V_1 + \ldots + V_n], \quad (16)$$

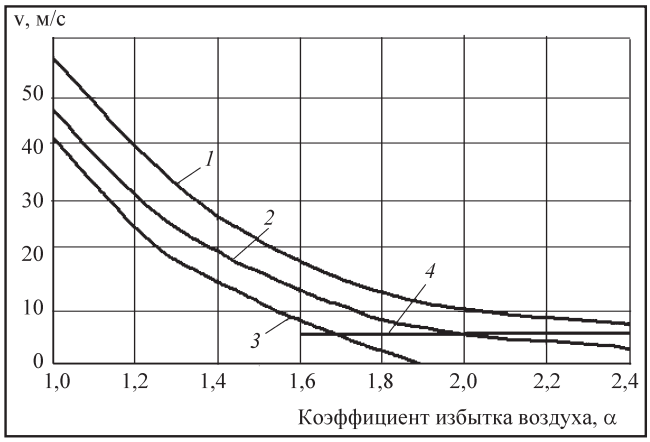

Рис. 4. *Изменение ламинарной скорости сгорания водородно-метановой смеси:*
1 – содержание водорода 15 %; *2* – содержание водорода 10 %; *3* – содержание водорода 5 %; *4* – предел воспламенения 5 см/с

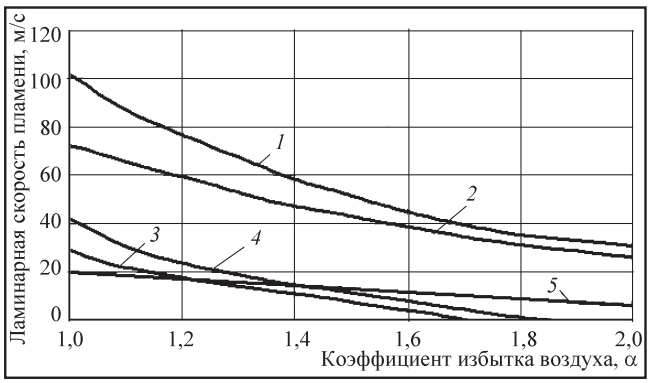

Рис. 5. *Скорость распространения пламени для различных газов:*
1 – коксовый газ; 2 – пиролизный газ; 3 – биогаз; 4 – природный газ; 5 – продукты газификации древесины

где $ЦТ_1$, $ЦТ_2$ – цетановые числа компонентов смесевого состава; V_1, V_2, V_n – объемные доли компонентов смесевого состава.

Величину ЦЧ топливных смесей приближенно оценивают по физическим параметрам или групповому химическому его составу.

Расчетная величина смешанного топлива может быть определена по групповому химическому его составу:

$$ЦТ = 0{,}85П + 0{,}1Н - 0{,}2А, \qquad (17)$$

где П, Н, А – содержание в топливе соответственно парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов.

Для товарных сортов ДТ групповой состав ДТ содержит соответственно 34 % парафиновых, 40 % нафтеновых и 26 % ароматических углеводородов.

Рабочий процесс современных транспортных дизелей с ЦЧ, равным менее 20 ед., сопровождается высоким индукционным периодом. Применение топлива с таким ЦЧ недопустимо. Для транспортных дизелей ЦЧ, равное 35–40 ед., можно считать предельно допустимой величиной, обеспечивающей нормальную его работу. Величина ЦЧ обеспечивает пуск газодизеля и нормальное протекание РП.

Аналитическая зависимость для определения ЦЧ смесей топлив может быть представлена выражением:

$$ЦЧ_{см} = ЦЧ_{дт} V_1 + ЦЧ_{кпг} V_2, \qquad (18)$$

где $ЦЧ_{дт}$ и $ЦЧ_{кпг}$ – цетановые числа дизельного топлива и КПГ; V_1 и V_2 – объемные доли дизельного и газового топлива. Величина ЦЧ топлива предопределяет скорость химических процессов подготовки смеси к воспламенению.

Влияние добавки СУГ и КПГ к дизельному топливу на ЦЧ смеси показано на рис. 6.

По мере увеличения добавки КПГ ЦЧ (кривая *2*) смеси уменьшается. Элементарный состав углеводородного топлива оказывает заметное влияние на качество смесеобразования, сгорание и состав ОГ газодизеля. Количество КПГ в газодизеле ограничивает величину ароматических C_mH_n, характеризующих склонность топлива к самовоспламенению. Добавление в КПГ присадок, повышающих ЦТ, несколько улучшает проблему повышения эффективности самовоспламенения.

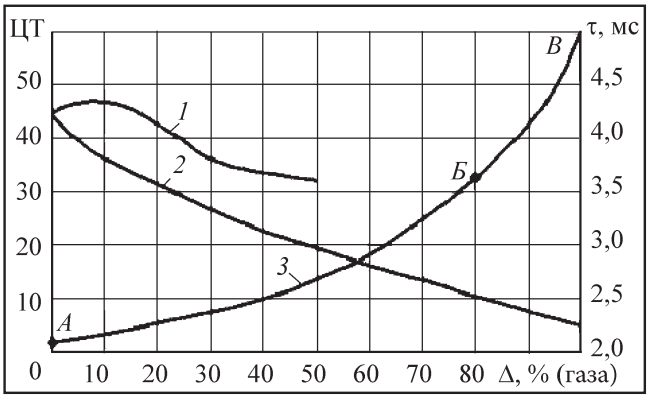

Рис. 6. *Влияние добавки газа на цетановое число газодизельной смеси:*
1 – СУГ; *2* – СПГ; *3* – период задержки воспламенения; *А–Б* – рабочая зона; *Б–В* – неисследованная зона

При работе дизеля на ДТ величина τ_i (кривая *3*) складывается из продолжительности впрыскивания и распыливания топлива, его испарения и диффузии, протекания предпламенных реакций, неоднородности многостадийного воспламенения прохождения холодного и голубого пламени.

Расчетный метод позволяет определить величину ЦЧ смеси. Для определения теплоты сгорания топлив существует ряд эмпирических зависимостей. Все они основаны на связи теплоты сгорания с элементарным составом, плотностью, анилиновой точкой и другими физико-химическими характеристиками топлива и его смеси.

Значительное увеличение индукционного периода горения по мере снижения ЦЧ сопровождается ухудшением пуска двигателя и последующего протекания его РП.

Надежная работа дизеля на топливной смеси может быть обеспечена при содержании в ней 15–20 % ДТ.

Для повышения низкооктанового бензина, получаемого в достаточном количестве в результате первичной переработки нефти, его смешивают с высокооктановым природным газом. В основу работы бинарной двухтопливной системы питания положен принцип автоматической подачи природного газа. Закономерность изменения расхода газа может быть представлена следующей зависимостью:

$$R = M_м / (M_м + M_б), \qquad (19)$$

где R – концентрация газового топлива в смеси, величина которой изменяется в пределах 0,2–0,5; $M_м$ и $M_б$ – массовые доли метана и бензина в смеси.

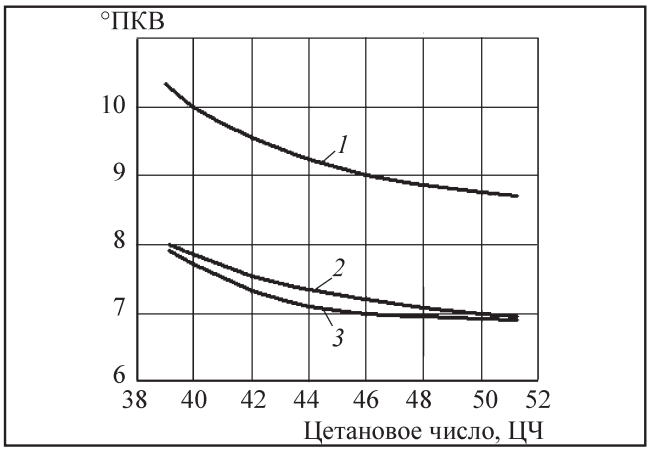

Рис. 7. *Влияние ЦТ на задержку воспламенения топлива:* *1* – 2300 мин$^{-1}$, нагрузка полная 100 %; *2* – 1600 мин$^{-1}$, нагрузка 50 %; *3* – частота вращения 1600 мин$^{-1}$, нагрузка 10 %

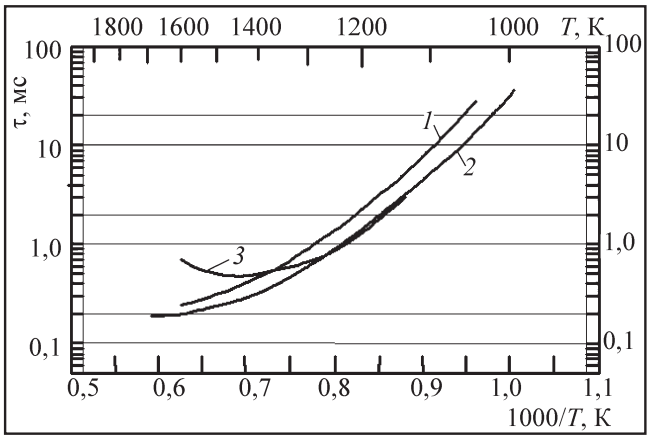

Рис. 8. *Изменение задержки воспламенения этана в зависимости от температуры и давления:* *1* – 2,5 МПа; *2* – 4,0 МПа; *3* – 0,5 МПа

Высокий технический уровень современных НТС позволяет реализовывать подобные технические решения.

Влияние ЦТ на задержку воспламенения топлива показано на рис. 7.

Малые концентрации этана и пропана в ПГ заметно влияют на характер процесса сгорания и величину задержки воспламенения рабочей смеси.

Отдельные компоненты КПГ оказывают заметное влияние на величину задержки воспламенения рабочей смеси газодизеля.

Период индукции газовой смеси может быть представлен зависимостью:

$$\tau_i = K_м e^{-E_о/RT}, \text{ мс}, \qquad (20)$$

где $K_м$ – коэффициент диффузии (концентрация) метана, полученный расчетным или экспериментальным методами; $E_о$ – условная энергия активации топлива, кДж/кмоль.

Изменение задержки воспламенения этана в зависимости от температуры газа приведено на рис. 8.

Коэффициент молекулярной диффузии метана в воздушный поток изменяется в пределах 0,1–1 см^2/с , а при диффузии его в дизельное топливо составляет 0,04 см^2/ч.

Значение коэффициента $K_м$ можеть быть определено по экспериментальным данным ГД, работающего при отсутствии подачи КПГ при $Q_{впр}$ в пределах 25–30 ПКВ. В расчете принимали значение энергии активации E = = 22,5·10^3 кДж/кмоль.

Воспламенение в дизельном двигателе ограничивает минимальное значение степени сжатия до 13–14 ед. Условия бездетонационной работы газового двигателя не допускают превышения 12–13 ед. Увеличение доли газа в газодизельной смеси в диапазоне 0–80 % сопровождается возрастанием задержки воспламенения смеси с 2 до 3,7 мс.

Измерение расхода газового топлива в эксплуатации. Расход КПГ нормируют в объемных единицах (м^3), приведенных к нормальным условиям. Для определения количества газа в баллонах газобаллонных автомобилей применяют косвенный метод – по величине давления и температуры газа в баллонах.

При значительном изменении давления и температуры необходимо учитывать коэффициент сжимаемости и определять удельный объем их уравнения

$$pV = ZRT, \qquad (21)$$

где p – давление, Па; V – объем, м^3; Z – коэффициент сжимаемости давления газов в баллоне, МПа; V – объем баллонов, м^3; R – Дж/(моль·К); T – К.

Объем газа, заправленного в баллоны автомобиля, при давлении 0,1 МПа и температуре 15 °С, определяется по формуле:

$$Q_{КПГ} = 10V_б(p_2 / Z_2 - p_1 / Z_1), \qquad (22)$$

где p_1, p_2 – соответственно начальное и конечное давление газов в баллоне, МПа; Z_1, Z_2 – коэффициенты сжимаемости газа соответственно при начальном и конечном давлениях.

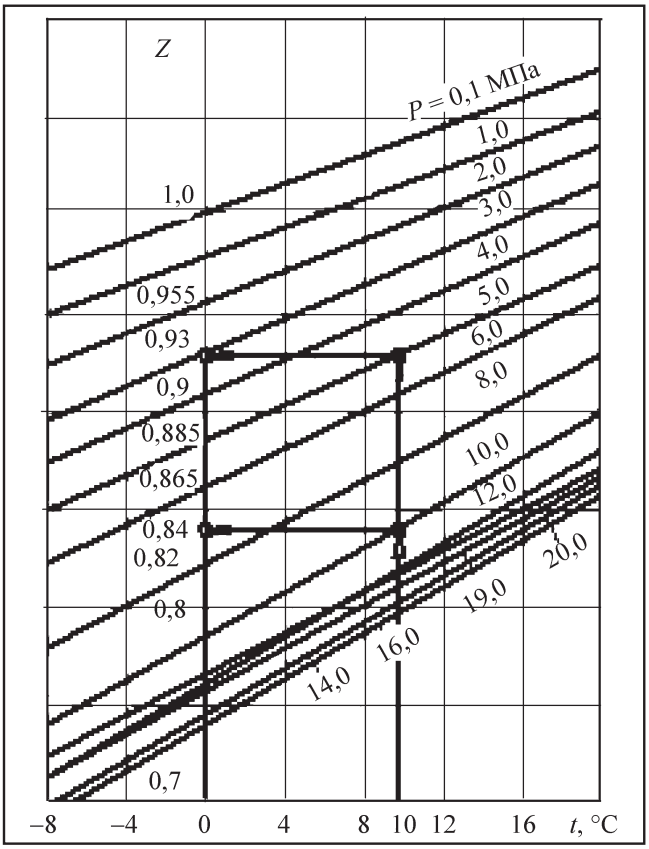

Рис. 9. *Номограмма определения расхода КПГ при эксплуатации газобаллонного автомобиля*

Коэффициент сжимаемости газа учитывает непропорциональность изменения его объема с изменением давления. Для метана коэффициент сжимаемости при 0 °С при давлении от 0,1 до 20 МПа колеблется в пределах от 1 до 0,82. С учетом коэффициента сжимаемости на АГНКС разработаны таблицы вместимости баллонов НТС.

Коэффициенты сжимаемости КПГ (Z_1 и Z_2) являются функциями температуры и давления газа. Их определяют по номограмме при заданных значениях давления p и температуры газа t °С. Ключ к определению коэффициентов сжимаемости показан на рис. 9 стрелками [15].

Расход КПГ обусловлен изменением его давления и температуры. Расход КПГ оценивают объемными единицами (м^3), приведенными к нормальным условиям.

Пример 1. Определить расход газа НТС, если он выехал из АТП при величине давления в баллонах P_1 = 10 МПа и вернулся на АТП с давлением, равным P_2 = 5 МПа. Средняя температура окружающего воздуха равна +10°С. Расход газа составил:

$$Q_{ср} = 10 \cdot 0{,}4(100 / 0{,}84 = 50 / 0{,}93) = 26 м^3.$$

На НТС отсутствует возможность непосредственного измерения, так как в баллон постоянного объема помещают различный объем КПГ в зависимости от температуры и давления, по величине давления в баллонах, которое измеряют с помощью штатного манометра высокого давления.

При отсутствии номограммы коэффициенты сжимаемости газа Z_1 и Z_2 в формуле принимают равными $Z_1 = Z_2 = 1$, тогда содержание количества газа (израсходованного, оставшегося в баллонах или заправленного) можно измерить приблизительно по величине перепада давления, определяемого при помощи манометра высокого давления. Расход газа составил 20 м^3. Погрешность подобных расчетов составляет 25 %.

Данный способ расчета имеет большие погрешности при определении фактического количества заправленного КПГ. Точность измерения зависит от процедуры заправки. Кроме того, необходимо учитывать температуру газа до заправки и после заправки. Большая продолжительность заправки способствует интенсивному теплообмену между газом и окружающей средой, сопровождающемуся более высоким наполнением газового баллона.

Современные системы впрыска газа в меньшей степени чувствительны к снижению содержания метана в КПГ. Системы впрыска электронными средствами компенсируют недостаток метана в ПГ путем увеличения подачи газа.

Нормирование газа в эксплуатации. Нормы расхода газа учитывают расход газа на перемещение собственной массы автомобиля (линейная норма), выполнение транспортной работы и количество ездок. Для автомобилей, работающих на КПГ, введены в действие временные линейные нормы расхода газа на 100 км пробега. В 2004 г. они были включены в нормативный документ расхода топлива и смазочных материалов на автомобильном транспорте. Линейные нормы расхода КПГ (м^3/100 км) для газобаллонных автомобилей приведены в табл. 9.

Для автомобилей и автопоездов, выполняющих транспортную работу, учитываемую в тонно-километрах, дополнительно устанавливается расход КПГ на каждые 100 км в количестве 2 м^3.

Таблица 9

Нормы расхода газового топлива

Марка, модель автомобиля	Базовая норма	
	Бензин л/100 км	КПГ $м^3$/100 км
ЗИЛ-138А	32,6	31,5
ЗИЛ-138АГ	32,6	32
ЗИЛ-ММЗ-45054	38,6	37,5
ГАЗ-53-27	26,5	25,0
ЛАЗ-695НГ	43	43
ГАЗ-САЗ-3509	28	27
ГЗСА-950	28	27
ГЗСА-3704	22,5	22

Для автомобилей-самосвалов (кроме расхода топлива, предусмотренного нормами) дополнительно устанавливается расход топлива на каждую ездку с грузом: КПГ – 0,25 $м^3$ или 0,25 л при работе на бензине.

При работе бортовых автомобилей с прицепами линейная норма расхода топлива увеличивается на каждые 100 км на 2 $м^3$ КПГ на каждую тонну собственной массы прицепа (для бортовых автомобилей и седельных тягачей) и на каждую тонну собственной массы и половину номинальной грузоподъемности прицепа (для автомобилей-самосвалов и самосвальных автопоездов).

При работе специализированных автомобилей нормы расхода газа увеличиваются или уменьшаются каждую тонну превышения или снижения массы такого автомобиля против базового в количестве 2,0 $м^3$ КПГ.

Для автомобилей, использование которых допускается с почасовой оплатой, норма расхода топлива на каждые 100 км увеличивается на 10 % по отношению к линейной.

Для запуска холодного двигателя установлена норма 0,4 л на один запуск. Бензин выдается с введением зимних норм расхода топлива.

При утилизации газа (сварочные и малярные работы, а также ремонт арматуры баллонов) газовое топливо списывается по акту за подписью главного инженера АТП.

Применение бензина или дизельного топлива для газобаллонных автомобилей рекомендуется только в следующих случаях: при израсходовании газового топлива для следования автомобиля до заправки; при нарушении работоспособности или негерметичности газовой системы питания; при невозможности заправки автомобиля газовым топливом; при запуске двигателя при температурах окружающей среды ниже 0 °С и отсутствии на АТП средств тепловой подготовки двигателей.

Нормы расхода топлива для газодизельных автомобилей. Линейные нормы расхода топлива газодизельных автомобилей на 100 км пробега увеличиваются на 1,3 л при работе на дизельном топливе и на 1,2 $м^3$ плюс 0,25 л дизельного топлива при работе в газодизельном режиме соответственно на каждую тонну собственной массы прицепов (для бортовых автомобилей и седельных тягачей).

Теплоэнергетические расчеты показывают, что при газодизельном процессе 1 $м^3$ ПГ заменяет 0,87 ДТ. Для замены 1 л ДТ необходимо израсходовать 1,15 $м^2$ газа. Линейные нормы расхода топлива газодизельными автомобилями приведены в табл. 10.

При работе бортовых автомобилей с прицепами в ГД линейная норма расхода топлива на 100 км пробега увеличивается на 1,2 $м^3$ КПГ и 0,25 л ДТ на каждую тонну собственной массы прицепа.

Для автомобилей-самосвалов, кроме расхода топлива, предусмотренного настоящими нормами, расход топлива увеличивается на каждую ездку с грузом на 0,2 $м^3$ КПГ и 0,1 л ДТ.

Для грузовых автомобилей, работающих с почасовой оплатой, нормы расхода как КПГ, так и ДТ на каждые 100 км увеличиваются на 10 % по сравнению с нормами, указанными выше.

Пример 2. Автомобиль КамАЗ-53208 в течение смены работал в городе с использованием газа. Пробег автомобиля составил 170 км, транспортная работа – 668 т·км. Норма расхода газа составляет:

дизельного топлива – 6,5(170/100) + + 0,25(668/100) = 12,6 л;

КПГ – 22,5(170/100) + 1,2(688/100) = 46,5 $м^3$.

Природный газ является одним из наиболее перспективных энергоносителей для транспортных средств. Мировая потребность в газе обеспечена на 70 лет разведанными рентабельными запа-

Таблица 10

Нормы расхода топлива газодизельными автомобилями

Модели автомобилей	Режимы		
	Дизельный	Газодизельный	
	Дизтопливо, л/100км	ДТ, л/100 км	КПГ, $м^3$/100 км
Бортовые и шасси			
КамАЗ-53208	26,0	6,5	22,5
КамАЗ-53218	26,5	6,5	23,0
КамАЗ-53217	26,0	6,5	21,5
КамАЗ-53219	25,5	6,5	22,0
Одиночный тягач			
КамАЗ-54118	26,0	6,5	22,5
Самосвал			
КамАЗ-55118	35,0	9,0	30,0
Газодизельный автобус			
"Икарус 280"	43	10–16	26–28

сами, составляющими 136 трлн $м^3$. При этом среднегодовая мировая добыча природного газа равна примерно 2 трлн $м^3$. КПГ является полноценным моторным топливом, не требует существенной технологической переработки и по ряду параметров превосходит современные жидкие моторные топлива.

Для стимулирования производства компримированного природного газа постановлением правительства РФ установлено предельное значение его цены, не превышающее 50 % от цены бензина А-76. В настоящее время стоимость газомоторного топлива не превышает 50 % стоимости бензина марки АИ-80.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ГОСТ 27577–2000** Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия.

2. **Ерохов В.И., Карунин А.Л.** Газодизельные автомобили (конструкция, расчет, эксплуатация). Учебное пособие. М.: Граф-Пресс, 2005. 560 с.

3. **ГОСТ Р** (проект, окончательная редакция) Газовые моторные топлива на основе метана для двигателей внутреннего сгорания транспортных средств. Общие технические условия. М.: Стандартинформ. 2014.

4. **Рачевский Б.С.** Сжиженные углеводородные газы. М.: Изд-во "Нефть и газ", 2009. 640 с.

5. **Мкртычан Я.** Расход газообразного моторного топлива на автомобильном транспорте. "АГЗК+АТ", № 4 (46). 2009. С. 13–17.

6. **Ерохов В.И.** Система питания газобаллонного автомобиля на компримированном природном газе. Журнал "АГЗК+АТ", № 3 (72). 2013. С. 9–21.

7. **Система** питания на природном газе EcoFuel Touran и Caddy. Volswagen Group Academy. file 74755.2009, № 373. 49 с.

8. **Ерохов В.И., Григорьев Е.Г., Колубаев Б.Д.** Газобаллонные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.

9. **ГОСТ 5542–2014** Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

10. **Ерохов В.И. и др.** Перспективы использования природного газа на автомобильном транспорте. Журнал Автодорожник Украины. 1981. № 2. С. 21–23.

11. **Ерохов В.И.** Физико-химические и моторные свойства газового топлива. Журнал "АГЗК+АТ", № 5 (11). 2003. С. 64–69.

12. **Ерохов В.И.** Токсичность современных автомобилей. Методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу. Учебник. Издательство "ФОРУМ", 2016. 458 с.

13. **ИСО 15403-1:2006** Газ природный.Сжатый природный газ для применения в качестве автомобильного топлива. Часть 1. (международный стандарт).

14. **ГОСТ 30319.1–96** Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.

15. **Ерохов В.И.** Газобаллонные автомобили (конструкция, расчет, диагностика). Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком. 2016. 598 с.

УДК 66.074.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗА НА ВХОДЕ В ТУРБОДЕТАНДЕР НА КОМПЛЕКСЕ СПГ НА ГРС И РАЦИОНАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЯЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ

М.С. Лебедев, Д.О. Быков, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Технология производства СПГ на ГРС заключается в последовательном охлаждении сжижаемого потока технологическим потоком, расширенным в турбодетандере. Перед расширением в турбодетандере технологический поток охлаждается обратным расширенным потоком в предварительном теплообменнике до температуры 220–230 К. При этой температуре часть углеводородов уже переходит в жидкое состояние, поэтому для недопущения попадания большей части капель конденсата на рабочее колесо турбомашины перед ней установлен фильтр, улавливающий эти капли, которые затем сбрасываются в распределительный газопровод ГРС. В данной работе представлен анализ компонентного состава магистрального газа в целях определения тенденции увеличения концентрации углеводородов в газе и выбора оптимального состава для расчета, исследование компонентного состава отделяемой на входе в турбину жидкости в зависимости от параметров потока, а также возможные варианты рациональной утилизации этой смеси.

Ключевые слова: *сжиженный природный газ (СПГ); турбодетандер; углеводороды; газораспределительная станция (ГРС); очистка.*

INVESTIGATION OF GAS PURIFICATION PROCESS AT THE TURBOEXPANDER INLET IN LNG COMPLEX AT GDS AND THE RATIONAL UTILIZATION OF THE SEPARATED COMPONENTS

Lebedev M.S., Bykov D.O., Ural Federal University named after B. N. Yeltzin, Yekaterinburg city

The technology of LNG production at GDS is in consistent cooling of the liquefied stream by a technological flow expanded in a turboexpander. Before expansion in the turboexpander, the technological flow is cooled by the reverse expanded flow in the pre-heat exchanger to a temperature of 220–230 K. At this temperature, some of the hydrocarbons are already liquid, so there is a filter to prevent most of the condensate droplets from getting onto the impeller of the turbomachine, drops are then discharged into the distribution gas pipeline of GDS. This paper presents the analysis of the component composition of the pipeline gas in order to determine the trend of increasing the concentration of hydrocarbons in the gas and to choose the optimal composition for the calculation, to study the component composition of the liquid to be separated at the inlet to the turbine, depending on the flow parameters, and possible uses for this mixture.

Keywords: *liquefied natural gas (LNG); turboexpander; hydrocarbons; gas distribution station (GDS); purification.*

Анализ компонентного состава магистрального газа заключается в построении графиков изменения средней за месяц концентрации определенного компонента в газе. Поскольку азот, кислород, водород, диоксид углерода и метан не испытывают фазовых превращений на входе в турбодетандер, анализировать изменение их концентраций в дан-

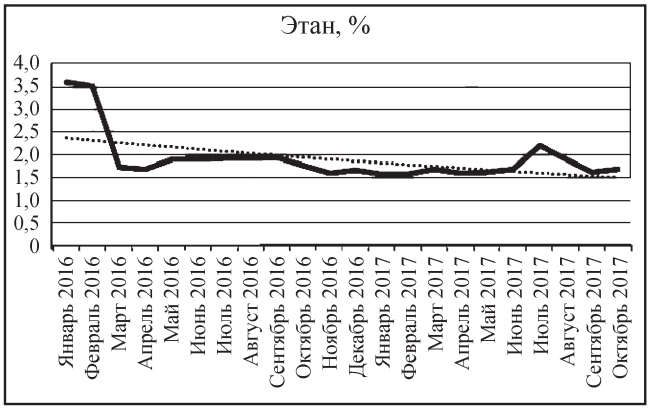

Рис. 1. *График изменения концентрации этана в магистральном газе*

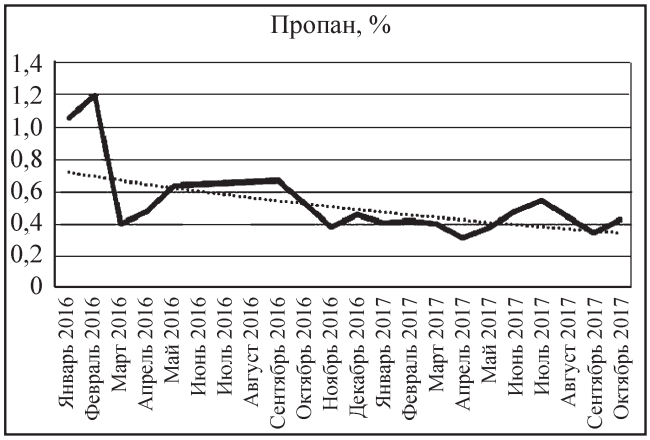

Рис. 2. *График изменения концентрации пропана в магистральном газе*

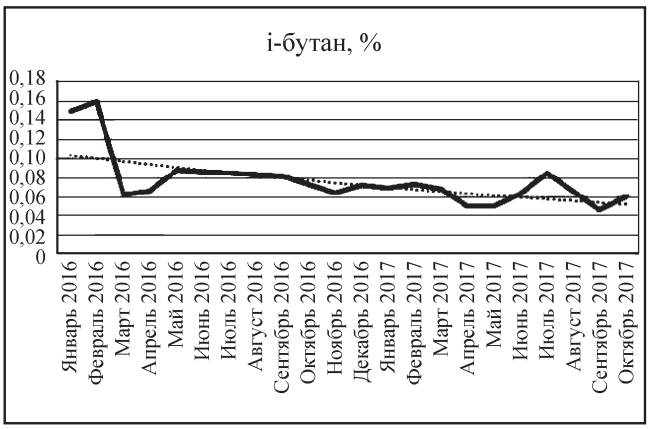

Рис. 3. *График изменения концентрации i-бутана в магистральном газе*

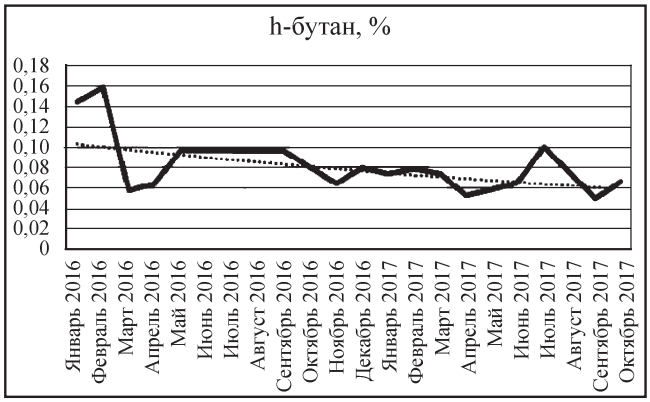

Рис. 4. *График изменения концентрации h-бутана в магистральном газе*

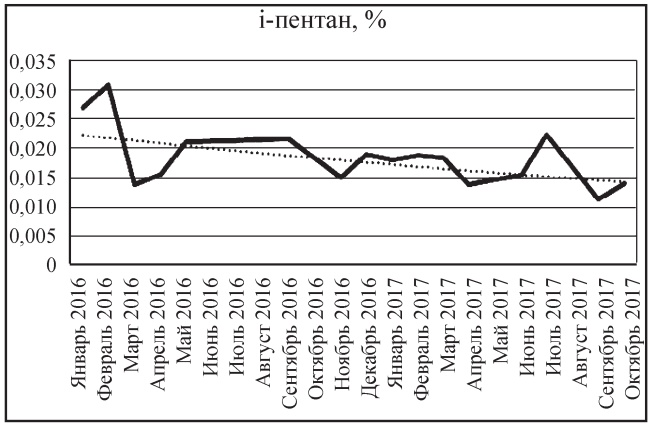

Рис. 5. *График изменения концентрации i-пентана в магистральном газе*

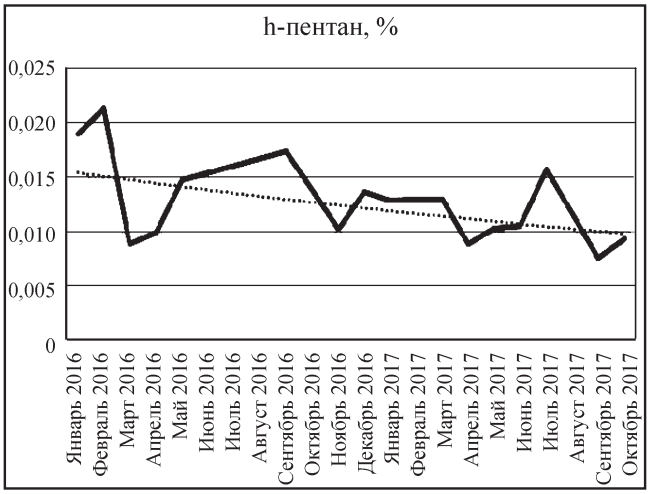

Рис. 6. *График изменения концентрации h-пентана в магистральном газе*

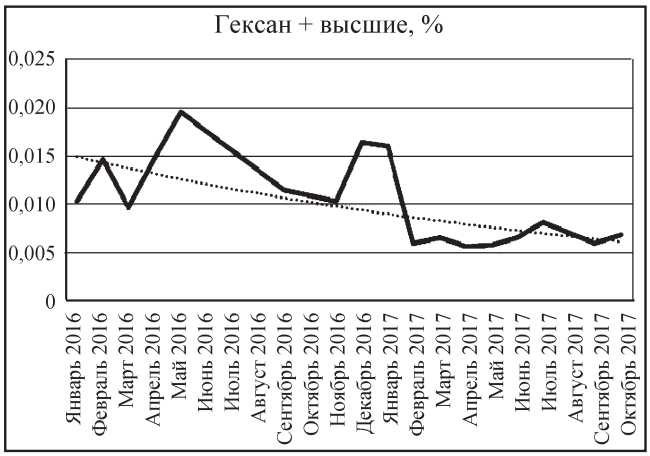

Рис. 7. *График изменения концентрации гексана с высшими алканами в магистральном газе*

ной работе не имеет смысла. На основе имеющихся данных о компонентном составе магистрального газа за каждый месяц 2016 и 2017 гг. получены следующие графики (рис. 1–7) для каждого компонента (кроме метана).

Как видно из графиков и линий тренда, все рассматриваемые углеводороды имеют тенденцию к уменьшению концентрации в газе. Однако нельзя исключать возможность резкого увеличения их концентраций (как это было в начале 2016 г.).

Для дальнейшего расчета достаточно определить крайние верхнее и нижнее значения концентраций, а также среднее значение.

Таблица 1

Компонентные составы газа с максимальными, минимальными и усредненными концентрациями алканов во входном газе

Алкан	Этан	Пропан	i-бутан	h-бутан	i-пентан	h-пентан	гексан+
Верхнее значение, %	3,61	1,2	0,159	0,158	0,031	0,021	0,0196
Нижнее значение, %	1,57	0,242	0,037	0,05	0,0113	0,0089	0,0056
Среднее значение, %	1,94	0,51	0,072	0,078	0,0175	0,0135	0,0065

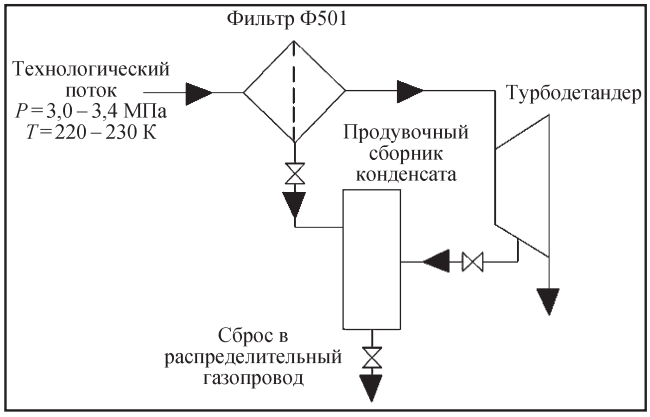

Рис. 8. *Схема продувки фильтра и детандерной части*

На рис. 8 изображена схема детандерной части турбоагрегата со сборником конденсата и клапанами для регулярной продувки фильтра и полости детандера.

Для расчета компонентного состава потока на входе в турбодетандер необходимо знать компонентный состав газа на входе в комплекс, а также температуру и давление потока.

Проанализировав компонентный состав магистрального газа за 2016–2017 гг., принимается средний состав входного на комплекс газа.

При номинальном режиме работы турбины давление на входе в турбину составляет 3,0–3,4 МПа, а температура варьируется от 220 до 230 К в зависимости от необходимости откачки паров СПГ из емкостей хранения (при откачке паров температура перед детандером снижается). Метан, кислород, азот и диоксид углерода в рассматриваемой точке технологической схемы не конденсируются, поэтому в расчете они не используются, но учитывается их присутствие.

Температура конденсации гексана и высших углеводородов попадает в рабочий диапазон температур перед детандером. Процесс конденсации будет проходить до тех пор, пока парциальное давление компонента не станет равным давлению насыщения компонента при температуре в данной точке. Температура конденсации пентанов и h-бутана ниже 220 К, но при изменении компонентного состава газа в сторону увеличения их концентрации, их парциальные давления увеличатся, а значит и температура конденсации увеличится, следовательно, нельзя исключить их возможный переход в жидкое состояние. Следует также учитывать свойства растворимости индивидуальных компонентов в жидких фракциях.

Таблица 2

Состав входного газа при средних значениях концентраций алканов

Компонент	Обозначение	Объемная доля
Метан	CH_4	0,9597
Этан	C_2H_6	0,0194
Пропан	C_3H_8	0,0051
i-Бутан	iC_4H_{10}	0,00072
h-бутан	hC_4H_{10}	0,00078
i-Пентан	iC_5H_{12}	0,000175
h-Пентан	hC_5H_{12}	0,000135
Гексан и выше	C_6H_{14}	0,000065
Диоксид углерода	CO_2	0,00204
Азот	N_2	0,01173
Кислород	O_2	0,00012

Для более точной оценки компонентного состава газа на входе в турбину смоделирован процесс сжижения газа в программе Aspen HYSYS V7.3 [4]. В качестве базисного уравнения газового закона выбрано уравнение Пенга–Робинсона (модифицированное уравнение Ван-дер-Вальса), компонентный состав газа выбирается средний согласно табл. 2. На рис. 9 изображена схема сжижения газа, смоделированная в программе.

На рис. 9 объекты модели соответствуют определенному оборудованию комплекса: K-100 (турбокомпрессор), K-101 (турбодетандер), LNG-100 (предварительный теплообменник), LNG-101 (основной теплообменник), V-100 (фильтр на входе в турбодетандер), VLV-100 и VLV-101 (дроссели), V-102 (сепаратор), V-103 (емкость хранения СПГ).

Расход и компонентный состав жидкости, отделяемой перед турбодетандером, значительно зависят от температуры. Согласно модели, фазовый переход наступает при температуре 220 К. Наибольший интерес составляет расход и компонентный состав жидкости, отделенной перед турбодетандером и доведенной до условий окружающей среды, т.е. до давления $P = 1$ бар и температуры $T = 273$ К. Для этого в модель комплекса на отборе жидкой фазы из фильтра перед детандером добавлены дроссель VLV-102 и нагреватель E-100, имитирующие переход потока к нормальным условиям.

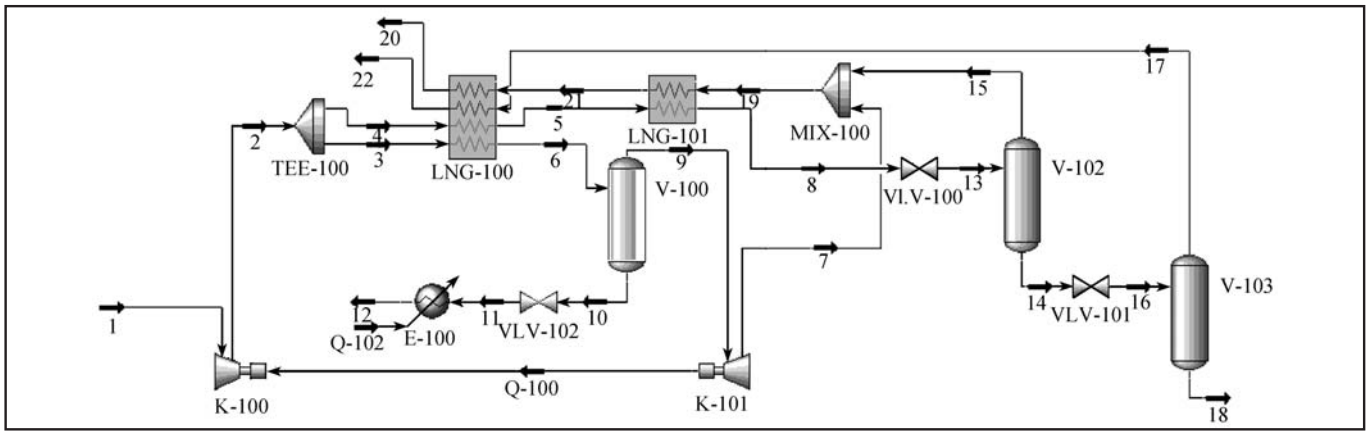

Рис. 9. *Модель комплекса сжижения газа на ГРС*

Далее рассматривается зависимость компонентного состава отделяемой жидкости и ее расхода при нормальных условиях от давления и температуры перед детандером.

Как видно из табл. 3, концентрации компонентов при температуре 220 К и изменении давления от 3,0 до 3,4 МПа меняются незначительно. С уменьшением давления концентрация этана не меняется, гексана – уменьшается, остальных компонентов – увеличивается. При этом расход жидкости варьируется от 0,52 до 1,439 кг/с.

При изменении температуры в сторону увеличения (221 К и выше) конденсации компонентов не происходит, поэтому рассмотрим зависимость при более низкой температуре – 219 К.

Согласно табл. 4, изменение концентраций аналогично изменениям при температуре 220 К. Расход меняется от 1,194 до 2,132 кг/с.

Далее рассмотрим влияние компонентного состава входного газа на компонентный состав и расход отделяемой жидкости. Для этого в модели изменим состав газа, поступающего на турбокомпрессор, до верхних значений концентраций (см. табл. 1). В данном случае часть углеводородов будет конденсироваться уже при 230 К.

Как видно из табл. 5, расход жидкости при изменении концентраций компонентов на входе значительно увеличился, при этом количественно компонентный состав изменился незначительно.

При температуре 225 К наблюдается увеличение расхода и уменьшение концентрации гексана на 3 %.

При температуре 220 К и давлении 3,4 МПа конденсации углеводородов не происходит, а при дальнейшем изотермическом снижении давления наблюдается значительное увеличение расхода:

Таблица 3

Концентрации жидких алканов перед турбиной при температуре 220 К при средних значениях концентраций компонентов во входном газе

Алкан, %	P = 3,4 МПа T = 220 К	P = 3,3 МПа T = 220 К	P = 3,2 МПа T = 220 К	P = 3,1 МПа T = 220 К	P = 3,0 МПа T = 220 К
Этан	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Пропан	1,94	1,97	2,01	2,04	2,07
i-Бутан	2,88	2,94	3,00	3,05	3,11
h-Бутан	6,69	6,82	6,95	7,08	7,19
i-Пентан	9,77	9,91	10,03	10,14	10,22
h-Пентан	13,98	14,13	14,26	14,36	14,44
Гексаны +	64,49	63,97	63,49	63,07	62,71
Расход, кг/с	0,52	0,825	1,081	1,287	1,439

Таблица 4

Концентрации жидких алканов перед турбиной при температуре 219 К при средних значениях концентраций компонентов во входном газе

Алкан, %	P = 3,4 МПа T = 219 К	P = 3,3 МПа T = 219 К	P = 3,2 МПа T = 219 К	P = 3,1 МПа T = 219 К	P = 3,0 МПа T = 219 К
Этан	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Пропан	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08
i-Бутан	2,90	2,96	3,02	3,08	3,13
h-Бутан	6,75	6,90	7,03	7,16	7,27
i-Пентан	9,93	10,07	10,20	10,31	10,41
h-Пентан	14,22	14,38	14,51	14,62	14,70
Гексаны +	64,00	63,46	62,97	62,53	62,15
Расход, кг/с	1,194	1,502	1,762	1,973	2,132

Таблица 5

Концентрации жидких алканов перед турбиной при температуре 230 К при верхних значениях концентраций компонентов во входном газе

Алкан, %	P = 3,4 МПа T = 230 К	P = 3,3 МПа T = 230 К	P = 3,2 МПа T = 230 К	P = 3,1 МПа T = 230 К	P = 3,0 МПа T = 230 К
Этан	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Пропан	2,48	2,52	2,55	2,58	2,61
i-Бутан	3,39	3,44	3,50	3,55	3,59
h-Бутан	7,40	7,52	7,63	7,73	7,82
i-Пентан	10,37	10,46	10,53	10,59	10,63
h-Пентан	12,28	12,35	12,40	12,43	12,44
Гексаны +	63,78	63,41	63,09	62,82	62,59
Расход, кг/с	13,428	13,717	13,918	14,023	14,024

Таблица 6

Концентрации жидких алканов перед турбиной при температуре 225 К при верхних значениях концентраций компонентов во входном газе

Алкан, %	P = 3,4 МПа T = 225 К	P = 3,3 МПа T = 225 К	P = 3,2 МПа T = 225 К	P = 3,1 МПа T = 225 К	P = 3,0 МПа T = 225 К
Этан	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Пропан	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72
i-Бутан	3,60	3,69	3,77	3,85	3,93
h-Бутан	7,97	8,16	8,35	8,54	8,72
i-Пентан	11,44	11,69	11,92	12,14	12,35
h-Пентан	13,36	13,59	13,81	14,01	14,20
Гексаны +	60,76	59,97	59,21	58,48	57,78
Расход, кг/с	20,01	21,288	22,537	23,738	24,873

Таблица 7

Концентрации жидких алканов перед турбиной при температуре 220 К при верхних значениях концентраций компонентов во входном газе

Алкан, %	P = 3,4 МПа T = 220 К	P = 3,3 МПа T = 220 К	P = 3,2 МПа T = 220 К	P = 3,1 МПа T = 220 К	P = 3,0 МПа T = 220 К
Этан	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25
Пропан	0,00	2,67	2,72	2,76	2,81
i-Бутан	0,00	3,61	3,72	3,83	3,95
h-Бутан	0,00	7,69	7,96	8,24	8,52
i-Пентан	0,00	10,02	10,39	10,78	11,18
h-Пентан	0,00	11,34	11,73	12,12	12,53
Гексаны +	0,00	64,35	63,17	61,96	60,72
Расход, кг/с	–	0,974	3,935	6,931	9,952

3 кг/с на каждый бар. При этом концентрация гексана снижается более чем на процент на каждый бар.

Теперь изменим состав газа, поступающего на турбокомпрессор, до нижних значений концентраций (см. табл. 1).

Согласно модели, конденсация углеводородов в данном случае при давлении 3 МПа начнется только при температуре 211,5 К. Поскольку при эксплуатации комплекса такая температура не достигается, рассматривать зависимость состава конденсата от давления и температуру при данном входном составе газа не имеет смысла.

Таким образом, изменение давления на входе в турбодетандер незначительно влияет на компонентный состав жидкости, отделяемой в фильтре Ф501 и доведенной до нормальных условий. При изменении температуры в сторону уменьшения расход жидкости увеличивается. Однако в процессе эксплуатации температура на входе в турбодетандер поддерживается больше 220 К, поэтому расход отделяемой жидкости можно усреднить до значения 1 кг/ч.

Изменение компонентного состава в сторону увеличения концентраций "неметановых" компонентов во входном газе приводит к значительному увеличению расхода отделяемой фракции, однако общий компонентный состав жидкости меняется незначительно.

В процессе останова комплекса удалось отобрать пробу конденсата перед входом на фильтр Ф501 через штуцер продувки потока, установленный для резервной линии. Проба была нагрета до температуры окружающей среды при атмосферном давлении.

Определение компонентного состава проводилось в лаборатории комплексных исследований Центра коллективного пользования Уральского федерального университета, прибор – хроматограф масс-спектрометр (способ ионизации – электронный удар).

В результате анализа пробы определены концентрации всех компонентов, в частности – изомеров главных алканов, количество которых превышает 100. Просуммировав концентрации изомеров, получены следующие значения:

Пропан – 0,42 %, бутаны – 11,03 %, пентаны – 28,22 %, гексан и выше – 51,63 %.

Поскольку отбор пробы производился не в стационарных условиях, считать полученные данные достоверными будет некорректно, однако можно судить о приблизительном количественном составе компонентов в смеси. Согласно полученной хроматограмме, наибольшую концентрацию в смеси будут иметь пентаны и гексаны (и более высокие).

Следующей задачей стало нахождение применения данной смеси пентанов и гексанов. Известно, что данная смесь широко применяется в качестве средства для обезжиривания поверхностей, свойства которого регламентированы документом

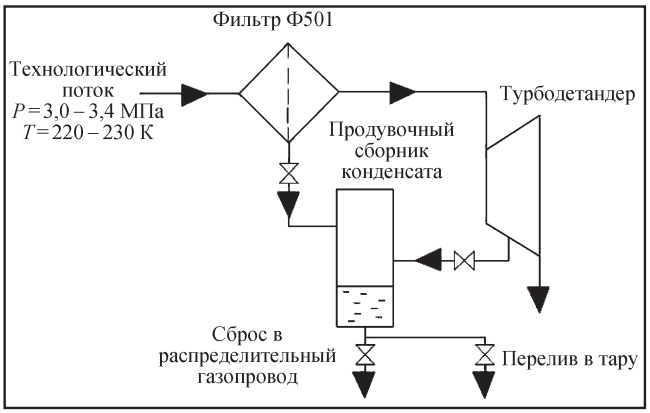

Рис. 10. *Схема продувки фильтра и детандерной части с предлагаемым отбором в тару*

"Эфир петролейный ТУ 6-02-1244-83" [5]. Согласно данному документу пентано-гексановая фракция (по-другому – петролейный эфир) может применяться как растворитель жиров, масел, смол и т.д.

Для определения эффективности обезжиривания поверхности от масла проведен следующий эксперимент: на две плоские стальные некрашеные поверхности равномерно нанесено турбинное масло типа ТП-22С (применяется в маслосистеме турбодетандера на комплексе) толщиной слоя меньше 1 мм.

Эксперимент проводился методом многократного протирания двух поверхностей при температуре окружающей среды –15 °С в течение одной минуты: первая – ветошью, смоченной в пентано-гексановой фракции, вторая – сухой ветошью, с дальнейшим сравнением результатов методом протирания сухой бумажной салфеткой обеих поверхностей и визуального определения наличия на ней масляных пятен. В результате определено, что на металлической поверхности № 1, протираемой смоченной ветошью, масляная пленка в полной мере удалилась, о чем говорит отсутствие масляных пятен на салфетке. На поверхности № 2 масляные пятна удалились менее эффективно, поскольку на салфетке имелось значительное количество масляных пятен. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что пентано-гексановая смесь удаляет масло с металлической поверхности с эффективностью до 100 %.

Учитывая примерно постоянный состав отделяемой фракции при изменении параметров ожижителя согласно данным моделирования в программе Aspen HYSYS, имеет смысл использовать отделяемую смесь в качестве обезжиривателя в структурных подразделениях ООО "Газпром трансгаз Екатеринбург", для этого необходимо внести изменения в технологию продувки фильтра (рис. 10).

Для получения петролейного эфира необходимо сделать отвод с краном от линии сброса конденсата в распределительный газопровод, что позволит дросселировать жидкость до атмосферного давления и нагревать до температуры окружающей среды в самой таре.

При условии работы комплекса на полную мощность (круглосуточно), общий расход полученного эфира в среднем составит примерно 4,7 т в год. Очевидно, что при увеличении концентраций пентана и гексана в магистральном газе расход эфира увеличится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Способ** производства сжиженного природного газа и комплекс для его реализации: пат. № 2541360 Рос. Федерация: МПК F25J 1/00 (2006.01) / Гайдт Д.Д., Мишин О.Л.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Газпром трансгаз Екатеринбург". № 2014106445/06; заявл. 20.02.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.

2. **Люгай С.В.** Повышение эффективности сжижения природного газа на газораспределительных станциях магистральных газопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19, 05.02.13; Всерос. науч.-исслед. ин-т природ. газов и газовых технологий (ВНИИГАЗ). Москва, 2010. 24 с.

3. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: 1972. 720 с.

4. **Кузнецов О.А.** Основы работы в программе Aspen HYSYS. М.: Берлин: Директ-Медиа, 2015. 153 с.

5. **ТУ 6-02-1244-83.** Эфир петролейный. Технические условия. Введ. 1983–01–26.

УДК 665.637.143

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ СКРИНИНГ ЭКСТРАГИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ COSMO-RS МЕТОДА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ФРАКЦИЙ ОТ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Г.Р. Азизбейли, Институт нефтехимических процессов им. академика Ю.Г. Мамедалиева НАНА, г. Баку, Азербайджан

Представлены данные по скринингу (выбору) квантово-химическим методом COSMO-RS ионных жидкостей (ИЖ) содержащих в составе различные катионы и анионы, а также широкоиспользуемых в промышленности растворителей (N-метилпирролидон-NMP, N-формилморфолин-NFM) для разделения алифатических, нафтеновых, ароматических углеводородов полициклического и гибридного строения, нафтеновых кислот, асфальтенов и т.д., содержащихся в масляных дистиллятах Бакинских нефтей. Представлен ряд ионных жидкостей эффективных по ароматической емкости и селективности.

Ключевые слова: *ионные жидкости; ароматические углеводороды; экстракция; COSMO-RS; Турбомоле; скрининг.*

THEORETICAL SCREENING OF THE EXTRACTION CAPACITY OF IONIC LIQUIDS USING THE COSMO-RS METHOD FOR SEPARATING PETROLEUM FRACTIONS FROM AROMATIC HYDROCARBONS

Azizbeyli G.R., Institute of petrochemical processes im. academician Yu.G. Mamedaliyev of ANAS, Baku city, Azerbaijan

Data on screening (selection) by the quantum-chemical method of COSMO-RS ionic liquids (IL) containing various cations and anions, as well as widely used industrial solvents (N-methylpyrrolidone-NMP, N-formylmorpholine-NFM) for separation of aliphatic, naphthenic, aromatic hydrocarbons of polycyclic and hybrid structure, naphthenic acids, asphaltenes, etc. contained in oil distillates of Baku oils. A number of ionic liquids effective in aromatic capacity and selectivity are presented.

Keywords: *ionic liquids; aromatic hydrocarbons; extraction; COSMO-RS; Turbomole; screening.*

Загрязнение окружающей среды различными токсикантами, полученными во время эксплуатации некачественных топлив и масел, является одной из глобальных проблем современного мира. В связи с этим с каждым днем ужесточаются требования, предъявляемые к топливам и маслам, и особенно к содержанию в их составе полициклических и гибридных ароматических углеводородов (АУВ) и сернистых соединений. Снижение количества АУВ в составе топливных и масляных нефтяных дистиллятов до минимума является широко актуальным. Область требует проведения новейших работ, где немаловажно создание теоретических основ для осуществления в будущем на их основе эффективных технологий [1].

Известно, что для облагораживания и разделения различных углеводородов из состава нефтяных фракций (НФ), широко исследованы процессы гидрогенизации, гидроочистки, каталитический крекинг, риформинг и т.д. и на их основе созданы крупные технологические установки. Одним из важных процессов в этом направлении является селективная очистка НФ различными молекулярными растворителями. Однако во многих случаях эти растворители являются высоко канцерогенными, термически нестабильными, легко окисляемыми и имеют низкую ароматическую емкость по отношению к АУВ. Замена их более эффективными растворителями, в частности ИЖ входящими, в основную концепцию "Зеленой Химии", является особо актуальной [2]. "Дизайн" катионов и анионов ионных жидкостей, способствует выбору специфического растворителя, управлению селективностью и избирательностью процесса. Ионные жидкости часто называют designer solvents (дизайнер-растворителями). Известно, что ИЖ могут быть составлены из многочисленных комбинаций органических катионов и неорганических анионов, выбор и проверка всех их экспериментальным путем практически неосуществимы. В связи с этим предпочитаются различные методы теоретической модернизации UNIFAC, UNIQUAC, NRTL, Wilson, Monte-Karlo и др. В этом направлении в последние годы особенный интерес представляет метод COSMO-RS, основанный на квантово-химических вычислениях, которые дают возможность определить предварительные термодинамические параметры до экспериментальных результатов. Данный метод позволяет соединить ряд квантово-химических расчетов со статистической термодинамикой. Метод основывается на скрининге плотностей распределенных зарядов молекул и описывает молекулу и молекулярные характеристики.

В представленной работе приводятся результаты теоретического исследования методом COSMO-RS [3, 4] процессов разделения различных углеводородов и сопоставления данных с процессами селективной очистки различных нефтяных дистиллятов, получаемых из Бакинских нефтей, от АУВ, с использованием экологически и экономически приемлемых ионно-жидкостных (ИЖ) растворителей.

Экспериментальная часть

Расчеты по методу COSMO-RS проводились в двух стадиях. В первую очередь были определены термодинамические свойства ИЖ катион и анионов, в основном в рамках BP_TZVP параметров. В последующих стадиях на основе cosmo-файлов, состоящих из этих термодинамических свойств, с помощью программы COSMO-ThermX, были рассчитаны σ-профили ИЖ катионов и анионов. Выбор катионов и анионов, входящих в состав ионных жидкостей, осуществлялся на основе их σ-профилей. Нужно отметить, что сигма-профиль – это диаграмма распределения статического заряда на вычисленной молекулярной поверхности. В этом случае экстрагируемую способность растворителей можно оценивать сравнивая их σ-профили с σ-профилем экстрагируемого вещества. На примере нафталина и н-ундекана приведены типичные σ-профили, относящиеся к ароматическим и алифатическим углеводородам (рис. 1). На абциссной прямой приведены σ-профили, соответсвующие плотностям зарядов атомов распределенных по A^2 области (e/A^2), на ординате указаны вероятные значения сигма (P(σ)). Расположение эффективных ИЖ катионов и анионов схематически изображены пунктирными линиями.

Проводился теоретический скрининг около 200 ИЖ, имеющих различные химические строения, состоящих из N, O-содержащих катионных (аммоний, анилиний, морфолиний, оксазонилий) и анионных (карбоксилат, (метил)сульфат, фосфат, нитрат и др.) комбинаций, используемых в качестве экстрагента при экстракции различных масляных дистиллятов, получаемых из Бакинских нефтей, от АУВ с моно-, полициклическим и гибридным строением.

Проводился скрининг углеводородов (УВ) различного строения: в качестве представителя парафиновых УВ был выбран ундекан, в качестве моноциклических УВ – бензол, 1, 2 – диметилбензол, 1, 2, 4 – триметилбензол, толуол, 2-этилгексилтолуол, в качестве полициклических УВ – нафталин, антрацен, хризен, в качестве ароматических УВ с гибридным строением – флюорен, 2, 3-бензофлюорен, дигидроциклопентатриметилфенантрен. В то же время проводился скрининг твердых парафинов (октадекан), моно-, би-циклических нафтеновых кислот, присоединенных длинной побочной цепью непосредственно с карбоксильной группой, и низко-молекулярных, пятичленных, гетероатомных асфальтенов. Сравнительные рассчеты проводились с ИЖ и промышленными экстрагентами, используемыми при очистке различных нефтяных фракций и масляных дистиллятов.

Результаты и их обсуждение

Скрининг катионов. Проводился скрининг катионов моно-, ди-, три- и тетраэтиламмония, в качестве представителей нециклических катионов, σ-профили которых представлены на рис. 2, вместе с σ-профилем молекулы ундекана. Как видно, на показанных ниже участках наблюдаются пики, принадлежащие атому положительного заряда катиона моноэтиламмония –0,2·10 [e/A^2] и –0,53·10 [e/A^2], пики, принадлежащие атому положительного заряда катиона диметиламмония –0,53·10 [e/A^2] и 0 [e/A^2], один высокий пик, при-

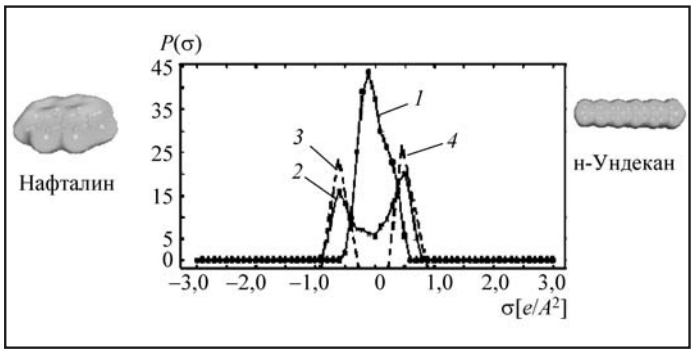

Рис. 1. *σ-Профили нафталина и н-ундекана:*
1 – н-ундекан; *2* – нафталин; *3* – схематический катион; *4* – схематический анион

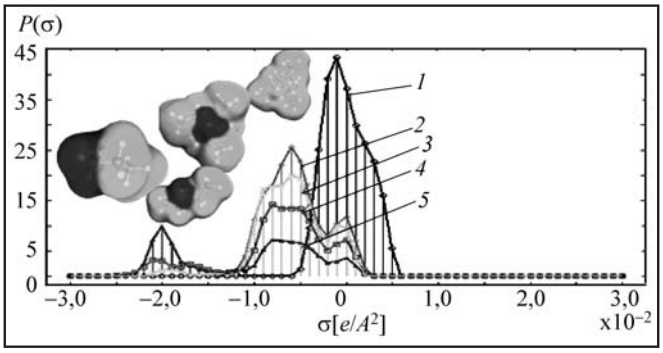

Рис. 2. *σ-Профили катионов би-, ди-, три-, тетраэтиламмония и молекулы ундекана:*
1 – н-ундекан; *2* – тетраэтиламмоний; *3* – триэтиламмоний; *4* – диэтиламмоний; *5* – моноэтиламмоний

надлежащий атому положительного заряда триэтиламмония –0,3·10 [e/A^2], и два неинтенсивных пика, принадлежащих отрицательно заряженным атомам –0,17·10 [e/A^2 и 0,23·10 [e/A^2], пики, принадлежащие положительно заряженным атомам триэтиламмония –0,6·10 [e/A^2] и 10 [e/A^2] .

σ-Профиль молекулы ундекана охватывает область, начиная с –0,6·10 [e/A] до +0,6·10 [e/A], и в области –0,1·10 характеризуется высоким пиком. Сравнением σ-профилей катионов моно-, ди-, три-, тетраэтиламмония показано, что они обладают наиболее интенсивными пиками, так как в катионе тетраэтиламмония содержится большое количество С-Н связей.

В целях изучения влияния чисел и длины алкилзамещенных, содержащихся в N-атоме, на его ...-профиль, были рассчитаны профили катионов диэтилбутиламмония, диэтилтретбутиламмония, триэтилбутиламмония, триэтилбензиламмония и сравнены с катионом тетраэтиламмония (рис. 3).

Таким образом, длина алкилзамещенной цепи в катионе влияет как на ароматическую/алифатическую селективность, так и на ароматическую емкость, так как с увеличением длины алкил радикала (*R*) передача электрона из алкильной группы в катион ИЖ растет. В результате положительный заряд катиона уменьшается. Таким образом, взаимосвязь с ароматическим соединением слабеет, что приводит к уменьшению селективности. Кроме того, с увеличением длины цепи ($R \geq$ С6) экстракция неароматических соединений, иными словами, коэффициент распределения увеличивается и вновь уменьшается селективность.

Для скрининга, в качестве представителей циклических катионов были взяты катионы морфолиния, N-метилморфолиния, N, N-диметилморфолиния и оксазолиния. σ-профили катионов, как циклического, так и нециклического строения и σ-профили отдельных ароматических УВ, вычислялись с помощью математических формул на основе областей перекрытия. Гистограмма вычисленных показателей представлена на рис. 4.

Чем больше область перекрытия любого АУВ с σ-профилем катиона, тем больше будет емкость против этого АУВ (иными словами, увеличится растворяющая способность этого УВ).

Как видно, с увеличением длины алкильной группы, содержащейся в АУВ до C_4, емкость катиона тетраэтиламмония к этому АУВ растет; когда число атомов углерода достигает 5, ароматическая емкость повышается, а селективность снижается; а при увеличении числа атомов углерода в алкильной цепи до 6 и выше и ароматическая емкость, и селективность снижаются.

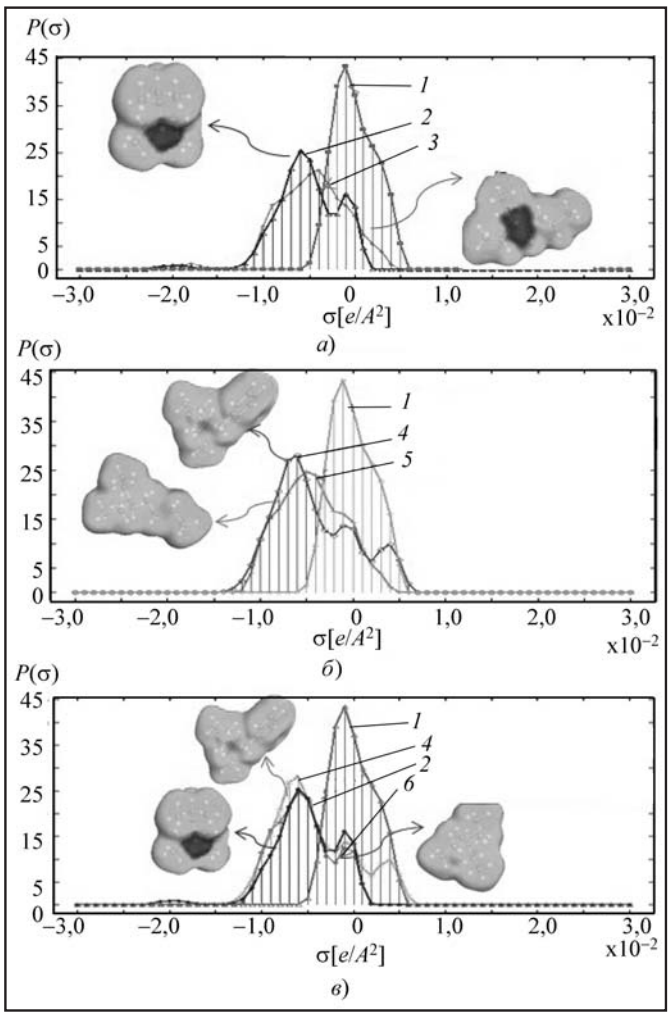

Рис. 3. *σ-Профили катионов:*
а – диэтилбутиламмония, диэтилтретбутиламмония;
б – триэтилбутиламмония, триэтилбензиламмония;
в – тетраэтиламмония, диэтилтретбутиламмония, триэтилбензиламмония на фоне н-ундекана:
1 – н-ундекан; *2* – диэтиламмоний; *3* – диэтилбутиламмоний; *4* – триэтилбензиламмоний; *5* – триэтилбутиламмоний; *6* – тетраэтиламмоний

Скрининг анионов. Для скрининга были взяты анионы карбоксилата (формиата, ацетата, бензоата, метилсульфата и др.). Процентная оценка областей перекрываний заскриненных σ-профилей анионов с σ-профилями АУВ, входящих в состав масляных дистиллятов, приведена в таблице. Как видно из таблицы, область перекрывания σ-про-

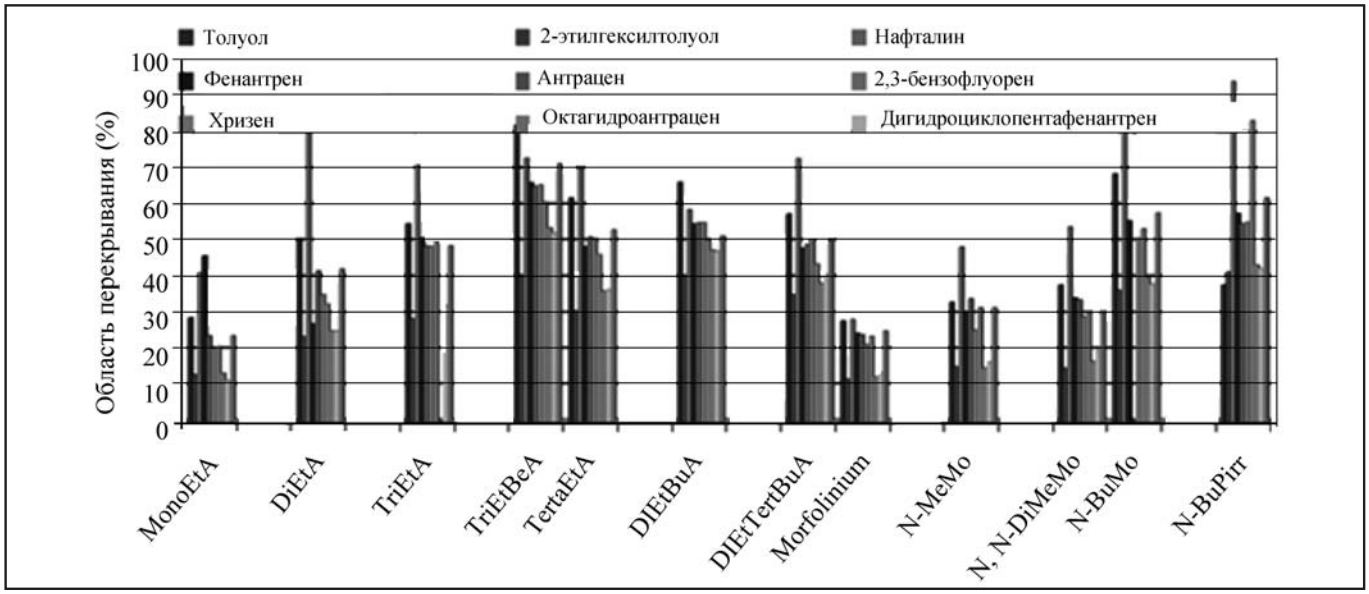

Рис. 4. *Гистограмма вычисленных показателей областей перекрытия катионов аммония, пирролидиниума, морфолиния и σ-профилей отдельных АУВ*

филя аниона формиата с АУВ меняется в пределах 5, 12, 14, 26. Это свидетельствует об очень низкой ароматической емкости аниона формиата. Область перекрывания σ-профиля аниона ацетата σ-профилем толуола составляет 30 %, а область перекрывания σ-профиля нафталина составляет 47,13 %. Область перекрывания σ-профилей остальных АУВ меняется в пределах 13,65–19,94 %.

Область перекрывания σ-профилей аниона бензоата с толуолом составляет 69,6 %. Это свидетельствует о плотном расположении аниона бензоата вокруг легких АУВ и о сферическом затруднении для катионов. Однако область перекрывания АУВ с другим полициклическим и гибридным строением, меняется в пределах – 32,08–58,59 % и считается приемлемой. Область перекрывания профиля аниона метилсульфата с профилем АУВ составляет 7,13–61,43 %.

Среди заскриненных анионов анион бензоата и, частично, анион ацетата считаются приемлемыми, так как анион ацетата может быть селективным только для низкомолекулярных АУВ, с короткой боковой цепью (область перекрывания σ-профиля толуола – 30 %) и для полициклических АУВ, с двумя кольцами и короткой боковой цепью (область перекрывания σ-профиля нафталина – 47,13 %).

Области перекрывания σ-профилей анионов с АУВ, входящими в состав масляных дистиллятов

АУВ	Формиат	Ацетат	Бензоат	Метилсульфат
Толуол	14,26	30	69,6	7,13
2-Этилгексиотолуол	7,07	13,69	32,46	17,57
Нафталин	11,8	47,13	58,59	61,41
Фенантрен	9,23	19,94	47,65	21,67
Антрацен	8,24	18,16	42,79	20,98
2,3-Бензофлюорен	7,5	17,32	42,11	18,39
Хризен	7,19	15,85	37,7	32,88
Октагидроантрацен	8,37	18,56	36,98	19,74
Дигидроциклопентафенантрен	5,13	13,49	35,48	16,02
Флюорен	9,29	21,11	51,26	21,79

В отличие от аниона ацетата, анион бензоата является селективным к низкомолекулярным АУВ, а также к АУВ с полициклическим и гибридным строением. Селективность аниона бензоата снижается в следующем порядке: нафталин > флюорен > фенантрен> 2,3 – бензофлюорен > хризен > октагидроантрацен > 2-этилгексилтолуол.

Выбор ионных жидкостей. Среди возможных 200 ИЖ, состоящих из комбинаций различных анионов и катионов, были выбраны 48 ИЖ, являющихся относительно приемлемыми. А также в модельной системе нафталин/н-ундекан вычислены их теоретические показатели, такие как ароматическая емкость и селективность с применением термодинамических формул. Таким образом, пять самых приемлемых, заскриненных по ароматической емкости ИЖ, располагаются в следующем порядке: N, N-диметилморфолиний формиат > тетраэтиламмоний формиата > тетраэтиламмоний ацетат > диэтилтетрабутиламмоний формиат > тетраэтиламмоний формиат, а пять самых приемлемых, заскриненных по селективности ИЖ, располагаются в следующем порядке: метилсульфат моноэтиламмония > метилсульфат морфолиния > N-метилморфолиний метилсульфат > морфолиний формиата.

Заключение

Результаты проводимых нами теоретических исследований показали, что ароматическая емкость ИЖ, содержащей в своем составе катионы типа алкиламмония, в значительной степени зависит от структуры и природы катионов, а селективность зависит от структуры и природы анионов. Среди заскриненных 48 ИЖ, выбор тандема, состоящего из катионов и анионов, обладающих как высокой ароматической плотностью, так и высокой селективностью, затруднен. Этот результат соответствует результату проводимых экспериментально-исследовательских работ, в области разделения толуола в системе толуол/н-гексан, ионной жидкостью с катионами типа пиридиний и имидазолий.

Таким образом, удаление легких и полициклических АУВ без боковых цепей (или с короткой боковой цепью) из состава масляных дистиллятов с помощью указанных ИЖ экстрагентов является возможным. Удаление моно- и полициклических ароматических углеводородов с длинной боковой цепью из состава масляных дистиллятов, а также нафтен-ароматических углеводородов гибридного строения, как с короткой, так и с боковой цепью, этим способом может стать практически невозможным.

В результате скрининга промышленных экстрагентов – NFM и NMP, каждый из этих экстрагентов проявил высокую селективность к низкомолекулярным, моноциклическим АУВ с короткой боковой цепью; в то же время показано проявление высокой селективности NFM, в отличие от NMP, к полициклическим АУВ, имеющим два кольца, с короткой боковой цепью; установлено, проявление низкой селективности каждого экстрагента к АУВ полициклического и гибридного строения. Прогнозировано и экспериментальными результатами [5,6] подтверждено повышение эффективности экстракции с использованием в качестве экстрагентов смесей указанных ИЖ с NFM и NMP.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бурко Р.А., Терёшина Т.В.** Экологические проблемы современного общества и их пути решения //Молодой ученый. 2013. № 11. С. 237–238.
2. **Азизов А.Г., Асадов З.Г., Ахмедова Г.А.** Ионные жидкости и их применение. Баку. Изд. "Элм", 2010, 580 с.
3. **Klamt A.** The COSMO and COSMO-RS solvation models / Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science. 2011, V. 1. P. 699–709.
4. **Andersson M.P., Eckert F., Reinisch J., Klamt A.** (2017) Prediction of aliphatic and aromatic oil-water interfacial tension at temperatures >100 °C using COSMO-RS / Fluid Phase Equilibria. 10.1016 / j.fluid.2017.06.005.
5. **Самедова Ф.И., Гасанова Р.З., Алиева Р.В., Азизбейли Г.Р., Кадымалиева Н.З.** Повышение эффективности селективной очистки различными растворителями вязкого дистиллята из балаханской нефти путем использования СК–CO_2 / Мир нефтепродуктов, 2013. № 4. С. 7–9.
6. **Hamida R. Azizbeyli, Akif H. Azizov, Reyhan V. Aliyeva, Reyhan Z. Hasanova, Khayala S. Khali.** Theoretical and experimental screening of molten salts for selective treatment of oil distillates /EUCHEM, Molten Salts and Ionic Liquids XXV, 6–11 July 2014, Tallin, P. 8.
7. **Ибрагимова М.Д., Азизов А.Г., Алиева Р.В., Мамедов Р.Б.** Исследование природы процессов, протекающих при регенерации экстрагента селективной очистки масляных фракции морфолинформиатной ионной жидкостью. Нефтепереработка и нефтехимия, 2012. № 12. С. 37–42.

УДК 629.3

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO_2

А.А. Капустин, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
В.А. Раков, канд. техн. наук, Вологодский государственный университет

В статье сделана оценка безопасности электромобилей по выбросам парникового газа CO_2 в атмосферу. Выполнено сравнение выбросов парникового газа автомобиля с бензиновым двигателем внутреннего сгорания и электромобилей с учетом экологичности производства топлива и электричества.

Ключевые слова: *электромобиль; выбросы загрязняющих и вредных веществ; парниковые газы; экологическая безопасность.*

ECOLOGICAL SAFETY OF ELECTRIC VEHICLES FROM THE POINT OF VIEW OF CO_2 EMISSIONS

Kapustin A.A., D-r of technical sciences, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering;
Rakov V.A., Ph.D. of technical sciences, Vologda State University

The article assesses the safety of electric vehicles in terms of greenhouse gas CO_2 emissions into the atmosphere. A comparison of the greenhouse gas emissions of a car with a gasoline internal combustion engine and electrical means is performed taking into account the ecological safety in the production of fuel and electricity.

Keywords: *electric vehicle; emissions of pollution and harmful substances; greenhouse gases; environmental safety.*

Постановка задачи

Одним из основных направлений совершенствования автомобильного транспорта и автомобилизации России, как и других стран, является повышение эффективности системы "автомобиль – водитель – среда" (АВС). Определяющим в этой системе является "автомобиль", жизненный цикл которого связан с производством, эксплуатацией и рециклингом. Общество на всех этапах оценивает экологическую безопасность автомобиля по расходу энергетических ресурсов и негативное воздействие автомобиля на окружающую среду. Так, "Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г." предусматривает реализацию комплекса мероприятий, направленных на производство автомобилей высоких экологических классов с энергетическими установками, работающими на экологически чистом топливе. К таким автомобилям относятся электромобили, приводимые в движение электромоторами, получающими питание от аккумуляторных батарей.

В конце XX в. создание мощных энергоемких аккумуляторов позволило дать новый виток расширению производства электромобилей и рынка их потребителей. Известно, что электромобили, или "электрокары", многие десятилетия работали в цехах заводов и фабрик для снижения загазованности. Но интенсивность роста производительности производства заставила перевести технологию на использование для внутризаводских перевозок дизельные погрузчики, оборудованные нейтрализаторами. Эффективность электрокаров из-за необходимости простоя на период заряда аккумуляторов была в разы меньше, и они не смогли конкурировать с дизельной автомобильной техникой. Особенно трудным оказался вопрос обеспечения экологической безопасности обслуживания и ремонта аккумуляторных батарей в эксплуатации.

За 130 лет, прошедших с рождения автомобиля, общество выработало устойчивую, постоянно совершенствующуюся, культуру автомобилизма, которая отражается в функционировании системы АВС. Надо отметить, что реализация новых технологий в этой консервативной системе, в том числе и по внедрению экологически чистых электромобилей, воспринимается автомобильным сообществом – неоднозначно. Информационное поле постоянно рассказывает о негативном влиянии бензиновых и дизельных автомобилей на окружающую природу, вызываемое ими глобальное потепление климата и превышение допустимых загрязнений воздуха в мегаполисах. Это позволило значительно усилить лоббирование запрета на использование углеводородного топлива для автомобильных ДВС в регионах с повышенным загрязнением воздушного бассейна.

Вопросы уменьшения загрязнения атмосферы антропогенными источниками обсуждались на 21-м Всемирном климатическом саммите в Париже (в 2015 г.). В его решениях отмечено, что многие страны взяли обязательства по снижению выбросов парниковых газов на 30 % по сравнению с 1990 г. Частично эта задача уже решена благодаря введению более высоких экологических стандартов, обеспечивающих повышение экологических характеристик автомобилей. Однако технические решения по снижению расхода топлива и установка систем снижения выбросов вредных (загрязняющих) веществ оказываются недостаточными для повышения экологичности системы АВС в комплексе.

Остановимся на главном звене системы – автомобиле. Дальнейшие инженерные решения по снижению экологической нагрузки автомобиля на атмосферный воздух могут пойти по двум направлениям: 1) совершенствование конструкции автомобильных ДВС для использования топлив экологических классов, обеспечивающих законодательные перспективные нормы выбросов вредных (загрязняющих) веществ; 2) внедрение в автомобилях энергетических установок, эффективно конкурирующих с ДВС в системе АВС. Надо отметить, что серьёзный вызов ДВС в этой борьбе делают носители идеологии гибридных энергетических установок (ГЭУ): ДВС + электромотор. Можно признать, что для некоторых условий эксплуатации "гибриды" успешно доказывают свою высокую эффективность [1]. Например, "Формула-I".

В настоящее время выпускаемые в России автомобили используют бензин и дизельное топливо не ниже экологического класса 5, которые позволяют выполнять нормы европейского стандарта "Евро-5" по выбросам вредных веществ: CO, CH, NO_x и частиц. Но в ближайшем будущем российским автостроителям необходимо будет внедрять экологический стандарт "Евро-6", уже действующий в странах Европейского союза. Для легковых автомобилей он устанавливает предельную норму выбросов парникового газа CO_2 – 95 г/км. В настоящее время у отечественных легковых автомобилей выбросы CO_2 составляют 170–190 г/км, т.е. этот показатель необходимо снизить в 2 раза. Такое решение потребует кардинальных изменений в конструкции энергетической установки автомобиля. Такие страны, как Германия, Франция, Голландия, Норвегия, Япония, Китай и др., видят выход в массовом использовании электромобилей, что благоприятно влияет на их популярность. Увеличение их продаж в мире за 2010–2017 гг. приведено на рис. 1.

Как следует из графика (рис. 1), мировой ежегодный рост продаж электромобилей в 2017 г. достиг 1 млн шт. в год, при этом ежегодные темпы роста за последние 5 лет составляют около 30 %. Правительства многих стран и автопроизводители идут на постепенное вытеснение автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями, развивая производство электромобилей.

На 2017 г. в автомобильном парке России эксплуатировалось всего около 900 шт. электромобилей [1]. Расчеты показывают, что даже при полной замене легковых автомобилей с бензиновыми и

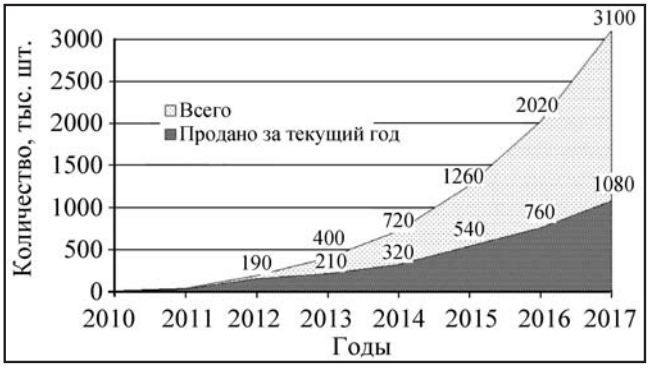

Рис. 1. *Мировые продажи электромобилей и подзаряжаемых гибридных автомобилей по годам*

дизельными ДВС на электромобили, потребление электроэнергии в энергетической системе РФ вырастет не более чем на 10 % [2]. Подсчитано, что имеющиеся резервы в электроэнергетике, включая зарядку электромобилей в ночное время, в период падения потребления электроэнергии, не вызовет перегрузки энергетической системы.

Может ли переход на электромобили существенно повлиять на экологическую безопасность системы АВС и России в целом?

Научная экспозиция

Электромобили принято считать автомобилями, имеющими "нулевые выбросы вредных веществ" и называть их "экологически чистыми". При этом умалчивается, что для зарядки аккумуляторов электромобилей используется электроэнергия, производимая на электростанциях и передаваемая к розеткам на зарядных станциях. То есть при оценке экологической безопасности электромобилей необходимо учитывать выбросы CO_2 электростанциями при производстве электроэнергии для жизненного цикла автомобиля. Одновременно необходимо различать типы электростанций.

В энергетический комплекс России входит около 600 электростанций различных типов, которые согласно статистическим данным ежегодно производят около 1050 млрд кВт·ч электроэнергии [3]. Например, в 2016 г. тепловые электростанции выработали 674 млрд кВт·ч электроэнергии, гидроэлектростанции – 178 млрд кВт·ч, атомные электростанции – 196 млрд кВт·ч. Выработка электроэнергии экологически чистыми (условно) солнечными и ветровыми электростанциями составила всего 0,7 млрд кВт·ч, что менее 0,1 % всей генера-

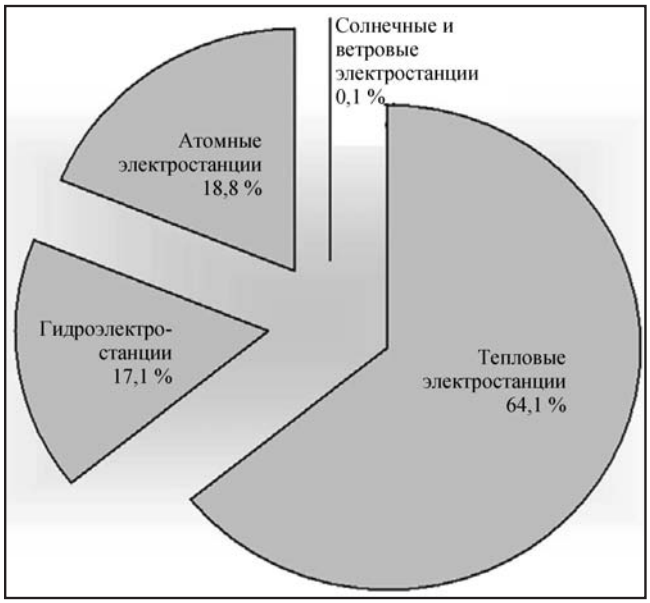

Рис. 2. *Распределение производства электроэнергии различными типами электростанций в России*

ции электроэнергии в России (рис. 2). При этом за последние 15 лет этот показатель не изменился [3].

Оценка причин глобального потепления климата от чрезмерно высоких выбросов парникового газа сделана на данных производства электроэнергии различными по типу электростанциями [3]. Это позволило оценить объемы выбросов загрязняющих веществ в эквиваленте к CO_2 (табл. 1).

Научная аргументация

• В целях установления влияния выбросов вредных веществ автомобилями на загрязнение атмосферы, выполнен анализ и расчет загрязнений атмосферного воздуха существующим парком легковых автомобилей и оценка доли этих загрязнений в сравнении с другими видами загрязнителей воздуха в России.

• Оценка предполагаемого положительного эффекта по очистке атмосферного воздуха, при массовом использовании легковых электромобилей выполнена с помощью расчетов объемов выбросов CO_2 в г/км, исходя их данных каталогов по значениям удельных выбросов моделей автомобилей.

• Для сравнения выбросов CO_2 выбраны два легковых автомобиля с одинаковыми кузовами и шасси, при этом один из них с бензиновым ДВС, а второй – электромобиль.

Исследовательская часть

Произведем оценку выбросов от легковых автомобилей.

Отечественный парк легковых автомобилей составляют около 42 млн ед. ($N_{ЛА}$ – число легковых автомобилей). Согласно статистическим данным, приводимым порталом "Автостат", средний пробег легковых автомобилей ($L_{СР}$) в год, составляет 12 тыс. км. Величина выбросов CO_2 легковым автомобилем (D_{CO_2}) зависит от рабочего объема двигателя, массы автомобиля и условий эксплуатации. Например, в каталогах можно прочитать, что для легкового автомобиля с двигателем рабочим объемом 1,8 л выбросы CO_2 составляют 170 г/км, а автомобиль с двигателем рабочим объемом 2,5 л выбрасывает 230 г/км.

В условиях реальной эксплуатации приведенные значения выбросов часто превышаются. Для первой оценки выбросов легковыми автомобилями в России можно, с небольшой погрешностью, принять среднее значение CO_2 – 200 г/км. Используя эту величину, подсчитаем общую массу выбросов CO_2 от всех легковых автомобилей в год:

$$M_{CO_2} = N_{ЛА} \times L_{СР} \times D_{CO_2} =$$
$$= 42\,000\,000 \times 12\,000 \times 200 = 100{,}8 \text{ млн т.}$$

Таблица 1

Выбросы парниковых газов от электростанции в России

Тип поставляющей электроэнергию электростанции	Выбросы CO_2, г/кВт·ч	Производство электроэнергии, млрд кВт·ч	Эквивалент выброса CO_2, млн т
Тепловые электростанции	1100	674	741,4
Атомные электростанции	300	196	58,8
Гидроэлектростанции	50	178	8,9
Ветровые и солнечные электростанции	30	0,7	0,021
	Всего	1048,7	809,1

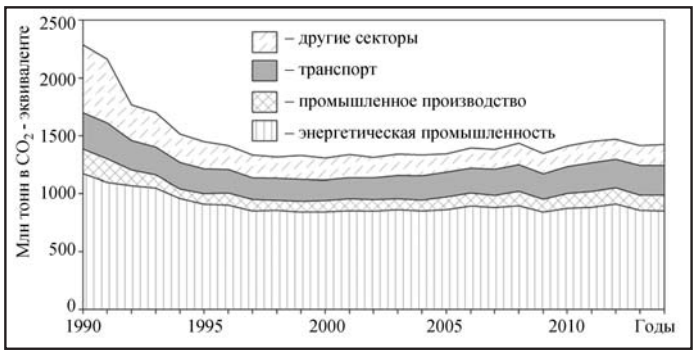

Рис. 3. *Выбросы парниковых газов источниками в CO_2-эквиваленте*

То есть весь российский парк легковых автомобилей производит лишь 1/8 выбросов парниковых газов электростанций, в CO_2-эквиваленте. А совокупный антропогенный выброс парникового газа от всех видов источников загрязнения в России составляет около 1500 млн т, в CO_2-эквиваленте [4].

Также на графике (рис. 3) приведен вклад разных секторов экономики в совокупный выброс парниковых газов в России, доля всего транспорта не превышает в нем 10 %.

Далее произведено сравнение выбросов CO_2 для автомобиля с бензиновым ДВС LADA Kalina 1.6 и электромобиля LADA ElLada. Автомобили построены на одной платформе и имеют близкие технические характеристики (табл. 2).

В каталогах отмечается, что электромобиль не имеет выбросов CO_2 в атмосферу при эксплуатации. При этом экологическое воздействие электростанции, вырабатывающей энергию для зарядки аккумуляторной батареи, не указывается. Норма выбросов CO_2 электростанцией (M) и расход энергии ($Q_Э$) электромобилем позволяют оценить для электромобиля удельный выброс в граммах на километр ($M_Э$). Также необходимо отметить, что существуют косвенные выбросы, связанные с переработкой нефти и передачей электроэнергии. Согласно "Национальному докладу о кадастре..." [4] выбросы парниковых газов при производстве топлива (переработке нефти) составляют 5,8 % от выбросов, которые образуются при сжигании топлива. Условно обозначим этот показатель как коэффициент загрязнения при производстве ($K_{ЗП}$). Также известно, что при передаче электроэнергии от электростанций до конечного потребителя теряется до 15 % электроэнергии. Обозначим данные потери как коэффициент потерь при передаче электроэнергии ($K_{ПП}$). Совокупный выброс CO_2 сравниваемыми автомобилями будет равен:

Таблица 2

Характеристики автомобилей LADA Kalina 1.6 и LADA ElLada

Характеристика	LADA Kalina 1.6	LADA ElLada
Тип кузова	Универсал	Универсал
Снаряженная масса, кг	1110	1215
Максимальная скорость, км/ч	183	140
Мощность, л.с.	98	80
Средний расход топлива, л/100 км	7,2	Нет
Расход электроэнергии, кВт·ч /100 км	Нет	15,3
Пробег без дозаправки, км	700	150
Выбросы CO_2 в отработавших газах, г/км	177	–

автомобиль с ДВС $M_{CO_2} = M_З \times K_{ЗП} = 177 \times 1{,}058 = 187$ г / км;

электромобиль $M_{CO_2} = \frac{M \times Q_Э}{100} \times K_{ЗП} = \frac{900 \times 15{,}3}{100} \times 1{,}15 = 158$ г / км.

Результаты расчетов выбросов в CO_2-эквиваленте при производстве электроэнергии на разных электростанциях для зарядки электромобиля приведены в табл. 3.

Результаты исследования. Учитывая тот факт, что основная доля электроэнергии в России производится с помощью различных типов теплоэлектростанций, выбросы CO_2 при эксплуатации электромобиля LADA ElLada составят не менее 158 г/км, что сопоставимо с выбросами автомобиля с бензиновым двигателем LADA Kalina 1.6 – 187 г/км (рис. 4). Ветровые и солнечные электростанции практически не выбрасывают парниковый газ, но из-за высокой удельной стоимости электроэнергия, вырабатываемая ими, оказывается значительно дороже, что ограничивает их широкое внедрение в России.

Необходимо оценивать и известный зарубежный опыт эксплуатации электромобилей. Известен случай с электромобилем в Сингапуре, где электроэнергия производится угольными ТЭС. Владелец электромобиля Tesla вместо получения

Таблица 3

Выбросы парниковых газов электромобилем с учетом производства электроэнергии на разных электростанциях

Тип поставляющей электроэнергию электростанции	Выбросы CO_2, г/кВт·ч	Выбросы в CO_2-эквиваленте, г/км
Гидроэлектростанция	50	8,7
Атомная электростанция	300	53
Газовая теплоэлектростанция	900	158
Теплоэлектростанция на базе нефтепродуктов	1300	229
Угольная теплоэлектростанция	1600	282

субсидии на покупку экологически чистого автомобиля был оштрафован. Местная полиция подсчитала, что суммарный выброс CO_2 составил для электромобиля 400 г/км, против допустимых 200 г/км.

Аналогично необходимо учитывать экологические характеристики используемой электроэнергии по выбросам парникового газа электростанциями при производстве и рециклинге электромобилей. Масса Li-Ion и Ni-MH аккумуляторных батарей, с запасом электрической энергии для электромобиля, может достигать 1 т, что сопоставимо с массой небольшого городского автомобиля. Согласно проведенным исследованиям доля выбросов парникового газа при производстве и рециклинге электромобиля может значительно превысить выбросы от производства автомобиля с ДВС [5–6].

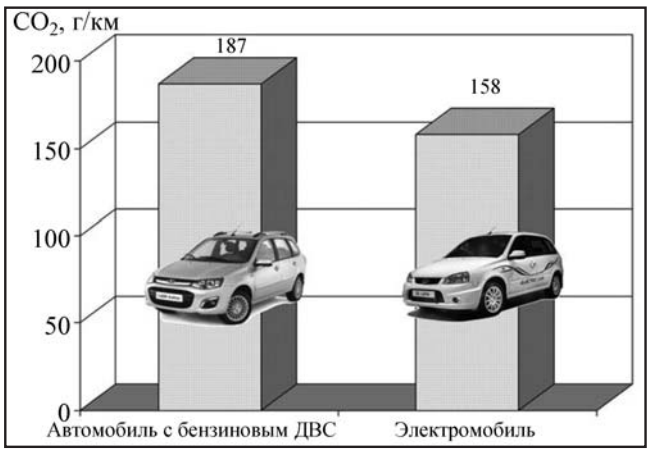

Рис. 4. *Сравнение выбросов бензинового автомобиля и электромобиля (по заводским данным)*

Выводы

Сложившаяся инфраструктура генерации электроэнергии при большой доле электростанций работающих на ископаемых – угле, нефти и газе, не дадут положительного экологического эффекта от перехода на электромобили. Развитие массового их использования в России не сможет способствовать снижению выбросов парниковых газов. Эта задача должна решаться в комплексе с совершенствованием энергетического комплекса страны.

На одном из энергетических форумов Президент России В.В. Путин отметил, что снижение энергоемкости экономики идет по пути массового использования современных технологий.

В России порядка 50 % генерации электроэнергии приходится на газ, что позволяет существенно снизить выбросы и другое негативное влияние на экологию.

"Парижское соглашение" должно изменить энергополитику многих стран, направленную на сокращение выбросов парниковых газов. По мнению Президента В.В. Путина, газомоторное топливо является в конечном итоге гораздо более высокоэкологичным, чем электромобили. Потому что первичный источник электрогенерации пока в значительной степени – это уголь и топочный мазут. (Текст из стенограммы выступления В.В. Путина.)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Капустин А.А., Раков В.А.** Гибридные автомобили: учебное пособие. М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. Вологда: ВоГУ, 2016. 116 с.

2. **Александров И.К., Раков В.А.** Анализ перспектив развития электрифицированного автомобильного транспорта. Транспорт Российской Федерации. 2012. № 2. С. 50–52.

3. **Основные** характеристики российской электроэнергетики [Электронные ресурсы]. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. – URL: https://minenergo.gov.ru.node.532. Дата: 22.12.17.

4. **Национальный** доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2014гг. / А.И. Нахутин, М.Л. Гитарский, А.А. Романовская и др. М.: Росгидромет, ФГБУ "ИГКЭ Росгидромета и РАН", 2016. 451 с.

5. **Kapustin A., Rakov V.** Methodology to evaluate the impact of hybrid cars engine type on their economic efficiency and environmental safety // Transportation Research Procedia Cep. "12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities" SPbOTSIC 2016". 2017. С. 247–253.

6. **Капустин А.А., Раков В.А.** Оценка выбросов при производстве транспортных средств // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин приборов и оборудования: материалы XII международной научно-технической конференции; Вологда: ВоГУ, 2017. С. 96–99.

УДК 656.13.08

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДОРОЖНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

В.А. Грушников, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ВИНИТИ РАН, г. Москва

Результаты проводимых в разных странах исследований проблемы безопасности дорожного движения свидетельствуют об острой необходимости ее решения возможностями искусственного интеллекта, поддерживающего человека за рулем колесного транспортного средства.

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения; системы активной безопасности; предотвращение столкновений.*

MODERN POSSIBILITIES OF PREVENTING ROAD COLLISIONS

Grushnikov V.A., Ph. D. of technical sciences, VINITI of RAN, Moscow

The results of studies of road safety in different countries with different levels of economic development testify to the urgent need and the possibility of solving it by the possibilities of artificial intelligence supporting a person at the wheel of a wheeled vehicle.

Keywords: *road safety; active safety systems; collision avoidance.*

По данным официальной статистики в России в 2015 г. произошло 184 тыс. дорожно-транспортных происшествий (ДТП), в которых ранены более 231 тыс. чел., что на 8 % меньше и погибли 23,1 тыс. чел., что на 14 % меньше, чем в предшествующем году. За 2015 г. произошло более 5 тыс. наездов на велосипедистов. Количество аварий с пьяными водителями уменьшилось незначительно (на 1,9 %), а вот число погибших в результате таких происшествий возросло на 15 % (почти 4 тыс. чел.). Основное количество ДТП (157 тыс. случаев) произошло из-за нарушений правил дорожного движения водителями, а 63 тыс. аварий – из-за неудовлетворительных условий содержания и обустройства улично-дорожной сети.

В информации Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) статистика по России приводится без разделения по видам ДТП с причинами их возникновения. Среди них лидируют так называемые другие (очевидно не установленные), которых 34 %, затем следуют несоответствие скорости движения конкретным условиям с 23 %, несоблюдение правил приоритета – 11 %, алкогольное опьянение водителя – 7 %, выезд на встречную полосу – 6 %, отсутствие прав на управление колесным транспортным средством (КТС) – 6 %, несоблюдение правил приоритета пешеходов – 5 %, несоблюдение дистанции – 5 %, невыполнение предписаний сигналов светофора – 2 % и превышение допустимой скорости – 1 %.

В Германии, например, в статистической отчетности причин ДТП полная конкретика: превышение допустимой скорости – 20 %, пьяный водитель – 17 %, опасный обгон – 17 %, неправильное использование дорог – 17 %, нарушение правил приоритета пешеходов – 9 %, опасное маневрирование – 9 %, несоблюдение светофорных и знаковых предписаний – 6 %, несоблюдение дистанций – 5 %.

В США, как и в Германии, нет присущего, пожалуй, только России пункта "другие нарушения", а сама классификация причин ДТП крайне лаконична: опьянение водителей – 32 %, превышение допустимой скорости – 30 %, отвлечение внимания водителя – 16 % и погодные условия – 11 %.

Китай, с более чем 200 млн КТС, скоро обойдет США по транспортной моторизации. Ну а смертность – выше, чем в России, особенно достается мотоциклистам, которых в стране очень много. Как ни странно, но количество ДТП со смертельным исходом по причине нетрезвого состояния водителя КТС в Китае составляет 9 %, что больше, чем в России с 7 %. За первое полугодие 2017 г. на дорогах КНР было зафиксировано около 99 тыс. аварий, в результате которых погибли 27 тыс. чел., еще 117 тыс. получили ранения. Общее число автомобильных аварий за данный период снизилось на 9,3 %. При этом более чем на 37 % сократилось число ДТП с летальным исходом, вызванных управлением КТС в нетрезвом состоянии. Почти 4 тыс. пешеходов погибли на пешеходных переходах в Китае за последние три года. Причиной 90 % ДТП на пешеходных переходах стало нарушение правил дорожного движения водителями. Остальные 10 % случились по вине пешеходов. Неутешительная статистика вновь подчеркнула актуальность повышения культуры вождения в Китае и развития сопутствующей инфраструктуры (светофоры, пешеходные переходы и мостики). В некоторых городах Китая борьбу с пешеходами, перебегающими дорогу на запрещающий сигнал светофора, вывели на новый уровень. Так, в Шэньчжэне специальные устройства фотографируют пешеходов-нарушителей и тут же размещают их фотографии на информационных табло. А в г. Ухань пешеходные переходы снабдили турникетами.

Печальное лидерство по числу погибших в ДТП стабильно занимает Индия. В 2016 г. по официальным данным – это 150 тыс. чел., что означает, что каждый час на автомобильных дорогах страны гибнет 17 чел. А общее количество жертв ДТП составило 480 652 чел.

Из этой статистики трудно выявить какие-то общие для всех, поскольку факторов их возникновения множество, а их причинно-следственные связи далеко не всегда лежат на поверхности, определяясь не только уровнем технического оснащения КТС и дорожно-транспортной инфраструктуры, но и уровнем социально-экономического развития и культурными традициями. Тем более такая простая арифметика сильно затруднена особенностями и достоверностями официальных оценок, не говоря уже о том, что если в большинстве стран мира дорожно-транспортный травматизм оценивается в числе ДТП разного уровня на 100 тыс. жителей, то в США, например, – на 100 тыс. км. Несмотря на это, в США при высоком уровне автомобилизации уровень смертности в ДТП на 100 тыс. жителей составляет около 12 % (35 тыс. чел. в 2016 г.), в России при меньшем абсолютном и относительном количестве КТС на дорогах этот показатель – около 20 %, в Германии при зафиксированных в 2014 г. 2,4 млн ДТП удельное число погибших всего 4 %, ну а в Китае – более 5 % (в достоверности такой оценки остается только задуматься) и в Индии – более 12 %.

Эта общая для всех стран мира проблема предотвращения дорожно-транспортного травматизма с учетом социально-культурных особенностей и уровня экономического развития решается примерно одними и теми же методами с использованием похожих по потенциальной результативности, но с разной эффективностью реализуемых мероприятий. А в их основе лежит обстоятельный анализ с привлечением возможностей современных информационных цифровых технологий причин ДТП, в первую очередь, по ранжированной статистике нарушений правил дорожного движения со столкновениями.

Рис. 1. *Наиболее опасное фронтальное столкновение*

При углубленном анализе пространственно-временных аспектов ДТП и автокатастроф в таком мегаполисе, как Нью-Йорк, например, явно просматриваются [1] различия между ними с участием одного и нескольких КТС. Разработанные для этого модели случайных параметров учитывают время суток, гетерогенный вес и другие внутренние, связанные с водителем, и внешние факторы воздействия окружающей среды, а также параметры транспортных потоков. Обобщенная пространственно-временная модель упорядоченного пробита позволила использовать общедоступные данные Информационных баз Smart Location Data и BEST Practices по статистике ДТП в 2008–2012 гг. Результаты их обработки показали наличие существенной разницы между факторами, определяющими тяжесть последствий одиночных и групповых столкновений КТС. Эта гетерогенность существует и по полной массе грузовых автомобилей и автопоездов. Кроме того, отдельные ДТП с участием грузовиков, как оказалось, являются пространственно-зависимыми событиями как для одиночных, так и для групповых столкновений, разнящихся в разное время суток.

Понимание причинно-следственных связей этих событий позволяет прогнозировать возможные развития событий на автомобильной дороге, но далеко не всегда – предусмотреть опасности нарушения правил дорожного движения, которые являются [2] одним из основных факторов совершения ДТП с тяжелыми травмами и смертельными исходами в США и во всем мире. Улучшить эту печальную статистику, по мнению исследователей проблемы дорожно-транспортного травматизма из Университета шт. Северная Каролина, можно на основе количественной оценки риска, который водители нарушениями всеми понятных узаконенных действий создают для себя и других водителей в транспортных потоках. Для их наглядности проанализированы и проклассифицированы столкно-

вения на ее автострадах и улицах городов в 2010–2013 гг. Установлено, что превышение установленного ограничения скорости является наиболее частой причиной серьезных травм, даже по сравнению с проездом на запрещающий сигнал светофора самого нарушителя. Но самой опасной среди всех категорий ДТП является фронтальное столкновение (рис. 1). Следующим по серьезности последствий ДТП категорируется боковое столкновение (рис. 2.).

А для водителей других КТС с сопутствующими и встречными транспортными потоками неконтролируемые маневры водителей наиболее опасны. Управление КТС в состоянии алкогольного опьянения в два раза более вероятно приведет к тяжелой травме, чем вождение под воздействием наркотиков. Водители зачастую уверены, что их нарушение правил дорожного движения не приведет к столкновению и серьезной травме. Поэтому информирование водителей КТС о том, какой риск они представляют для себя и для других водителей, нарушая правила дорожного движения, является одним из действенных способов повышения безопасного поведения на дорогах общего пользования.

Действенными в этом плане оказываются не только инновационные, но уже хорошо зарекомендовавшие себя способы. Так, эффективным по результатам имитационных и натурных испытательных экспериментов оказалось [3] использование комплекса оптимального интеллектуального управления полноприводным КТС при переменной динамике движения. Оптимальное решение задачи предотвращения опрокидывания, рысканий, сносов и заносов достигается комбинацией отслеживания фактических продольных и поперечных скоростей и ускорений с недопущением критических значений. В этой инновационной стратегии управления используется модель прогнозирования поведения автомобильного КТС методом пространственного преобразования поэтапного изменения величин его динамических характеристик в привязке к контакту шин с дорожным покрытием в различных скоростных режимах. Для управления нелинейными связями между разнонаправленными перемещениями КТС и вычисления последовательных оптимальных параметров его движения без нежелательных последствий разработан инновационный алгоритм нелинейного моделирования прогнозного контроля динамики. А сама система управления системами КТС по-

Рис. 2. *Второе по опасности и частости боковое столкновение автомобилей*

строена по иерархическому принципу с разделением контроллеров режимов движения на первичный с их предварительным выбором и адаптационный в скользящем режиме реального времени. Как показали имитации в автономных режимах движения беспилотника, эта иерархическая методология приносит почти 1700%-е улучшение вычислительной эффективности без потери производительности управления. Результаты испытаний с двойным переходом из режима разгона в режим торможения и обратно на криволинейной траектории движения на основе аппаратной системы моделирования в циклах показали, что с использованием оптимального интеллектуального контроллера среднеквадратичные значения боковых сносов и заносов и ошибки ориентации могут быть уменьшены на 41 и 30 % соответственно по сравнению с таковыми с помощью модели программного обеспечения драйвера ускорений без предварительного просмотра методом отслеживания. Кроме того, средняя безопасная скорость полноприводного КТС на крутых виражах увеличивается на 0,26 км/ч, максимальный угол бокового скольжения при этом подавляется до 1,9 и улучшаются возможности удержания полосы, предотвращаются опрокидывания и столкновения при автономном режиме беспилотного управления.

До массового появления легитимных на дорогах общего пользования беспилотных КТС, управляемых системами искусственного интеллекта, важно добиться максимальных возможностей по предотвращению столкновений пилотируемыми автомобилями хотя бы с минимально необходимой и возможной поддержкой водителей электронными ассистентами. Это поможет выявить реальный уровень когнитивных возможностей людей за ру-

лем и продолжительность и эффективность действий автоматических систем. Поскольку наиболее частым и опасным по последствиям среди всех ДТП являются фронтальные столкновения, именно в них, в первую очередь, анализируются успехи в совершенствовании устройств активной безопасности. Так, исследователями из Университета Чунцина (КНР) на легковых автомобилях Mazda и Honda положительно оценена [4] эффективность использования различных вариантов электронной системы автономного превентивного экстренного торможения.

Менее частые, но достаточно распространенные среди причин ДТП, задние столкновения также опасны и нуждаются в системах поддержки в виде предупреждения о потенциальной вероятности совершения и превентивного предотвращения. Результаты имитационного моделирования в программной среде VanetMobiSim с помощью сетевого имитатора версии NS2, проведенного, например, в Университете Чанши, продемонстрировали [5] эффективность функционирования инновационного алгоритма, основанного на передаче информации между КТС по специальной технологии так называемого короткозамкнутого со сканированием критической дистанции и детектированием аварийного сигнала.

Реальная оценка эффективности камер заднего наблюдения в предотвращении ошибок парковки и наездов на пешеходов по результатам исследований несчастных случаев в австралийском шт. Виктория показала [6], что наезды КТС на пешеходов являются серьезной проблемой травматизма участников дорожного движения. Но она недооценивается, поскольку большинство таких травм не фиксируется в официальных протоколах ДТП. На основании данных экспериментальных исследований установлено, что камеры заднего вида эффективны, но недоказательны в низкоскоростных режимах движения автомобиля задним ходом, особенно в мертвых зонах видимости, для предъявления претензий нарушителю, наехавшему на пешехода. Широкая доступность современных информационных цифровых технологий в новейших алгоритмах управления повышает стимул для проведения реальных оценок с использованием данных о ДТП. С использованием логистической модели были проанализированы 3172 травм пешеходов в ДТП в Новой Зеландии и четырех австралийских штатах в 2007–2013 гг. Результаты показали снижение травматизма пешеходов при выполнении маневра парковки задним ходом автомобилистами на КТС, оснащенных современными камерами заднего вида. Правда, необходимо продолжать совершенствовать эту технологию системы активной безопасности.

Но все же наиболее действенным способом предотвращения столкновений в плотных и интенсивных транспортных потоках на скоростных автомагистралях и улицах мегаполисов является использование систем экстренного превентивного торможения. Это уже не в первый раз подтверждено [7] результатами исследований в 22 штатах США в 2010–2014 гг. В качестве эталонов для сравнения степени безопасной оснащенности были выбраны легковые автомобили Volvo X-60 и S60 2010–2012 гг. выпуска, а их соперниками стали другие автомобили среднего класса и внедорожники без оснащения такими системами. Установлено, что низкоскоростные системы превентивного экстренного торможения без оповещения водителя предотвратили 27 % столкновений, с оповещением – 43 %, а функционирующие на более высоких скоростях – более 50 %, снизив тяжесть травмирования при невозможности предотвратить столкновение на 20, 45 и 56 % соответственно и уменьшив страховые выплаты почти на 1 млн долл. США.

Но даже не такие сложные и дорогие электронные системы оказывают действенную поддержку водителя КТС. Высоки возможности сигнального сосредоточения и/или привлечения его внимания при ослаблении контроля за дорожно-транспортной ситуацией при утомлении, например, и при повышенной опасности и/или рискованности его манеры вождения для снижения вероятностей потенциальных столкновений в ДТП. Проведенное [8] сотрудниками Технического университета Мюнхена, концерна Continental и Делфтского технологического университета (Нидерланды) исследование эффективности предупреждающих вибротактильных стимуляторов внимания водителей КТС позволило разработать рекомендации по использованию его результатов в алгоритмах функционирования электронных систем активной безопасности и даже для совершенствования систем автоматического управления беспилотным подвижным составом. Проанализированы правильность реакций на внешние возмущения, их скорости, оперативности реакции, ориентации глаз и головы на статические и динамические виб-

Рис. 3. Беспилотный автомобиль: насколько он опаснее или безопаснее пилотируемого?

рационные воздействия на сиденье водителя. На тренажере 18 участников эксперимента провели по три сеанса: без имитации вождения, с управлением виртуальным высокоавтоматизированным КТС без отвлечения на решение отвлекающей задачи и с необходимостью принятия решения интеллектуально сложной задачи. В каждом сеансе участники получили по четыре вибровоздействия в левой или правой части сиденья и четыре блуждающих динамических – в сиденье и спинке. Результаты показали, что правильность ответов на сложные умственные вопросы варьировался до 94 % при статическом тактильном воздействии в каждом сеансе и до 74 % – при динамическом, хотя эти эффекты и не были статистически значимыми. Время реакции по повороту рулевого колеса при статическом вибровоздействии было приблизительно на 200 мс быстрее, чем при динамическом. Результаты слежения за глазами выявили соответствие между направлением головы и направлением изменения полосы движения и показали, что движения головы и глаз ускоряются в большей степени при статических вибрациях, чем при динамических.

Рассмотренные аспекты причинно-следственных связей и возможностей предотвращения столкновений пилотируемых КТС, все более полно и комплексно оснащаемых устройствами активной безопасности, приближают перспективу эксплуатации на дорогах общего пользования в штатном режиме беспилотных роботизированных КТС. Но вопросы по защите людей в роботизированных и пилотируемых КТС (рис. 3) на дорогах общего пользования пока остаются без четких ответов. В рамках этой стратегической тенденции несомненный интерес представляет разработанная [9] в Техническом центре китайской корпорации Dongfeng Motor усовершенствованная система электронной поддержки водителя КТС, превращающая его в мобильный полуавтомат. Экспериментальный образец Dongfeng Fengshen AX7 с полным набором этих устройств активной безопасности прошел успешные стендовые, лабораторно-дорожные и полевые эксплуатационные испытания на дорогах общего пользования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Zhou W., Wang X., Zhang D.** Truck Crash Severing in New York City. An Investigation of the Spatial and the Time of Day Effects // Accid. Anal. And Prev. [Электронный ресурс]. 2017. С. 249–261.

2. **Penmetsa P., Pulugurtha S.S.** Risk Drivers Pose to Themselves and Other Drivers by Violating Traffic Rules // Traffic Injury Prev. [Электронный ресурс]. 2017. № 1. С. 63–69.

3. **Song P., Gao B., Xie S., Fang R.** Optimal Predictive Control for Path Following of a Full Drive-dy-Wire Vehicle at Varying Speeds // Chin J. Mech. Eng. 2017. № 3. С. 711–721.

4. **Hu Y., Lu Z., Lin X.** Algorithm and Simulation Verification of Longitudal Collision Avoidance for Autonomous Emergency Break (AEB) System Based on PreScan // Qiche anguan ju jieueng xuebao = J. Automot. Safety and Energy. 2017. 8, № 2. С. 136–142.

5. **Chen T., Fang N., An L.** Vehicle Rear-end Collision Warning Algorithm Based on DSRC// Qiche anguan ju jieueng xuebao =J. Automot. Safety and Energy. 2017. № 2. С. 164–169.

6. **Keall M.D., Fides B., Newstead S.** Real-World evaluation of the Effectiveness of Reversing Camera and Parking Sensor Technologies in Preventing Backover Pedestrian Injuries // Accid. Anal. And Prev. [Электронный ресурс]. 2017. С. 39–43.

7. **Cicchino J.B.** Effectiveness of Forward Collision Warning and Autonomous Emergemcy Braking Systems in Reducing Front-to-Rear Crash Rates // Accid. Anal. And Prev. [Электронный ресурс]. 2017. С. 142–152.

8. **Petermeijer S.M., Cieler S., de Winter J.C.F.** Comparing Spatially Static and Dynamic Vibrotactile Tace-Over Reguests in the Driver Seat // Accid. Anal. And Prev. [Электронный ресурс]. 2017. С. 218–227.

9. **Bian N., Zhao B., Lai F., Lin J., Chen J., Zhou J.** Development and Application of Semi-automated Driving Vehicle on Highway // Qiche anguan ju jieueng xuebao = J. Automot. Safety and Energy. 2017. № 2. С. 149–156.

КОНЦЕПТЫ НА ВЫСТАВКЕ CES-2018

А.С. Савченко

За последнее время автопроизводители все чаще привозят свои передовые модели в Лас-Вегас (штат Невада, США) на выставку Consumer Electronics Show. Обычно специфика новинок соответствует духу CES: автомобильные компании стараются показать там свои наиболее инновационные разработки и на этот раз их оказалось немало.

На CES-2018 по традиции было представлено немало концептов. Наиболее любопытным из них стал кроссовер Hyundai Nexo, работающий на водороде. С точки зрения тенденций дизайна можно отметить два решения. Во-первых, в новинке основной блок фар замаскирован под "противотуманки", а верхние светодиодные полоски являются всего лишь дневными ходовыми огнями. Во-вторых, тут применяется еще более инновационное решение, которое среди автомобильных дизайнеров принято называть "парящей крышей": на задних стойках предусмотрена полоса черного цвета, благодаря которой создается этот визуальный эффект.

Заявленные динамические показатели поражают. Этого удалось добиться благодаря использованию мощного (163 л.с. и 394 Н·м) электромотора. В итоге время разгона с 0 до 100 км/ч составляет 9,5 с.

Поскольку речь идет о модели на топливных ячейках, то ее важнейшим параметром является все-таки не динамика, а дальность хода. Именно в этом аспекте и был достигнут основной прогресс: запас хода вырос на 214 км, до 800. В данном случае речь идет об испытательном цикле NEDC (New European Driving Cycle), который имеет мало общего с реальным миром. В то же время даже по более строгой американской методике EPA было насчитано около 600 км, что является отличным показателем для подобных транспортных средств.

Hyundai Nexo

Во время презентации представители Hyundai не забыли обратить внимание на адаптацию Nexo для стран с прохладным климатом. По словам разработчиков, передовой кроссовер способен "завестись" после ночи при температуре –30 °С. Выход на рабочие показатели происходит спустя всего 30 с после пуска, что считается рекордным показателем по меркам класса. При этом новинка не спасует и на жаре: система охлаждения позволяет эксплуатировать Nexo при температуре окружающего воздуха до 50 °С.

Новый корейский кроссовер может заправляться на водородных станциях, работающих под давлением от 350 до 750 бар. На полную заправку уходит 5 мин, что вполне сравнимо с показателями привычных бензиновых или дизельных автомобилей.

Но проблема заключается в том, что от самой модели зависит далеко не все. Во-первых, одним из традиционных бичей этого вида транспорта является слабо развитая инфраструктура: даже в США станции заправки водородом встречаются лишь в штате Калифорния. Во-вторых, автомобили с топливными ячейками дороги в производстве. Даже при цене 50–70 тыс. долл. США подобные модели убыточны для производителя. А еще силовая установка Nexo не так уж долговечна: срок жизни топливных ячеек оценивается в 160 тыс. км пробега или десять лет.

Hyundai Nexo поступит в продажу уже в ближайшие месяцы. Ключевые рынки – Южная Корея, США и Европа. Цена пока неизвестна.

Еще одной новинкой CES-2018 из Южной Кореи стал Kia Niro EV. Как нетрудно догадаться по названию, это электрическая версия компактного кроссовера Niro, который уже больше года продается в США.

Оригинальный Kia Niro был анонсирован еще два года назад. В нем используется 1,6-литровый бензиновый мотор мощностью 103 л. с. и 43-сильный электродвигатель. Под задними сиденьями кроссовера установлена скромная литий-ионная батарея емкостью 1,56 кВт·ч. Средний расход топлива в смешанном цикле должен составлять 4,7 л на 100 км.

В Kia Niro EV уже нет ДВС, а мощность электромотора увеличена до 204 л.с. За питание отвеча-

Kia Niro EV

ет литий-ионный аккумулятор емкостью 64 кВт·ч. Согласно официальной спецификации, дальность хода составляет около 383 км.

Пока нет точных сведений о том, когда же Kia Niro EV поступит в продажу, но нет и поводов сомневаться в том, что рано или поздно это произойдет. Согласно недавно раскрытому плану, до 2025 г. корейский бренд собирается выкатить в общей сложности 16 электрифицированных моделей. Глава отдела НИОКР компании KIA д-р Янг У Чхоль на CES-2018 отметил, что в это число входит пять обычных гибридов, пять "подключаемых" (с возможностью внешней зарядки), пять электромобилей и одна модель на топливных ячейках.

Выставкой Consumer Electronics Show охотно пользуются и китайские производители. В этом году здесь дебютировал стартап Byton, известный ранее как Future Mobility Corp., который представил свой первый концепт.

Обычно кроссоверы называют на американский манер SUV (Sport Utility Vehicle). В то же время Byton заявляет, что ее новинка является первым в мире SIV (Smart Intuitive Vehicle), "интеллектуальным интуитивным автомобилем".

Автомобиль обладает весьма интересной внешностью. Фары и фонари тонкими полосками растянулись вдоль всей ширины кузова. На боковинах нет ни ручек дверей, ни наружных зеркал (последние заменены встроенными в передние крылья камерами заднего вида).

Интерьер концепта почти полностью отделан кожей. Но главной изюминкой является просто бескрайний 49-дюймовый экран с разрешением 3840×720 точек. Наверняка он будет сильно отвлекать от дороги во время вождения. Впрочем, самостоятельно крутить баранку и не придется: уже на момент старта продаж кроссовер будет оснащен автопилотом третьего уровня, а в 2020 г. он проапгрейдится до четвертого.

В базовой заднеприводной версии Byton предусмотрен электромотор мощностью 271 л.с. Можно также будет выбрать 475-сильную модификацию с колесной формулой 4×4. У двух модификаций будет различаться и запас хода: он составит 400 или 520 км соответственно. Производитель пообещал, что от фирменной зарядной станции можно будет пополнить запас энергии на 240 км пути всего за 20 мин.

Выход Byton на мировой рынок запланирован на 2019-й. При этом начальная цена кроссовера не кажется такой уж заоблачной – 45 тыс. долл. В будущем на его платформе будут созданы седан и компактный хэтчбек. Пока достоверно не известно, на какие рынки выйдет компания из КНР, но отделения уже зарегистрированы в США, Германии и др.

На CES-2018 публика впервые смогла внимательно разглядеть Fisker EMotion. Как и многие предыдущие творения Хенрика Фискера, выглядит новинка, как минимум необычно. Это достаточно крупный седан, хотя оценить габариты весьма непросто: из-за необычных форм на фотографиях автомобиль выглядит компактнее, чем есть на самом деле. А между тем длина кузова составляет около 5 м.

Внутри EMotion почти все выполнено из кожи, металла и углепластика. При этом побывавшие на CES-2018 журналисты отметили очень высокое качество изготовления салона, что обычно не свойственно подобным прототипам. Но пока доработаны далеко не все системы. Даже эти необычные двери,

Концепт Byton

Fisker EMotion

Genovation GXE

распахивающиеся вверх, нельзя закрыть. Будет ли удобно подобное решение в быту? Ключевой задачей дизайнеров было создать яркий образ, так что о практичности пришлось забыть. Особое внимание было уделено простору пассажиров заднего ряда. Для этого была максимально увеличена колесная база.

Toyota E-Palette

Изначально в Fisker EMotion должны были появиться суперконденсаторы, но поскольку производство новинки планируют начать в конце 2019 г., а соответствующая технология еще не готова, то пришлось ограничиться более привычными литий-ионными аккумуляторами. Их поставщиком выступает LG Chem, при этом обсуждается возможность строительства специального завода в США для удовлетворения спроса со стороны Fisker Inc. Запас хода должен составить 640 км.

Еще одной особенностью Fisker EMotion является встроенная беспилотная система. Она полагается на показания сразу пяти лидаров – столь сложная конфигурация пока не встречается в серийных автомобилях.

Американская компания Genovation Cars на CES-2018 впервые показала обновленное электрическое купе Genovation GXE, базой которого послужил Chevrolet Corvette.

Модель Genovation GXE получила новую электрическую силовую установку, отдача которой составляет порядка 800 л.с. и 948 Нм крутящего момента. Это позволило модели Genovation GXE ускорить от 0 до 60 миль в час менее чем за 3 с, прежде чем достичь максимальной скорости свыше 220 миль в час (354 км/ч).

Ожидается, что в серию электрическое купе Genovation GXE пойдет в 2019 г. Представители американской компании сказали, что минимальная цена модернизированной версии GXE составит не менее чем 750 тыс. долл.

Японская Toyota на CES-2018 продемонстрировала концепт футуристического коммерческого транспортного средства E-Palette. Это видение корпорацией будущего, в котором электрические автономные транспортные средства станут основой инфраструктуры города.

E-Palette – это электрическая платформа-трансформер, которая легко адаптируется к различным образам жизни и потребностям. Например, ее можно использовать в такси, грузо- и автобусных перевозках, каршеринге. Фургон может трансформироваться в гостиничный номер, небольшой магазин, офис или медпункт. Его будут выпускать в трех размерах, длиной 4–7 м.

Концепт создан в сотрудничестве с Amazon, Didi, Pizza Hut, Uber и Mazda. Платформу E-Palette планируют использовать на Олимпийских играх в Токио в 2020 г.

Испытания электробуса «Волгабас» в Санкт-Петербурге продолжаются

В Санкт-Петербурге на маршруте № 7 продолжаются испытания нового электробуса "Волгабас". Новинка, которую "Северная столица" тестирует первой в России, вышла на линию в конце октября 2017 года. За 50 дней работы электробус перевез 23 тыс. пассажиров.

Электробус может одновременно перевезти 90 человек, он полностью низкопольный и приспособлен для перевозки маломобильных пассажиров. Батарея и силовая установка автобуса произведены в России.

"Волгабас" украшен силуэтами петербургских достопримечательностей – Мариинского театра, Адмиралтейства и Казанского собора. Слоган "Город чистой красоты", выведенный на борту, объединяет то, чем знаменит Санкт-Петербург во всем мире – музыку, архитектуру и литературу. А применение экологичного транспорта, в свою очередь, поможет поддержать мировой тренд и улучшить качество жизни горожан.

Средняя рыночная стоимость электробуса варьируется от 20 до 30 млн руб. Достижение положительного экономического эффекта при эксплуатации данного транспортного средства по сравнению с дизельным возможно. Разница формируется за счет цены электроэнергии и уменьшения объема технологических работ, что обусловлено особенностями конструкции. Однако цена автобусов с электродвигателем, превышающая цену дизельных собратьев почти в 2 раза, увеличивает амортизационные отчисления.

www.avtobus.spb.ru

"Газпром" и растущий рынок СПГ

Совет директоров ПАО "Газпром" принял к сведению информацию о перспективах развития отрасли сланцевого газа и СПГ в различных регионах мира, возможностях и угрозах для компании. Было отмечено, что согласно большинству прогнозов в средне- и долгосрочной перспективе производство сланцевого газа в мире будет сосредоточено в основном на североамериканском континенте.

В 2016 г. объемы производства газа из сланцев в США увеличились незначительно, а совокупная добыча газа из всех источников — снизилась (впервые с 2005 г.). С экономической точки зрения сланцевая отрасль остается убыточной, что ведет к увеличению долговой нагрузки добывающих компаний. С учетом текущей динамики добычи по результатам 2017 г. в США возможно дальнейшее снижение уровня добычи газа.

В Канаде отрасль сланцевого газа продолжает развиваться крайне низкими темпами, что связано с ограниченными возможностями монетизации газа, а также наличием в стране других, более дешевых в производстве газовых ресурсов.

Несмотря на позитивные оценки сланцевой отрасли в КНР, ее развитие идет с отставанием от заявленных планов. Динамичный рост объемов добычи возможен здесь только при условии открытия большого числа высокопродуктивных залежей, а также существенного снижения себестоимости производства газа из сланцев. При этом по оценкам большинства экспертов развитие сланцевой отрасли в КНР не окажет серьезного влияния на растущую зависимость страны от импорта газа.

В 2016 г. окончательно завершилась геологоразведка на сланцевый газ в странах континентальной Европы. В 2017 г. планов по возобновлению работ в обозримой перспективе не анонсировалось.

В рамках работы по оценке тенденций на рынке сжиженного газа участники заседания подчеркнули, что в настоящее время

Продукция СПГ-заводов траспортируется к заказчикам большими судами, в частности Grand Mereya

американский СПГ не отличается высокой конкурентоспособностью на глобальном рынке из-за его высокой себестоимости. В этой связи большинство международных экспертов ожидают, что в ближайшие годы мощности действующих СПГ-заводов в США будут недозагружены. При этом начиная со второго полугодия 2015 г. в стране было принято только одно окончательное инвестиционное решение по реализации нового СПГ-проекта. Это указывает на снижение интереса покупателей к американскому сжиженному газу, особенно в странах, обладающих возможностью импорта трубопроводного газа. Так, например, доля СПГ из США в совокупном газопотреблении европейских стран по итогам текущего года составит меньше одного процента.

Участники заседания отметили, что наибольшее увеличение объемов потребления СПГ в ближайшие 20 лет ожидается в странах АТР. Рост закупок также прогнозируется в странах Европы, что обусловлено в первую очередь падением собственной добычи газа (по этой же причине можно ожидать и увеличения спроса на российский трубопроводный газ на европейском рынке).

В условиях роста спроса на сжиженный природный газ "Газпром" продолжает работу по развитию этого направления бизнеса. Ведется подготовка документации по проекту третьей технологической линии СПГ-завода на Сахалине (в рамках проекта "Сахалин-2"). Со стратегическим партнером Shell подписаны Основные условия соглашения о совместном предприятии по реализации проекта "Балтийский СПГ". Идет строительство комплекса по производству, хранению и отгрузке СПГ в районе компрессорной станции "Портовая".

Правлению поручено продолжить работу по оценке перспектив развития отрасли сланцевого газа и СПГ в различных регионах мира.

Производственный комплекс "Пригородное" проекта "Сахалин-2"