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

Том 16. № 10. 2017 г. Издается с января 2002 г. Периодичность – ежемесячно

Журнал включён в Перечень изданий ВАК Минобрнауки РФ

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА

Ерохов В.И.

Технико-эксплуатационные показатели газобаллонных автомобилей нового поколения. Лекция № 1. Часть 2. Экологические показатели газобаллонных автомобилей нового поколения 435

Приведены экологические характеристики современных газовых двигателей. Установлены закономерности изменения экологических параметров газовых и газодизельных двигателей нового поколения. Изложены механизм и природа образования вредных веществ при работе наземных транспортных средств на газовом топливе. Приведены обобщенные экологические характеристики современных газобаллонных наземных транспортных средств.

Марков В.А., Чирков А.Ю., Зайченко В.М., Цыплаков А.И., Директор Л.Б.

Использование генераторного газа из биомассы в газопоршневых энергоустановках 452

Показаны преимущества использования газообразных топлив в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Рассмотрены технологии получения газообразных топлив из биомассы. Представлен состав и физико-химические свойства генераторного газа, получаемого из органических возобновляемых энергоресурсов. Дан сравнительный анализ свойств различных газообразных топлив.

Семаков Е.В., Гудков Ю.И.

Автономная система экспресс-диагностики положения кузова автомобиля при перевозке альтернативных видов топлива 464

В работе описывается автономный измерительный модуль для контроля наклонов кузова топливозаправщика для перевозок альтернативного топлива. Обосновывается выбор связи для передачи данных от измерительного модуля в компьютер. Описывается принцип работы системы. Портативный измерительный модуль для контроля кузова топливозаправщиков позволит проводить быстрые тесты на различных дорожных покрытиях. Дальнейшая разработка будет включать в себя модернизацию соединения с компьютером, добавление поддержки iOS и ОС Android, увеличение работы в автономном режиме от аккумуляторной батареи и повышение точности измерения.

Раенбагина Э.Р.

Определение экономического эффекта при обеспечении безопасного слива сжиженного природного газа из автомобильных газовых баллонов 466

В статье приведена методика определения экономического эффекта от внедрения комплекса технических решений по обеспечению безопасного слива сжиженного природного газа.

ИНФОРМАЦИЯ

Жаров М.И., Денщиков И.И.

Экологический аспект добычи углеводородов 472

Добыча любых полезных ископаемых никогда не радовала экологов. Причина в самой природе углеводородов: они токсичны, пожароопасны, находятся под большим давлением и постоянно стремятся выйти из-под контроля.

Семаков В.Г.

Рынок крупнотоннажных грузовых автомобилей 477

К сегменту крупнотоннажных грузовиков (HCV) относятся автомобили, имеющие полную массу свыше 16 т. В 2016 г. рынок новых машин этой категории составил 36 тыс. ед. – на 11,4 % больше, чем годом ранее. Таким образом, рост продаж зафиксирован впервые после трех лет падения.

Новости 480

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 28.09.2017 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”, 2017

АГЗК + АТ

«AutoGas Filling Complex + Alternative fuel»

AN INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL MAGAZINE

Vol. 16. № 10. 2017 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.

Technical and operational characteristics of gas-cylinder cars of the new generation. Lecture № 1. Part 2. Environmental performance of lpg vehicles of the new generation 435

Giventhe ecological characteristics of modern gas engines.The regularities of changes in the environmental parameters of the gas and gas-diesel engines of new generation. Set out the mechanism and nature of formation of harmful substances when operating ground vehicles on gas fuel. The generalized environmental characteristics of modern gas vehicles.

Markov V.A., Chirkov A.Yu., Zaichenko V.M., Tsyplakov A.I., Direktor L.B.

Using generator gas of biomass in gas piston power plants 452

Advantages of using gaseous fuels in reciprocating internal combustion engines are shown. Technologies of getting gaseous fuels of biomass are considered. Composition and physicochemical properties of generator gas produced from organic renewable resources are presented. A comparative analysis of properties of various gaseous fuels is given.

Semakov E.V., Gudkov Yu.I.

Autonomous system of express diagnostic of automobile body position during alternative fuel transportation 464

This paper present a project that will describe autonomous measurement module for refueler body incline measurement. The choice of communication protocol between measurement module and computer is justified. Principle of operation of the system described.
The autonomous measurement module for refueler body control allow making fast tests on different road cover. Further development will include upgrading connection with computer, adding support for iOS and Android OS, increasing work in autonomous mode from the storage battery and make better accuracy of measure.

Raenbagina E.R.

Determination of the economic effect while ensuring the safe discharge of liquefied natural gas from automobile gas cylinders 466

The article describes the method of determining the economic effect from the introduction of a set of technical solutions for ensuring the safe discharge of liquefied hydrocarbon gas.

INFORMATION

Zharov M.I., Denshchikov I.I.

Ecological aspect of hydrocarbon production 472

The extraction of any minerals has never pleased the ecologists. The reason is in the very nature of hydrocarbons: they are toxic, fire hazardous, are under great pressure and constantly seek to get out of control.

Semakov V.G.

Large-capacity trucks market 477

The segment of large-capacity trucks (HCV) includes cars with a gross mass of over 16 tons. In 2016, the market for new vehicles of this category was 36 thousand units. – by 11,4 % more than a year earlier. Thus, sales growth was recorded for the first time after three years.

News 480

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", 2017

УДК 621.436.7.013

ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГАЗОБАЛЛОННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ. ЛЕКЦИЯ № 1. ЧАСТЬ 2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГАЗОБАЛЛОННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

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

Приведены экологические характеристики современных газовых двигателей. Установлены закономерности изменения экологических параметров газовых и газодизельных двигателей нового поколения. Изложены механизм и природа образования вредных веществ при работе наземных транспортных средств на газовом топливе. Приведены обобщенные экологические характеристики современных газобаллонных наземных транспортных средств.

Ключевые слова: *газовый двигатель; компримированный природный газ; экологические показатели; рециркуляция отработавших газов; оксиды азота, сажа, углеводороды, оксид углерода; запальная доза; газодизель; нормы токсичности; дымность; продукты сгорания.*

TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF GAS-CYLINDER CARS OF THE NEW GENERATION. LECTURE № 1. PART 2. ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF LPG VEHICLES OF THE NEW GENERATION

Erokhov V.I., Ph.D. of techn. sc., Moscow Polytechnic University, Moscow

Giventhe ecological characteristics of modern gas engines.The regularities of changes in the environmental parameters of the gas and gas-diesel engines of new generation. Set out the mechanism and nature of formation of harmful substances when operating ground vehicles on gas fuel. The generalized environmental characteristics of modern gas vehicles.

Keywords: *gas engine; compressed natural gas; environmental aspects; exhaust gas recirculation; nitrogen oxides; soot; hydrocarbons; carbon monoxide; pilot dose; gas diesel engine; the norms of the toxicity; smoke; products of combustion.*

Преимущество ПГ в качестве топлива обусловлено высоким содержанием водорода. Сгорание ПГ сопровождается меньшим по сравнению с жидким топливом образованием CO_2 на единицу выделенной теплоты [1]. Углеводородные газы по сравнению с традиционным моторным топливом имеют благоприятное соотношение углерода к водороду (С/Н). Углеродное число у современных бензинов составляет 6,0, а СУГ и ПГ – соответственно 4,9 и 2,99. Высокое содержание водорода в газовом топливе обеспечивает более полное сгорание горючей смеси.

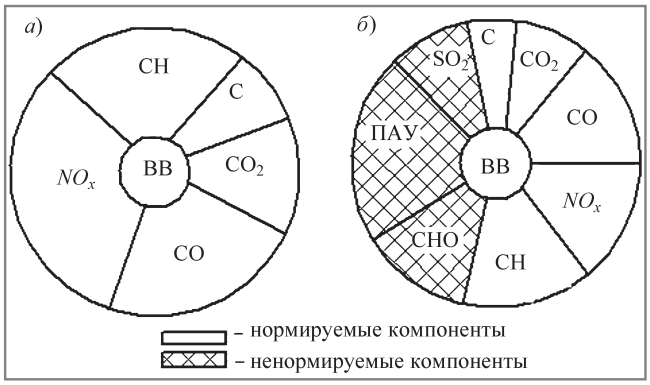

Рис. 1. *Условная суммарная токсичность:*
а – нормируемые компоненты; *б* – ненормируемые компоненты

Потенциал образования парникового эффекта можно представить зависимостью:

$$I_{\text{парн}} = m_{CO_2} + 320 m_{N_2O} + 25 m_{CH_4}, \qquad (1)$$

где m_{CO_2}, m_{N_2O} и m_{CH_4} – выбросы вредных веществ (ВВ); 320 и 25 – коэффициенты потенциала парникового эффекта данных веществ.

Номенклатура нормируемых и предполагаемых выбросов ВВ приведена на рис. 1.

Вредное влияние отдельных компонентов ВВ отработавших газов оценивают по индексу концентрации вредности. Основными вредными компонентами, определяющими токсичность ОГ, являются оксиды азота и углерода, альдегиды, углекислый газ и сернистый ангидрид.

Оценка относительной вредности вредных компонентов в общей токсичности ОГ может быть представлена в виде суммарного индекса концентрации вредности ВВ:

$$k_p = C_{\text{ф}} / c_{\text{пдк}}, \qquad (2)$$

где $C_{\text{ф}}$ и $c_{\text{пдк}}$ соответственно фактическая и предельно допустимая концентрации вредного вещества в рассматриваемой среде.

Оценку относительной вредности отдельных компонентов ВВ в общей токсичности ОГ осуществляют по суммарному индексу концентрации [5]:

$$K_{pi} = \frac{k_p}{\Sigma_i^n T_{cc}^{co}} \cdot 100\,\%, \qquad (3)$$

 ISSN 2073-8323

где K_{pi} – индекс концентрации соответствующего компонента.

Токсичность ОГ двигателя характеризуется суммарным количеством содержащихся в них вредных веществ:

$$\sum T_{cc}^{co} = \sum_i^n g_{co}^i m_{\text{о.г}} T_{cc}^{co}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\sum_i^n T_{cc}^{co} &= g_{co} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{co} + g_{\text{CH}} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{\text{CH}} + \\ &+ g_{\text{NO}_2} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{\text{NO}_2} + g_o m_{\text{о.г}} T_{cc}^{c} + \\ &+ g_{P_{\text{в}}} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{P_{\text{в}}} + g_{\text{SO}} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{\text{SO}} + \\ &+ g_{\text{акр}} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{\text{акр}} + g_{\text{Бп}} m_{\text{о.г}} T_{cc}^{\text{Бп}},\end{aligned} \quad (5)$$

где g_{co} ... $g_{\text{Бп}}$ – удельный вес каждого компонента ОГ; $m_{\text{о.г}}$ – масса ОГ; T_{cc}^{co} – относительная вредность ОГ,

$$\begin{aligned}\sum_i^n T_{cc}^{co} &= g_{co} m_{\text{о.г}} 1 + g_{\text{CH}} m_{\text{о.г}} 2 + \\ &+ g_{\text{NO}_2} m_{\text{о.г}} 36 + g_c m_{\text{о.г}} 60 + \\ &+ g_{P_{\text{в}}} m_{\text{о.г}} 4286 + g_{\text{SO}} m_{\text{о.г}} 60 + \\ &+ g_{\text{акр}} m_{\text{о.г}} 100 + g_{\text{Бп}} m_{\text{о.г}} 3 \cdot 10^6.\end{aligned} \quad (6)$$

Распределение суммарного индекса концентрации по отдельным компонентам ОГ в современных дизелях представлено на рис. 2.

Доля NO_x в суммарном индексе концентрации на режимах ХХ составляет 35–40 % и 70–75 % на режимах нагрузок свыше 20 %. Доля СО в суммарном индексе концентрации ВВ составляет около 10 % на режимах средних нагрузок, возрастая до 22 % на режимах полной мощности и до 20 % на холостом ходу (ХХ). Альдегиды оказывают заметное влияние на суммарный индекс концентрации ВВ на режимах ХХ и полной нагрузки.

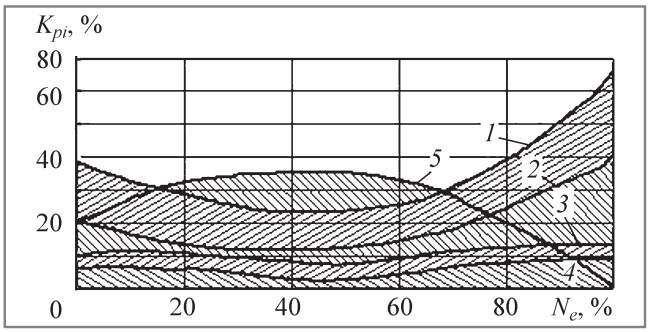

Рис. 2. Распределение суммарного индекса концентрации по отдельным токсическим компонентам ОГ современного двигателя:
1 – окислы азота; *2* – окись углерода; *3* – альдегиды; *4* – сернистый ангидрид; *5* – неучтенные компоненты

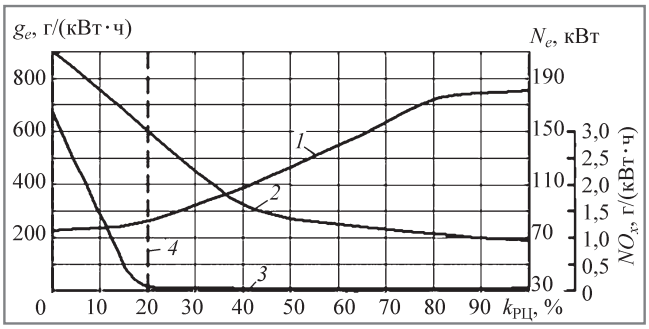

***Рис. 3.** Влияние степени РЦ ОГ на показатели работы двигателя:*
1 – расход толива; *2* – оксиды азота; *3* – мощность; *4* – граница эффективности РЦ

Механизм воздействия РЦ на внутрицилиндровые процессы имеет сложный и неоднозначный характер [4]. Инертный газ разбавляет рабочую смесь, не изменяя соотношения воздух/топливо, уменьшает содержание кислорода в заряде.

Действие возвращаемых ОГ на протекание процесса сгорания проявляется в двух основных аспектах. NO_2 способствует ускорению протекания предпламенных химических реакций, в результате которых сокращается период задержки воспламенения ($\varphi_{\tau i}$).

Сгорание протекает при меньшей скорости нарастания давления $(dp/d\varphi)_{\max}$, в результате чего снижается содержание NO_x и C_mH_n (особенно альдегидов) в составе ОГ.

Образование NO_x в ОГ является следствием высокой температуры и давления в КС. Возврат ОГ в объеме 25 % обратно на впуск двигателя сопровождается ухудшением процесса сгорания, замедлением его скорости, снижением температуры и давления в цилиндре, т.е. создаются условия, способствующие уменьшению выброса NO_x.

ОГ, возвращенные в цилиндр, действуют как активные центры в начале сгорания, но одновременно увеличивают количество балластных компонентов, замедляющих протекание реакции окисления и снижение температуры рабочего цикла.

Кислород повышает температуру горения за счет введения ОГ (искусственное уменьшение содержания кислорода в составе рабочей смеси), происходит снижение температуры сгорания. Это приводит к снижению количества кислорода, взаимодействующего с азотом и обеспечивающего снижение количества NO_x.

Уменьшение кислорода сопровождается снижением интенсивности тепловыделения в период кинетического сгорания, обеспечивая умеренные скорости образования NO_x. Однако при этом увеличиваются неполнота сгорания топлива, дымность ОГ и выброс ТЧ.

Основное влияние ОГ на процесс сгорания обусловлено содержанием продуктов с высокой удельной теплоемкостью и двуокиси углерода. Присутствие их в процессе сгорания приводит к снижению локальных и средних температур цикла, способствующих образованию NO_x.

Рециркуляция ОГ обеспечивает увеличение наполнения цилиндров при остающемся постоянном количестве подаваемого свежего воздуха. Присутствие ОГ в процессе сгорания приводит к снижению локальных и средних температур цикла, способствующих образованию NO_x [2–4].

Определяющим параметром системы РЦ является коэффициент рециркуляции ($K_{рц}$):

$$K_{рц} = \left[\frac{C^{вт}_{CO_2} - C^{ос}_{CO_2}}{C^{ог}_{CO_2}}\right] \cdot 100\,\%, \qquad (7)$$

где $C^{вт}_{CO_2}$, $C^{ос}_{CO_2}$ и $C^{ог}_{CO_2}$ – концентрации CO_2 соответственно во ВТ, окружающей среде и ОГ.

Коэффициент рециркуляции ($K_{рц}$) представляют в процентах относительно ОГ $G_{ог}$. Большие значения $K_{рц}$ соответствуют высокой частоте вращения КВ.

Аналогичный подход использован фирмой Ricardo Consulting Engineers, путем введения параметра EGR (Exhaustgasrecirculation) – control.

Цикловое наполнение двигателя с учетом РЦ ОГ можно представить зависимостью [5]:

$$G_{ц} = \frac{M_{н} i K_{рц}}{1{,}2n} \cdot 10^4, \qquad (8)$$

где $G_{ц}$ – цикловое наполнение цилиндра, (мг/цикл); $M_{н}$ – массовое наполнение цилиндра; i – тактность двигателя; n – частота вращения КВ двигателя; $K_{рц}$ – коэффициент рециркуляции ОГ.

Содержащийся в составе ОГ диоксид азота способствует ускорению протекания предпламенных химических реакций, в результате которых сокращается период задержки воспламенения $\varphi_{\tau i}$. Сгорание протекает при меньшей скорости нарастания давления $(dp/d\varphi)_{max}$, в результате чего снижается содержание NO_x и C_mH_n.

Для снижения выбросов NO_x до уровня "Евро-5" целесообразно повышать степень РЦ до 20 %. Снижение температуры ОГ на 1 °С способствует увеличению РЦ на 0,002–0,01 %.

РЦ замещает содержание кислорода в камере сгорания, что влияет на протекание процесса сгорания и снижение максимальной температуры во фронте пламени, сопровождающейся снижением концентрации NO_x. Снижение выбросов NO_x при использовании РЦ обусловлено повышением удельной теплоемкости заряда из-за добавления CO_2, H_2O (паров воды), а также запаздывания начала сгорания и замедления его развития. Уменьшение кислорода в горючей смеси при РЦ приводит к снижению максимальной и среднецикловой температуры сгорания и смещению процесса сгорания на линию расширения.

Уменьшение температуры продуктов сгорания и выброса NO_x при использовании РЦ на 90 % связано с уменьшением содержания кислорода и только 10 % эффекта связывают с повышением удельной теплоемкости заряда.

С 1980 г. система РЦ стала частью электронной системы автоматического управления двигателем. ЭБУ контролирует эффективность работы системы РЦ ОГ. Она не работает при запуске холодного двигателя и его прогреве до температуры 40–60 °С.

Современные экологические стандарты OBD–II и EOBD второго поколения предполагают наличие бортовой диагностики, основанной на системе РЦ ОГ.

Влияние степени РЦ ОГ на показатели работы бензинового двигателя приведено на рис. 4. Относительная величина уменьшается по мере увеличения степени РЦ.

Из физических особенностей воздействия ОГ на процесс сгорания вытекает, что эффективность рециркуляции ОГ увеличивается при снижении температуры ОГ.

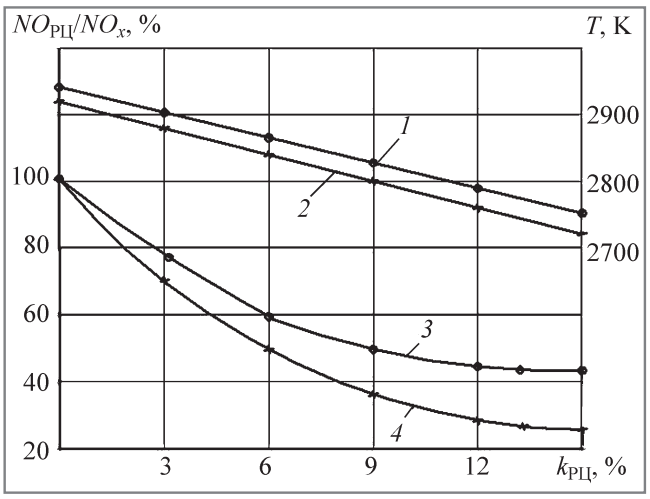

Рис. 4. *Влияние рециркуляции на выброс NO_x и температуру ОГ:*
1 – максимальная температура в зоне продуктов сгорания; *2* – максимальная температура в цилиндре; *3* – снижение NO_x при температуре рециркуляции газов 100 °С; *4* – снижение NO_x при температуре рециркулируемых газов 50 °С

При рециркуляции в свежем заряде цилиндра снижается доля свободного кислорода, что приводит к снижению скорости и температуры сгорания топлива, что сопровождается ухудшением условий образования NO_x.

Рециркуляция ОГ сопровождается уменьшением максимальной температуры цикла благодаря уменьшению свежего заряда и увеличению его теплоемкости. РЦ уменьшает содержание кислорода в камере сгорания, но также влияет на протекание процесса сгорания и снижает максимальную температуру во фронте пламени, в результате чего происходит снижение эмиссии NO_x.

Рециркуляция ОГ сопровождается уменьшением максимальной температуры цикла благодаря уменьшению свежего заряда и увеличению его теплоемкости. Образование NO_x в ОГ является следствием высокой температуры и давления в КС, связанных с повышением эффективности сжигания топлива в двигателе – чем выше температура, т.е. чем выше топливная экономичность и мощность двигателя, а также повышается выброс NO_x.

Присутствие ОГ в процессе сгорания приводит к снижению локальных и средних температур цикла, способствующих образованию NO_x. Зависимость изменения температуры имеет линейный характер. Если коэффициент остаточных газов равен нулю, то мощность максимальная. С ростом коэффициента остаточных газов мощность всегда падает.

При умеренной степени рециркуляции 5–15 % ОГ и сохранении исходными M_e, в двигателе достигаются весьма низкие удельные выбросы NO_x 4,5–2,5 г/(кВт·ч) (по 13-ступенчатому циклу) при обеспечении приемлемого уровня дымности ОГ, что является важнейшим преимуществом системы РЦ ОГ. При высокой степени РЦ, превышающей 40 % от объема воздуха на впуске, происходит увеличение содержания сажи, СО, C_mH_n и увеличение расхода топлива из-за недостатка кислорода.

Влияние температуры горючей смеси на образование NO_x бензинового двигателя показано на рис. 5.

Рециркуляция – эффективное средство снижения NO_x. РЦ 10 % уменьшает выделение NO_x на 50 %. При РЦ из-за разбавления заряда продуктами сгорания процесс сгорания протекает несколько хуже. Концентрации СО и C_mH_n в ОГ несколько увеличиваются.

Из-за недостатка кислорода в отдельных зонах КС образуется богатая смесь, сгорание которой не может быть полным и сопровождается образованием частиц сажи.

Основная масса NO_x образуется в первой половине процесса сгорания. Запаздывание процесса тепловыделения является основным фактором, вносящим вклад в образование NO_x. Содержание в составе ОГ NO_2 способствует ускоренному протеканию предпламенных химических реакций, в ре-

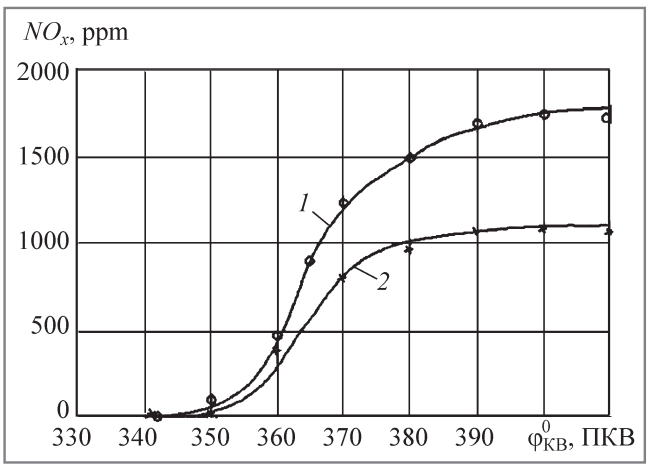

Рис. 5. *Влияние температуры горючей смеси бензинового двигателя на образование оксидов азота:*
1 – температура 100 °С; *2* – температура 50 °С

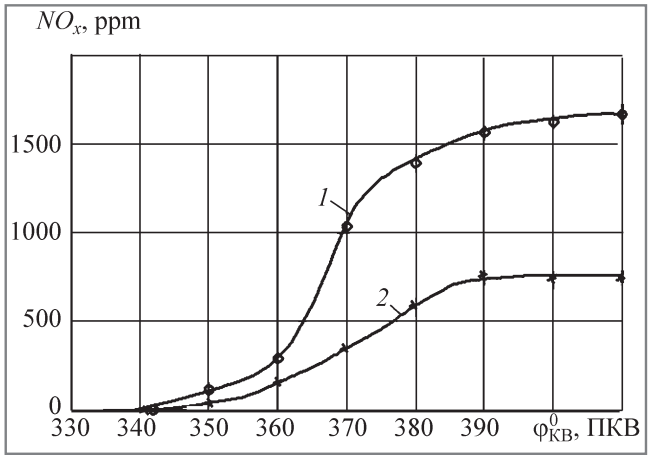

Рис. 6. *Влияние степени РЦ на образование оксидов азота бензинового двигателя:*
1 – $K_{РЦ}$ = 0; 2 – $K_{РЦ}$ = 15 %

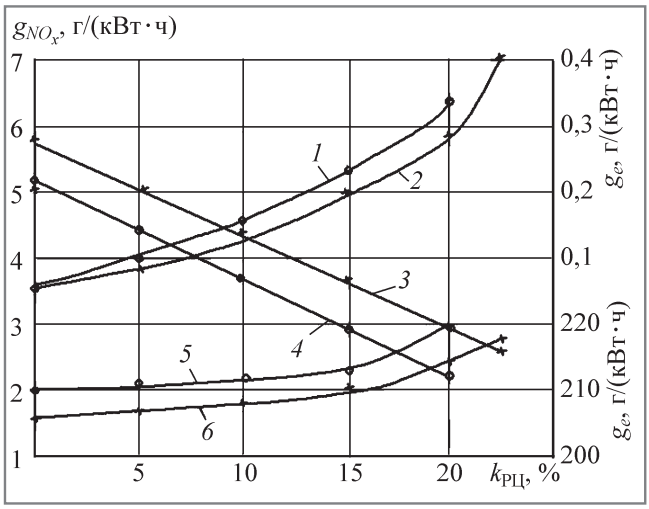

Рис. 7. *Влияние степени РЦ на показатели работы дизеля:*
1, 4, 5 – сажа, оксиды азота, удельный расход топлива соответственно, о–о – нагрузка 100 %; *2, 3, 6* – сажа, оксиды азота, удельный расход топлива соответственно, х–х – нагрузка 25 %; $n_{КВ}$ = 1800 мин$^{-1}$

зультате которых сокращаются период задержки воспламенения топлива и его сгорание.

В этом случае снижение концентрации NO_x в ОГ происходит вследствие уменьшения максимальной температуры цикла ОГ. РЦ ОГ увеличивает общее наполнение цилиндров при остающемся постоянном количестве подаваемого свежего воздуха.

Влияние температуры ОГ на образование оксидов азота бензинового двигателя показано на рис. 6.

Применение РЦ приводит к запаздыванию начала сгорания и замедлению его развитию, что сопровождается снижением температуры сгорания рабочей смеси и сокращению периода в течение которого максимальные температуры цикла остаются неизменными.

Зависимость влияния степени РЦ на показатели работы современного дизеля приведена в [9] и на рис. 7.

По мере увеличения значения рециркуляции NO_x (кривая *3*, *4*) уменьшаются, а сажа (кривая *1*, *2*) и удельный расход топлива (кривая *5*, *6*) – возрастают.

Изменение основных показателей дизеля от степени рециркуляции ОГ приведено на рис. 8.

Проведенные исследования показали целесообразность рециркуляции ОГ в дизеле на всех режимах [6, 7] для снижения NO_x и особенно на режимах малых нагрузок.

Испытания транспортного дизеля [7, 8] показали целесообразность использования РЦ ОГ на режимах малых нагрузок. Применение РЦ ОГ обеспечивает снижение выбросов оксидов азота на 35 %, ТЧ при неизменном уровне топливной экономичности.

Относительные выбросы оксидов азота и сажи при различном коэффициенте избытка воздуха в зависимости от коэффициента рециркуляции и состава горючей смеси приведены на рис. 9.

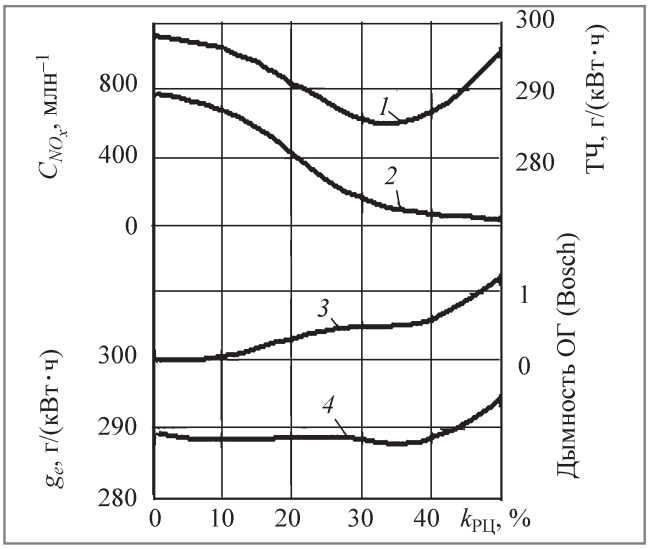

Рис. 8. *Изменение основных показателей дизеля от степени рециркуляции отработавших газов:*
1 – твердые частицы; *2* – оксиды азота; *3* – дымность ОГ; *4* – удельный расход топлива; *n* = 2400 мин$^{-1}$; нагрузка 25 %

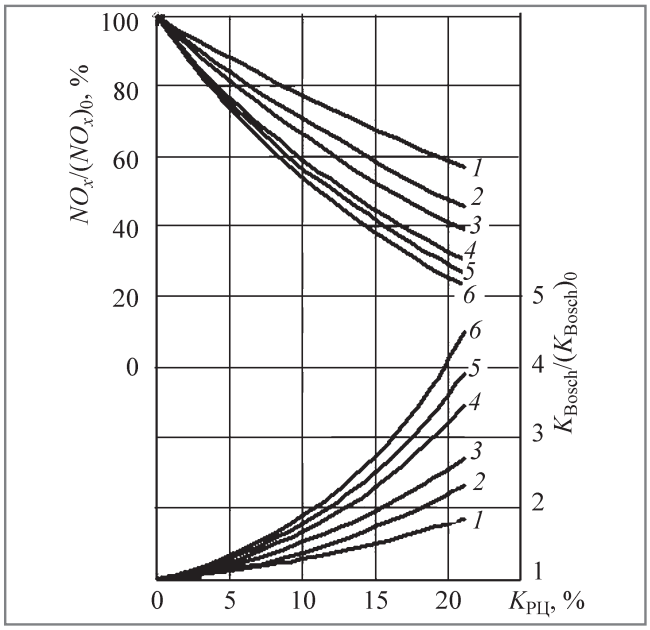

Рис. 9. *Зависимость выбросов оксидов азота и сажи при различных значениях коэффициента избытка воздуха:*
1 – α = 4,0; *2* – α = 3,0; *3* – α = 2,5; *4* – α = 2,0;
5 – α = 1,8; *6* – α = 1,6

Проведенные исследования показали целесообразность РЦ ОГ в дизеле на всех режимах [6, 7] для снижения NO_x и особенно на режимах малых нагрузок.

Сажа, представляющая микроскопические углеродистые частицы различной формы, величины и структуры диаметром 0,05 мкм, достигает минимального значения при $K_{рц}$ = 25 %. Ядро частицы состоит из чистого углерода, а на нем адсорбируются различные углеводородные соединения, оксиды металлов и серы. Состав частиц сажи зависит от применяемого рабочего процесса, режима его работы и состава топлива. Частота вращения КВ не оказывает влияния на концентрацию выброса ВВ.

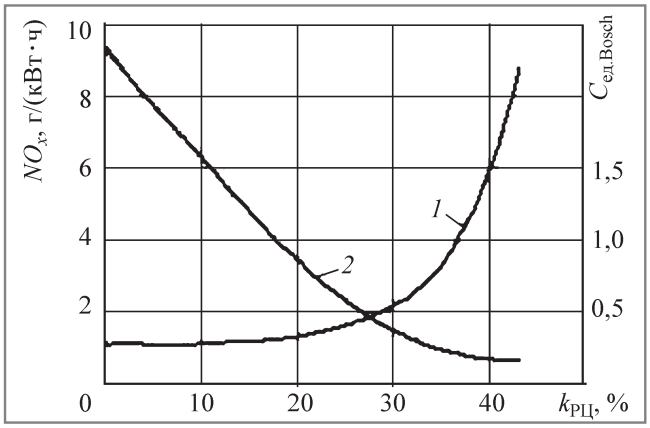

Рис. 10. *Влияние РЦ на выброс сажи и NO_x:*
1 – выброс NO_x; *2* – выброс сажи

Влияние РЦ ОГ на выброс сажи и оксидов азота приведено на рис. 10. Снижение сажи в ОГ сопровождается ростом NO_x. Уменьшение содержания сажи обеспечивают при повышении температуры сгорания и увеличении давления впрыска. Однако повышение температуры сопровождается увеличением NO_x, а содержание сажи снижается. Влияние вида топлива и режима работы газового двигателя на выброс ВВ приведено на рис. 11.

Система питания газобаллонного автомобиля содержит две равноценные системы, обеспечивающие полноценную работу двигателя на бензине или на газовом топливе [10].

Сравнительные характеристики при работе на бензине и газовом топливе показывают, что при работе на газовом топливе система питания обеспечивает более благоприятные экологические характеристики по сравнению с ее работой на бензине.

Коэффициент избытка воздуха при работе двигателя на газовом топливе заметно выше по сравнению с бензиновым двигателем (кривая, *е*). Газовый двигатель работает на обедненной смеси. Содержание продуктов неполного сгорания CO и C_mH_n (кривые *д*, *г*) при работе на газовом топливе существенно меньше по сравнению с бензином.

Содержание продуктов полного окисления CO_2 в газовом двигателе (кривые *в*) заметно меньше по сравнению с бензиновым двигателем. Это связано с меньшим содержанием углерода в газовом топливе и более бедной горючей смесью.

Содержание NO_x при работе на газовом топливе заметно меньше по сравнению с бензином (кривые *б*). Это связано с меньшей температурой рабочего цикла и более медленным сгоранием газовоздушной смеси.

Содержание кислорода при работе на газовом топливе значительно больше по сравнению с бензином, что связано с эффективным обеднением горючей смеси (кривая *а*) и повышенным содержанием в ней кислорода.

Применение газового топлива позволяет эффективно обеднить горючую смесь, что обусловле-

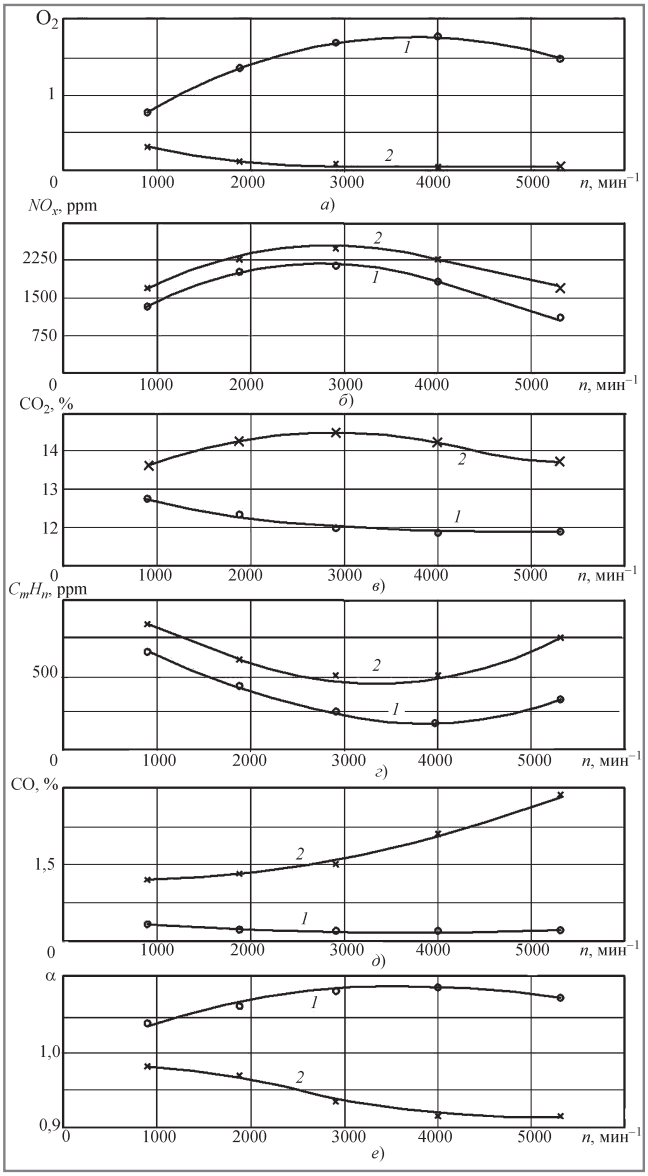

Рис. 11. *Влияние вида топлива и режима работы газового двигателя на выброс вредных веществ:*
1 – газ; *2* – бензин

но большим обеднением газовоздушной горючей смеси при работе на газовом топливе (кривые *е*).

При работе на газовом топливе наблюдается уменьшение количества продуктов неполного сгорания CO и C_mH_n в ОГ. Одновременно с этим несколько уменьшается и концентрация NO_x в связи с более низкой температурой рабочего цикла.

Автомобили, работающие на КПГ, характеризуются низким содержанием ВВ [3].

Расчет концентраций сажи представлен в программе ДИЗЕЛЬ-РК, разработанной специалистами МГТУ им Н.Э. Баумана. Скорость сажеобразования в зоне горения:

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau}\right)_K = 0{,}004\frac{q_c}{V}\frac{dx}{d\tau}, \qquad (9)$$

где V – текущий объем цилиндра; q_c – цикловая подача топлива; dx/dt – скорость тепловыделения.

Скорость сажеобразования пропорциональна скорости исчезновения жидких капель вследствие их полного испарения. Параллельно с сажеобразованием протекает процесс выгорания сажевых частиц и уменьшения их объемной концентрации.

Скорость выгорания сажи может быть представлена выражением

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau}\right)_B = 3{,}1\cdot 10^{-6}\, n^{0,5}\, p[C], \qquad (10)$$

где p – текущее давление в цилиндре, МПа; $[C] = C/V$ – текущая концентрация сажи в объеме цилиндра. Скорость изменения концентрации сажи в цилиндре из-за расширения:

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau}\right)_V = 0{,}75\frac{6n}{V}\frac{dV}{d\varphi}C. \qquad (11)$$

Перевод полученного значения концентрации сажи [C], г/м^3, в единицы шкалы Хартриджа осуществляется по уравнению:

$$\text{Hartridge} = 100[1 - 0{,}945\exp(-2{,}4226[C]). \qquad (12)$$

По аналогичным эмпирическим зависимостям концентрация сажи [C] может быть переведена в единицы шкалы Bosch, а также в единицы коэффициента абсолютного светопоглощения K, m^{-1}.

Показатели эмиссии твердых частиц могут быть вычислены по эмпирической формуле Алкидаса [11] в зависимости от дымности ОГ:

$$[PM] = 565\left(\ln\frac{10}{10 - \text{Bosch}}\right)^{1,206}. \qquad (13)$$

В камере сгорания существуют неоднородные по температуре участки. Капли жидкого топлива, попадая на эти поверхности, крекируются, и двигатель работает с повышенной дымностью ОГ. На стадии процесса сгорания углеводородов образуется свободный углерод. Реакция распада происходит с высокими скоростями по сравнению с реак-

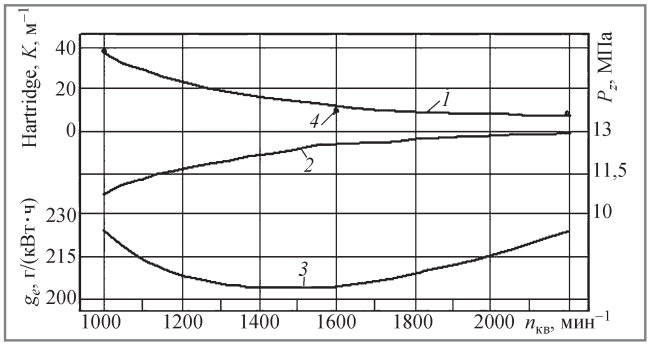

Рис. 12. *Сопоставление расчетных и экспериментальных концентраций сажи по ВСХ:*
1 – дымность (Hartridge); *2* – среднее давление цикла; *3* – удельный расход топлива; *4* – расчет

циями его окисления. С ростом температуры разница между скоростями распада и окисления увеличивается, что является причиной повышенной дымности ОГ дизелей.

Сопоставление результатов расчета концентраций сажи (Hartridge) с результатами измерений по внешней скоростной характеристике приведено на рис. 12.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов концентрации сажи на режимах ВСХ показали высокую их сходимость.

Влияние угла опережения зажигания ($\theta_{заж}$) на показатели работы одноцилиндрового двигателя 1Ч S/D = 70/82 приведено на рис. 13.

Увеличение ($\theta_{заж}$) повышает температуру внутри камеры сгорания (КС) и может довести ее до опасного уровня. При позднем ($\theta_{заж}$) температура в КС снижается. Первичный очаг воспламенения обусловлен пробоем искры между электродами свечи зажигания. Удаляясь от свечи, пламя достигает турбулентной зоны топливного заряда. Фронт пламени начинает дробиться и приобретает ячеистую структуру на участке горения.

Концентрация C_mH_n возрастает при увеличении ($\theta_{заж}$). Уменьшение ($\theta_{заж}$) снижает концентрацию NO_x вследствие уменьшения температуры рабочего цикла двигателя. Параметры ($\theta_{заж}$) выбирают из условий получения максимальной мощности при удовлетворительной топливной экономичности. Величина ($\theta_{заж}$) практически не влияет на содержание CO и CO_2, так как природа их образования связана с составом горючей смеси. При увеличении ($\theta_{заж}$) количество в C_mH_n ОГ пропорционально возрастает и связано с неполнотой сгорания топлива. При уменьшении ($\theta_{заж}$) количество NO_x уменьшается вследствие снижения температуры рабочего цикла. Повышение температуры ОГ из-за уменьшения ($\theta_{заж}$) является благоприятным условием для снижения C_mH_n в ОГ.

Для снижения содержания C_mH_n и NO_x угол опережения зажигания устанавливают возможно более поздним. Повышение температуры ОГ из-за уменьшения ($\theta_{заж}$) также является благоприятным для снижения C_mH_n в продуктах сгорания. Оптимальной величиной с точки зрения g_e является ($\theta_{заж}$), равный 26°. Уменьшение ($\theta_{заж}$) снижает NO_x и C_mH_n и связано с уменьшением максимальной температуры сгорания.

Влияние величины угла впрыскивания запальной дозы на выброс ВВ при работе газодизеля по 13-ступенчатому циклу приведено на рис. 14.

Величина угла опережения впрыска запальной дозы топлива оказывает более сильное влияние на

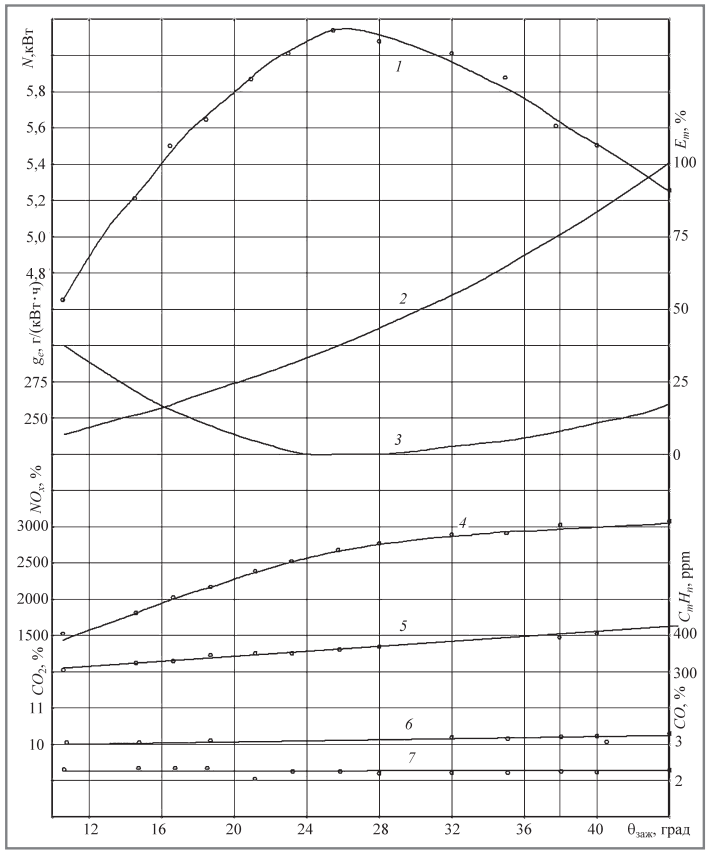

Рис. 13. *Влияние величины угла опережения зажигания на показатели работы одноцилиндрового двигателя при n – 2000 мин; α = 0,9; η_v = 0,725*

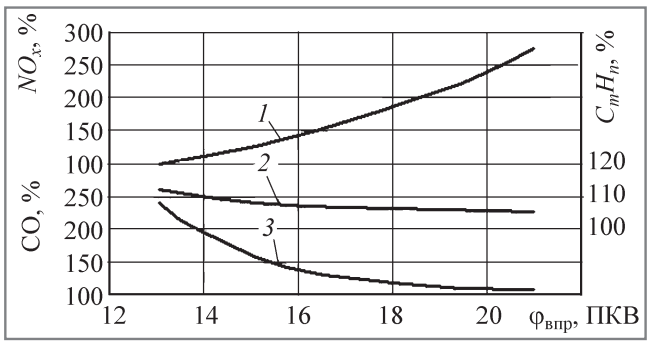

Рис. 14. *Влияние угла опережения впрыска ЗД на выброс ВВ при работе газодизеля 6РЧ (15х12 по 13-ступенчатому циклу) на выброс ВВ:*
1 – NO_x %; 2 – C_mH_n, %; 3 – CO, %

экономические и экологические показатели, происходящие при работе в дизельном режиме. Заметное влияние на выброс NO_x оказывает величина ° ПКВ, равная 2–3 °ПКВ. Увеличение °ПКВ с 13 до 21 °ПКВ снижает выброс CO в 2,5 раза и C_mH_n в 1,1 раза, а содержание NO_x увеличивается в 2,5 раза. Допуск на отклонение угла не должен превышать 1°ПКВ. Для получения хороших результатов установочный угол °ПКВ должен изменяться в зависимости от нагрузки – для данного двигателя с 24° на малых нагрузках и до 13° на больших нагрузках.

Увеличение угла впрыска топлива сопровождается снижением дымности ОГ и окиси углерода. Так, на режимах нагрузок, близких к номинальным, изменение регулировки угла в сторону увеличения приводит к уменьшению содержания CO в ОГ дизелей на 0,071 г/м^3, содержание сажи на 0,166 г/м^{3}дымность ОГ на 0,35 единицы Bosch.

Оптимальную регулировку угла необходимо различать как по топливной экономичности, так и по выбросу отдельных токсичных компонентов, и в первую очередь – NO_x. Уменьшение угла опережения впрыска топлива снижает содержание NO_x в ОГ, так как уменьшается максимальная температура цикла. При этом увеличивается содержание продуктов неполного сгорания – окиси углерода и углеводородов. Анализ влияния угла опережения впрыска топлива на токсичность ОГ дизеля показали, что при уменьшении угла с 30 до 21° п.к.в. до ВМТ выброс NO_x уменьшился на 60 %, мощность дизеля снизилась на 1,8 %, а выброс сажи увеличился в 1,5 раза. Для уменьшения выброса сажи на режиме полной нагрузки рекомендуется одновременно с уменьшением угла опережения впрыска топлива уменьшать на 20–25 % максимальную цикловую подачу.

Измененный угол впрыскивания ЗД в диапазоне 18–24 °ПКВ до ВМТ в зависимости от нагрузки уменьшает расход топлива до 40 г/кВт по сравнению с постоянным углом опережения впрыскивания. Для получения хороших результатов установочный угол опережения впрыскивания запальной дозы (ЗД) должен изменяться в зависимости от нагрузки – от 24° на малых нагрузках и до 13° на больших нагрузках двигателя.

Наиболее простым способом воздействия на токсичность ОГ является изменение регулировок угла опережения начала подачи топлива, который широко применяют в условиях эксплуатации. Угол опережения начала подачи топлива устанавливают путем снятия регулировочных характеристик для каждой марки дизеля, исходя из условий наивысшей возможности топливной экономичности.

Максимальное снижение NO_x на единицу степени РЦ ОГ наблюдается на повышенных нагрузках. Применение РЦ ОГ приводит к запаздыванию начала сгорания и замедлению его развития, что влечет за собой снижение рабочей температуры и сокращение периода, в течение которого максимальные температуры цикла остаются неизменными. Основная масса NO_x образуется в первой половине процесса сгорания. Запаздывание вносит определенный вклад в образование NO_x. Снижение концентрации O_2 и увеличение теплоемкости впускного заряда (за счет H_2O и CO_2) снижает NO_x СУГ.

Влияние состава горючей смеси на выброс вредных веществ в зависимости от способа смесеобразования представлено на рис. 15.

При работе на газовом топливе наблюдается уменьшение количества продуктов неполного сгорания – CO и C_mH_n в ОГ. Одновременно с этим несколько уменьшается и концентрация NO_x в связи с более низкой температурой рабочего цикла.

Содержание CO в ОГ на установившихся режимах составляет 0,5–2,2 % у бензинового двигателя и 0,1–0,6 % – у газового.

Токсичность газового двигателя по основным компонентам соизмерима с токсичностью дизеля. При работе газового двигателя выброс CO и C_mH_n соответственно в 1,5 и 1,7 раза больше, чем у дизеля, а содержание NO_x в 3,0 раза меньше. Это и оп-

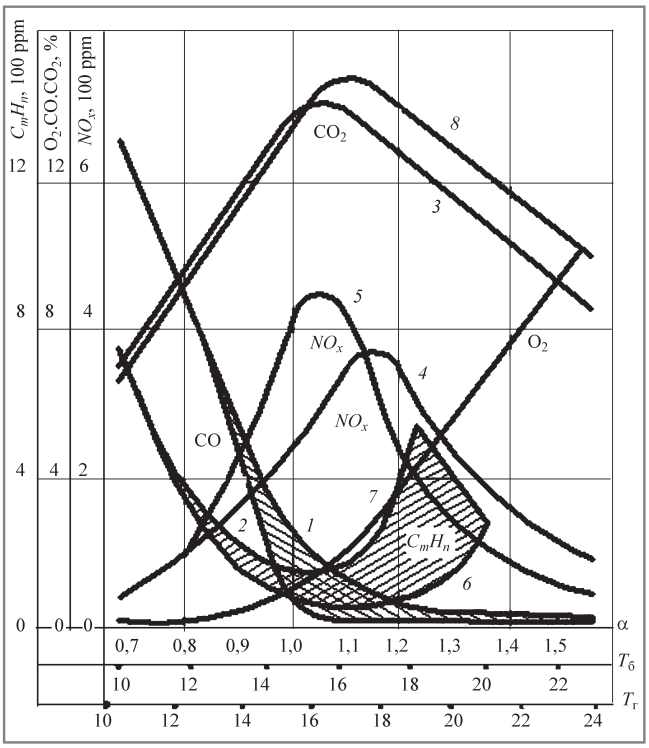

Рис. 15. *Влияние состава газовоздушной и бензовоздушной смеси на выброс ВВ:*
1, 5, 7, 8 – бензин; *2, 3, 4, 6* – газовое топливо

ределяет в целом меньшую суммарную токсичность ОГ по сравнению с дизельным двигателем.

Применение КПГ в качестве моторного топлива в целом снижает выброс CO и CO_2 на 50 %. Кроме того, при сгорании ПГ образуется на 20–25 % меньше CO по сравнению обычными бензиновыми двигателями.

Применение газа в качестве моторного топлива обеспечивает существенное снижение выброса вредных веществ на единицу пути по основным контролируемым компонентам (CO – в 2–4 раза, NO_x ~ в 1,2–2,0 раза и C_mH_n – в 1,1–1,4 раза).

Максимальная неравномерность распределения топлива по цилиндрам у современных карбюраторных двигателей достигает 35 % и более. Отмеченный эффект смесеобразования вызывает увеличение в ОГ CO на 45–55 % и концентрацию C_mH_n на 35–45 % при стехиометрическом составе горючей смеси.

Применение СУГ позволяет расширить предел устойчивой работы на бедных смесях до величины α = 1,58 против α = 1,37 при работе на бензине.

Газовое топливо обеспечивает снижение максимальной неравномерности горючей смеси до 15–20 %. Поэтому использование СУГ в качестве моторного топлива ведет к заметному снижению продуктов неполного сгорания (CO и C_mH_n) в ОГ. Несколько меньше содержится в ОГ и концентраций NO_x, что объясняется малой скоростью сгорания горючей смеси, понижающей максимальную температуру рабочего цикла. Снижение токсичности ОГ по основным контролируемым компонентам достигает CO в 2–4 раза, NO_x – 1,2–2,0 раза и C_mH_n – 1,1 через 2–4 с.

Система питания при работе на бензине допускает максимальное обеднение горючей смеси не более α = 1,0 и исключает возможность работы двигателя при содержании CO в ОГ менее 0,8 %. Выброс C_mH_n при α > 1,0 существенно возрастает. Применение газового топлива расширяет пределы устойчивой работы двигателя на более бедных смесях.

Энергия ЗД топлива в 10^2–10^4 раз больше энергии искрообразования свечи зажигания. Снижение величины ЗД ниже минимального неизбежно приводит к пропускам воспламенения. Высокая энергия ЗД топлива обеспечивает надежное воспламенение бедной газовоздушной смеси, а также подготавливает быстрое сгорание основной порции топлива. Снижение величины запальной дозы ниже минимального уровня неизбежно приводит к пропускам воспламенения или даже невозможности воспламенения газовоздушной смеси.

Работа в газодизельном цикле возможна при больших значениях α, при средних и малых нагрузках обеспечивается высокая энергия источника воспламенения и его многоочаговой формы (факела ЗД). На режимах малых и средних нагрузок при работе в газодизеле (ГД), по сравнению с дизельным топливом, экономичность резко ухудшается и увеличиваются выбросы CO и C_mH_n. Оптимальное значение температуры впрыскивания топлива для дизельного двигателя соответствует 18°, а для газодизеля – 16°. Физико-химические процессы начинают активно протекать с момента φ = 310 °ПКВ. Период индукции (мс) может быть представлен следующей зависимостью:

$$\tau_i = k_д e^{-E_o/RT}, \qquad (14)$$

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

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

Значение коэффициента $K_м$ может быть определено по экспериментальным данным, значение τ_i ГД, работающего при отсутствии подачи КПГ при $Q_{впр}$ в пределах, рекомендуемых заводом-изготовителем, 25–30 °ПКВ. В расчете принимали величину активации $E = 22{,}5 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. При поздней величине угла впрыскивания ЗД $Q_{впр}$= 18 °ПКВ воспламенение газодизельной смеси на режиме p_e происходит через τ_I = 0,8–1,1 мс 7–11 °ПКВ после впрыскивания ДТ и заканчивается условно в интервале 8–11 °ПКВ до ВМТ. За начало $\tau_{iзап}$ принимают $\varphi_о$ – 310–315 °ПКВ до ВМТ, после которого начинают активно протекать предпламенные реакции. В этом случае получаем $\tau_{iзап}$= 3,80–4,20 мс и 34–38 °С, т.е. воспламенение запального топлива происходит за 11–12 °ПКВ до ВМТ (большее значение $\tau_{iзап}$ соответствует $\varphi_о$ = 310°).

Начало процесса сгорания рассчитывают с учетом величины задержки воспламенения. Количество КПГ в газодизеле ограничивают величиной пропусков воспламенения из-за большого значения τ_i при низком цетановом числе (ЦЧ) смеси. Ароматические C_mH_n характеризуют склонность топлива к самовоспламенению. Добавление в КПГ присадок с высоким ЦЧ улучшает эффективность самовоспламенения. ПГ имеет низкую воспламеняемость. Температура самовоспламенения газового топлива составляет 600 К и превышает температуру ДТ в два раза.

Увеличение индукционного периода τ_i горения по мере снижения ЦЧ сопровождается ухудшением пуска двигателя и последующего протекания РП. Надежная работа дизельного двигателя на топливной смеси может быть обеспечена при содержании в ней 15–20 % ДТ. Продолжительность распада струи ЗД не превышает 1,0 мс. Длина распадающейся струи составляет 15 мм.

В ГД сгорание ЗД в силу ее малой величины происходит достаточно быстро до начала активного сгорания газового топлива. Сгорание ДТ происходит при высоких значениях коэффициента избытка воздуха независимо от нагрузочного режима работы двигателя.

Наиболее эффективное горение газообразного топлива происходит в узком диапазоне значений. Газодизельный цикл имеет относительно узкую зону оптимального горения топливовоздушной смеси. Существует возможность улучшения топливной экономичности на режимах малых и средних нагрузок до 25–30 % при одновременном снижении массовых выбросов ВВ.

Воспламенение от сжатия в дизеле ограничивает минимальное значение степени сжатия 13–14 ед. Условия бездетонационной работы газового двигателя не допускают повышения степени сжатия выше 12–13 ед. Возможности работы в газодизельном цикле при больших значениях α при средних и малых нагрузках обеспечиваются высокой энергией источника воспламенения и его многоочаговой формы.

Эффективность сгорания газовоздушной смеси возможна лишь в узком диапазоне α. Поэтому, несмотря на более высокую экономичность на максимальных нагрузках, на режимах малых и средних нагрузок при работе в ГД по сравнению с дизельным топливом экономичность резко ухудшается и увеличиваются выбросы СО и C_mH_n. Влияние величины ЗД дизельного топлива на показатели токсичности ОГ газодизеля показано на рис. 16.

Важным критерием минимальной величины ЗД дизельного топлива является температура носка распылителя форсунки. Температура носика форсунки возросла на 75–100 °С по сравнению с базовой модификацией и достигла максимальной величины, равной 285 °С.

Снижение температуры распылителя форсунки по мере увеличения запальной дозы вполне закономерно, так как происходит улучшение его охлаждения за счет большего количества подаваемого дизельного топлива.

Уменьшение величины ЗД и в особенности при невысокой нагрузке приводит к перепаду температур пояска на величину 80–100 °С. По мере роста величины ЗД температура носика форсунки снижается.

Высокие выбросы NO_x на больших нагрузках определяются ростом P_z и T_z, а также снижением коэффициента избытка воздуха. Высокие ОГ и C_mH_n на малых нагрузках связаны с ростом коэффициента избытка воздуха. В наблюдаемых точках перегиба величина ЗД топлива становится сравни-

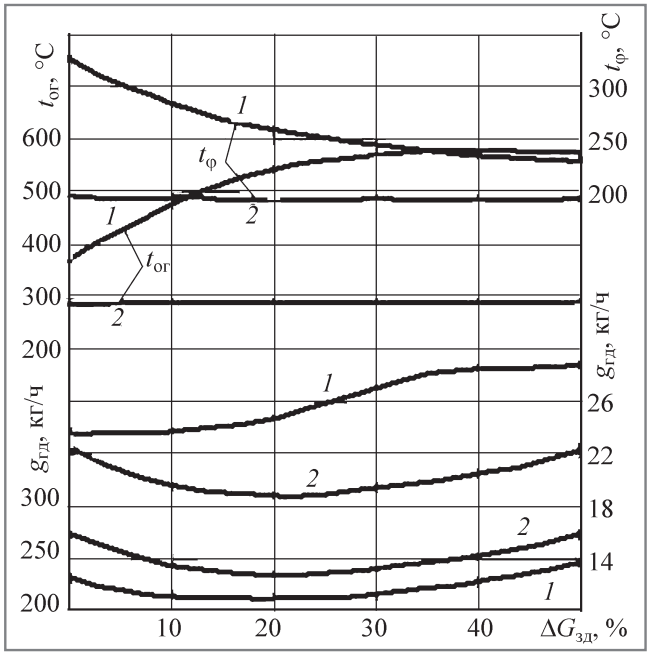

Рис. 16. Влияние величины запальной дозы дизельного топлива на показатели токсичности ОГ газодизеля при различной его нагрузке:
1 – х–х – 0,75 МПа; *2* – о–о – 0,35 МПа;
n = 1800 мин$^{-1}$; $t_ф$ – температура носка форсунки

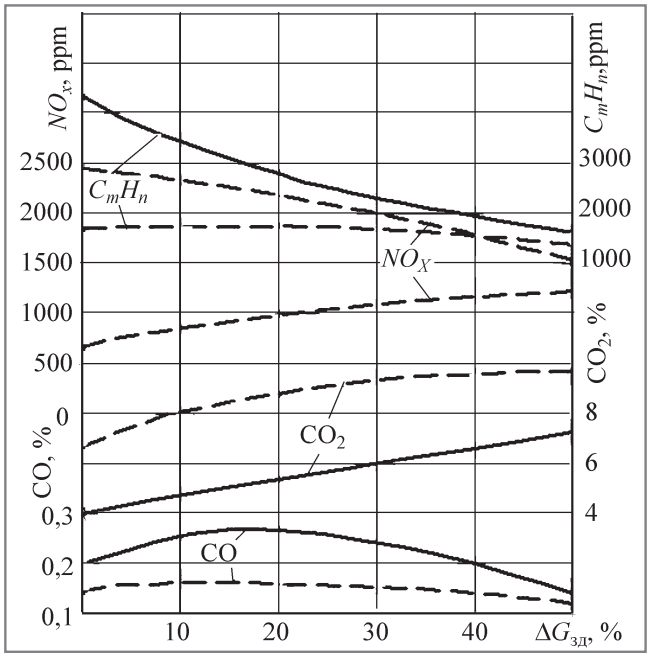

Рис. 17. Влияние ЗД ДТ на показатели токсичности ОГ газодизеля 8ЧЧ (S/D = 120/120) при различной его нагрузке:
1 – х–х– P_e = 0,25 МПа; *2* – о–о – P_e = 0,75 МПа;
n = 1800 мин$^{-1}$

мой с суммарной дозой топлива и процесс стремится к дизельному.

Перевод дизеля на работу по ГД-циклу приводит к снижению в 2,0–2,5 раза выброса сажи и адсорбируемых на ней канцерогенных веществ, к снижению интенсивности уровня шума на 3–4 дБ(А). Влияние ЗД ДТ на показатели токсичности приведено на рис. 17.

Минимальная величина запальной дозы топлива, равная 8–10 %, не соответствует оптимальной, поскольку это ухудшает топливную экономичность на 5–6 %, повышает выброс ВВ и C_mH_n на 5–10 %, что указывает на плохое воспламенение и сгорание газовой смеси. Это также обусловливает повышение температуры носика распылителя на 50 % из-за недостаточного охлаждения топливом.

Увеличение доли газа в газодизельной смеси в диапазоне 0–80 % сопровождается некоторым снижением ее метанового числа и возрастанием задержки воспламенения смеси с 2 до 3,7 мс.

На практике $\Delta G_{зд}$ принимают равной 15–20 %. Величина $\Delta G_{зд}$ оказывает заметное влияние на выброс NO_x и C_mH_n. По мере увеличения ЗД концентрация NO_x (при высоких p_e) и особенно C_mH_n (при малых p_e) в ОГ снижается.

Увеличение $\Delta G_{зд}$ с 10 до 40 % снижает выброс NO_x в 1,5–2,0 и C_mH_n в 3,0–3,5 раза. Концентрация СО в ОГ изменяется незначительно на всех режимах. Минимально возможное $\Delta G_{зд}$ значение дизельных двигателей составляет 15–20 %.

Влияние величины запальной дозы на показатели работы, температуру носка и концентрацию ВВ приведено на рис. 18.

По мере увеличения ЗД на малых нагрузках резко снижается расход топлива и уменьшается содержание C_mH_n и СО в ОГ, концентрация NO_x возрастает незначительно. При этом на больших нагрузках наблюдается более существенное увеличение выбросов NO_x и значительно меньший выброс C_mH_n и СО в ОГ.

Увеличение запальной дозы положительно влияет на температуру носка распылителя форсунки, температура которого при больших нагрузках и частотах вращения достигает 300 °С. Запальную дозу целесообразно увеличивать в области малых и

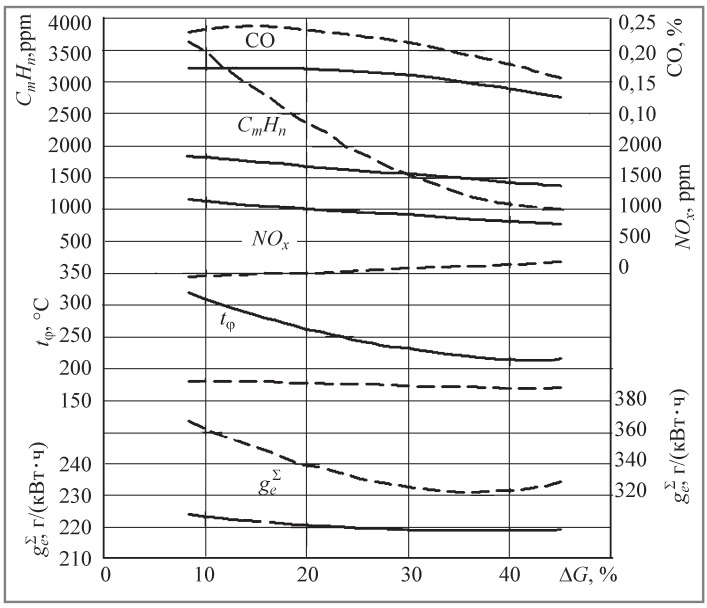

Рис. 18. *Влияние ЗД на показатели работы газодизеля 8VЧ S/D (120/120): n = 1800 мин$^{-1}$; о–о – p_e = 0,75 МПа; х–х – p_e = 0,25 МПа ; $t_ф$ – температура носка форсунки*

больших нагрузок. Минимальное значение ЗД существенно влияет на температуру носка распылителя форсунки, вызывающую закоксовывание отверстий распылителя. В газодизельных двигателях по сравнению с дизельным без изменения угла опережения впрыска на больших нагрузках наблюдается снижение расхода топлива, а на малых – его резкое увеличение до 15 %.

Увеличение ЗД с 8–10 до 14–17 % улучшает топливную экономичность на 11 % на малых и на 5 % на больших нагрузках. Содержание C_mH_n на малых нагрузках снижается на 35 %. Чтобы носовой наконечник распылителя не достигал предельной температуры 280 °С, минимальный расход ДТ через форсунку установлен в объеме 10 мг/цикл. На больших нагрузках наблюдается более существенное увеличение выбросов NO_x и значительно меньший выброс C_mH_n и СО.

Уменьшение величины ЗД топлива, особенно при невысокой нагрузке, приводит к перепаду температур пояска на величину 80–100 °С. С увеличением ЗД температура носка форсунки снижается.

Влияние значения $\Delta G_{ЗД}$ на температуру пояска распылителя наиболее заметно в диапазоне изменения ЗД от 8–10 % до 20 %: $\Delta G_{ЗД}$ = 10 % соответствует 320 °С, а при увеличении $\Delta G_{ЗД}$ до 20 % температура снижается до величины 250–270 °С. Дальнейшее увеличение значения ЗД до 40–50 % снижает температуру до 180–200 °С. Подача топлива на уровне 10 % приводит к недопустимо высокой температуры пояска распылителя из-за недостаточного его охлаждения топливом.

Нагрузочная характеристика газодизеля 8VЧ S/D (120/120) приведена на рис. 19.

По нагрузочной характеристике выброс СО и C_mH_n в ГД выше, чем в дизельном. Выбросы ВВ снижаются по мере уменьшения нагрузки и увеличения α. Высокие выбросы NO_x на больших нагрузках определяются ростом p_z и T_z, а также снижением n. Высокие СО и C_mH_n на малых нагрузках обусловлены повышением α.

Эффективность газодизеля оценивают с помощью коэффициента экологической эффективно-

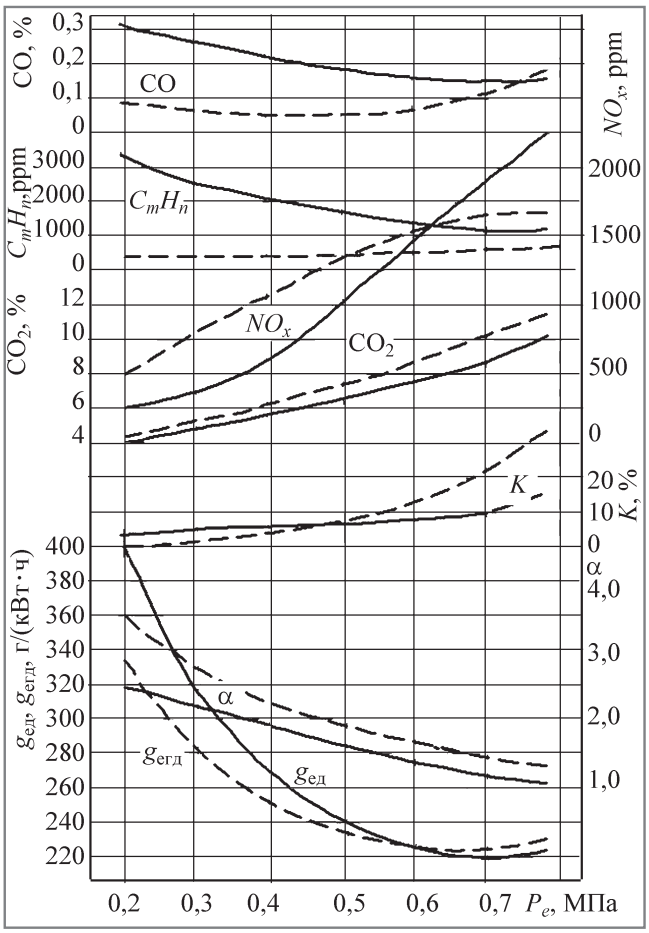

Рис. 19. *Нагрузочная характеристика газодизеля 8VЧ (120/120): о–о – дизельный режим; х–х – газодизельный режим*

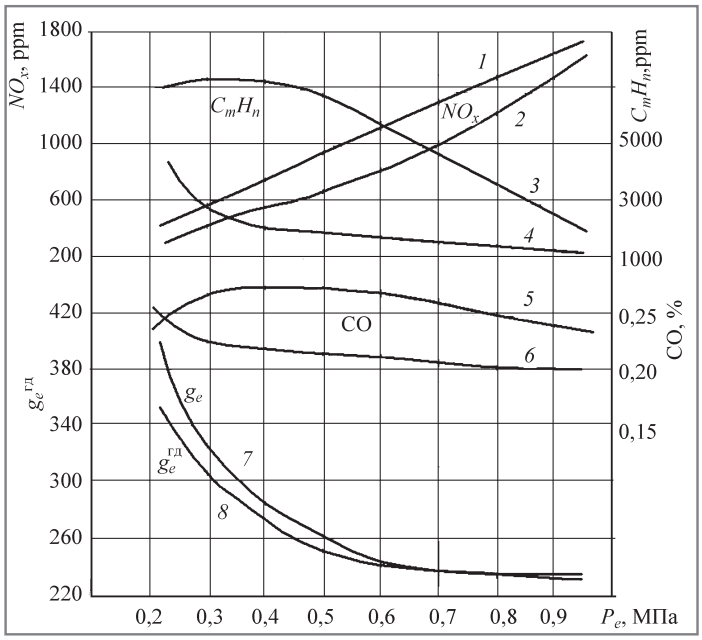

Рис. 20. *Экологические характеристики газодизеля: 1, 3, 5, 7 – ДТ; 2, 4, 6, 8 – ГД*

сти ($K_{эгд}$), представляющего отношение приведенной суммарной токсичности ОГ дизеля к суммарной токсичности ГД:

$$K_{эгд} = \frac{\Sigma_{in} T_{дтсо}}{\Sigma_{in} T_{гдсо}} \le 1{,}0, \qquad (15)$$

где $T_{дтсо}$ – приведенная суммарная токсичность ОГ дизеля; $T_{гдсо}$ – приведенная суммарная токсичность дизеля.

Коэффициент $K_{эгд}$ изменяется в диапазоне 1–2. Он представляет собой количество воздуха [м^3], необходимого для разбавления ОГ до безвредного состояния. На режимах ускорения ГД обеспечивает снижение дымности ОГ в 2,7 раза по отношению к базовому дизельному двигателю, а на режиме максимальной частоты вращения колевала – снижение в 3 раза. На установившихся режимах показатели дымности ГД в 1,7 раза меньше по сравнению с дизельным режимом. На режимах M_{emax} дымность ОГ при работе ГД значительно меньше дизельного двигателя.

При работе ДВС без коррекции ЗД топлива составляет 15,4–21,6 %, а с коррекцией – 15,1–20,2 %, соответственно расход газа без коррекции ЗД равен 25–35,5 м^3/100 км, а с коррекцией достигает 24,5–38,5 м^3/100 км топлива на 75–80 % за счет замещения газом. Перевод дизеля на работу по ГД циклу приводит к снижению в 2,0–2,5 раза выброса сажи и к снижению адсорбируемых на ней канцерогенных веществ, к снижению на 3–4 дБ(А) уровня шума. Дымность ОГ при использовании метана снижается в 2–2,5 раза и не превышает 25 %. По мере снижения нагрузки происходит ухудшение экономических показателей. Работа двигателя в ГД-режиме способствует снижению уровня дымности ОГ в 1,8–2,2 раза, что обусловлено уменьшением ДТ в ГД-режиме.

Наиболее эффективно горение газообразного топлива происходит в узком диапазоне значений коэффициента избытка воздуха, поэтому ГД имеет узкую зону оптимального сгорания газовоздушной смеси. Суммарный коэффициент избытка воздуха α^{Σ} равен 1,65, а индикаторный расход топлива изменяется в относительно узких пределах 125–130 г/кВт·ч при частоте вращения 1100–1900 мин$^{-1}$.

Экологические характеристики газодизеля приведены на рис. 20.

Применение газодизельной аппаратуры обеспечивает снижение продуктов неполного сгорания. Экологические характеристики газодизеля 8VЧ S/D(120/120) при работе на дизельном и газодизельном топливе приведены на рис. 21.

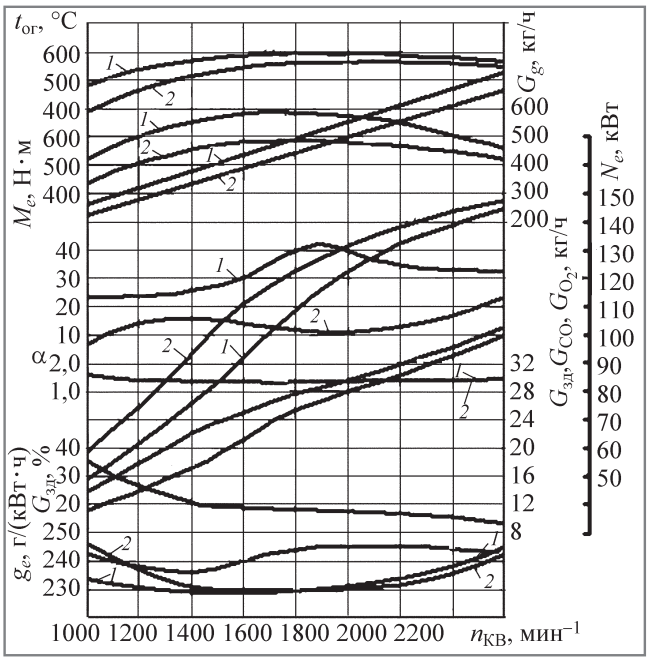

Рис. 21. *Экологические характеристики газодизеля 8VЧ (12/12); полная нагрузка*

Температура ОГ на эксплуатационных режимах соответствует 300–420 °С. Максимальная температура ОГ достигает 550–580 °С. Скорость сгорания газодизельной смеси несколько меньше по сравнению с дизельной. Высокая энергия ЗД обеспечивает надежное воспламенение бедной газовоздушной смеси, а также быстрое сгорание основной порции топлива.

При работе на ДТ газодизель развивает максимальную мощность 146 кВт при расходе топлива 35,9 кг/ч. [12]. Минимальный удельный расход топлива по скоростной характеристике составил 230 г/(кВт·ч), а на номинальном режиме – 245 г/(кВт·ч). Дымность ОГ при работе на ДТ по скоростной характеристике не превышала 43 %. ГД-режим сопровождается повышением мощности и крутящего момента во всем диапазоне ВСХ. При этом наблюдается небольшое повышение температуры ($t_{ог}$) ОГ. На режимах малой частоты вращения КВ двигателя расход топлива ГД несколько выше, наблюдается снижение дымности ОГ во всем диапазоне скоростной характеристики в 2–3 раза и уровень дымности не превышает 20 %.

При работе на смешанном виде топлива уровень дымности снижается на 15–20 % на средней величине частоты вращения коленвала двигателя при работе на ВСХ и снижается до 80,0 % на режиме холостого хода и частичных нагрузок.

Выброс C_mH_n и NO_x при работе на смешанном топливе уменьшается во всем диапазоне ВСХ. Температура поверхности при работе по ВСХ ГД ниже по сравнению с дизельным двигателем. Для точки, расположенной в области клапанной перемычки, разница составляет свыше 10 °С. При работе на газе перепад температур в различных местах поверхности головки цилиндра ниже, чем при работе на ДТ.

Анализ норм токсичности и дымности ОГ показывает, что доля NO_x в ОГ достигает 65 %. Выброс ВВ газодизеля 8VЧ S/D(12/12) составляет: СО – 14 г/(кВт·ч); C_mH_n – 3,5 г/(кВт·ч) и NO_x – 18 г/(кВт·ч). Максимальное значение ЗД топлива составляет 20 % общего расхода топлива при работе двигателя по ВСХ ГД. Мощность двигателя изменяется в диапазоне от 160–152 кВт при изменении температуры газа от 15 до 30 °С. Оптимальная величина температуры газа, поступающего во впускной тракт, составляет 18 °С.

Снижение величины выброса СО при работе на смешанном топливе при работе по ВСХ с малой частотой вращения КВ двигателя составляет 25–30 % и увеличивается на 1,5 % в области высокой частоты вращения коленвала двигателя. Выброс CO_2 характеризует полноту сгорания топлива.

Работа двигателя в зоне оптимального состава горючей смеси сопровождается существенным снижением выбросов СО и C_mH_n. Дымность ОГ при использовании метана снижается в 2,0–2,5 раза и не превышает 25 %. На частичных нагрузках происходит некоторое ухудшение экономических показателей по мере снижения нагрузки, что связано с ухудшением протекания процесса сгорания.

Горение газового топлива имеет более плавный характер благодаря одновременному горению газового и ЗД дизельного топлива. В ОГ метан составляет 90–95 % C_mH_n.

ГД режим уменьшает дымность в 2–3 раза, а концентрацию CO_2 понижает на 1,5–2 %. При этом удельный расход топлива снижается на 2–6 г/(кВт·ч). Однако содержание СО и C_mH_n в ГД двигателе выше, чем в дизельном двигателе. При номинальном режиме работы ГД выброс сажи по сравнению с ДТ несколько уменьшается. Работа ГД сопровождается повышенным выбросом C_mH_n и СО по сравнению с аналогичными параметрами дизельного двигателя. Выброс C_mH_n и NO_x при работе на смешанном топливе снижается во всем диапазоне ВСХ. Образование сажи происходит в течение всего периода сгорания топлива. Состав горючей смеси имеет важное значение на баланс реакции крекинга и сгорания углеводородов.

Изменение величины $\Delta G_{зд}$ в пределах 10–40 % оказывает заметное влияние на выброс NO_x и C_mH_n. По мере увеличения ЗД концентрация NO_x (при высоких P_e) и особенно C_mH_n (при малых P_e) в ОГ снижается. Увеличение $\Delta G_{зд}$ с 8 до 45 % сопровождается снижением выброса NO_x в 1,5–2,0 раза и C_mH_n – в 3,0–3,5 раза. Концентрация СО в ОГ на всех режимах меняется незначительно при изменении величины ЗД.

Предельные значения содержания ВВ по тестам (Правило N 49 ECE) приведены в таблице.

Характеристики токсичности газодизеля 6РЧ S/D (15/12) приведены на рис. 22.

При номинальном режиме работы на ГД-режиме выброс сажи по сравнению с ДТ несколько уменьшается. Снижение дымности ОГ при работе

Токсичность отработавших газов дизеля

Содержание г/(кВт·ч)	Евро-5	Газовый двигатель	Газодизель	Дизель с системой нейтрализации
CO	4,0	0,07	2,5	0,56
CH	0,55	0,34	0,12	0,02
NO_x	2,0	2,13	0,25	3,28
PM (твердые частицы)	0,5	0	0,35	0,018

на смешанном виде топлива снижается на 15–20 % на средней частоте вращения коленвала двигателя при работе на ВСХ и снижается до 80 % на режимах ХХ и частичных нагрузок.

Подобная закономерность обусловлена улучшением смесеобразования. Выброс C_mH_n и при работе на смешанном топливе снижается во всем диапазоне ВСХ.

Высокие выбросы NO_x на больших нагрузках определяются ростом P_z и T_z, а также снижением коэффициента избытка воздуха. Высокие CO и C_mH_n на малых нагрузках связаны с ростом коэффициента избытка воздуха. В наблюдаемых точках перегиба величина ЗД топлива становится сравнимой с суммарной дозой топлива и процесс стремится к дизельному.

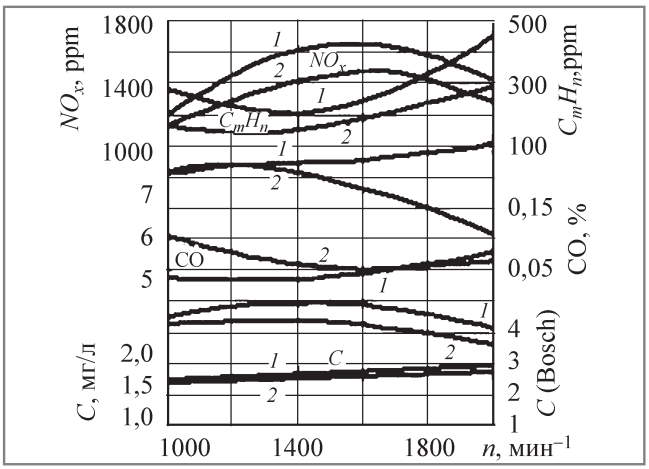

Рис. 22. Характеристики токсичности газодизеля 6РЧ S/D (15/12)

Концентрация NO_x при смешанном регулировании возрастает, что связано с улучшением протекания процесса сгорания при коэффициентах избытках воздуха, близких к оптимальному. Дымность ОГ при использовании метана снижается в 2–2,5 раза и не превышает 25 %. Относительное сравнение величин выбросов NO_x, C_mH_n и CO при работе двигателя в дизельном режиме и в ГД показало, что при газодизельном процессе величина ЗД топлива неоднозначно влияет на токсичность ВВ.

При умеренной степени рециркуляции 5–15 % ОГ и сохранении исходными M_e, в двигателе достигаются весьма низкие удельные выбросы NO_x = = 4,5–2,5 г/(кВт·ч) при обеспечении приемлемого уровня дымности ОГ, что является важнейшим преимуществом РЦ ОГ.

Скорость сгорания газодизельной смеси несколько меньше по сравнению с дизельной. Подобные закономерности сопровождаются улучшением экологических показателей современных ГД. Переход двигателя на ГД-режим сопровождается повышением мощности крутящего момента во всем диапазоне внешней скоростной характеристики. При этом наблюдается небольшое повышение температуры ОГ ($t_{ог}$).

Удельный расход топлива при работе на ГД снижается практически во всем диапазоне. Однако на режимах малой частоты вращения коленвала двигателя расход топлива на ГД-режиме несколько выше. На ГД наблюдается резкое снижение дымности ОГ во всем диапазоне скоростной характеристики в 2–3 раза и не превышает 20 %.

Применение смешанного регулирования топливоподачи позволяет улучшить топливную экономичность ГД на режимах малых и средних нагрузок до 25–30 % при одновременном снижении выброса ВВ.

Максимальная величина ЗД топлива составляет 20 % от величины общего расхода топлива при работе двигателя по внешней скоростной характеристике ГД. Температура газа, поступающего в двигатель, существенно влияет на мощностные показатели двигателя. Распределение температур по цилиндрам ГД существенно улучшается по сравнению с базовым дизелем.

Продолжительность впрыска должна быть увеличена, что улучшает воспламенение газовоздушной смеси и снижает тепловую напряженность распылителя форсунки.

При равных эффективных показателях ГД имеет улучшенную форму ВСХ. Подбор оптимального закона подачи газовой и жидкой фаз топлива, а также применение РЦ позволяют снизить расход топлива на величину до 40 г/(кВт·ч), а также сократить массовый выброс ВВ от неполного сгорания топлива в 5–7 раз и обеспечить выполнение перспективных норм по выбросу ВВ ниже уровня требований Правил EECR N49.03 (CO – 1 г/(кВт·ч), C_mH_n – 0,5 г/(кВт·ч) и NO_x – 2 г/(кВт·ч) без применения специальных антитоксичных систем.

Изменение $\Delta G_{зд}$ оказывает заметное влияние на выброс NO_x и C_mH_n. По мере увеличения запальной дозы концентрация NO_x (при высоких P_e) и особенно C_mH_n (при малых P_e) в ОГ снижаются.

Рециркуляция ОГ представляет собой наиболее эффективный метод снижения NO_x без существенного увеличения образования сажи в двигателе. Величина ЗД оказывает заметное влияние на выброс ВВ.

Наземные транспортные средства с газовыми двигателями соответствуют экологическому стандарту "Евро-5". Наиболее эффективным методом снижения выбросов NO_x газовых двигателей является система РЦ ОГ и уменьшение угла опережения зажигания.

Требования экологического стандарта OBD–II и EOBD предполагают приоритетное определение неисправностей системы РЦ, отказ которой неизбежно приводит к повышению выброса ВВ и прежде всего NO_x.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ерохов В.И.** Технико-эксплуатационные показатели газовой аппаратуры // Журнал "АвтоГазоЗаправочный Комплекс+Альтернативное топливо". 2003. № 4 (10). С. 68–70.

2. **Автомобильный справочник.** Перевод с англ. М.: Изд-во "За рулем". 2000. 896 с.

3. **Автомобили** КАМАЗ 65115, 65116 с газовым двигателем. 65115-39020001 РТ, ответственный редактор Д.Х. Валеев, 2010. 79 с.

4. **Ерохов В.И.** Экологическая эффективность газобаллонного автомобиля на компримированном природном газе. Журн. "Транспорт на альтернативном топливе", 2017. № 3. С. 57–66.

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

6. **Needham J.R., Doyle D.M., Nicol A.J.** The Low NOx Truck Engine // SAE Technical Paper Series. 1991. № 910731. 10 p.

7. **Малов Р.В., Ерохов В.И. и др.** Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. М.: Транспорт, 1982. 200 с.

8. **Mattes P., Remmeils W., Sudmanns H.** Untersuchungen zur Abgasruckfuhrung am Hochleistungsdieselmotor // MTZ. 1999. Jg. 60. № 4. S. 234–243.

9. **Zelenka P., Aufinger H., Reczek W., Cartellieri W.** Colled EGR – A key technology for future efficient HD diesels // SAE Technical Paper Series. 1998. № 980190. 13 p.

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

11. **Alkidas A.C.** Relationship between smoke measurements and particulate measurements. SAETechn.Pap.Ser., 1984, N 840412, 9 p.

12. **Молибога А.Г., Хафизов Р.Х.** ОАО "КАМАЗ": решение проблем экологии больших городов России. Журнал "Транспорт на альтернативном топливе". 2010. № 6 (18). С. 19–21.

УДК 621.433.2, 621.436

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ИЗ БИОМАССЫ В ГАЗОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ*

В.А. Марков, д-р техн. наук; **А.Ю. Чирков,** д-р физ.-мат. наук, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
В.М. Зайченко, д-р техн. наук; **А.И. Цыплаков, Л.Б. Директор,** д-р техн. наук; Объединенный институт высоких температур (ОИВТ) РАН, г. Москва

Показаны преимущества использования газообразных топлив в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Рассмотрены технологии получения газообразных топлив из биомассы. Представлен состав и физико-химические свойства генераторного газа, получаемого из органических возобновляемых энергоресурсов. Дан сравнительный анализ свойств различных газообразных топлив.

Ключевые слова: *попутный нефтяной газ; физико-химические свойства; дизельный двигатель; газодизельный двигатель; дизельное топливо.*

USING GENERATOR GAS OF BIOMASS IN GAS PISTON POWER PLANTS

Markov V.A., Dr. of techn. sciences; **Chirkov A.Yu.,** Dr. of phis.-mat. sciences; **Zaichenko V.M.,** Dr. of techn. sciences; **Tsyplakov A.I., Direktor L.B.,** Dr. of techn. sciences

Advantages of using gaseous fuels in reciprocating internal combustion engines are shown. Technologies of getting gaseous fuels of biomass are considered. Composition and physicochemical properties of generator gas produced from organic renewable resources are presented. A comparative analysis of properties of various gaseous fuels is given.

Keywords: *associated petroleum gas; physicochemical properties; diesel engine; gas-diesel engine; diesel fuel.*

Моторные топлива, получаемые из альтернативных сырьевых ресурсов, находят все большее применение в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [1–3]. Эти топлива получают из различных сырьевых ресурсов и они имеют очень разнообразные физико-химические свойства. Альтернативные топлива можно разделить на четыре группы (рис. 1) [3–5]. К первой группе альтернативных топлив относятся топлива, получаемые из нефтепродуктов, с добавками топлив ненефтяного происхождения (спирты, эфиры, растительные масла и их сложные эфиры, вода, растворы химически активных веществ) или других углеводородов. Такие добавки могут быть очень значительны и превышать объем нефтяного топлива. Эти смеси называют смесевыми или композитными топливами. По своим эксплуатационным свойствам смесевые топлива могут быть близки к нефтяным дистиллятным топливам, особенно при небольшом объеме добавки альтернативного топлива.

Вторую группу альтернативных топлив составляют синтетические жидкие топлива, идентичные или близкие по составу к традиционным нефтяным топливам. Их получают путем переработки жидкого, газообразного или твердого сырья: из тяжелых нефтей, природных битумов, каменного и бурого углей, горючих сланцев, а также из метанола. Свойства этих топлив достаточно близки к свойствам нефтяных топлив.

В третью группу альтернативных топлив входят жидкие ненефтяные топлива, существенно отличающиеся по физико-химическим, моторным и эксплуатационным свойствам от традиционных топлив. Это спирты, эфиры, растительные масла и их сложные эфиры. К этой же группе топлив можно отнести водотопливные эмульсии, водоугольные суспензии и различные композиции других несмешиваемых топлив.

К четвертой группе альтернативных топлив можно отнести топлива, находящиеся в газообразном состоянии. Это природный газ (компримированный или сжиженный), сжиженный нефтяной газ (пропан-бутановые смеси), водород, аммиак, диметиловый эфир, вторичные газы (генераторный газ, биогаз, синтез-газ).

К преимуществам использования газообразных топлив в поршневых двигателях внутреннего сгорания, в частности в дизелях, следует отнести лучшее качество процесса смесеобразования, поскольку газообразное топливо и окислитель (кислород воздуха) находятся в одном агрегатном состоянии. Такое улучшение качества процесса смесеобразования позволяет увеличить полноту сгорания топлива и, как следствие, улучшить показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ). Применение газообразного топлива исключает попадание жидкого топлива на стенки камеры сгорания и разжижение моторного масла. В результате улучшаются условия смазки деталей двигателя, увеличиваются срок их службы и периодичность смены моторного масла.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) – проект № 17-08-01233 "Моделирование, экспериментальное исследование и оптимизация рабочих процессов в перспективных газопоршневых двигателях при работе на попутном нефтяном газе" (2017–2019 гг.).

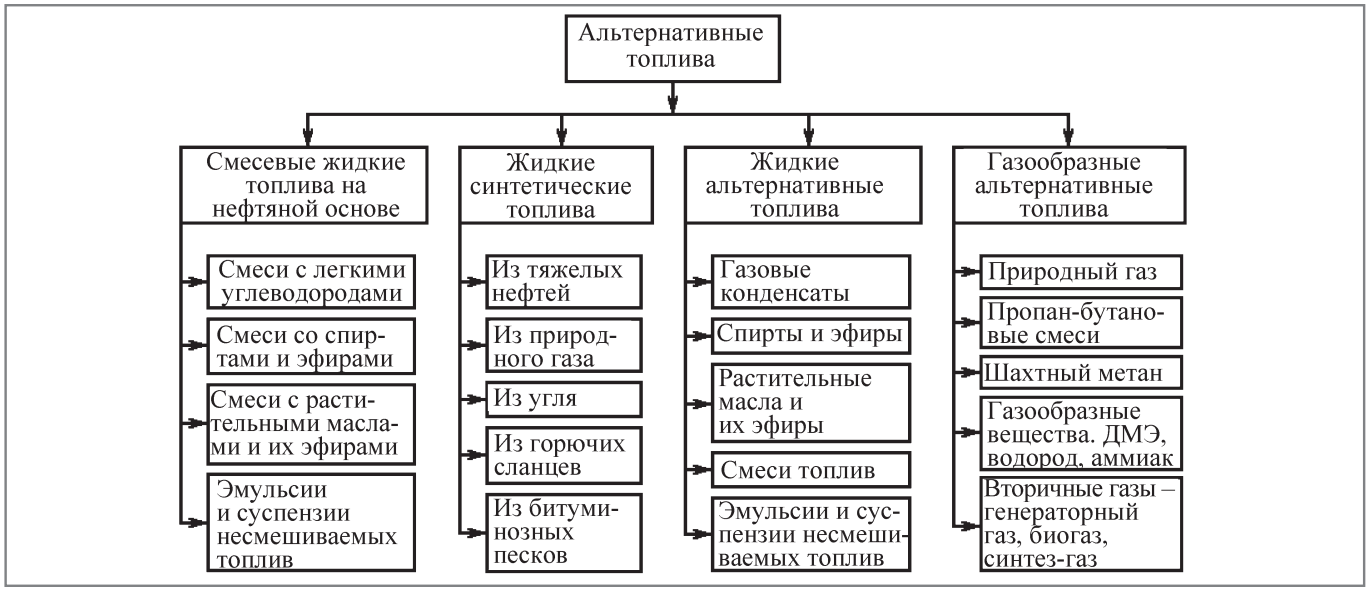

Рис. 1. *Классификация альтернативных моторных топлив*

При использовании газообразного топлива в дизелях упрощается система топливоподачи (при организации чисто газового цикла двигателя).

Значительным топливно-энергетическим ресурсом для производства моторных топлив являются биомасса и продукты ее переработки. При этом необходимо отметить возобновляемость этого источника энергии. Ежегодно в мире образуется 170–200 млрд т растительной биомассы (в пересчете на сухую массу), что энергетически эквивалентно 70–80 млрд т нефти [6, 7]. Используется лишь небольшая ее часть. При современном уровне развития техники имеется возможность дополнительного использования биомассы (еще около 2,5–5 %) для производства моторного топлива, что эквивалентно 2–4 млрд т нефти или 3–6 млрд т угля ежегодно. Представленные на рис. 2 данные о динамике изменения объемов использования биомассы как топлива в различных странах мира свидетельствуют о том, что последние годы характеризуются быстрым ростом потребления энергоносителей, производимых из биомассы (на рис. 2 учтены не только моторные топлива, но и другие виды биотоплив).

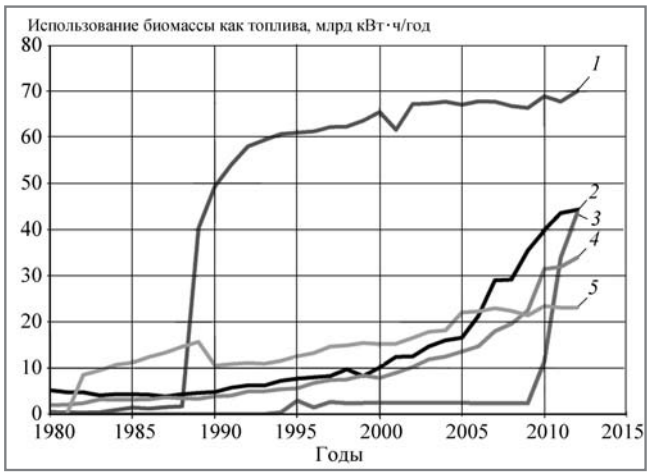

Рис. 2. *Динамика изменения объемов использования биомассы как топлива в различных странах:*
1 – США; *2* – Германия; *3* – Китай; *4* – Бразилия; *5* – Япония

Кроме возобновляемости биотоплив следует отметить и их хорошие экологические качества, причем не только на стадии их использования в энергетических установках, но и на стадиях производства, хранения и транспортировки топлив. Процессы производства биотоплив, как правило, являются экологически чистыми. В отличие от нефтепродуктов, при попадании биотоплив в почву и водоемы они разлагаются в течение нескольких недель. При сжигании биотоплив обычно уменьшаются выбросы в атмосферу с ОГ продуктов неполного сгорания (несгоревшие углеводороды, сажа). Кроме того, сжигание биотоплив обеспечивает кругооборот углекислого газа в атмосфере – выделяющийся при сгорании биотоплив углекислый газ потребляется при выращивании растений, используемых для производства биотоплив.

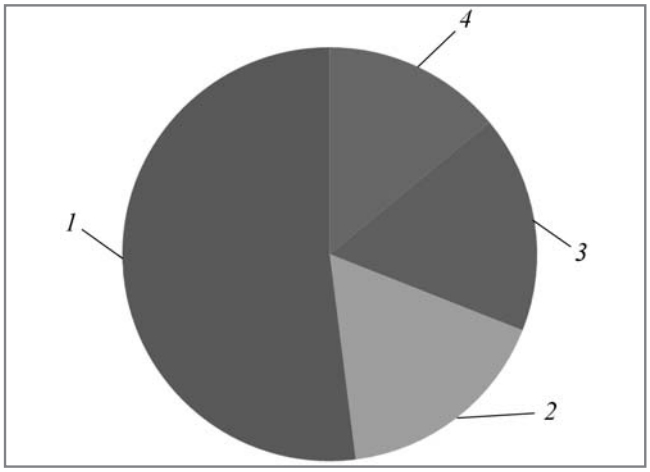

Рис. 3. Структура методов снижения выбросов углекислого газа:
1 – повышение топливной экономичности двигателей (52 %); *2* – применение биотоплив (17 %); *3* – применение электромобилей и автомобилей с комбинированными (гибридными) энергетическими установками (17 %); *4* – применение водородных топливных элементов (14 %)

В связи с этим использование биотоплив рассматривается как эффективное средство борьбы с выбросами углекислого газа, являющегося основным парниковым газом [4, 8, 9]. Об этом свидетельствует представленная на рис. 3 структура методов снижения выбросов углекислого газа, в соответствии с которой применение биотоплив наряду с повышением топливной экономичности двигателей является значимым фактором борьбы с парниковым эффектом [10].

При сравнении характеристик различных видов нефтяных и альтернативных топлив обычно учитывается целый комплекс показателей. Но, в первую очередь, необходимо оценить отличия свойств альтернативного топлива от свойств традиционных нефтяных топлив. Для такого сравнения различных топлив в табл. 1 приведены физико-химические свойства традиционных нефтяных и альтернативных топлив для ДВС [3].

Расширяющееся применение газообразных топлив обусловлено необходимостью расширения энергетической базы для автомобильного транспорта и снижения его вредного воздействия на окружающую среду. Перспективно внедрение газовых и газодизельных двигателей в сельскохозяйственном производстве, позволяющее снизить расходы на покупку топлив для сельхозтехники и улучшить ее экологические характеристики. Экономически оправдано использование газовых топ-

Таблица 1

Физико-химических свойствах нефтяных и альтернативных топлив для автомобильных ДВС и двигателей сельскохозяйственных машин

№	Наименование показателя	Бензин	Дизельное топливо	Метанол	Этанол	СПГ (метан)	Водород	ДМЭ
1	Химическая формула	Набор углеводородов		CH_3OH	C_2H_5OH	CH_4	H_2	CH_3OH
		C_5–C_{10}	C_{12}–C_{20}					
2	Молярная масса	100–150	200–250	32	46	16	2	46
3	Плотность, кг/м^3	720–750	820–850	792	789	420 (жидкий)	70 (жидкий)	670 (жидкий)
4	Температура начала кипения (ожижения), °С	40–180	180–350	65	78	–162	–253	–25
5	Температура самовоспламенения	350–410	230–250	465	425	540	585	235
6	Октановое число (моторный метод)	82–98	–	82–92	90–95	105–110	70	–
7	Цетановое число	5–18	40–50	5	8	3	0	55–60
8	Концентрационные пределы взрывоопасности с воздухом, % об.	0,6–8,0	0,6–6,5	5,5–37	3,5–15	0,4–16,5	4,0–77,0	1,7–36,0

Окончание табл. 1

№	Наименование показателя	Бензин	Дизельное топливо	Метанол	Этанол	СПГ (метан)	Водород	ДМЭ
9	Стехиометрическое соотношение воздух/топливо (кг/кг)	14,2	14,3	6,5	9,0	17,2	34,4	9,0
10	Низшая теплота сгорания МДж/кг	44–48	42–44	20	27	50	120	28
11	Средний эффективный КПД ДВС, %	30–35	40–45	30–40	30–40	40–45	45–50	40–45
12	Средняя розничная стоимость*, руб/кг	27–30	23–25	14–18	5–20	2–6	125–150	2–3
Примечание: * – данные 2010 г.								

лив на железнодорожном и водном транспорте, в авиации. Целесообразен перевод на газовые топлива двигателей дизель-генераторных установок и других стационарных дизелей. Поэтому более широкое распространение получают газовые двигатели (двигатели, работающие на газовом топливе) и газожидкостные двигатели (двухтопливные двигатели, работающие на газовом топливе и дизельном топливе или бензине). Это объясняется указанными выше преимуществами газообразных топлив. По удельной мощности и топливной экономичности лучшие современные газовые и газожидкостные двигатели близки к жидкотопливным, а по токсичности ОГ и износу эти двигатели имеют значительные преимущества.

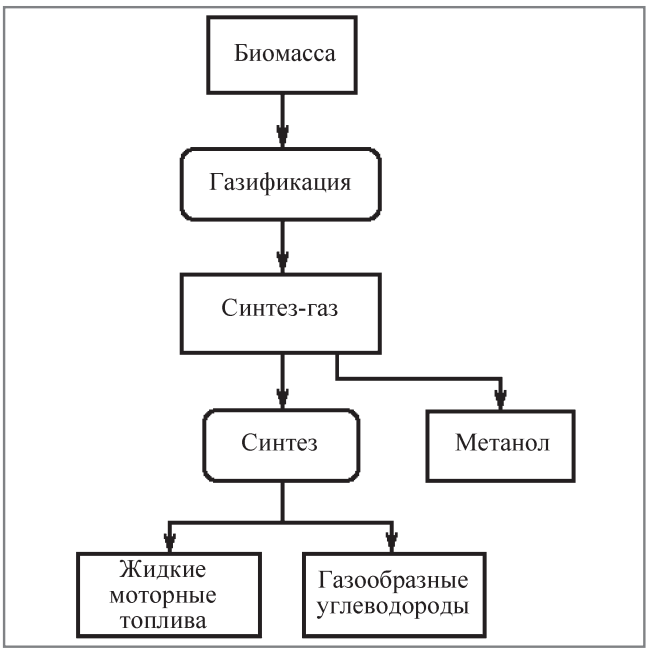

Рис. 4. *Схема синтезирования топлив из биомассы*

Известны различные методы получения моторных топлив из биомассы [3, 4, 6, 7]. Моторные топлива могут быть получены из биомассы путем ее газификации водяным паром при температурах t = 1000–1200 °С и дальнейшего синтеза топлив из синтез-газа при повышенных температуре и давлении (t = 200 °С, p = 1 МПа) в присутствии катализатора – кобальта Co (рис. 4). Эти процессы называют термохимическими реакциями (ТХР) или процессами. Из 1 кг сырья синтезируют 120–150 г жидких углеводородов – компонентов синтетических моторных топлив. Таким же образом получают газообразные углеводороды, которые могут быть использованы и в качестве самостоятельных топлив. Кроме того, биомасса является сырьем для производства спиртов (этанола, метанола и др.), которые применяются в качестве кислородсодержащих топлив для ДВС или для получения синтетических моторных топлив.

Отдельной стадией газификации биомассы является прилолиз – термическое разложение органических соединений при недостатке кислорода [4, 11, 12]. Пиролиз осуществляется при температурах 800–900 °С и при давлениях, близких к атмосферному. Выделяют первичные пиролизные реакции (разрушение тяжелых углеводородных молекул) и вторичные (синтез тяжелых углеводородов из низкомолекулярных непредельных углеводородов – эти реакции протекают преимущественно на поздних стадиях пиролиза). В результате пиролиза получают пиролизный газ, легкую

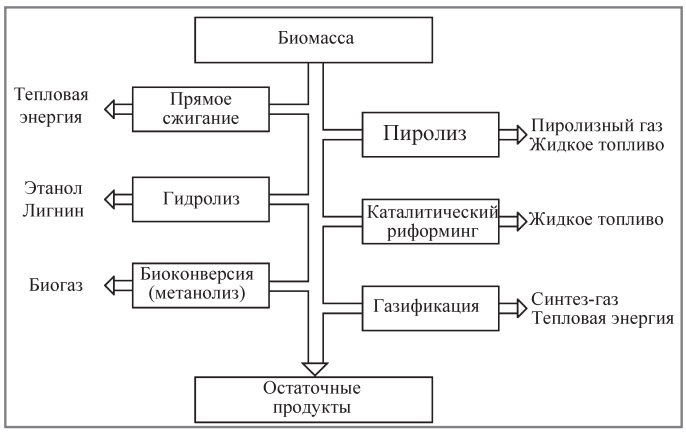

Рис. 5. *Основные технологии переработки биомассы*

смолу (пиробензин) и тяжелую пиролизную смолу (температура начала кипения около 200 °С). Возможно выделение из пиролизного газа водорода. Остаточный продукт пиролиза – пиролитический кокс. Основные технологии переработки биомассы представлены на рис. 5 [4].

В последнее время в связи с развитием средств малой распределенной энергетики возрос интерес к автономным энергетическим установкам, использующим газопоршневой двигатель в качестве привода электрогенератора. Такие установки имеют ряд несомненных достоинств: относительно низкие удельные капитальные затраты, короткие сроки монтажа, быстрый запуск, простота обслуживания, высокий КПД на режимах с частичной нагрузкой, мобильность [13]. Наибольшей топливной экономичностью отличаются энергетические установки, оснащенные теплообменными агрегатами для утилизации тепла (мини-ТЭЦ) [14], которые появились еще в начале XX века [15]. Отдельным направлением указанной технологии получения электроэнергии и тепла является использование в качестве моторного топлива газообразных продуктов термохимической конверсии биомассы (торфа, древесных, сельскохозяйственных отходов, а также органического мусора).

Генераторный газ как моторное топливо использовался с момента появления ДВС. Первый промышленный двигатель, предложенный французским изобретателем Этьенном Ленуаром в 1860 г., работал на светильном газе [3]. Это был двухтактный двигатель с золотниковым газораспределением и воспламенением газа от электрической искры. В 1876 г. немецкий инженер Николаус Август Отто создал четырехтактный двигатель, работавший на смеси светильного газа с воздухом и потребляющий в два раза меньше газа, чем двигатель Ленуара. В этом двигателе использовались также генераторный, доменный, природный и попутный нефтяной газы. Благодаря этому двигатель получил широкое распространение в промышленности. Светильный газ применялся в качестве топлива в одном из первых образцов двигателей, созданных Рудольфом Дизелем. В России производство газовых двигателей началось в 1908 г. на Коломенском заводе. Перед первой мировой войной Харьковский паровозостроительный завод производил газогенераторные двигатели единичной мощностью 3200 л. с. [16]. В настоящее время в странах Евросоюза, США, Индии и в ряде других стран приняты национальные программы по производству моторного биотоплива (биоэтанол, биодизель, генераторный и пиролизный газы) для использования его в ДВС, в том числе и для производства электроэнергии [9, 17–20].

Россия обладает самыми большими в мире запасами биомассы. По существующим оценкам, на территории РФ сосредоточено около 25 % мировых запасов древесины и 45 % мировых запасов торфа [21]. Ежегодный прирост запасов торфа составляет 260–280 млн т у.т. (тонна условного топлива: 1 т у.т. = 7 Гкал) и только 1,1–1,2 % от этого количества добывается и используется. Сжигаемые ежегодно на полях отходы сельскохозяйственного производства (главным образом солома) составляют в тепловом эквиваленте 17 млн т у.т. Целенаправленное выращивание биотопливных культур (рапс, кукуруза и пр.) для получения жидких моторных топлив в РФ пока не получило широкого развития по ряду причин, в основном экономического характера [22]. Существует и не всегда учитывается ряд факторов, сопутствующих производству растительного сырья для получения биотоплив. Так, не учитывается вред, наносимый азотными удобрениями, используемыми при выращивании биотопливных культур (масличных и зерновых). В результате естественного процесса нитрификации и денитрификации этих удобрений выделяется закись азота N_2O, которая является парниковым газом, действующим в 300 раз сильнее диоксида углерода CO_2 [23]. По данным зарубежных публикаций, представленным в работе [24], негативное влияние на экологию при учете всей цепочки производства и использования биодизеля и биоэтанола в 1,5 раза превышает вред, наносимый сжиганием минерального топлива.

Помимо экономических и экологических проблем необходимо учитывать и социальные аспекты производства биотоплива. В связи с нехваткой продовольствия в мире возникает вопрос о соотношении между получаемыми с определенного участка земли продуктами питания и количеством биотоплива, которое может быть выработано при возделывании на этом же участке растений для его производства. В упомянутой выше статье [24] показано, что биотопливо (в том числе и биогаз) не может заменить существенную часть топлива нефтяного происхождения и практически не способствует решению экологических и экономических проблем. Производство биотоплива не позволило затормозить рост цен на нефть в 2008 г. – расширение его производства привело к росту цен на продукты питания. При этом в худшем положении оказались страны, не имеющие собственных природных запасов нефти и не способные производить достаточное количество продовольствия. Основной вывод работы [24] заключается в том, что в России не следует ориентироваться на производство биодизельного топлива и биоэтанола, но при этом необходимо развивать локальное производство горючих газов в качестве моторного и печного топлива на основе неизбежных отходов производства (сельскохозяйственного, лесного и т.п.).

В СССР газогенераторная тематика в 1930–1950-х гг. активно разрабатывалась рядом исследовательских организаций (ЦНИДИ, ВИЭСХ, ЭНИН АН СССР, НАТИ, НАМИ), серийно выпускались (заводы ЗИС, ГАЗ, СТЗ и др.) и активно использовались газогенераторные автомобили, тракторы и тепловозы (последние использовались до 70-х годов прошлого века на Приволжской железной дороге). Были созданы и освоены в производстве твердотопливные газогенераторы и газовые двигатели транспортного и стационарного типов. Анализ и обобщение опыта этого "золотого периода" газогенераторных технологий представлены в работе [16]. В настоящее время в России работы по развитию и совершенствованию газогенераторных технологий проводятся в ЦНИДИ (г. Санкт-Петербург). Установки ЦНИДИ ГГЭУ-100 на базе газодизеля ЯМЗ-238 и твердотопливного газогенератора достаточно успешно эксплуатируются. Исследования ведутся также ИПХФ РАН (г. Черноголовка, Московская обл.) и другими организациями, где созданы опытно-промышленные установки по получению генераторного газа из разнообразного растительного сырья и низкокалорийных углей. Использование генераторного газа для газопоршневых двигателей полностью отвечает современным тенденциям по снижению техногенного воздействия на окружающую среду. Средний состав отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания представлен в табл. 2, а усредненный состав ОГ отечественных дизелей – в табл. 3 [25, 26].

Присутствующая в составе ОГ двуокись углерода (углекислый газ CO_2) в настоящее время относится к парниковому газу, но используемое газообразное топливо является CO_2-нейтральным. Как

Таблица 2

Средний состав наиболее массовых компонентов ОГ ДВС

Компонент	N_2	CO_2	H_2O	O_2	CO
Объемная доля, %	74	13,6	9	3,3	0,3

Примечание: указано содержание компонентов в объемных %.

Таблица 3

Усредненный состав ОГ отечественных дизелей

Компонент ОГ	Концентрация в ОГ на различных режимах	Токсичные компоненты ОГ дизелей на режиме полной нагрузки	
		Концентрация, г/м^3	Удельный выброс, г/(кВт·ч)
Азот N_2	74–78 %	–	–
Кислород O_2	2–18 %	–	–
Водяной пар H_2O	0,5–9,0 %	15–100	–
Диоксид углерода CO_2	1–12 %	40–240	–

Окончание табл. 3

Компонент ОГ	Концентрация в ОГ на различных режимах	Токсичные компоненты ОГ дизелей на режиме полной нагрузки	
		Концентрация, г/м^3	Удельный выброс, г/(кВт·ч)
Оксиды азота NO_x, в том числе:	0,004–0,5 %	1–8	10–30
монооксид азота NO	0,004–0,5 %	1,0–4,5	6–18
диоксид азота NO_2	0,0001–0,013 %	0,1–0,8	0,5–2,0
Монооксид углерода CO	0,005–0,4 %	0,25–2,5	1,5–12,0
Углеводороды CH_x	0,009–0,3 %	0,25–2,0	1,5–8,0
Бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$	0,05–1,0 мкг/м^3	$(0,2–0,5)\cdot10^{-6}$	$(1–2)\cdot10^{-6}$
Сажа C	0,01–1,1 г/м^3	0,05–0,5	0,25–2,0
Диоксид серы SO_2	0,0018–0,02 %	0,1–0,5	0,4–2,5
Триоксид серы SO_3	$(0,4–6)\cdot10^{-4}$ %	–	–
Альдегиды RCHO, в том числе:	0,002 %	1,0–10,0	–
формальдегид HCHO	$(1–19)\cdot10^{-4}$ %	–	–
акролеин CH_2CHCHO	$(1–1,3)\cdot10^{-4}$ %	0,001–0,04	0,06–0,2
Примечание: "–" – показатель не приведен.			

указано выше, это обусловлено тем, что объем CO_2, получаемый при сгорании генераторного газа, не превышает объема диоксида углерода, поглощаемого растениями при их росте в процессе фотосинтеза. Поэтому эксплуатация энергетических установок, использующих в качестве топлива продукты газификации биомассы, не приводит к повышению концентрации диоксида углерода в атмосфере.

Ниже приведен анализ свойств генераторного газа, получаемого из органических возобновляемых энергетических ресурсов (ВЭР), и его компонентов как моторного топлива, а также проведено сопоставление физико-химических свойств наиболее распространенных газообразных топлив. Рассмотрены природный газ (метан), биогаз, генераторный газ и попутный нефтяной газ. Некоторые их физико-химические свойства приведены на рис. 6 и в табл. 4 [3, 4, 20, 27–30].

Генераторный газ образуется в результате газификации углеродистого твердого сырья в специальных установках – газогенераторах. В газогенераторах часть твердого вещества переводится в газообразную фазу, содержащую до 75 % энергии исходного вещества. Современные технологии позволяют получить генераторный газ с заданными

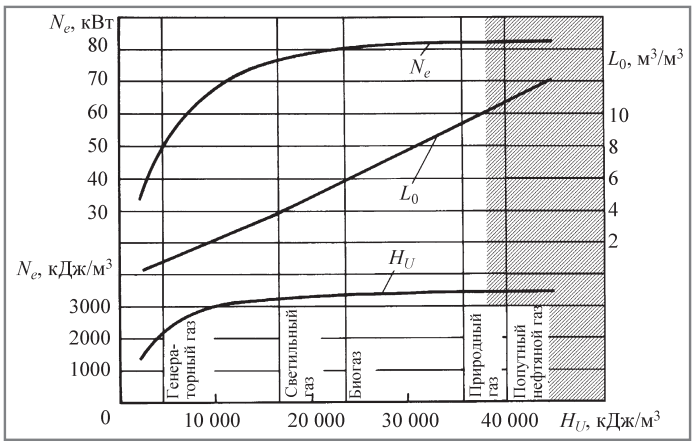

Рис. 6. *Зависимость теплотворной способности газовоздушной смеси $H_{U\,см}$, теоретически необходимого для сгорания 1 м^3 топлива количества воздуха L_o и эффективной мощности N_e газового двигателя, работающего на режиме n = 1000 мин$^{-1}$ и α = = 1, от теплотворной способности газа H_U (заштрихована область, соответствующая попутному нефтяному газу)*

Таблица 4

Свойства метана, биогаза, генераторного газа и попутного нефтяного газа

Показатели	Виды топлив			
	Метан	Биогаз	Генераторный газ	Попутный нефтяной газ
Массовая теплота сгорания, кДж/кг	49 900	9800–30 100	25 000–30 000	50 000
Объемная теплота сгорания, кДж/м^3	3380	3000–3300	2200–3000	3300
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг/кг	17,2	3,5–10,2	3,0–9,0	16,0
Границы воспламенения смеси по α:				
богатой	0,70	0,66–0,70	0,60–0,65	0,60
бедной	2,10	1,80–1,95	1,5–1,7	2,50
Максимальная скорость сгорания, м/с	0,40	0,20–0,37	0,16–0,18	0,30
Метановое число	100	115–130	92–108	90

химическим составом, теплотой сгорания и другими специфическими свойствами (например, с высокой стойкостью к детонации при сгорании в ДВС). Это определяется выбранной схемой газификатора и составом исходного сырья.

Газогенератор (газификатор) представляет собой шахтную печь, в которую сверху загружается твердое топливо, а снизу подается воздух в количестве, недостаточном для полного сгорания топлива. Кислород воздуха, поступающего через колосниковую решетку, встречает слой раскаленного кокса и вступает в реакцию с углеродом. В связи с недостаточным для полного сгорания количеством подаваемого воздуха продуктами реакции являются CO_2 и CO. Проходя далее через раскаленный кокс (900–1000 °C), CO_2 частично восстанавливается углеродом до CO по реакции $CO_2 + C = 2CO$, а в при наличии в топливе влаги образуется водород по реакции $H_2O + C = H_2 + CO$. Обычно в дутье добавляют водяной пар, и генераторный газ дополнительно обогащается водородом и окисью углерода по реакции $H_2O + C = H_2 + CO$, а также предотвращается спекание золы. При движении вверх горячие газы производят сухую перегонку топлива, выделяя из него летучие фракции и влагу.

Генераторный газ, получаемый из твердого топлива, представляет собой механическую смесь нескольких газов, каждый из которых имеет свои физико-химические свойства, существенно влияющие на работу двигателя. Содержание большого количества негорючих компонентов в виде CO_2 и N_2 (свыше 50 %) обусловливает низкую теплоту сгорания генераторного газа (не более 2,2–3,0 МДж/м^3). В зависимости от вида твердого топлива, способа и режима газификации состав газа может меняться. Типичные состав и свойства генераторного газа, получаемого из древесной коры, торфа, древесины:

– CO – 23–26 %, H_2 – 10–15 %, CH_4 – 2–3 %, C_nH_m – 0,5 %, ($N_2 + CO_2$) – 55–62 %;

– низшая теплота сгорания газа H_u = = 2,2–3,0 МДж/м^3;

– коэффициент стехиометрии L_o = 0,9–2,1 м^3 возд./м^3 газа;

– низшая теплота сгорания стехиометрической газовоздушной смеси $H_{см}$ = 1,9–2,6 МДж/м^3 (для сравнения, низшая теплота сгорания стехиометрической смеси воздух–метан составляет 3,4 МДж/м^3);

– октановое число, определенное по моторному методу ОЧМ, равно 130–140 ед. Октановое число моторное (ОЧМ) определяется на одноцилиндровой установке при частоте вращения коленчатого вала 900 об/мин, температуре всасываемой смеси 149 °C и переменном угле опережения зажигания. ОЧМ имеет более низкие значения, чем ОЧИ – октановое число исследовательское. ОЧМ показывает, как ведет себя топливо с точки зрения детонации при работе двигателя под нагрузкой.

Величина $H_{см}$ определяет мощность и другие показатели эффективности газового двигателя.

Водород, входящий в состав газа, а также монооксид углерода обеспечивают широкие пределы воспламенения и обеднения газовоздушной смеси, однако сгорание этих газов характеризуется значительным снижением коэффициента молекулярного изменения μ, что приводит к снижению мощности (для водорода и монооксида углерода μ = 0,85; для жидкого топлива μ = 1,06; для природного газа μ = 1). Коэффициент молекулярного изменения характеризует относительное изменение объема при сгорании смеси и представляет отношение количества продуктов сгорания (кмоль) к количеству горючей смеси до сгорания (кмоль).

Рассмотрим некоторые свойства горючих компонентов, входящих в состав генераторного газа, а также других горючих и инертных газов, которые могут присутствовать в газомоторном топливе искусственного происхождения.

Метан (МЧ = 100, ОЧМ = 110, H_u = = 35,8 МДж/м^3, $H_{см}$ = 3,23 МДж/м^3, L_o = = 9,53 м^3/м^3). Основной компонент природного газа входит в небольших количествах в состав генераторного газа, широко используется в качестве моторного топлива для всех типов двигателей. Метановое число (МЧ) – показатель, характеризующий детонационную стойкость газообразного топлива (способность топлива противостоять самовоспламенению при сжатии) для двигателей внутреннего сгорания. Число равно содержанию (в процентах по объему) в его смеси с водородом, при котором эта смесь эквивалентна по детонационной стойкости исследуемому топливу в стандартных условиях испытаний. Метановое число 100 соответствует метану (детонационно стойкий). Метановое число 0 соответствует водороду (нестойкий).

Водород (МЧ = 0, ОЧМ = 45–85, H_u = = 10,2 МДж/м^3, $H_{см}$ = 3,04 МДж/м^3, L_o = = 2,38 м^3/м^3). Все аспекты его использования в качестве моторного топлива требуют отдельного рассмотрения. Процесс сгорания и явления детонации в двигателе при использовании в качестве топлива смеси водорода с воздухом существенно отличаются от сгорания углеводородных топлив. Высокая скорость сгорания и очень малый период задержки воспламенения стехиометрической и близкой к ней водородо-воздушной смеси создают проблемы "жесткого" сгорания, детонации и обратных вспышек во впускном тракте двигателя. Следует также заметить, что в настоящее время нет единого метода определения детонации в водородном двигателе и способа установления детонационного сгорания в нем с помощью измерительных приборов.

Монооксид углерода (угарный газ) (МЧ = 62, ОЧМ = 120, H_u = 12,1 МДж/м^3, $H_{см}$ = 3,56 МДж/м^3, L_o = 2,38 м^3/м^3). Газ ядовит, в чистом виде в качестве моторного топлива не используется, однако входит в состав некоторых видов горючих газов искусственного происхождения. Вследствие высокой детонационной стойкости монооксида углерода необходимо стремиться к максимальному его содержанию в составе генераторного газа.

Аммиак (нитрид водорода) (ОЧМ = 111, H_u = = 14,2 МДж/м^3, $H_{см}$ =1,75 МДж/м^3, L_o = 6,1 м^3/м^3. Ядовит, при нормальных условиях бесцветный газ, вследствие низкой скорости горения сжигание чистого аммиака в двигателе требует специальной организации процесса сгорания. Аммиак входит в состав газообразных отходов некоторых химических производств, а также в небольшом количестве присутствует в составе биогаза.

Инертные газы – азот и диоксид углерода. Их присутствие в составе газомоторного топлива увеличивает детонационную стойкость газовоздушной смеси, причем способность диоксида углерода подавлять детонацию проявляется в несколько раз сильнее, чем азота [31].

При прочих равных условиях величина теплоты сгорания смеси "генераторный газ – воздух" ($H_{см}$) определяет количество тепла, введенного в двигатель, следовательно, и его мощностные показатели.

Более подробный анализ влияния содержания различных горючих компонентов в генераторном газе на теплоту сгорания газовоздушной смеси показывает, что она зависит от коэффициента стехиометрии, различного для компонентов генераторного газа [16]. Из результатов этого анализа следуют два важных вывода:

– если содержание горючих компонентов в генераторном газе не превышает 50 % (объемных), то наиболее выгодной составляющей с точки зрения максимальной теплотворной способности смеси является метан. Поскольку содержание метана в генераторном газе никогда не достигает 50 %, то при заданном избытке воздуха необходимо стремиться к увеличению количества метана в составе газа;

– монооксид углерода как компонент генераторного газа предпочтительней водорода, особенно если суммарное содержание горючих компонентов в газе превышает 50 %. В этом случае обеспечиваются высокие антидетонационные свойства.

Газ, получаемый в газогенераторе, на выходе из него имеет высокую температуру, содержит твердые частицы, смолы. Газогенераторная установка, работающая совместно с поршневым ДВС, должна в обязательном порядке иметь комплексную систему охлаждения и очистки газа. Поступающий в газотопливную магистраль двигателя газ должен быть отфильтрован, очищен от смолосодержащих фракций, охлажден до +50 °С [32, 33], содержание механических примесей – не более 1,0 мг/м^3 [34]. Отходы, образующиеся при получении генераторного газа (смолы, органические кислоты, зола и т.д.), как правило, экологически небезопасны и подлежат обезвреживанию и утилизации. Это может осложнить или, в ряде случаев, сделать невозможной эксплуатацию всего энергокомплекса [32].

Генераторный газ, как и любое моторное топливо, используемое в двигателе с искровым воспламенением, должен обладать определенной стойкостью к преждевременному самовоспламенению (детонации). Что касается фактора, характеризующего детонационную стойкость газового топлива, а соответственно, и его пригодность в качестве моторного топлива для поршневых ДВС – метанового числа, то предлагается его рассчитывать по компонентному составу (методики расчета корпорации Caterpillar (США), Американского исследовательского института газа (AGRI)) [35]. Последняя, в частности, определяет метановое число как

$$\text{МЧ} = 1{,}624\ \text{ОЧМ} - 119{,}1;$$

$$\text{ОЧМ} = 137{,}8\ m\text{CH}_4 + 29{,}948\ m\text{C}_2\text{H}_6 -$$

$$- 167{,}06\ mC_nH_m + 181{,}23\ m\text{CO}_2 + 26{,}99\ m\text{N},$$

где обозначение m и формула – мольный объем соответствующего компонента.

Анализ приведенных формул показывает, что методика расчета позволяет оценить свойства, в основном, нефтяных попутных газов, и что метановое число газовой смеси прямо пропорционально ее октановому числу. В приведенной методике не содержится указаний по оценке свойств газов, содержащих водород и монооксид углерода. Следовательно, при создании газопоршневого двигателя, использующего в качестве топлива генераторный газ, можно вполне ориентироваться на оценку детонационной стойкости газа по его октановому числу, которое определено экспериментально и лежит в пределах 130–140 единиц ОЧМ. Метановое число, определенное по изложенной выше методике, составит 92–108 единиц МЧ. Такие антидетонационные свойства генераторного газа определяются наличием инертных компонентов (CO_2 и N_2), а также содержанием монооксида углерода CO, имеющего высокую детонационную стойкость. Следует заметить, что государственным стандартом ГОСТ 27577–2000 на газовое топливо для ДВС, действующим в РФ, понятие "метановое число" не предусмотрено, а детонационную стойкость природного газа и смеси углеводородных газов необходимо оценивать октановым числом по моторному методу – ОЧМ [34]. Метановое число и ОЧИ определяются составом используемого газа [3, 6, 36–38].

Необходимо упомянуть и некоторые другие виды горючих газов искусственного происхождения, которые могут быть использованы в качестве топлива для газового двигателя:

– пиролизный газ (пиролиз растительного сырья без доступа окислителя), примерный состав (% об.) CO – 35, H_2 – 35, CH_4 – 5, CO_2 – 20, N_2 – 5; МЧ – 71, ОЧМ – 116, H_u = 9,3 МДж/м^3;

– коксовый газ, примерный состав (% об.) CO – 8, H_2 – 55, CH_4 – 31, CO_2 – 2, N_2 – 3, O_2 – 1; МЧ – 40, ОЧМ – 96 – 98, H_u = 18,05 МДж/м^3;

– газообразные отходы химических производств, в состав которых входят водород, монооксид углерода, аммиак, инертные газы.

В настоящее время в России ряд научно-исследовательских организаций и предприятий ведут исследования, разработки технологических процессов газификации, а также производят газогенераторы, использующие в качестве сырья твердое органическое топливо (торф, древесные пеллеты, щепа, уголь и пр.). Подробный анализ состояния газогенераторных технологий в России и в мире представлен в работе [39]. Применительно к использованию газогенераторных комплексов для распределенного производства электроэнергии и тепла газопоршневыми когенерационными установками следует выделить представленную ниже группу разработчиков и производителей и их продукцию.

ООО "ЭКОМАШГРУПП" в сотрудничестве с ЗАО "СЕЛИГЕР-ХОЛДИНГ" (г. Тверь) разрабатывает и производит автономные газогенераторные комплексы "ЭкомашГазГенТорф" [26]. В состав комплекса входят: блок подготовки и сушки сырья, блок газификации (производство синтез-

газа), блок охлаждения и очистки синтез-газа. Комплекс предназначен для обеспечения газовым топливом газопоршневых установок мощностью 100–300 кВт.

В Центральном научно-исследовательском дизельном институте (ООО "ЦНИДИ", г. Санкт-Петербург) созданы промышленные образцы газогенераторных установок ГГЭУ-60 и ГГЭУ-100 для работы на буром угле и другом органическом местном сырье, проведены сертификационные испытания на древесном топливе [40]. Установки являются полнокомплектными и поставляются в составе модулей подготовки сырья, генераторного газа и газодизельной электростанции на базе дизельных двигателей (ЯМЗ).

Компания ООО АРЗ "Синтур-НТ" (г. Нижний Тагил) дорабатывает свои газопоршневые электростанции на базе двигателей ЯМЗ для работы на генераторном газе (установка турбокомпрессора, специальная конструкция газосмесителя). Комплексы комплектуются газогенераторами производства Китая [41].

ФГУП НПЦ газотурбостроения "Салют" (г. Москва) ведет работы по созданию оборудования для газификации твердых топлив в модульном исполнении для обеспечения энергоустановок как сравнительно большой единичной мощности – от 1 МВт электрической и до 2 Гкал/ч тепловой, так и небольшой – до 400 кВт электрической мощности [42].

Проблемами технологии и оборудования для газификации твердых топлив также занимаются следующие организации и предприятия РФ [39]: ГНУ ВИЭСХ (г. Москва); ЗАО "Энергетические схемы и технологии" (г. Москва); ИПХФ РАН (г. Черноголовка, Московская область); ООО "БиоРЕКС" (г. Москва, г. Тольятти); ООО "Адаптика-завод" – ООО "Интер-реммаш", (г. Брянск).

Из импортного оборудования, представленного на российском рынке, можно отметить газогенераторные электростанции американской компании Flex Technologies (российское представительство в г. Москве). Электростанции работают на генераторном газе, получаемом из опилок, щепы, торфа и пр. Диапазон мощности – от 28 до 1340 кВт. Энерготехнологические комплексы обеспечивают подготовку сырья, получение и очистку генераторного газа для использования его в газопоршневой электростанции. Потребление сырья – от 12 до 1340 кг/ч (древесная щепа), в зависимости от модели генераторного комплекса. В качестве привода электрогенератора используются атмосферные или оснащенные турбонаддувом газопоршневые двигатели GM (США), Perkins (Великобритания), ЯМЗ (Россия) [43]. Имеется ряд других производителей подобного оборудования из стран ЕС, Китая, и др., менее широко представленные в России.

Заключение

Генераторный газ – один из немногих видов моторного топлива, который может быть получен из возобновляемого сырья с относительно небольшими затратами на производство, так как технология его получения достаточно проста, а сырьем являются, как правило, неиспользуемые растительные ресурсы. Генераторный газ может производиться на небольших компактных транспортабельных установках (газогенераторах), совмещенных с самим двигателем, в связи с чем отпадает необходимость емкостей для хранения газа. Установки большой мощности могут быть модульного типа, что позволяет сократить трудоемкость, время монтажа и запуска газогенераторных энергокомплексов. В России на рынке газогенераторного оборудования работает ряд отечественных организаций; также представлены и зарубежные компании. Объемное энергосодержание смеси "генераторный газ–воздух" на 20–45 % ниже, чем у смесей с воздухом других газомоторных топлив (природный газ, пропан), что приводит к снижению мощностных показателей двигателя.

Одним из важных свойств генераторного газа является высокая детонационная стойкость (способность топлива противостоять самовоспламенению при сжатии), так как его октановое число (показатель, характеризующий детонационную стойкость топлива) находится в диапазоне от 110 до 140 (для сравнения: у бензина – 91–98 (ОЧИ); у природного газа – 100–110). Это позволяет компенсировать падение мощности газового двигателя за счет турбонаддува, повышения степени сжатия или использования цикла газодизеля. Тепловые потери в газогенераторе могут утилизироваться в системе комплексной утилизации теплоты, отведенной от двигателя (когенерация), и увеличить общую эффективность энергогенерирующей установки.

В отличие от других видов топлив, особенно ископаемых, в продуктах сгорания генераторного газа почти полностью отсутствует сера и другие вредные для окружающей среды химические элементы и соединения. Токсичность отработавших

газов ДВС в этом случае не превышает действующих норм без применения систем нейтрализации. Сам же генераторный газ токсичен вследствие наличия в его составе монооксида углерода, токсичны и отходы, образующиеся при работе газогенератора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Емельянов В.Е., Крылов И.Ф.** Альтернативные экологически чистые виды топлива для автомобилей: Свойства, разновидности, применение. М.: ООО "Издательство Астрель": ООО "Издательство АСТ", 2004. 128 с.

2. **Лапидус А.Л., Крылов И.Ф., Жагфаров Ф.Г. и др.** Альтернативные моторные топлива: Учебное пособие для вузов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 288 с.

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

4. **Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М.** Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. М.: НИЦ "Инженер" (Союз НИО), 2016. 292 с.

5. **Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.

6. **Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В.** Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2007. 480 с.

7. **Паушкин Я.М., Лапидус А.Л., Адельсон С.В.** Растительная биомасса как сырье для получения олефинов и моторных топлив // Химия и технология топлив и масел. 1994. № 6. С. 3–5.

8. **Васильев И.П.** Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. 240 с.

9. **Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В.** Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: ООО НИЦ "Инженер", 2011. 536 с.

10. **Energy** Technology Perspectives . Scenarios and Strategies to 2050. Paris: International Energy Agency, 2006. 486 p.

11. **Мухина Т. Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е.** Пиролиз углеводородного сырья. М.: Химия, 1987. 240 с.

12. **Промди К., Витидсант З.** Получение биотоплива пиролизом травы императы цилиндрической // Химия и технология топлив и масел. 2013. № 4. С. 7–9.

13. **Зайченко В.М., Цой А.Д., Штеренберг А.Я.** Распределенное производство энергии. М.: БуКос, 2008. 207 с.

14. **Зайченко В.М., Чернявский А.А.** Мини-ТЭЦ на базе газопоршневых двигателей // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2011. № 5. С. 99–103.

15. **Еленковский Ю.** Утилизация теплоты, теряемой двигателями внутреннего сгорания // Вестник Волжского общества для надзора за паровыми котлами. 1914. № 12. С. 1–8.

16. **Коллеров Л.К.** Газомоторные установки. М.: Машгиз, 1951. 239 с.

17. **Попель О.С., Фортов В.Е.** Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 450 с.

18. **Орсик Л.С., Сорокин Н.Т., Федоренко В.Ф. и др.** Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития / Под ред. В.Ф. Федоренко. М.: ФГНУ "Росинформагротех", 2008. 404 с.

19. **Федоренко В.Ф., Сорокин Н.Т., Буклагин Д.С., Тихонравов В.С.** Инновационное развитие альтернативной энергетики. Ч. 1. М.: ФГНУ "Росинформагротех", 2010. 348 с.

20. **Цыплаков А.И.** Газопоршневые энергоустановки на генераторном газе: особенности конструкции, опыт эксплуатации, результаты экспериментальных исследований. Препринт ОИВТ РАН № 3-512. М.: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2013. 51 с.

21. **Бессмертных А.В., Зайченко В.М.** Развитие распределенной энергетики // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 9. С. 823–832.

22. http://esco.co.ua/journal/2012 1/aet30/art30.htm.

23. http://science.viniti.ru/index.php?&option=com content&task= view&itemid= 139&section= &id=316&id art=N002117.

24. **Володин В.М., Лупачев П.Д., Гольнев В.С.** Биотопливо и производство продуктов питания // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 5. С. 69–71.

25. **Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.** Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

26. **Майков К.М.** Газификация торфа – источник энергетических ресурсов // Торф и бизнес. 2011. № 2. С. 14–21.

27. **Рачевский Б.С.** Сжиженные углеводородные газы. М.: Нефть и газ, 2009. 640 с.

28. **Марков В.А., Жердев А.А., Фурман В.В., Коссова Л.Е.** Технологии использования попутного нефтяного газа для генерирования электроэнергии // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2016. № 11. С. 17–25.

29. **Иванов С.С., Тарасов М.Ю.** Требования к подготовке растворенного газа для питания газопоршневых двигателей // Нефтяное хозяйство. 2011. № 1. С. 102–105.

30. **Марков В.А., Чирков А.Ю., Зайченко В.М., Цыплаков А.И.** Физико-химические и моторные свойства попутного нефтяного газа и возможности его использования в качестве моторного топлива для дизелей // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2017. № 8.

31. **Генкин К.И.** Газовые двигатели. М.: Машиностроение, 1977. 196 с.

32. **Суханов В.С., Левин А.Б.** Дорога в тупик. Опыт создания и опытно-промышленной эксплуатации газогенераторной установки на древесном топливе и газодизельной электростанции на ее базе. http://lesprominform.ru/jarchive/articles/ itemprint/1662.

33. **Caterpillar.** Руководство по выбору, монтажу и эксплуатации LRKO7256. Двигатели серии G3600-G3300. Раздел "Топливные системы".

34. **ГОСТ 27577–2000** "Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия". М.: Изд-во стандартов, 2000. 8 с.

35. http://m-luks.com/podgotovka_gaza_v_apparatah-cog.

36. **ГОСТ Р 55598–2013** "Попутный нефтяной газ. Критерии классификации". М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

37. **Букреев Г.А., Нижник М.Е.** Применение различных газов в качестве топлива для ДВС: Обзор / Двигатели внутреннего сгорания: Межведомств. сб. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. Серия 4. Вып. 4. 36 с.

38. **Левкин Г.М.** Повышение эффективности применения газового топлива в транспортных ДВС: Обзор / Двигатели внутреннего сгорания: Межведомств. сб. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. Серия 4. Вып.2. 40 с.

39. **Копытов В.В.** Газификация конденсированных топлив. Ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. М.: Инфра-Инженерия, 2012. 509 с.

40. **ДВС** с газогенераторными установками. http://www.cnidi.ru/ index.php?nid=6.

41. **Внедрение** газопоршневых электростанций в Монголии. http://sintur.ru/stat/458/.

42. **Копытов В.В.** Газификация твердых топлив // Лесопромышленник. 2011. № 5.

43. **Газогенераторные** электростанции серии FBU с газопоршневыми двигателями. http://flextech.ru/recept/engines.

УДК 62-791.2

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Е.В. Семаков, Ю.И. Гудков, МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва

В работе описывается автономный измерительный модуль для контроля наклонов кузова топливозаправщика для перевозок альтернативного топлива. Обосновывается выбор связи для передачи данных от измерительного модуля в компьютер. Описывается принцип работы системы.

Портативный измерительный модуль для контроля кузова топливозаправщиков позволит проводить быстрые тесты на различных дорожных покрытиях. Дальнейшая разработка будет включать в себя модернизацию соединения с компьютером, добавление поддержки iOS и ОС Android, увеличение работы в автономном режиме от аккумуляторной батареи и повышение точности измерения.

Ключевые слова: *топливозаправщик; альтернативное топливо; измерительный модуль; гироскоп; акселерометр; Wi-Fi.*

AUTONOMOUS SYSTEM OF EXPRESS DIAGNOSTIC OF AUTOMOBILE BODY POSITION DURING ALTERNATIVE FUEL TRANSPORTATION

Semakov E.V., Gudkov Yu.I., MIEM NRU HSE, Moscow

This paper present a project that will describe autonomous measurement module for refueler body incline measurement. The choice of communication protocol between measurement module and computer is justified. Principle of operation of the system described.

The autonomous measurement module for refueler body control allow making fast tests on different road cover. Further development will include upgrading connection with computer, adding support for iOS and Android OS, increasing work in autonomous mode from the storage battery and make better accuracy of measure.

Keywords: *refueler; alternative fuel; measurement module; gyroscope; accelerometer; Wi-Fi.*

Большинство автопроизводителей видят потенциал развития транспорта в применении новых, более экологичных альтернативных видов топлива, способных снизить уровень выброса углекислого газа в атмосферу. В частности, по мнению компании Scania, одними из популярных альтернативных видов топлива, использующихся сегодня на автомобильном транспорте, являются этанол и биодизельное топливо [1]. Этаноловые двигатели имеют КПД на 40 % выше, чем у четырехтактных газовых двигателей. Биодизель используется в дизельных двигателях как один из видов топлива класса FAME (сложный метиловый эфир).

При использовании альтернативных видов топлива важное значение приобретает обеспечение безопасной перевозки топлива до потребителя на топливозаправщиках. Одним из аспектов осуществления безопасной и комфортной перевозки является настройка подвески и системы стабилизации автомобиля (ESP).

Автомобильный транспорт является сегодня одной из наиболее перспективных областей для опережающего внедрения новых информационных технологий. Число датчиков и автоматизированных систем управления агрегатами и механизмами современного автомобиля растет в геометрической прогрессии. Однако большинство таких систем предназначены в первую очередь для "облегчения жизни" водителя транспортного средства и не могут использоваться разработчиками самого транспортного средства на этапе его испытаний на полигоне.

Основная проблема подобных устройств заключается в том, что инженеры проектируют измерительные модули для контролирования объекта в пространстве именно для конкретных разрабатываемых устройств [2], а это означает, что такие модули невозможно использовать в других системах, чтобы проводить экспресс-тестирование автотранспорта на устойчивость при эксплуатации и следить за поведением кузова на неровной местности. Поэтому целью данной работы является разработка и исследование автономных систем контроля положения кузова топливозаправщика, чтобы перевозка топлива осуществлялась в более безопасных условиях. Для решения этой проблемы необходимо создать портативный измерительный модуль для контроля наклонов кузова топливозаправщика при проведении тестов в условиях бездорожья, неровного и сложного рельефа.

Рис. 1. *Структурная схема системы контроля кузова топливозаправщика*

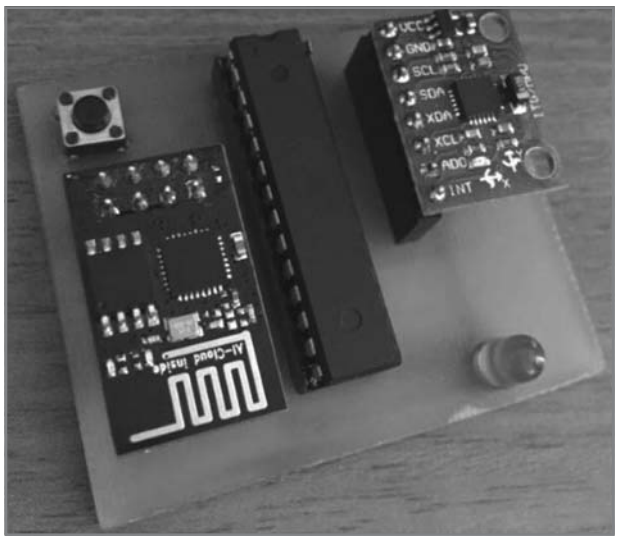

Рис. 2. *Система контроля кузова топливозаправщика*

На ровных и прямых дорогах поведение транспорта предсказуемо, и управление становится комфортным. Но на бездорожье все совсем иначе: внезапные кочки, подъемы и спуски. Чтобы обеспечить максимально возможный комфорт и безопасность при перевозке топлива, необходимо настроить подвеску и систему ESP (Electronic Stability Program) [3–4] таким образом, чтобы осуществлялась компенсация неровности дороги, что обеспечит комфорт и безопасность на неровных дорогах. Предварительные тесты настройки подвески топливозаправщика поможет провести портативная система контроля в реальном времени, построенная на основе МЭМС-датчиков (микроэлектромеханические системы). Такая система состоит из гироскопических датчиков и акселерометра, микроконтроллера и Wi-Fi модуля. Так как устройство является беспроводным, то расположить его можно независимо от расположения бортового компьютера. Каждый наклон кузова топливозаправщика регистрируется датчиками системы и обрабатывается микроконтроллером, после этого данные о положении посылаются по беспроводной связи на бортовой компьютер или персональный компьютер. Таким образом, эксперт, глядя на полученные данные, определяет, как ведет себя топливозаправщик в разных условиях и затем, если необходимо, выполняет корректировку характеристик подвески.

Система стабилизации работает по беспроводной Wi-Fi связи для обмена данными с бортовым компьютером. Так как в системе установлен Wi-Fi модуль, который поддерживает стандарт IEEE 802.11 b/g/n, данные передаются в радиусе до 400 м на скорости 7,4 Мбайт/с.

Несмотря на то, что проводная связь имеет огромную скорость передачи данных, ее использование вызывает ряд проблем. Во-первых, необходимо прокладывать провода, зачастую в труднодоступных частях кузова и шасси. Во-вторых, провода легко подвергаются коррозии и могут выйти из строя из-за вибраций и из-за перетирания во время движения транспорта.

Существует другая технология беспроводной связи – Bluetooth, которая является альтернативой Wi-Fi связи, тем не менее она имеет меньший радиус действия и скорость передачи данных, из-за чего может быть нестабильное соединение системы с компьютером, где отображаются результаты тестовых заездов.

Для передачи данных в разработанной системе используется Transmission Control Protocol (TCP), который отлично подходит для отправки небольших символьных данных. Wi-Fi модуль в устройстве создает беспроводную сеть, к которой можно подключиться с совместимого устройства. Затем Wi-Fi модуль создает TCP-сервер, к которому подключается бортовой компьютер через специальное программное обеспечение (TCP-клиент). После подключения сервер начинает беспрерывно отправлять данные клиенту.

Принцип работы системы следующий: при запуске системы микроконтроллер передает настройки датчикам и модулю связи, после этого система готова к работе. Каждый крен и тангаж (наклоны вдоль оси X и наклоны вдоль оси Y) изменяют значения в датчиках, и они постоянно посылают обновленные данные по шине связи I^2C (Inter-Integrated Circuit) в микроконтроллер. Обработав эти данные, микроконтроллер передает их через последовательный порт в Wi-Fi модуль, который уже установил связь с бортовым или персональным компьютером. Компьютер, получив данные, отображает информацию в реальном времени в графическом формате.

Данная система контроля кузова топливозаправщика позволит проводить тесты подвески в различных дорожных ситуациях и выводить результаты на экран в реальном времени. На хорошо проверенной и правильно настроенной подвеске транспортировка топлива становится более безо-

пасной, а водитель автомобиля будет ощущать меньше вредоносных вибраций и чувствовать себя комфортно в любых условиях, будь то бездорожье или неровная дорога. Еще одно преимущество рассматриваемой системы в том, что в ней используются недорогие, но в то же время эффективные компоненты, что не добавляет значительной стоимости на производство. Кроме этого, данную систему контроля можно располагать на тяжелой технике для мониторинга положения кузова в сложных условиях.

В итоге простота системы как в производстве, так и при эксплуатации, низкая себестоимость, высокая надежность позволяют сделать вывод, что подобная система найдет свое применение при эксплуатации топливозаправщика в сложных условиях, осуществлении перевозок топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Альтернативные** виды топлива // Грузовые автомобили. URL: http://www.argosscan.ru/index.php/gruzovye-avtomobili/item/67-alternativnye-vidy-topliva (дата обращения: 03.05.2017).

2. **Михайлов В.В., Снитков А.Г., Ляхов С.В.** Повышение эксплуатационных показателей автобуса путем интегрированного управления подвеской и трансмиссией // Наука и техника. 2016. № 1. URL: http://ceberleninka.ru/index.php/gruzovye-avtomobili/item/67-alternativnye-vidy-topliva дата обращения: 03.05.2017).

3. **Электронная** система курсовой устойчивости (ESP) // Технологии и разработки. URL: http://www.truck.man.eu/ru/ru/man_welt_1/technology_and_competence/safety_and_assistance_systems_1/elektronic_stability_program/electronic_stability_program_truck.html (дата обращения: 06.05.2017).

4. **Электронная** система стабилизации ESP // Безопасное движение. URL: http://www.mercedes-benz.ru/content/russia/mpc/mpc_russia_website/ru/home_mpc/bus/home/new_buses/models/regular_service_busses/_Citaro_c2/facts/safety_/drive.html (дата обращения: 06.05.2017).

УДК 621.439:629.114.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОГО СЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ БАЛЛОНОВ

Э.Р. Раенбагина, канд. техн. наук, ФГБОУ ВПО "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", г. Омск

В статье приведена методика определения экономического эффекта от внедрения комплекса технических решений по обеспечению безопасного слива сжиженного природного газа.

Ключевые слова: *сжиженный природный газ; слив; газовый баллон; экономический эффект.*

DETERMINATION OF THE ECONOMIC EFFECT WHILE ENSURING THE SAFE DISCHARGE OF LIQUEFIED NATURAL GAS FROM AUTOMOBILE GAS CYLINDERS

Raenbagin E.R., Ph.D. of tech. sci., Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk city

The article describes the method of determining the economic effect from the introduction of a set of technical solutions for ensuring the safe discharge of liquefied hydrocarbon gas.

Keywords: *liquefied natural gas; draining; Gas cylinder; economic effect.*

Внедрение в АТП поста слива СУГ из автомобильных газовых баллонов позволит уменьшить вынужденный расход СУГ и снизить простои газобаллонных автомобилей, предотвратит загрязнение окружающей среды и повысит пожарную безопасность при выполнении работ по ТО и ТР. Тогда ожидаемый экономический эффект от внедрения будет

$$Э = Э_1 + Э_2 + Э_3, \quad (1)$$

где $Э_1$ – экономический эффект от экономии СУГ и сокращения потерь времени на слив его из автомобильных баллонов, руб.; $Э_2$ – экономический эффект от предотвращения загрязнения окружающей среды, руб.; $Э_3$ – условный экономический эффект от повышения пожарной безопасности при выполнении работ по ТО и ТР газобаллонных автомобилей, руб.

Ожидаемый экономический эффект в этом случае определится по формуле

$$Э_1 = (З_1 L_1^{-1} - З_2 L_2^{-1}) L_2 - E_н K, \quad (2)$$

где $З_1$ – годовые затраты АТП до внедрения поста слива СУГ (по данным предприятия), руб.; $З_2$ – годовые затраты АТП после внедрения поста слива СУГ, руб.; L_1 – годовой пробег парка автомобилей до внедрения поста слива СУГ (поданным предприятия), км; L_2 – годовой пробег парка автомобилей после внедрения поста слива СУГ, км; $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K – капитальные вложения на строительство поста слива СУГ, руб.

Годовые затраты АТП на внедрение поста слива СУГ равны

$$З_2 = З_1 - З_Т + З_А + З_Э, \quad (3)$$

где $З_Т$ – стоимость СУГ, сливаемого на посту, руб.; $З_А$ – амортизационные отчисления на пост слива СУГ, руб.; $З_Э$ – затраты на эксплуатацию поста слива СУГ, руб.

Стоимость сжиженного газа, сливаемого на посту слива СУГ и затем используемого по назначению, определяется так:

$$З_Т = C_г G, \quad (4)$$

где $C_г$ – цена одной тонны СУГ, заправляемого на АГЗС, руб./т; G – масса газа, сливаемого на посту за год, т.

Стоимость сжиженного газа, сливаемого на посту слива СУГ и затем используемого по назначению, определяется так:

$$З_Т = C_г G, \quad (4)$$

где $C_г$ – цена одной тонны СУГ, заправляемого на АГЗС, руб./т; G – масса газа, сливаемого на посту за год, т.

Масса сливаемого на посту газа

$$G = G_г N, \quad (5)$$

где $G_г$ – масса газа в полностью заправленном баллоне, кг; N – количество баллонов, опорожняемых на посту за год, шт.

Масса газа в баллоне

$$G_г = 0{,}9\rho_ж V_б, \quad (6)$$

где $\rho_ж$ – плотность жидкой фазы СУГ, кг/м^3; $V_б$ – средний объем баллонов, опорожняемых на посту за год, м^3.

Общее количество опорожняемых в течение года баллонов рассчитывается по формуле

$$N = N_{ТО} + N_{СО} + N_{ОС} + N_о, \quad (7)$$

где $N_{ТО}$ – количество обслуживаний ТО-2; $N_{СО}$ – количество сезонных обслуживаний арматуры баллонов; $N_{ТР}$ – число текущих ремонтов газобаллонных автомобилей; $N_{ОС}$ – количество баллонов, подлежащих освидетельствованию; $N_о$ – количество отказов арматуры баллонов за год.

Количество обслуживаний ТО-2

$$N_{ТО} = \frac{L_1}{L_{ТО} K_1 K_3}, \quad (8)$$

где $L_{ТО}$ – нормативная периодичность ТО-2, км; K_1 – коэффициент корректирования нормативов в зависимости от условий эксплуатации; K_3 – коэффициент корректирования нормативов в зависимости от природно-климатических условий.

Количество сезонных обслуживаний арматуры баллонов

$$N_{СО} = A_И, \quad (9)$$

где $A_И$ – количество списочных автомобилей, работающих на сжиженном газе.

Число заездов автомобилей на текущий ремонт

$$N_{ТР} = t_{ТР} L_1 (1000 \cdot t)^{-1}, \quad (10)$$

где $t_{ТР}$ – норматив трудоемкости текущего ремонта на 1000 км пробега, чел.-ч.; t – среднее время простоя автомобиля в ремонте, ч.

Количество баллонов, подлежащих освидетельствованию, определяется из расчета, что все баллоны в течение двух лет должны пройти освидетельствование,

$$N_{ОС} = 0{,}5 A_И. \quad (11)$$

Возможное количество отказов арматуры баллонов

$$N_о = p_о A_И, \quad (12)$$

где $p_о$ – вероятность возникновения отказа (нарушение внутренней или наружной герметичности) ЗПА баллона.

Амортизационные отчисления на пост слива СУГ определяются следующим образом:

$$З_А = \frac{\alpha (C_{об} + C_м + C_{ос})}{100}, \quad (13)$$

где α – норма амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов, %; $C_{об}$ – стоимость оборудования поста слива, руб.; $C_м$ – стоимость монтажа оборудования, руб.; $C_{ос}$ – стоимость основных средств поста слива, руб.

Затраты на эксплуатацию поста слива сжиженного газа рассчитываются по следующей формуле:

$$З_э = З_{эл} + З_{иг} + З_р, \quad (14)$$

где $З_{эл}$ – затраты на электроэнергию, руб.; $З_{иг}$ – затраты на инертный газ, руб.; $З_р$ – заработная плата оператора поста, руб.;

Затраты на электроэнергию определяются из выражения

$$З_{эл} = c_э P k_{сп} T_{фо}, \quad (15)$$

где $c_э$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./(кВт·ч); P – мощность токоприемников поста, кВт; $k_{сп}$ – коэффициент спроса; $T_{фо}$ – фонд рабочего времени оборудования поста, ч.

Затраты на инертный газ для дегазации баллонов

$$З_{иг} = \frac{c_{иг} NM}{M_{иг}}, \quad (16)$$

где $c_{иг}$ – стоимость одного баллона с инертным газом, руб.; M – масса инертного газа, расходуемого на дегазацию одного автомобильного баллона, кг; $M_{иг}$ – масса инертного газа в баллоне, кг.

Заработная плата рабочего, обслуживающего пост слива СУГ из автомобильных газовых баллонов, определяется так:

$$З_р = c_т T_{фн} k_н, \quad (17)$$

где $c_т$ – тарифная ставка оператора 4-го разряда, руб./ч; $T_{фн}$ – номинальный годовой фонд времени рабочего, ч.; $k_н$ – коэффициент, учитывающий премии, дополнительную заработную плату и отчисления на страхование.

Годовой пробег парка газобаллонных автомобилей после внедрения поста слива СУГ зависит от сокращения времени простоя автомобилей, которое, в свою очередь, приведет к увеличению коэффициента выпуска автомобилей на линию.

Сокращение времени простоя автомобилей при наличии поста слива СУГ из баллонов для всего парка автомобилей определится из выражения

$$\Delta T = 0{,}0167(t_2 - t_1)N / t, \quad (18)$$

где t_1 – время полного слива СУГ из баллона среднего объема, мин; t_2 – время опорожнения такого же баллона путем выпуска паровой фазы в воздух, мин.

Продолжительность опорожнения баллона путем выпуска газа в воздух

$$t_2 = \frac{G_г}{G_{св}}, \quad (19)$$

где $G_{св}$ – массовый расход газа из баллона при свободном выпуске паровой фазы в окружающую среду, кг/мин.

Прирост коэффициента выпуска автомобилей на линию при наличии поста слива СУГ составит

$$\Delta\alpha = 100\Delta T(Д_р A_и)^{-1}, \quad (20)$$

где $Д_р$ – число рабочих дней в году.

Тогда годовой пробег парка газобаллонных автомобилей после внедрения поста слива СУГ определится по формуле

$$L_2 = L_1(1 + 0{,}01\Delta\alpha). \quad (21)$$

Капитальные вложения на строительство поста слива СУГ из автомобильных газовых баллонов включают в себя стоимость оборудования поста $C_{об}$, затраты на монтаж оборудования $C_м$ и расходы на строительные работы $C_{ос}$:

$$K = C_{об} + C_м + C_{ос}. \quad (22)$$

Ущерб окружающей среде, причиняемый выбросами (выпусками) СУГ в атмосферу в течение года определяется по формуле

$$У = \gamma\sigma f M, \quad (23)$$

где γ – удельные потери, руб./усл.т; σ – коэффициент относительной опасности загрязнения атмосферы над территорией АТП [1, 2]; f – величина, учитывающая характер рассеяния примеси в атмосфере; M – приведенная масса годового выброса загрязнений из источника, усл.т/год.

Значение σ для центральной части городов с населением свыше 300 тыс. чел., независимо от административной плотности населения, принимается равным 8 [1, 2].

Значение f при оценке ущерба от выброса аэрозолей принимается равным 10 [1, 2].

Значение приведенной массы годового выброса загрязнений в атмосферу от автомобиля определяется по формуле

$$M = \sum_{i=1}^{n} A_i m_i, \quad (24)$$

где m_i – масса годового выброса примесей i-го вида в атмосферу, т/год; A_i – показатель относительной агрессивности примеси i-го вида, усл.т/т; n – общее число примесей, выбрасываемых источником в атмосферу. Значение M определяется раздельно для каждого вида примесей. Значение показателя A_i определяется по формуле

$$A_i = a_i \alpha_i \delta_i, \quad (25)$$

где a_i – показатель относительной опасности присутствия примеси в воздухе, вдыхаемом человеком; α_i – поправка, учитывающая вероятность накопления исходной примеси или вторичных загрязнений в компонентах окружающей среды, а также поступления примеси в организм человека неингаляционным путем; δ_i – поправка, учитывающая действие на различные реципиенты, помимо человека.

Расчет показателей A_i и M_i для каждого вида примесей представлены в табл. 2.

Экономический эффект от предотвращения загрязнения окружающей среды численно равен величине причиняемого ущерба, т.е. $Э_2 = У$ [1].

Таблица 1

Опросный лист (февраль 2017 г.)

№	Предприятие	Количество сливов	Объем слитого газа, л
1	Газцентр "САГА"	16	352
2	Автомастерская "Электроник АВТО"	4	88
3	ООО "ЮЗА"	14	308
4	СТО "Автогаз"	2	44
5	СТО ООО "Авто-газ-сервис"	3	66
6	СТО "Автомастер55"	1	22
7	СТО "Автомастер"	2	44
8	Автосервис "Авто-техцентр+"	3	66
9	Автоцентр ООО "АГС"	5	110
10	ООО "АТХ-5"	0	0
11	Автосервис "Газ плюс"	2	44
12	СТО "ГазАвто+"	3	66
13	СТО ООО "ИнАвто"	4	88
14	Автокомплекс "Миллениум"	1	22
15	Сервисная фирма "Петролиум Газ Мастер"	5	110
16	Центр по установке газового оборудования "СГ-Трейдинг"	2	44
17	Автостудия "Соло"	0	0
18	Торгово-установочная фирма "Ультра-Газ Омск"	1	22
19	СТО "Экогаз"	2	44
20	Установочный центр "RusGaz"	1	22
	Итого	71	1562

Внедрение поста слива СУГ из автомобильных газовых баллонов значительно снижает вероятность возникновения пожара при выполнении работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту газобаллонных автомобилей.

Ущерб, нанесенный АТП возможным пожаром, определится как

$$У_п = Sp_п K_п, \quad (26)$$

где S – стоимость здания, оборудования, сооружений зон ТО, ТР и находящихся в этих зонах автомобилей, руб.; $p_п$ – вероятность возникновения пожара; $K_п$ – коэффициент нанесенного пожаром ущерба.

Условный экономический эффект от повышения пожарной безопасности, ввиду возможных безвозвратных потерь, численно равен величине ущерба, причиненного пожаром, т.е. $Э_3 = У_п$.

Отказ запорно-предохранительной арматуры является случайным процессом и возникает под влиянием многих переменных факторов, значение которых часто неизвестно. Данный процесс может быть описан функцией, которая при каждом новом значении аргумента характеризуется набором нескольких случайных величин. Отказ запорно-предохранительной арматуры можно описать нормальным законом распределения.

Выход из строя элементов мультиклапана газового баллона можно назвать случайным процессом, таким образом, необходимость слива газа из баллона является вероятностным событием.

Для выявления характера распределения количества отказов запорно-предохранительной арматуры и, следовательно, количества необходимых сливов газа из баллона были проведены наблюдения за работой 20 СТО в разных районах города, занимающихся монтажом и ремонтом ГБО. Пример ежемесячного опросного листа приведен в табл. 1. Наблюдения проводились на протяжении одного года. Получаемые в ходе исследований результаты использовались для построения графических зависимостей количества сливов и объемов сливаемого газа от времени года (рис. 1).

Собранная информация обрабатывалась с помощью методов теории вероятности и математической статистики [3]. Вычислялись значения выборочной дисперсии ошибок измерений и средняя квадратичная ошибка. Допустимые отклонения среднего

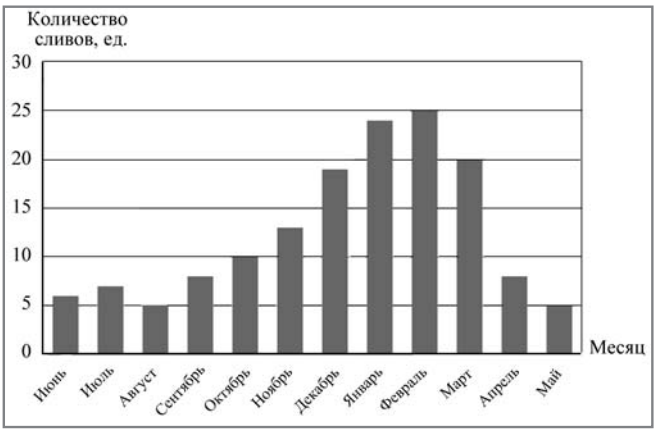

Рис. 1. Распределение количества сливов газа по месяцам

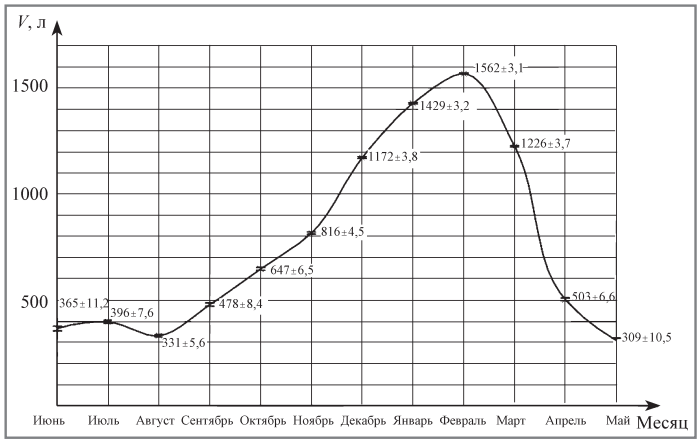

Рис. 2. Распределение объема сливаемого газа по месяцам

арифметического Δy от истинного значения измеряемой величины y определялось по формуле

$$\Delta y \pm \frac{t^{*} S^{u}}{\sqrt{u}}, \qquad (27)$$

где t^{*} – критерий Стьюдента.

Значение критерия Стьюдента определялось по таблице из источника [1] для доверительной вероятности 0,95. Расчет величины доверительных интервалов производился по методике, приведенной в [3].

Результаты расчетов объема сливаемого газа и величины доверительных интервалов представлены на рис. 2.

Исходя из проведенного анализа статистической информации, можно сказать, что ежегодно из-за нарушения технологии обслуживания ГБА в атмосферу города Омска выбрасывается Q =

Таблица 2

Расчет приведенной массы годового выброса загрязнений

Вещество	m_i, т	a_i	α_i	δ_i	A_i, усл.т/т	M_i, усл.т/год
Метан	0,315	0,63	1	2	1,26	0,4
Этан	0,236	1	1	1	1	0,24
Этилен	0,157	27,4	1	1,5	41,1	6,5
Пропан	2,624	0,63	1	2	1,26	3,3
n-Бутан	1,628	0,63	1	2	1,26	2
Изобутан	0,262	0,63	1	2	1,26	0,33
Бутилен	0,005	$6{,}3 \cdot 10^{6}$	2	1	$12{,}6 \cdot 10^{6}$	66 355
Сероводород	0,005	27,4	1	2	54,8	0,3
Серная кислота	0,016	24,5	1	2	49	0,8
Итого	5,248					66 368

= 5082±166 кг сжиженного пропан-бутанового газа с доверительной вероятностью 0,95.

Под экономическим ущербом понимаются негативные изменения основных свойств окружающей природной среды, выраженные в денежной форме [3, 7, 10]. Для определения экономического ущерба разработаны и применяются два методических подхода: метод прямого счета и метод обобщающих косвенных оценок.

Метод прямого счета, разработанный К.Г. Гофманом, А.А. Гусевым в 1970-е гг., охватывает широкий спектр потерь: от затрат на ликвидацию последствий загрязнения окружающей среды до расходов в здравоохранении и социальном обеспечении, связанных с ростом заболеваемости [7, 8]. Для столь объемных расчетов требуется привлечение специалистов разного профиля, поэтому на практике применяют упрощенный метод, изложенный в нормативном документе, разработанном Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды [1, 2].

Согласно типовой методике [1, 2], экономическая оценка ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух, определяется по формулам (23)–(25). Результаты расчета массы годового выброса загрязнений от слива СУГ в окружающую среду при эксплуатации в г. Омске 35 тыс. ГБА приведены в табл. 2.

Приведенная масса годового выброса загрязнений

$$M = 66\,368 \text{ усл.т/год.}$$

Ущерб от выброса СУГ в окружающую среду

$$У = 2{,}4 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 66\,368 = 12\,743\,000 \text{ руб./год.}$$

Эффект природоохранных мероприятий представляет собой предотвращенный ущерб в результате улучшения состояния окружающей среды [9, 10]. Разность предотвращенного ущерба и необходимых для этого издержек показывает величину абсолютного эффекта. Для предотвращения ущерба окружающей среде необходимо оборудовать пост слива СУГ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Временная** типовая методика определения предотвращенного экологического ущерба. Введ. 1999-03-09. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1999.

2. **Методические** указания по оценке и возмещению вреда, нанесенного окружающей природной среде в результате экологических правонарушений. Утв. Госкомэкологии РФ 6 сентября 1999 г.

3. **Румшиский Л.З.** Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство. М.: Наука, 1971. 192 с.

4. **Балацкий О.Ф.** Теоретические и практические вопросы определения экономического ущерба от загрязнения окружающей среды. Л: Гидрометеоиздат, 1984. 190 с.

5. **Боголюбов С.А., Сенчени И.С., Соловьева С.В.** Возмещение экологического ущерба: учебник. М.: Наука, 2001. 231 с.

6. **Бурдина Л.Г.** Оценка экологической эффективности производства // Вестник МАНЭБ. 1998. № 1. С. 23–24.

7. **Дьяков А.Ф., Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А.** Экономическая оценка социальных последствий риска. М.: Наука, 2007. 377 с.

8. **Чепурных Н.В., Новоселов А.Л.** Экономика и экология, развитие, катастрофы: монография. М.: Наука, 1996. 271 с.

9. **Загвоздкин В.К., Заикин И.А.** Методика оценки эколого-экономических последствий загрязнения земель нефтью и нефтепродуктами // Проблемы анализа риска. 2005. Т. 2. № 1. С. 6–32.

10. **Ильичева М.В.** Методы оценки экономического ущерба от негативного влияния загрязненной среды // Известия Челябинского научного центра. 2005. Вып. 3. С. 112–116.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ

М.И. Жаров, И.И. Денщиков

Добыча любых полезных ископаемых никогда не радовала экологов. Причина в самой природе углеводородов: они токсичны, пожароопасны, находятся под большим давлением и постоянно стремятся выйти из-под контроля.

Нефтяной "чернобыль" в тропиках

Мексиканский залив, нефтегазовое месторождение Makondo. Добычей нефти здесь занимается концерн British Petroleum (BP), его огромная нефтяная платформа DeepWater Horizon, находящаяся в 80 км от побережья Луизианы, пробурила скважину на глубину 3600 м под уровнем дна (глубина океана здесь еще полтора километра, так что оцените возможности техники!). Оставалось укрепить скважину цементом, чтобы надежно "запереть" нефть и газ. Технология работ такова: через обсадную колонну поступает спеццемент, а затем буровой раствор, который своим давлением вытесняет его вверх по скважине. Цемент затвердевает и создает надежную пробку. Затем в скважину подается морская вода, вымывающая раствор. Сверху на скважине дополнительно устанавливается защитный агрегат под названием превентор (о нем чуть ниже). В случае утечки он перекрывает нефти и газу путь наверх.

Подобные скважины работают без проблем долгие годы в самых разных странах, морях и природных условиях. Никто не спорит, что подводное бурение – сложная задача, но 3423 действующие скважины дают нефть только в одном Мексиканском заливе, а 25 из них – на глубинах моря более 300 м. Эта же платформа за семь месяцев до описываемых событий в 400 км от Хьюстона пробурила самую глубокую в мире скважину, уходящую под морское дно на глубину в 10,5 км!

"В случае, если скважина неожиданно начнет фонтанировать, создавая разлив нефти, не следует опасаться серьезных последствий, поскольку работы ведутся в соответствии с принятыми в данной отрасли нормами, используется проверенное оборудование и имеются методики, специально разработанные для подобных случаев..." – сказано в плане изыскательских работ, который за год до того компания BP представила в американскую надзорную инстанцию. Но что-то в тот весенний день пошло не так...

Филипп Джонсон, профессор Университета штата Алабама: "Если нефть, газ или простая вода попадут в процессе бурения в скважину (из-за недостаточной плотности бурового раствора), в скважине резко поднимется давление и возникнет возможность выброса. Если стенки скважины растрескались или цементный слой между обсадными трубами, защищающими бурильную колонну, и скальными породами в стенках скважины оказался недостаточно прочным, пузырьки газа могут взлететь вверх по бурильной колонне или снаружи обсадных труб, попадая внутрь колонны в местах стыков. При этом стенки скважины также могут растрескаться, создав возможности для утечек".

Утром 20 апреля 2010 г. в скважину закачали цемент, к полудню была проведена первая акустическая дефектоскопия цементной "пробки". 18 апреля бригада дефектоскопистов компании Schlumberger вылетела на буровую, однако BP отказалась от их услуг, нарушив регламент. Процедура должна была продлиться 12 ч, руководство не захотело ждать и отказалось от проверки. В 14:30 специалисты с оборудованием покинули платформу, а в скважину начали подавать буровой раствор.

Неожиданно в 18:45 давление в бурильной колонне подскочило до 100 бар. Это значило, что

Нефтяная платформа DeepWater Horizon в огне

Правительство США и BP договорились о 22 млрд долл. США за нефтяную катастрофу Deepwater Horizon (убытки от потери скважины, выплаты пострадавшим, затраты на устранение последствий катастрофы)

из скважины сочится газ. Однако в 19:55 была начата закачка воды, чего никак нельзя было делать в такой ситуации! Полтора часа вода подавалась с переменным успехом, резкие скачки давления то и дело прерывали работу. Ситуацию мог спасти противовыбросовый превентор, громоздкое сооружение с задвижками, построенное на океанском дне. При необходимости он перекрывает и заглушает вышедшую из-под контроля скважину. Но превентор на Macondo был неполноценным: одна из его трубных плашек, охватывающих бурильную колонну, была заменена на нерабочий вариант. На буровых порой позволяют себе такие замены – они снижают расходы на тестирование, авось пронесет...

Наконец, в 21:47 цементная заделка не выдерживает, вверх по колонне устремляется поток смеси метана, нефти и воды. В 21:49 раздался чудовищный взрыв и начался пожар. Столб черного дыма взметнулся на трехкилометровую высоту, словно над вулканом. Люди прыгали в воду с высоты 15-этажного дома. Система отключения платформы от скважины не сработала, и топливо продолжало подаваться в огонь.

Через 36 ч объятая пламенем огромная DeepWater Horizon опрокинулась и затонула. Из 126 членов команды буровой погибли 11 чел, 17 пострадали. "Налицо явная недооценка грозящих опасностей, – резюмировал Стив Арендт, вице-президент ABS Consulting и эксперт по безопасности нефтепереработки. – Длинная цепочка удач застила буровикам глаза. Они оказались просто не готовы".

Из открытой скважины в океан хлынула нефть. Черный поток не прекращался 152 дня, за это время в воду попало около 5 млн бареллей, пятно разлилось на 55 тыс. км^2, 1770 км песчаных пляжей побережья оказалось залито вязким мазутом. Погибли многие тысячи морских млекопитающих, птиц, черепах и прочих представителей фауны. Флоре побережья тоже досталось и не только ей. У тысяч людей огромного региона, не имеющих никакого отношения к нефтедобыче, пропали работа и бизнес (туризм, спорт, рыболовство).

Расследование, сделанное Бюро по управлению, регулированию и охране океанских энергоресурсов (BOEMRE) и Береговой охраной США, назвало 35 основных причин катастрофы, и в 21-м из них виновной признана BP. Компания заботилась только о прибыли, пренебрегая правилами техники безопасности и технологии глубоководного бурения. Оказались отключены системы контроля, поэтому ситуация оказалась неуправляемой. В результате такой в полном смысле слова преступной халатности BP потеряла более 20 млрд долл. США (убытки от потери скважины, выплаты пострадавшим, затраты на устранение последствий катастрофы).

С этими последствиями боролись десятки тысяч людей, специалистов и волонтеров. 7 мая 2011 г. была первая попытка установки нефтесборного купола, но только 4 августа утечку ликвидировали. Часть пятна удалось сжечь, пока в нем еще были легкие фракции. С водной глади "черное золото" собиралось специальными судами-скиммерами, а пляжи очищались вручную, механизация здесь бессильна. Люди отмывали спецрастворами несчастных пеликанов и чаек, черепах и дельфинов. Разумеется, всех спасти не удалось...

Основные последствия разлива нефти были устранены только к ноябрю 2011 г.

Катастрофа удивила и неожиданными результатами. Были открыты неизвестные до того бактерии, питающиеся нефтепродуктами. Эти микроорганизмы значительно уменьшили последствия катастрофы и сократили период восстановления. Вообще, если почитать статьи различных авторов семилетней давности, то апокалиптичность некоторых текстов зашкаливает. Особенно почему-то отличались этим российские пророки. Они предрекали полное вымирание жизни в Мексиканском

заливе, исчезновение Гольфстрима, изменение климата и прочие ужасы. Но уже через пять лет ничто не напоминало о трагедии, природа пережила удар.

Аналогичные, хоть и меньшие по масштабам катастрофы происходят при авариях нефтеналивных судов, особенно супертанкеров.

Вообще, и без катастроф при морской добыче и при поисково-разведочных работах на нефть и газ природа подвергается опасности в результате:

– нарушения покрова донных осадков и сообществ бентосных организмов при внедрении буровых снарядов в морское дно;

– воздействия нетоксичных буровых растворов на биоту, в том числе из-за повышения мутности воды около платформ;

– попадания в воду углеводородов всеми возможными путями.

Вернемся на землю

При освоении нефтяных и газовых месторождений наиболее активное воздействие на природную среду происходит в пределах территорий самих месторождений, трасс магистральных трубопроводов и в ближайших населенных пунктах. При этом нарушаются растительный, почвенный и снежный покровы, поверхностный сток и микрорельеф территории. Это приводит к сдвигам в тепловом и влажностном режимах грунта и к существенному изменению его общего состояния. Добыча нефти приводит к изменению глубоко залегающих горизонтов геологической среды.

В результате извлечения из недр нефти, газа и подземных вод, поддерживающих пластовое давление, происходят необратимые деформации земной поверхности. Перемещения ее, могут быть большими, чем даже при тектонических движениях.

Неравномерное протекающее оседание грунта часто приводит к разрушению водопроводов, железных и шоссейных дорог, линий электропередач и мостов. Оседания вызывают оползни и затопление низин. Могут происходить внезапные глубокие провалы, которые по характеру протекания и эффекту могут быть сравнимы с землетрясениями.

Опасность для окружающей среды представляют выбросы и разливы нефти (на каждый км^2 в зоне месторождений и трасс нефтепроводов приходится до 0,02 т разлитой нефти в год). На Самотлорском месторождении, например, более 20 тыс. км^2 территории загрязнено нефтью. Техногенные катастрофы происходят 3–4 раза в год.

При этом в отличие от теплого и солнечного Мексиканского залива потери российской нефти происходят в основном в северных широтах. Здесь активность солнца и бактерий на порядок ниже и мазутные озера в тундре не исчезают десятки лет!

Решение этой проблемы требует в первую очередь углубления переработки нефти, что приведет к рациональному ее использованию и улучшению состояния природной среды. Средняя глубина переработки нефти на российских нефтеперерабатывающих заводах составляет около 70 % (для сравнения в США – 90–98 %). Инвестиции в углубление переработки нефти в 5–7 раз эффективнее инвестиций в новые месторождения, это является одним из путей улучшения экологической обстановки.

Главная задача – свести к минимуму нежелательные последствия, рационально используя природные условия. Следует повышать уровень профессиональной подготовки и применять технологии для того, чтобы максимально эффективно проводить разведку и освоение месторождений. Необходимо оперативно компенсировать или устранять экологические последствия деятельности нефтяных компаний для окружающей среды.

В целях уменьшения загрязнения окружающей среды надо осваивать безамбарное бурение, позволяющее снизить объемы производственных отходов. Следует разрабатывать технологии по эффективной очистке загрязненных поверхностей с применением бактериальных препаратов и промывочных жидкостей.

По данным Совета Безопасности РФ, потери нефти в России в результате аварий ежегодно составляют 1,2 % от ее добычи, это не менее 3 млн т!

Дело – труба!

До 70 % российских трубопроводов требуют капитального ремонта. Основная причина аварий – коррозия. В России большинство машин и сооружений работают в агрессивных средах и только около 10 % не требуют активной антикоррозийной защиты. На внутрипромысловых трубопроводах 95 % отказов приходится на внутритрубную и наружную коррозию. Ежегодно по этой причине происходит до 40 тысяч аварий. Наиболее опасным видом коррозионного разрушения является коррозионное растрескивание под напряжением (само-

До 70 % российских трубопроводов требуют капитального ремонта

произвольное разрушение металла в результате одновременного воздействия агрессивной среды и механической силы). КРН характерно для трубопроводов большого диаметра с высоким давлением.

Основными методами диагностики магистральных газопроводов в России являются внутритрубная дефектоскопия и электрометрические измерения с последующим приборным обследованием состояния металла и изоляции труб в контрольных шурфах.

Внутритрубная дефектоскопия – это, несомненно, наиболее эффективный метод получения данных о размерах повреждений. Однако пока только половина трасс подготовлена к пропуску снарядов-дефектоскопов.

В дальнейшем, для повышения эффективности диагностических и ремонтных работ на трубопроводах, основным видом диагностики трубопроводов должен стать коррозионный мониторинг. Но радикальным путем станет замена материала.

Пригодных для изготовления труб для нефтяной отрасли материалов, собственно, два: высокопрочная сталь и армированный полипропилен (PPR). Сравним их эксплуатационные свойства.

У стальной трубы высокая герметичность. В этом плане она достаточно надежна. Однако по этому показателю сталь все же уступает полипропилену. Полипропиленовые армированные трубы способны " абсолютно" удерживать не только жидкости, но и газы.

Нефтепроводы обычно эксплуатируются постоянно, поэтому очень важно подобрать материал, который будет работать несколько десятков лет. Стальные трубы служат не очень долго – всего 10–15 лет при интенсивных нагрузках и не слишком устойчивы к износу. Основная проблема заключается в коррозии, которая очень быстро разрушает практически любую сталь. Ко многим химическим реагентам сталь более-менее устойчива, однако ее коррозионная слабость портит дело.

Трубы из полипропилена стойко выдерживают самые разные типы воздействия (от механических и термических до химических и биологических) и могут эксплуатироваться в течение полувека, однако на практике (по результатам испытаний), их ресурс оказывается больше, что позволяет считать PPR трубы практически вечными. Полипропилен совершенно не подвержен коррозии и на удивление износостоек, он не теряет гладкости и прочности с годами.

По цене качественная сталь уступает разве что меди, поэтому прокладка многокилометрового стального нефтепровода – удовольствие дорогое. Армированные полипропиленовые трубы значительно превосходят стальные по соотношению цена–качество. Нефтепровод из PPR труб обойдется в разы дешевле.

Стальные трубы подвержены частым засорам, поэтому время от времени нуждаются в чистке. Полипропиленовые трубы не требуют никакого обслуживания в течение всего срока эксплуатации. Полипропилен легкий и исключительно гладкий, поэтому образование отложений и засоров в полипропиленовых трубах полностью исключено.

Стальные трубы рано или поздно ржавеют, и коррозия через несколько лет эксплуатации разъедает сталь насквозь. Полипропилен не взаимодействует с кислотами, щелочами, с нефтью и нефтепродуктами, а также не подвергается коррозионным процессам.

Стальные трубы способны выдержать практически любое давление в системе, их прочностные характеристики не вызывают нареканий.

Конечно, армированные полипропиленовые трубы уступают по прочности стальным, однако следует заметить, что даже при высоких давлениях в нефтепроводе стальные трубы не испытывают даже 5 % допустимой нагрузки. У полипропиленовых труб этот показатель обычно не превышает 20–25 %, т. е. запас прочности составляет еще не менее 3/4. Поэтому полипропилен для данных

целей можно считать практически равнозначным стали.

Стальные трубы не слишком хорошо переносят низкие температуры, поэтому часто в регионах с пониженной температурой им предпочитают трубы из других материалов. Сталь постепенно деформируется под воздействием отрицательных температур, что в итоге может приводить к серьезным проблемам.

Трубы из полипропилена одинаково хорошо переносят как высокие (кроме экстремально высоких), так и низкие температуры (здесь ограничений практически нет – во всяком случае, климатических). Полипропилен не деформируется в холодную погоду, а потому нефтепровод будет функционировать в штатном режиме без изменения уровня давления в системе.

Рассмотрев важнейшие для нефтяной отрасли свойства труб из двух материалов, отметим значительное преимущество полипропиленовых. Они более герметичны и долговечны, дешевле и гораздо удобнее в обслуживании. Кроме того, они превосходят стальные по химической устойчивости и морозостойкости. Преимущество стальных труб – высокая прочность. Однако этот показатель не является решающим.

Можно сделать вывод, что вскоре трубы из армированного полипропилена практически полностью заменят стальные в нефтегазовой отрасли. Это, несомненно, благоприятно отразится и на экологической обстановке.

Остановить факельное шествие!

Чадящие факелы давно стали неотъемлемым элементом на фоне колонн и газгольдеров НПЗ и на месторождениях. Зачем сжигать ценное сырье, да еще с таким дымом, а значит с целым набором вредных соединений? Такой вопрос волнует многих, но специалисты дают объяснение.

На многих НПЗ или нефтехимических предприятиях есть процессы, протекающие под давлением. Во избежание аварий, связанных с несанкционированным превышением давления такие аппараты снабжены предохранительными клапанами. Куда девать те газы, которые сбрасывает этот клапан? Просто так сбрасывать в атмосферу их нельзя, очень вредно, взрыво- и пожароопасно. Поэтому их сбрасывают "на факел" и сжигают. А поскольку аварийный сброс может произойти в любое время, нужно, чтобы факел горел постоянно. Поэтому на любом нефтеперерабатывающем или нефтехимическом предприятии круглосуточно горит факел.

На любом нефтеперерабатывающем или нефтехимическом предприятии круглосуточно горит факел

Чтобы уменьшить выброс сажи в пламя подают водяной пар. Это несколько снижает загрязнение, но усиливает шум от горящего факела и вызывает недовольство жителей близлежащих районов (тоже экология!).

У факелов есть и экономическое "оправдание". Нефть представляет собой в основном смесь углеводородов, содержащую и так называемые легкие (имеющие низкую температуру кипения и газообразные) углеводороды. Попадание их в бензиновую фракцию недопустимо, они увеличивают взрывоопасность бензинов. В то же время этих фракций совсем немного, менее 1 % от массы перерабатываемой нефти. Если бы их было больше, то имело бы смысл их перерабатывать, что и делается на крупных НПЗ. А их образуется всего несколько кубометров в час. Затраты на их сбор и переработку ложатся дополнительным бременем на стоимость продукции. Дешевле их просто сжигать, чем тратиться на утилизацию.

Подсветка от пламени факелов на позволила сделать оценки масштабов сжигания попутного газа. По этим оценкам в сжигается около 50 млрд м^3 в год, официально – около 15–20 млрд.

Тем не менее прогресс и экологические нормы требуют остановить неэффективное и вредное сжигание попутного газа. Россия планирует (по крайней мере, так официально заявлено) прекратить использование газовых факелов.

РЫНОК КРУПНОТОННАЖНЫХ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В.Г. Семаков

К сегменту крупнотоннажных грузовиков (HCV) относятся автомобили, имеющие полную массу свыше 16 т. В 2016 г. рынок новых машин этой категории составил 36 тыс. ед. – на 11,4 % больше, чем годом ранее. Таким образом, рост продаж зафиксирован впервые после трех лет падения.

По данным агентства "АВТОСТАТ", безоговорочным лидером в этом сегменте традиционно является КАМАЗ, который в прошлом году продолжил укреплять свои позиции, заняв более половины рынка (50,3 %). Автомобили отечественной марки KAMAZ разошлись тиражом в 18,1 тыс. экз., что на 16,4 % больше по сравнению с 2015 г. Рост спроса обеспечивает новый модельный ряд компании, особенно в сегменте магистральных тягачей. Кроме того, весной прошлого года КАМАЗ вывел на рынок самосвалы нового модельного ряда.

Второе место со значительным отставанием сохраняет Минский автозавод, реализовавший 3,1 тыс. тяжелых грузовиков (–9,1 %) и занявший в результате 8,6 % российского рынка крупнотоннажной техники.

Лидером среди иностранных брендов в сегменте HCV остается шведская Scania, чьи продажи в прошлом году составили 2,5 тыс. машин (–1,1 %). На четвертую строчку рейтинга поднялся MAN с показателем 2,1 тыс. автомобилей (+19,6 %), чему способствовал высокий спрос на продукцию немецкой компании в сегментах тягачей и самосвалов. Таким образом, российский "Урал" опустился на пятое место, сохранив реализацию на прошлогоднем уровне – около 2,1 тыс. грузовиков (+0,2 %). Стоит отметить, что прошлый год стал первым полным годом продаж автомобилей нового семейства "Урал NEXT", поступивших на рынок в конце 2015 г.

Седельный тягач КАМАЗ-5490

Благодаря растущему спросу на флагманский грузовик Mercedes-Benz Actros, смог нарастить реализацию Mercedes-Benz – на 10,8 % до почти 2 тыс. машин по итогам 2016 г.

Шведская Volvo увеличила продажи еще больше – на 70,7 % до 1,7 тыс. автомобилей, что, впрочем, во многом обусловлено низкой базой 2015 г., когда на восемь месяцев была приостановлена сборка на российском заводе компании. Восьмой результат показал российский НЕФАЗ– 1,5 тыс. тяжелых грузовиков, что на 45,1 % больше по сравнению с 2015 г. Далее следует голландский производитель DAF, реализовавший 942 машины (+48,6 %).

Замыкает десятку лидеров по-прежнему японский Isuzu с показателем 548 автомобилей (–3,7 %). Доли каждого из оставшихся участников российского рынка крупнотоннажных грузовиков находятся ниже 1 %.

Региональная структура рынка HCV

Для российского рынка грузовой техники, в отличие от Западной Европы, характерно заметное преобладание крупнотоннажных автомобилей, чья доля составляет 67,5 %. Одним из определяющих факторов этого является то, что наша страна имеет намного большую территорию по сравнению с европейскими государствами, и для максимальной выгоды в сфере грузоперевозок целесообразнее использовать технику большей грузоподъемности.

Из 36 тыс. проданных в 2016 г. новых грузовых автомобилей полной массой свыше 16 т 28,5 % пришлось на Центральный ФО,

Седельный тягач Scania R730

в котором реализовано 10,3 тыс. таких машин (+6,9 %). При этом в региональном рейтинге лидирует Москва, где своих покупателей нашли 4,3 тыс. грузовиков (–2,4 %), а вот Подмосковье занимает в нем лишь пятую строчку с показателем 1,9 тыс. единиц (+14,1%). Вторым по объему продаж крупнотоннажной техники является Приволжский федеральный округ – реализация 6,8 тыс. грузовых автомобилей (+5,3 %) обеспечила ему почти 19%-ную долю рынка. Регионом-лидером здесь остается Республика Татарстан, чей результат составил 2,2 тыс. машин (+7,1 %). Третью строчку в рейтинге федеральных округов занимает Уральский ФО с долей 15,8 % – это 5,7 тыс. крупнотоннажных грузовиков (+22,8 %). При этом входящий в состав УФО Ханты-Мансийский АО – Югра занял второе место в региональном рейтинге после Москвы с показателем 3,1 тыс. автомобилей (+38,3 %).

Практически равные объемы реализации "крупнотоннажников" в 2016 г. зафиксированы в Северо-Западном ФО (4,1 тыс. шт.; +20,7 %) и Сибирском ФО (4,1 тыс. шт.; +5,6 %), а их доля составляет 11,4 и 11,3 % соответственно. Стоит отметить, что почти половину продаж на Северо-Западе обеспечивает рынок Санкт-Петербурга, который занимает четвертое место в региональном рейтинге с результатом 2 тыс. машин (+54,7 %).

Наибольший рост спроса на новые грузовые автомобили полной массой свыше 16 т наблюдался в Южном ФО – на 28,5 % до 2,3 тыс. ед. В Дальневосточном ФО в прошлом году реализовано 2 тыс. тяжелых грузовиков (+7,4 %). Меньше всего таких машин продается в Северо-Кавказском ФО – 726 автомобилей (+7,1 %) по итогам 2016 г.

Прогноз развития рынка HCV в России

Совокупность макроэкономических факторов, выбранных для моделирования рынка HCV, частично совпадает с составом факторов, использованных при про-

Самосвал MAN TGS

гнозе рынка легкотоннажных автомобилей (CV) . Отличия заключаются в том, что вместо факторов "Среднегодовой курс EURO", "Годовой оборот розничной торговли" и "Среднегодовая цена дизельного топлива" здесь были использованы такие, как "Среднегодовая цена нефти Brent", "Годовой объем импорта" и "Годовой объем грузооборота". Под последним фактором подразумевается объем грузооборота автотранпорта по РФ.

Среди этих выбранных факторов наиболее влиятельными являются следующие: "Среднегодовая цена нефти Brent", "Годовой объем импорта" и "Годовой объем грузооборота".

В случае развития российской экономики в 2017 г. по варианту "базовый+" все три перечисленных фактора должны будут показать умеренную позитивную динамику.

Так, предполагается рост цены нефти Brent с 45 USD/барр., до 50 USD/барр., годовой объем импорта может вырасти на 7–7,5 %, а годовой объем грузооборота – примерно на 1–1,5 %. Дополнительным условием восстановления рынка CV должна быть реализация мер поддержки автопрома и рынка, предусмотренных в 2017 г.

Согласно базовому сценарию развития, рынок HCV в 2017 г. может вырасти примерно на 11 %, т.е. до 39,8 тыс. автомобилей. В оптимистичном варианте рост может составить 19 %, а общий объем продаж – 43 тыс. автомобилей. Пессимистичный вариант прогноза предполагает небольшой показатель роста – около 6 %, или 38 тыс. машин. В период 2018–2019 гг. рост рынка HCV продолжится, однако в зависимости от сценария динамика роста будет существенно отличаться. По базовому сценарию рост может составить: 15 % – в 2018 г. и 14 % – в 2019 г., что обеспечит выход рынка по итогам 2019 г. на общий объем продаж около 52 тыс. автомобилей.

Самосвал Урал NEXT

В марочной структуре рынка HCV в 2017 г. ПАО "КАМАЗ" продолжит укреплять свои лидирующие позиции. Можно ожидать роста объема продаж тяжелых грузовиков "КАМАЗ" примерно на 15 %, что позволит еще увеличить свою рыночную долю с 50 до 52 %. При этом предполагается, что родственная марка НЕФАЗ тоже сможет нарастить продажи не менее чем на 10–11 %. Третья российская марка "Урал", вероятнее всего, сохранит объем продаж на прошлогоднем уровне или немного добавит к нему – 3–4 %.

Белорусская марка МАЗ вряд ли сможет преодолеть тенденцию спада последних лет и в лучшем случае потеряет 6–7 %, а ее рыночная доля снизится с 8,6 до 7,3 %.

Прогнозы по отношению марок-представителей "большой семерки" носят исключительно позитивный характер, за исключением марки Renault. По мнению "АВТОСТАТА", наиболее высокая динамика роста может сохраниться у марок Volvo и DAF, а именно 28 и 17 % соответственно. Марка MAN вполне может достичь роста в 12 %, а остальные марки: Scania, Mercedes-Benz и Iveco, – скорее всего, покажут умеренную динамику в 5–7 %. Кстати, в 2017 г. "большая семерка" может увеличить суммарный объем продаж примерно на 12–13 %.

НА "КАМАЗЕ" ОБСУЖДЕНЫ ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОМОТОРНОЙ ТЕХНИКИ

В ПАО "КАМАЗ" состоялось расширенное совещание по вопросам эксплуатации газомоторных автомобилей и автобусов с участием представителей министерств РТ и предприятий, использующих эту технику.

Сегодня ПАО "КАМАЗ" является ведущим российским производителем автомобилей и автобусов, работающих на природном газе

В рамках мероприятия компанию посетила большая делегация во главе с помощником премьер-министра Татарстана по вопросам нефтегазохимического комплекса Э.Р. Адеевым. В ее составе были также заместители министра транспорта и дорожного хозяйства РТ А.В. Егоров и А.Н. Усманов, замминистра промышленности и торговли РТ И.Р. Мингалеев, генеральный директор Казанского филиала ООО "Газпром газомоторное топливо" Б.Б. Газизуллин и др.

"Сегодня газомоторный рынок находится в фазе динамичного роста, и получение информации и практических рекомендаций непосредственно от потребителей позволяет нам быстро и оперативно решать проблемы развития этого инновационного направления", – пояснил директор по газомоторной технике ПАО "КАМАЗ" Е.П. Пронин. Он также отметил, что за семь месяцев, прошедших с предыдущей встречи "КАМАЗ" внедрил большинство рекомендаций и существенно поднял уровень качества и оперативности технического сервиса.

Комплексное обслуживание потребителей является приоритетом деятельности ПАО "КАМАЗ", поэтому хорошей традицией в компании стали встречи с транспортными предприятиями Татарстана, эксплуатирующими газомоторную технику. Активное содействие такому сотрудничеству оказывают Минпромторг и Минтранс республики.

Формат мероприятия включал доклады по совершенствованию и развитию газомоторной техники, развитию сервиса, формированию в Татарстане заправочной инфраструктуры, а также ознакомление с камазовским производством газомоторных автомобилей. Большой интерес участников вызвали новые модели газодизельных тягачей КАМАЗ-5490 и первые в России серийные автомобили на сжиженном природном газе. Традиционно обмен информацией вызвал большой интерес обеих сторон, и было признано целесообразным продолжить эту практику.

Собственный корпус по производству газомоторных автомобилей был открыт на автозаводе в апреле 2015 г., в рамках выполнения государственной программы по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива. В настоящее время ПАО "КАМАЗ" является ведущим российским производителем автомобилей и автобусов, работающих на компримированном природном газе. В газомоторном исполнении компания серийно производит практически весь традиционный модельный ряд, включая работающие на компримированном природном газе автобусы и спецтехнику.

При этом развитие производства техники, работающей на газовом топливе, является для "КАМАЗа" одним из важнейших направлений. В 2017 г. компания выпустила и первой в России сертифицировала две модели автомобилей, работающих на сжиженном природном газе. Первыми СПГ-автомобилями стали КАМАЗ-65117-37 и КАМАЗ-65116-37.

Пресс-служба ПАО "КАМАЗ