

На правах рукописи



ПЕТРОВ НИКОЛАЙ ВАДИМОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БЕНЗИНОВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА БИОГАЗ
КОРРЕКТИРОВАНИЕМ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.20.03. – «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2013

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Друзьянова Варвара Петровна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК» ФГБОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия»
Болоев Петр Антонович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили» ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский университет технологий и управления»

Гергенов Сергей Митрофанович

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в 13 час. на заседании диссертационного совета ДМ 212.039.06 при ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» по адресу: 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 в, ВСГУТУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим отправлять в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». С авторефератом можно ознакомиться на сайте ВАК Минобрнауки РФ (<http://vak.ed.gov.ru>).

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Б.Д. Цыдендоржиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На территории Якутии в данное время имеется 297 труднодоступных населенных пунктов, где проживает 742 500 чел. [1].

Труднодоступность заключается в том, что в большинстве случаев до них наземным путем можно доехать только по зимним дорогам. Весь необходимый ресурс - продукты, товары, топливо и т.д., завозят зимой и не всегда в полном объеме, поэтому в период распутицы - весной и осенью – остро встает вопрос нехватки ресурсов, в том числе и топливная проблема.

Актуальной является и проблема защиты окружающей среды от токсичных компонентов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работающих на жидких топливах нефтяного происхождения.

Одним из путей решения этих проблем послужило бы внедрение биогазовой технологии утилизации сельскохозяйственных отходов. Как известно, в результате использования биогазовой технологии получают качественное удобрение и сопутствующий продукт в виде биогаза. Биогаз является горючим газом и применяется в котлах отопления, газовых плитах для приготовления пищи, двигателях внутреннего сгорания.

В сельской местности Республики Саха (Якутия) основным потребителем жидкого топлива нефтяного происхождения является сельскохозяйственная техника. Даже частичный перевод этой техники на биогаз позволил бы снизить потребление жидких нефтяных топлив в отдаленных районах. В итоге снижение затрат на транспортировку жидкого топлива обеспечило бы высвобождение значительных средств, которые можно направлять на развитие отдаленных районов республики. Кроме того, биогазовая технология позволяет перейти фермерским хозяйствам на автономное бесперебойное энергообеспечение, что, несомненно, снизит себестоимость сельскохозяйственной продукции.

Таким образом, перечисленные выше особенности биогаза позволяют сделать вывод о необходимости перевода парка сельскохозяйственной техники Республики Саха (Якутия) на биогаз, что делает актуальной тему данной диссертационной работы.

Работа выполнялась в соответствии планами научных работ ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в рамках следующих тем:

1. Грант ректора СВФУ им М.К. Аммосова для студентов и молодых ученых на 2012 г. Тема проекта: «Технология применения биогаза в двигателях внутреннего сгорания».

2. Грант ректора СВФУ им М.К. Аммосова для студентов и молодых ученых на 2013 г. Тема проекта: «Разработка лабораторной биогазовой автозаправки в Республике Саха (Якутия)».

3. Проект № 4279 по государственному заказу Министерства образования и науки РФ на 2012-2014 год: "Разработка технологии получения возобновляемого энергетического ресурса из биомассы для использования в распределенной системе энергоснабжения региона".

Цель работы. Исходя из вышесказанного, целью данной работы были разработка и обоснование методики по обеспечению работоспособности дви-

гателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники, работающих на бензине, при переводе на биогаз путем изменения регулировочных параметров ДВС.

Задачи исследований. В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

1) выявление закономерности процессов сгорания и образования токсичных компонентов в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) при применении биогаза в качестве моторного топлива;

2) выявление закономерности изменения регулировочных параметров ДВС (коэффициента избытка воздуха α и угла опережения зажигания θ) от объемного содержания двуокиси углерода в биогазе;

3) определение технико-экономических показателей ДВС при работе на биогазе;

4) разработка технологической линии биогазовой заправочной станции;

5) оценка экономического эффекта от эксплуатации сельскохозяйственной техники с ДВС, работающей на биогазе.

Объект исследований. Процессы сгорания и образования токсичных компонентов в ДВС при работе на биогазе.

Предмет исследований. Закономерности процессов сгорания и образования токсичных компонентов в ДВС работающих на биогазе.

Методы исследований. Математическое моделирование процесса сгорания и образования токсичных компонентов в цилиндре ДВС, работающего на биогазе; экспериментальное определение показателей процесса сгорания, экономических и экологических показателей ДВС, работающего на биогазе, на тормозном стенде; методика обработки экспериментальных индикаторных диаграмм и характеристик тепловыделения.

Рабочая гипотеза – обеспечение работоспособности ДВС сельскохозяйственной техники, работающего на бензине, при переводе на биогаз возможно путем изменения регулировочных параметров ДВС - состава горючей смеси и угла опережения зажигания в зависимости от химического состава биогаза.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель, характеризующая влияние химического состава биогаза и регулировочных параметров ДВС (коэффициента избытка воздуха α и угла опережения зажигания θ) на процессы сгорания и образования токсичных компонентов.

2. Обосновано обеспечение работоспособности ДВС сельскохозяйственной техники, работающих на бензине, при переводе на биогаз путем изменения регулировочных параметров ДВС.

Практическая значимость работы. Корректировка алгоритма работы системы управления двигателем позволяет обеспечить работоспособность ДВС при применении биогаза в условиях сельскохозяйственного производства.

На основании проведенных исследований определены:

- функциональные зависимости расчета регулировочных параметров ДВС - состава горючей смеси α и угла опережения зажигания θ в зависимости

от объемного содержания двуокиси углерода;

- алгоритм работы системы управления двигателем, учитывающий изменение объемного содержания двуокиси углерода в биогазе;

- технико-экономические показатели работы ДВС при применении биогаза;

- экономическая эффективность применения биогаза в качестве моторного топлива для ДВС в условиях сельского хозяйства.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель, характеризующая влияние химического состава биогаза и регулировочных параметров ДВС (коэффициента избытка воздуха α и угла опережения зажигания θ) на процессы сгорания и образования токсичных компонентов;

2. Зависимости, характеризующие закономерности изменения регулировочных параметров ДВС (состава горючей смеси α и угла опережения зажигания θ) от объемного содержания двуокиси углерода в биогазе;

3. Зависимости, характеризующие закономерности изменения индикаторных и эффективных показателей ДВС при изменениях объемной доли двуокиси углерода в биогазе и регулировочных параметров ДВС - состава горючей смеси α и угла опережения зажигания θ .

Реализация результатов работы:

1. Разработанная методика расчета показателей работы и корректировок регулировочных параметров ДВС, работающих на биогазе, вследствие наличия углекислого газа в составе биогазового топлива внедрены в производство на Харьковском авторемонтном заводе № 126.

2. Разработанная пилотная биогазовая автозаправочная станция сооружена и запущена на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на: I Международной научно-практической конференции «Научные итоги 2011 года: достижения, проекты, гипотезы» (Новосибирск, НГТУ, 2011); IX Молодежной научно-практической конференции «Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания» (Новосибирск, НГТУ, 2012); VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2012); XV и XVIII Международных заочных научно-практических конференциях «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, НГТУ, 2012, 2013); Форуме научной молодежи Республики Саха (Якутия), посвященном 75-летию академика В.П. Ларионова (Якутск, ИФТПС СО РАН, 2013); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, ИрГСХА, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 1 работа – в издании, рекомендованном ВАК РФ. В данных работах отражены основные положения диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из вве-

дения, пяти глав, общих выводов, списка используемой литературы приложений. Полный объем работы содержит 148 страниц машинописного текста, в том числе 40 рисунков и 15 таблиц; список использованных источников состоит из 108 наименований на 12 страницах; приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, определены пути их решения, приведена информация о научной новизне и практической ценности работы, определен личный вклад соискателя в полученные результаты.

В первой главе выполнен анализ физико-химических свойств биогаза, как моторного топлива и рассмотрены способы его получения. Технология анаэробного сбраживания отходов органического происхождения позволяет решать не только проблему их утилизации, но и попутно производит биогаз – топливо, более экологически чистый, чем бензин или дизтопливо, дополнительный источник энергии для сельскохозяйственных двигателей. Следует отметить, что основным продуктом биогазовой технологии выступает высококачественное органическое удобрение.

Вопросам получения биогаза в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и проблемам улучшения их технико-экономических показателей посвящены труды И.И. Тимченко, Д. Рамадана, В. Баадера, В.Л. Чумакова, Н.В. Краснощекова, А.Д. Передерия, Т.Я. Андриюхина, Д. Каласса, К. Уолкера, А.Н. Захарченко, Б. Эдера и других авторов.

Проделанный анализ мирового опыта по использованию биогаза в качестве моторного топлива позволил сделать вывод, что данное топливо является одним из наиболее перспективных заменителей ископаемых углеводородных топлив.

Имеющаяся в настоящее время проблема снабжения топливом отдаленных районов Республики Саха (Якутия) требует поиска дополнительных путей решения. В связи с этим показано, что производство биогаза из местного сырья является одной из наиболее эффективных альтернатив транспортировке углеводородных топлив в эти районы.

Согласно информации из многочисленных научных источников, биогаз требует тщательной очистки перед его использованием в качестве топлива для ДВС. Анализ существующих методов показал, что для Якутии наиболее дешевым и перспективным способом очистки и обогащения биогаза является применение механических фильтров с наполнителями из природных цеолитов, добываемых в Республике Саха (Якутия).

Вторая глава посвящена математическому моделированию процессов сгорания топлива и образования токсичных компонентов в ДВС, работающем на биогазе.

В разделе приведена структурная схема теоретического исследования (рис. 1).

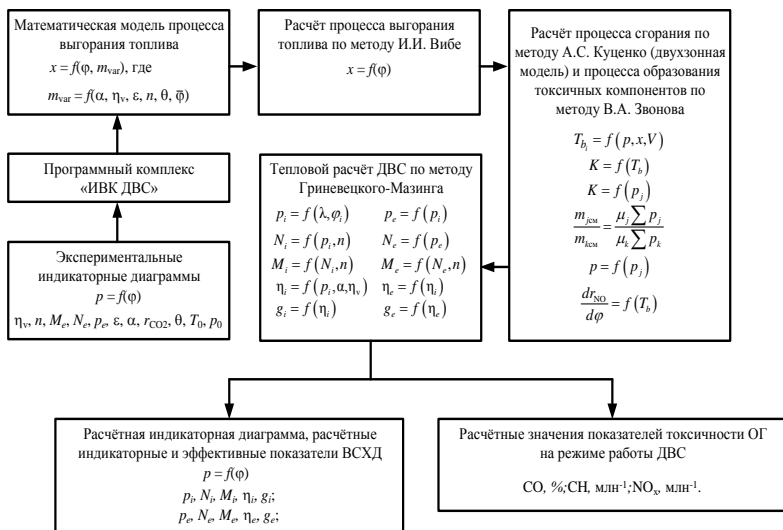


Рис. 1. Структурная схема теоретического исследования

В рамках данного исследования был осуществлен выбор математической модели, позволяющей описывать процесс выгорания углеводородного топлива. Показано, что для решения данной задачи лучше всего подходит метод расчета характеристик выгорания топлива проф. И.И. Вибе:

$$x = 1 - \exp \left(-6,908 \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_z} \right)^m \right), \quad (1)$$

где x – доля выгоревшего топлива; φ – текущий угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.; φ_0 – угол начала сгорания, град. п.к.в.; φ_z – угол продолжительности сгорания, град. п.к.в.; m – показатель характера сгорания Вибе.

Для адаптации данного метода к условиям процесса выгорания биогаза в цилиндре ДВС и повышения точности расчетов показателей токсичности, в модели И.И. Вибе (1) вместо постоянного значения показателя сгорания m использовался переменный показатель сгорания $m_{\text{вар}}$, изменяющийся в течение данного процесса.

Для расчета значения $m_{\text{вар}}$ использовалась эмпирическая формула А.П. Кузьменко для ДВС, работающего на природном газе:

$$m_{\text{вар}i} = 10,639 \cdot \bar{\varphi}_i \cdot (\alpha + 0,00025) \cdot \frac{\theta + 18}{40} \times \frac{\eta_v - 0,25}{0,8} \cdot \frac{\varepsilon + 1}{11} \cdot \frac{n + 500}{5000} - \dots \quad (2)$$

$$\dots - 28,025 \cdot \bar{\varphi}_i^2 + 98,045 \cdot \bar{\varphi}_i^3 - 156,86 \cdot \bar{\varphi}_i^4 + 86,88 \cdot \bar{\varphi}_i^5,$$

где $\bar{\varphi}_i$ – относительный угол сгорания, $\bar{\varphi}_i = 0 \dots 1$; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} ; α – коэффициент избытка воздуха; η_v – коэффициент наполнения; θ – угол опережения зажигания, град. п.к.в. до ВМТ; ε – степень сжатия.

Расчет угла продолжительности сгорания φ_z при работе ДВС на природном газе выполнялся по эмпирической зависимости:

$$\varphi_z = 31 \cdot (0,812 \cdot \alpha - 0,045 \cdot \theta + 4,223 \cdot 10^{-4} \cdot n - 0,1258 \cdot \eta_v + 0,107), \quad (3)$$

Сравнение расчетных характеристик выгорания топлива и результатов предварительных экспериментальных исследований ДВС, работающего на биогазе, показало, что при наличии CO_2 в топливе необходима усовершенствование математической модели процесса выгорания топлива. Соответственно, встала необходимость корректировки эмпирических зависимостей для расчета значений m_{var} и φ_z , учитывающих наличие CO_2 в биогазе.

Для получения данных зависимостей было выполнено индицирование ДВС, работающего на биогазе, на 22 режимах работы с варьированием объемной доли двуокиси углерода $r_{\text{CO}_2} = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$.

После обработки индикаторных диаграмм и получения экспериментальных характеристик выгорания топлива для определения значений m_{var} использовалось соотношение, полученное А.Н. Кабановым:

$$m_{\text{var}} = -1 - \log_{\bar{\varphi}} \frac{-6,908}{\ln(1-x)}, \quad (4)$$

Таким образом, для ранжированных значений $\bar{\varphi}_i$, найденных значений m_{var} была получена серия экспериментальных характеристик m_{var} .

На рисунке 2 приведены экспериментальные характеристики для переменного показателя сгорания m_{var} для режима максимального крутящего момента ($n = 3600 \text{ мин}^{-1}$; $\eta_v = 0,79$; $\alpha = 1,05$; $\theta = 32 \text{ град. пкв до ВМТ}$) для различного содержания CO_2 в биогазе.

На рисунке 3 приведена экспериментальная характеристика угла продолжительности сгорания φ_z в ДВС, работающем на биогазе, на этом же режиме от содержания CO_2 в биогазе. Из рисунка 3 видно, что данная зависимость имеет вид прямой пропорциональности.

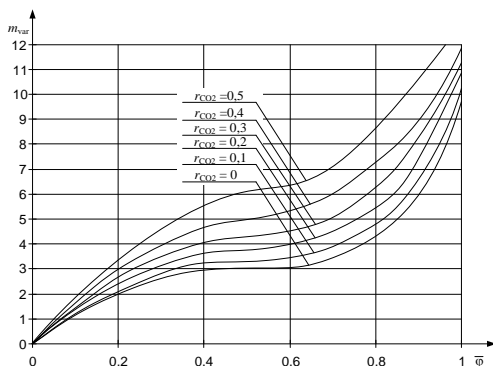


Рис. 2. Зависимость показателя m_{var} от содержания CO_2 в биогазе

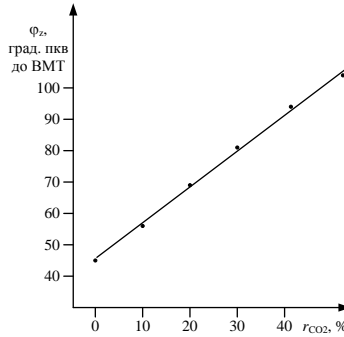


Рис. 3. Зависимость продолжительности сгорания φ_z от содержания CO_2 в биогазе

Аппроксимацией вышеприведенных экспериментальных характеристик получены следующие зависимости, учитывающие содержание CO_2 в биогазе:

$$m_{var} = m_{var0} + 9 \cdot \bar{\varphi} \cdot r_{CO_2}, \quad (5)$$

$$\varphi_z = \varphi_{z0} + 124 \cdot r_{CO_2}, \quad (6)$$

Таким образом, применение зависимостей (5) и (6) в математической модели (1) позволяет описать процесс выгорания биогаза в ДВС с учетом изменения его химического состава и регулировочных параметров двигателя.

Известно, что распределение температур в цилиндре двигателя с искровым зажиганием в процессе сгорания очень неоднородно – температура сгоревших газов превышает температуру несгоревшей смеси, как правило, в несколько раз. Вследствие этого метод проф. И.И. Вибе имеет принципиальный недостаток – она позволяет рассчитывать только среднюю термодинамическую температуру в цилиндре ДВС. Вследствие приведенных выше обстоятельств использование данной температуры недопустимо для расчетов показателей токсичности отработавших газов.

Для устранения данного недостатка уточненная математическая модель расчета процесса выгорания топлива в ДВС была дополнена двухзонной моделью процесса сгорания.

Расчетную схему двухзонной модели можно условно представить в виде, показанном на рисунке 4.



Рис. 4. Расчетная схема двухзонной модели

Двухзонная модель процесса сгорания подразумевает разделение зоны цилиндра на сгоревшую и несгоревшую смеси, границей которых служит поверхность фронта пламени. Также в этой модели предполагаются следующие допущения: смесь в каждой зоне гомогенная и имеет одинаковые физико-химические свойства во всем объеме зоны; давление в каждой точке надпоршневого пространства одинаково в определенный момент; толщина фронта пламени бесконечно мала;

Газы в надпоршневом пространстве считаются идеальными; потери рабочего тела в надпоршневом пространстве за счет прорыва газов через кольцевые уплотнения камеры сгорания не учитываются.

Температуры несгоревшей (T_u) и сгоревшей (T_b) зон в данной двухзонной модели рассчитываются с использованием зависимостей А.С. Куценко:

$$T_{u_{i+1}} = T_{u_i} \cdot \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{k_u - 1}{k_u}}, \quad (7)$$

где T_u – температура несгоревшей смеси, К; p – давление в цилиндре, Па; k_u – показатель адиабаты сжатия несгоревшей смеси.

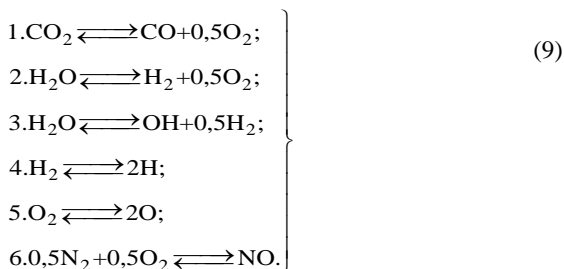
Температура сгоревшей смеси, К:

$$T_b = \frac{p \cdot V - M \cdot R_u \cdot T_u \cdot (1 - x)}{x \cdot M \cdot R_b}, \quad (8)$$

где R_u, R_b – газовые постоянные несгоревшей и сгоревшей смеси соответственно, Дж/(кг·К); V – надпоршневой объем, м³; M – масса смеси в надпоршневом пространстве, кг.

Для расчета содержания токсичных компонентов в отработавших газах двигателя, работающего на биогазе, с искровым зажиганием предлагается использовать метод расчета равновесного состава продуктов сгорания, предложенную проф. Звоновым В.А. Для уточненного расчета концентрации NO_x в отработавших газах данный метод дополняется кинетическим уравнением Зельдовича Я.Б.

Предполагается, что в продуктах сгорания проходят следующие реакции:



Также допускается, что в качестве топлива используется метан и в состав продуктов сгорания входят следующие 10 газов: CO₂; CO; H₂O; H₂; O₂; N₂; NO; OH; O; H.

Математическое описание метода расчета проф. В.А. Звонова представляет собой систему из N нелинейных уравнений с N неизвестными.

Основу системы уравнений составляют уравнения химического равновесия Я.Б. Зельдовича:

$$\frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{CO}_2}} = K_1; \quad \frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} = K_2; \quad \frac{P_{\text{OH}} \cdot P_{\text{H}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} = K_3; \quad (10)$$

$$\frac{P_{\text{H}}^2}{P_{\text{H}_2}} = K_4; \quad \frac{P_{\text{O}}^2}{P_{\text{O}_2}} = K_5; \quad \frac{P_{\text{NO}}}{P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}} \cdot P_{\text{N}_2}^{\frac{1}{2}}} = K_6,$$

где $K_1 \dots K_6$ – константы равновесия химических реакций (9); P_i – парциальное давление i -го компонента газовой смеси.

Уравнения (10) дополняются тремя уравнениями материального баланса:

$$\frac{O_{\text{T}} + \chi_{\text{OC}} O_{\text{возд}}}{C_{\text{T}} + \chi_{\text{OC}} C_{\text{возд}}} = \frac{\mu_{\text{O}} (2P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}} + A)}{\mu_{\text{C}} (P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}})},$$

$$\frac{H_{\text{T}} + \chi_{\text{HC}} \cdot H_{\text{возд}}}{C_{\text{T}} + \chi_{\text{HC}} \cdot C_{\text{возд}}} = \frac{\mu_{\text{H}} \cdot (B)}{\mu_{\text{C}} \cdot (P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}})}, \quad (11)$$

$$\frac{N_{\text{T}} + \chi_{\text{NC}} \cdot N_{\text{возд}}}{C_{\text{T}} + \chi_{\text{NC}} \cdot C_{\text{возд}}} = \frac{\mu_{\text{N}} \cdot (2 \cdot P_{\text{N}_2} + P_{\text{NO}})}{\mu_{\text{C}} \cdot (P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}})},$$

где $A = P_{\text{H}_2\text{O}} + 2P_{\text{O}_2} + P_{\text{OH}} + P_{\text{NO}} + P_{\text{O}}$; O_{T} – массовая доля кислорода в топливе; $O_{\text{возд}}$ – массовая доля кислорода в воздухе; C_{T} – массовая доля углерода в топливе; $C_{\text{возд}}$ – массовая доля углерода в воздухе; χ_{OC} – действительное соотношение масс атомов О и С в несгоревшей смеси; μ_{O} – молекулярная масса кислорода, кг/кмоль; μ_{C} – молекулярная масса углерода, кг/кмоль; H_{T} – массовая доля атома водорода в топливе; $B = 2 \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} + 2 \cdot P_{\text{H}_2} + P_{\text{OH}} + P_{\text{H}}$; $H_{\text{возд}}$ – массовая доля атома водорода в воздухе; χ_{HC} – действительное соотношение масс атомов Н и С в несгоревшей смеси; μ_{H} – молекулярная масса атома водорода, кг/кмоль; N_{T} – массовая доля азота в топливе; $N_{\text{возд}}$ – массовая доля азота в воздухе; χ_{NC} – действительное соотношение масс атомов N и С в несгоревшей смеси; μ_{N} – молекулярная масса атома азота, кг/кмоль.

Замыкается система уравнений десятым уравнением (12), представляющим собой закон Дальтона:

$$P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}} + P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{N}_2} + P_{\text{OH}} + P_{\text{NO}} + P_{\text{H}} + P_{\text{O}} = P, \quad (12)$$

где P – давление в камере сгорания на данном расчетном шаге.

Для верификации математической модели процесса сгорания она была дополнена методом расчета индикаторных и эффективных показателей рабочего цикла ДВС Гриневецкого-Мазинга.

В третьей главе описана методика экспериментального исследования ДВС, работающего на биогазе.

Для получения биогаза на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» автомобильного факультета Северо-Восточного фе-

дерального университета им. М.К. Аммосова разработана и запущена лабораторная биогазовая заправочная станция (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид лабораторной биогазовой заправочной станции:
1 – биогазовый реактор; 2 – газгольдер; 3 – водяной затвор; 4 – сепаратор; 5 – компрессор низкого давления КПП-230-24; 6 – ресивер; 7 – компрессор высокого давления МСН-10; 8 – металлопластиковый баллон высокого давления БА 100.20.327/1660 с $V=20\text{ м}^3$

Для исследования процессов сгорания и образования токсичных компонентов в ДВС, работающем на биогазе, создан экспериментальный стенд, общий вид которого приведен на рисунке 6.

В качестве ДВС был выбран двигатель МеМЗ-307 производства компании «АвтоАЗ-Мотор» (Мелитополь, Украина), переоборудованный на биогаз. На нем установлена газобаллонная топливная аппаратура, а степень сжатия увеличена с 9,8 до 13,5. Стенд оснащен приборами, необходимыми для определения показателей мощности, экономичности и токсичности ДВС. Для индцирования ДВС в головке первого цилиндра установлен датчик давления.



Рис. 6. Общий вид экспериментального стенда с ДВС МеМЗ-307:
1 – манометр; 2 – балансирная машина; 3 –расходомер воздуха; 4 – индикатор показаний балансирной машины; 5 –пульт управления стендом; 6 – тахометр; 7 –нагрузочное устройство; 8 – ДВС МеМЗ-307; 9 – измерительный комплекс «ИВК ДВС»; 10 – набор сопротивлений.

В четвертой главе описаны результаты расчетно-экспериментального исследования ДВС, работающего на биогазе, созданного на базе двигателя МеМЗ-307, работающего на бензине.

В разделе также приведена структурная схема экспериментального исследования, приведенная на рисунке 7.

Верификация математической модели осуществлялась сравнением расчетных и экспериментальных показателей мощности, экономичности и токсичности. Установлено, что погрешность расчетного определения M_e составляет до 10 %, погрешность определения η_e и g_e – до 12 %. Средняя погрешность расчетного определения M_e составляет до 7 %, η_e и g_e – до 9 %.

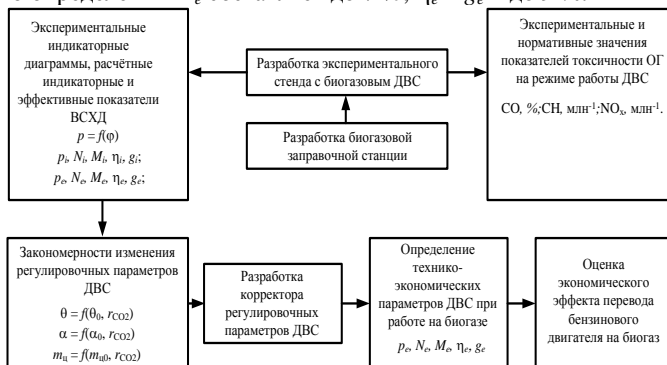


Рис. 7. Структурная схема экспериментального исследования.

В качестве примера на рисунке 8 приведено сравнение расчетной и экспериментальной характеристики переменного показателя сгорания $m_{\text{вар}}$ (параметры режима: $r_{\text{CO}_2} = 0,15$; $n = 4500 \text{ мин}^{-1}$; $\eta_v = 0,79$; $\alpha = 1,05$; $\varepsilon = 12$; $\theta = 32$ град. п.к.в. до ВМТ, $N_e = 39 \text{ кВт}$).

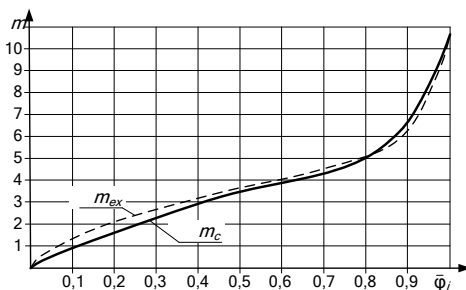


Рис. 8. Изменение переменного показателя сгорания:

m_{ex} – эксперимент; m_c – расчет

Проверка показала, что погрешность расчета среднего индикаторного давления p_i при использовании зависимостей для переменного показателя сгорания в сравнении с постоянным значением показателя сгорания уменьшилась с 11,6 % до 4,2 %.

На рисунке 9 приведено сравнение расчетных значений содержания CO , CH и NO_x в отработавших газах с результатами экспериментального анализа химического состава отработавших газов. Данное сравнение также выполнено для режимов ВСХД.

Из рисунка 9 видно, что максимальная погрешность расчетного определения W_{CO} составляет до 15 %, W_{NO_x} – до 14 %, W_{CH} – до 12 %. Средняя погрешность расчетного определения W_{CO} составляет до 11 %, W_{NO_x} – до 11 %, W_{CH} – до 8,5 %.

Таким образом, погрешности расчетного определения показателей мощности, экономичности и токсичности с помощью полученной математической модели находятся в пределах допустимой для ДВС нормы.

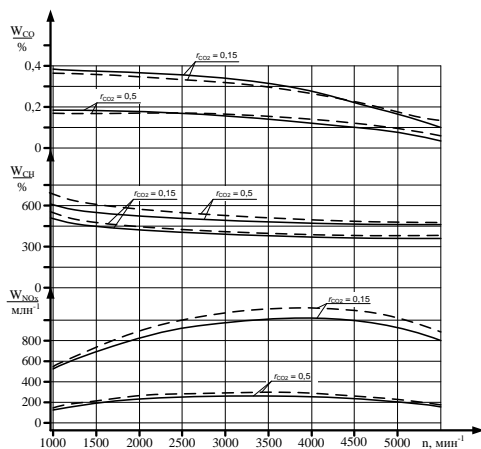


Рис. 9. Сравнение расчетных показателей токсичности отработавших газов на режимах ВСХД с экспериментальными данными:
 ————— эксперимент — — — расчет

Для уменьшения потерь мощности ДВС при переводе на биогаз предложено доработать систему управления ДВС так, как показано на рисунке 10. Целью данных изменений является увеличение подачи топлива по команде газового блока управления (ЭБУ) через газовые форсунки пропорционально увеличению r_{CO_2} , а также корректировка угла опережения зажигания (УОЗ) в соответствии с данными изменениями.

Расчет количества подаваемого топлива при этом предложено выполнять с помощью зависимости:

$$m_{\text{ц}} = \frac{m_{\text{ц0}}}{1 - r_{\text{CO}_2}}, \quad (13)$$

где $m_{\text{ц}}$ – цикловая подача топлива с учетом содержания CO_2 в нем, г/цикл; $m_{\text{ц0}}$ – потребная цикловая подача чистого метана, г/цикл.

Зависимость (13) предлагается использовать для корректировки топливной карты в газовом ЭБУ, программируя его с персонального компьютера

(ПК) через OBD-разъем при каждой заправке биогазом на определенное значение r_{CO_2} . Содержание CO_2 в биогазе на заправке можно определить с помощью газоанализатора-хроматографа типа АМТ-03, определяющего объемную долю CH_4 в биогазе.

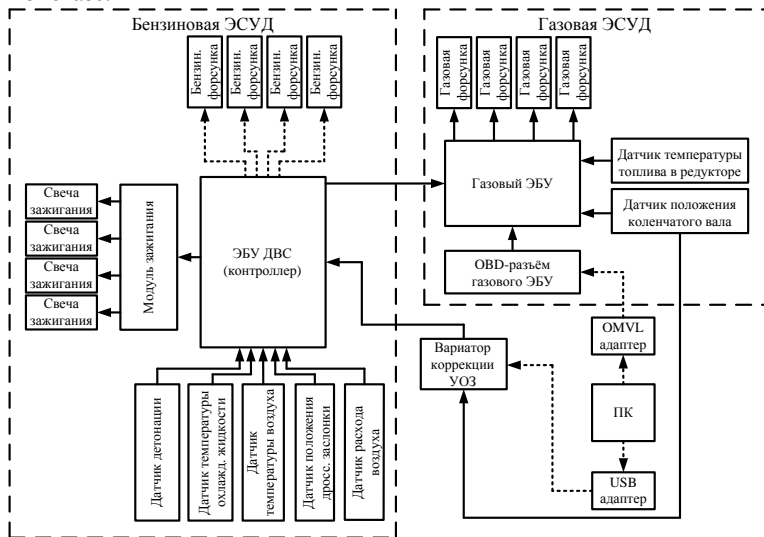


Рис. 10. Структурная схема электронной системы управления ДВС с корректированием регулировочных параметров

Для решения задачи корректировки УОЗ предложено использовать вариатор коррекции УОЗ, изображенный на рисунке 11.

В данный вариатор при каждой заправке биогазом с персонального компьютера (ПК) загружается характеристическая карта УОЗ, которая обеспечивает оптимальные показатели мощности, экономичности и токсичности при данном значении r_{CO_2} .

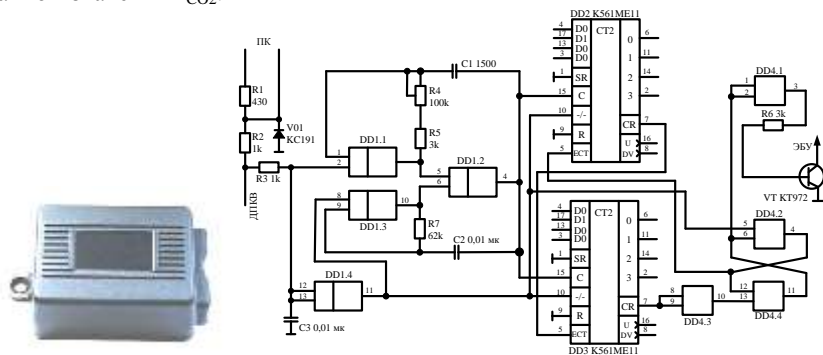


Рис. 11. Вариатор коррекции УОЗ и его принципиальная схема

На рисунке 12 приведен алгоритм коррекции регулировочных параметров ДВС, работающего на биогазе. Как видно из данного алгоритма, корректировка регулировочных параметров заключается в изменении программы цикловой подачи топлива газового ЭБУ и корректировке УОЗ с помощью вариатора коррекции УОЗ в ЭБУ ДВС.

Результаты испытания двигателя с корректированием регулировочных параметров приведены на рисунке 13.

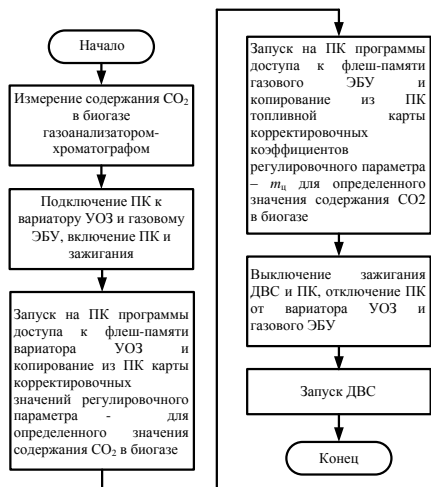


Рис. 12. Алгоритм корректировки регулировочных параметров ДВС, работающего на биогазе

частично устранить этот недостаток и не допустить существенного снижения мощности ДВС, работающего на биогазе.

Небольшое ухудшение экономичности при использовании корректора регулировочных параметров обусловлено поступлением с топливом в цилиндр большого количества CO_2 и, как следствие, отклонением фактического значения коэффициента избытка воздуха α от оптимального с точки зрения экономичности значения в сторону увеличения.

Установлено, что при увеличении содержания углекислого газа в топливе с $r_{\text{CO}_2} = 0$ до $r_{\text{CO}_2} = 0,5$, несмотря на увеличение удельного эффективного расхода топлива g_e более чем в два раза, эффективный КПД двигателя η_e снижается менее чем на 20 %. Данное обстоятельство связано со снижением нижней теплоты сгорания топлива при увеличении r_{CO_2} .

Снижение η_e вызвано увеличением количества воздуха, приходящегося на 1 кг метана, и появлением большого количества балластного газа (CO_2) в зоне горения топлива, что также приводит к ухудшению процесса сгорания.

Графики, приведенные на рисунке 13, показывают влияние объемной доли CO_2 в биогазе (r_{CO_2}) на эффективную мощность двигателя N_e при разных углах открытия дроссельной заслонки $\varphi_{\text{др}}$. При этом значение коэффициента избытка воздуха (α) оставалось неизменным ($\alpha \approx 1$). Из данного рисунка видно, что падение мощности по сравнению с природным газом в данном случае составляет 6...10 %, в зависимости от режима.

Из рисунка 13 также видно, что мощность двигателя при увеличении r_{CO_2} снижается пропорционально увеличению последней величины, что вызвано снижением нижней теплоты сгорания топлива. Корректор регулировочных параметров потерь мощности позволяет

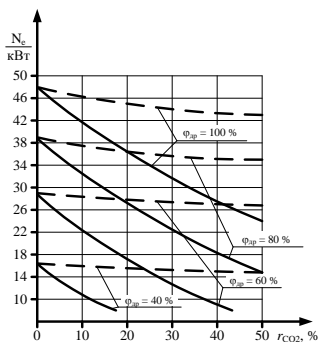


Рис. 13. Влияние r_{CO_2} на N_e на различных режимах:

— без корректировки регулировочных параметров;
 - - - с корректировкой регулировочных параметров .

Экспериментальные исследования показали, что удельный эффективный расход бензинового ДВС, при работе на биогазе, по метану $g_e(CH_4)$, без корректировки регулировочных параметров, увеличивается до 20 %, а при корректировании - до 9 %. Данное обстоятельство вызвано тем, что корректирование регулировочных параметров позволяет поддерживать стабильное значение коэффициента избытка воздуха, приведенного к чистому метану - $\alpha(CH_4)$.

Без корректировки регулировочных параметров, при поддержании стабильного значения α (приведенного к биогазу), увеличение r_{CO_2} приведет к снижению $\alpha(CH_4)$. Вследствие этого увеличивается цикловая нестабильность процесса сгорания, снижается эффективность дан-

ного процесса и, как следствие, увеличивается $g_e(CH_4)$.

На рисунке 14 приведено изменение показателей мощности (M_e) и экономичности (η_e, g_e) по ВСХД ДВС, при его работе на природном газе и биогазе. Для сравнения был выбран биогаз с $r_{CO_2} = 0,50$. Из данного рисунка видно, что корректирование регулировочных параметров ДВС, работающего на биогазе, позволяет сохранить его технико-экономические показатели на приемлемом уровне не зависимо от объемной доли CO_2 в биогазе.

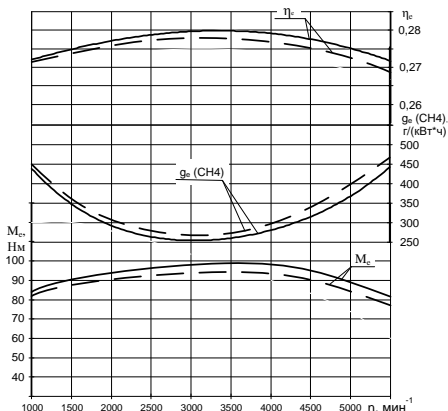


Рис. 14. ВСХД ДВС, работающем на биогазе, с корректированием регулировочных параметров

— природный газ ($r_{CO_2} = 0$); - - - биогаз ($r_{CO_2} = 0,50$).

Корректирование регулировочных параметров ДВС приводит к некоторому увеличению содержания CO в отработавших газах по сравнению с рабо-

той на природном газе, только на режимах больших нагрузок, когда $\alpha \approx 1$. Появление в камере сгорания большого количества CO_2 приводит к ухудшению условий сгорания, увеличивая также выбросы CH и снижая выбросы NO_x .

Таким образом, анализ экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях ДВС, работающего на биогазе, показал необходимость автоматической корректировки α на всех режимах работы двигателя при увеличении r_{CO_2} .

В частности, стала очевидной необходимость снижения коэффициента избытка воздуха для увеличения мощности и надежности работы ДВС, работающего на биогазе, с использованием корректора регулировочных параметров. На основе выполненных экспериментальных данных была получена следующая зависимость по выбору оптимального с точки зрения экономичности значения α :

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 - r_{\text{CO}_2}) - 0,28 \cdot r_{\text{CO}_2}, \quad (14)$$

где α_0 – коэффициент избытка воздуха при $r_{\text{CO}_2} = 0$.

Изменение α , а также r_{CO_2} приводит к необходимости оптимизации угла опережения зажигания θ , град. п.к.в. до ВМТ. Значение данной величины выбиралось исходя из обеспечения максимума эффективного КПД ДВС (η_e) на режиме. Экспериментальные данные дали возможность получить массив значений θ в зависимости от r_{CO_2} во всем диапазоне рабочих режимов двигателя. Анализ данного массива позволил получить следующую эмпирическую зависимость:

$$\theta = \theta_0 + 18,6 \left(\frac{\alpha}{(1 - r_{\text{CO}_2})} - 1 \right), \quad (15)$$

где θ_0 – угол опережения зажигания, град. п.к.в. до ВМТ, при $r_{\text{CO}_2} = 0$.

Формулы (14) и (15), наряду с зависимостью (13), предлагается использовать для расчета значений регулировочных параметров ДВС, работающем на биогазе, и их внесением в алгоритм работы электронной системы управления ДВС.

В пятой главе приведен анализ экономической эффективности переоборудования бензинового двигателя МеМЗ-307 на биогаз.

Выполнены расчеты по срокам окупаемости данной операции и вытекающим ежегодным экономиям средств, которые составили 108861 руб. При наличии работающей биогазовой установки и заправочной станции данная операция окупится через 0,75 лет (9 месяцев).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе поставлена и решена научно-практическая задача: обеспечение работоспособности бензиновых ДВС сельскохозяйственной техники, при переводе на биогаз путем разработки методики корректирования регулировочных параметров двигателя. Решение данной задачи позволило получить следующие научные и практические результаты:

1. Выявлены закономерности процессов сгорания и образования токсичных компонентов в ДВС при работе на биогазе. Установлено, что при ис-

пользовании адаптированной для биогаза математической модели погрешность расчетного определения W_{CO} не превышает 15 %, W_{NOx} – 14 %, W_{CH} – 12 %. При использовании табличных значений постоянного значения показателя характера сгорания m максимальная погрешность расчетного определения W_{CO} составляет до 25 %, W_{NOx} – до 21 %, W_{CH} – до 19 %.

2. Выявлены закономерности изменения регулировочных параметров ДВС (коэффициента избытка воздуха α и угла опережения зажигания θ) от объемного содержания двуокси углерода в биогазе. Предложены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать значения регулировочных параметров α и θ , а также значения цикловой подачи топлива $m_{ц}$, обеспечивающие работу бензинового ДВС на биогазе.

3. Определены технико-экономические показатели ДВС при работе на биогазе. Приведены результаты экспериментального исследования данного ДВС, при различных значениях r_{CO_2} . Показано, что корректирование регулировочных параметров позволяет компенсировать ухудшение показателей экономичности и токсичности, возникающие вследствие увеличения r_{CO_2} . Экспериментально установлено, что при корректировании регулировочных параметров при $r_{CO_2} \leq 0,5$ снижение эффективной мощности двигателя работающего на биогазе в сравнении с двигателем работающим на природном газе составляет не более 10 %, в то время как без корректирования – до 50 %.

4. Разработана технологическая линия биогазовой заправочной станции.

5. Выполнена оценка экономического эффекта от эксплуатации сельскохозяйственной техники с ДВС, работающем на биогазе. Рассчитаны сроки окупаемости переоборудования двигателя, работающего на бензине на биогаз. Расчеты показали, что годовой экономический эффект перевода ДВС на биогаз составляет 108861 руб. и при наличии работающей биогазовой установки и заправочной станции данная операция окупится уже через 0,75 лет.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Петров Н.В. Методика расчета содержания токсичных компонентов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания работающих на биогазе [Текст] / Н.В. Петров // Инновации и инвестиции. – 2013. - № 5. – С. 59-63.

В других изданиях:

2. Петров Н.В. Применение биогаза в ДВС [Текст] / Н.В. Петров // Сб. мат-лов I Междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 328–330.

3. Петров Н.В. Перспективы получения и применения биотоплива для ДВС в Якутии [Текст] / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Сб. мат-лов IX Молодежной науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Ч. 2 / Под ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 45–52.

4. Петров Н.В. Перспективы использования биогаза в двигателях внут-

ренного сгорания [Текст] / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Технические науки – от теории к практике: мат-лы XVIII Междунар. заочной науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2013. – С. 47–51.

5. Петров Н.В. Применение биогаза в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Технические науки - от теории к практике. – 2012. – № 15. – С. 47–51.

6. Петров Н.В. Анализ способов получения альтернативной энергии в условиях Якутии [Текст] / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Сб. тр. VII Междунар. науч. конф. «Тинчуринские чтения». – Казань, 2012. – С. 99.

7. Петров Н.В. Цеолит и перспективы его использования при очистке биогаза [Текст] / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Технические науки - от теории к практике. – 2013. – № 18. – С. 46–56.

8. Петров Н.В. Результаты экспериментального исследования автомобильного биогазового двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов, А.А. Приходкин, В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Техника и технологии: роль в развитии современного общества: Мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. 4 октября 2013 г.: Сб. науч. тр. – Краснодар, 2013. – С. 8–14.

Подписано в печать 21.11.2013 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ №376.

Издательство ВСГУТУ
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 в