

УДК 621.43.052

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО БИОГАЗОВОГО ДВС

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.Н. Кабанов, доцент, к.т.н., А.А. Приходкин, аспирант, ХНАДУ, В.П. Друзьянова, доцент, к.т.н., Н.В. Петров, ассистент, Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск, Россия**

*Аннотация.* Приведены результаты экспериментального исследования автомобильного ДВС, работающего на биогазе с разным объёмным содержанием CO<sub>2</sub>. Приведены рекомендации по выбору значений коэффициентов избытка воздуха и углов опережения зажигания для различных режимов работы автомобильного биогазового двигателя в зависимости от химического состава топлива.

*Ключевые слова:* биогаз, ДВС, экспериментальный стенд, нагрузочная характеристика.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО БІОГАЗОВОГО ДВЗ

**Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., О.М. Кабанов, доцент, к.т.н., О.О. Приходкін, аспірант, ХНАДУ, В.П. Друзьянова, доцент, к.т.н., М.В. Петров, асистент, Північно-Східний федеральний університет, м. Якутськ, Росія**

*Анотація.* Наведено результати експериментального дослідження автомобільного ДВЗ, що працює на біогазі з різним об'ємним вмістом вуглекислого газу. Наведено рекомендації з вибору значень коефіцієнтів надлишку повітря і кутів випередження запалювання для різних режимів роботи автомобільного біогазового двигуна залежно від хімічного складу палива.

*Ключові слова:* біогаз, ДВЗ, експериментальний стенд, навантажувальна характеристика.

## RESULTS OF AUTOMOBILE BIOGAS ENGINE EXPERIMENTAL INVESTIGATION

**F. Abramchuk, Professor, Doctor of Technical Science, O. Kabanov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, O. Prikhodkin, Postgraduate, KhNAHU, V. Druzyanova, Associate Professor, Candidate of Technical Science, N. Petrov, Assistant, North-East Federal University, Yakutsk, Russia**

*Abstract.* The results of experimental study of automotive ICE running using biogas with different volume content of CO<sub>2</sub> are presented. Recommendations for choosing the values of air-fuel ratios and ignition timings for different operating modes of the automotive biogas engine depending on fuel chemical composition are given.

*Key words:* biogas, ICE, test bench, load characteristic.

### Введение

Использование альтернативного топлива в автомобильных ДВС является особенно актуальной задачей для отдалённых северных

районов России, добраться в которые можно только в зимний период.

Например, на территории Якутии на 2013 г. имеется 297 труднодоступных населённых пунктов, где проживает 300500 тыс. чел. [1].

Использование биогаза в качестве моторного топлива в таких районах позволит увеличить автономность этих районов, снизить нагрузку на транспорт, уменьшить ущерб в случае срывов поставок топлива либо преждевременного истощения его локальных запасов.

Установка на легковой автомобиль биогазовой топливной аппаратуры без изменения ряда конструктивных и регулировочных параметров приводит к увеличению расхода топлива, что нерационально в условиях, когда его локальные запасы ограничены. Кроме того, отработавшие газы автомобилей наносят вред экосистеме отдалённых северных районов, поэтому снижение выбросов токсичных компонентов автомобильного биогазового двигателя также является актуальной задачей.

### Анализ публикаций

В мире широко ведутся работы по использованию биогаза на автомобильных ДВС [2, 3]. Особенно активные работы ведутся в регионах, имеющих проблемы с поставками ископаемого газового либо нефтяного топлива: Сирии [2], Судане [3] и др.

В [2] выполнены исследования по оценке расхода биогазового топлива автомобилем ВАЗ 2103 в различных дорожных условиях. В [3] приведены рекомендации по использованию биогаза в газодизеле, а также предложены рекомендации по максимально целесообразной степени очистки биогаза от  $\text{CO}_2$ .

В большинстве подобных работ главный акцент сделан на необходимости очистки биогаза от примесей, а также учёта их наличия при оценке расхода топлива биогазовым автомобилем.

Анализ научных публикаций показывает, что одной из основных проблем использования биогаза в качестве моторного топлива является его очистка. Вследствие этого биогазовый автомобиль часто заправляется топливом с разным содержанием  $\text{CO}_2$  в нём [3].

### Цель и постановка задачи

Исходя из вышесказанного, целью данной работы стала разработка рекомендаций по выбору регулировочных параметров малолитражного автомобильного двигателя, рабо-

тающего на биогазе, в зависимости от содержания  $\text{CO}_2$  в топливе.

### Описание биогазового ДВС

Для проведения экспериментального исследования был выбран серийно выпускаемый в настоящее время ГРП «АвтоЗАЗ-Мотор» ЗАО «ЗАЗ» и устанавливаемый на автомобили «ZAZ Sens» двигатель МеМЗ-307, переделанный для работы на биогазе. Данный двигатель имеет следующие конструктивные параметры: диаметр цилиндра – 75 мм; ход поршня – 73,5 мм. При переводе двигателя на биогаз степень сжатия была увеличена с  $\epsilon = 9,8$  до  $\epsilon = 13,5$ . Для надёжного воспламенения биогазового топлива на двигатель установлена многоискровая система зажигания высокой энергии. Также на двигателе установлена топливная аппаратура с распределённым впрыском биогазового топлива.

Данный двигатель был установлен на моторный стенд, оборудованный всеми необходимыми приборами для определения как эффективных, так и индикаторных показателей мощности и экономичности, а также токсичности отработавших газов. На рис. 1 приведен общий вид данного экспериментального стенда.



Рис. 1. Экспериментальный стенд с малолитражным автомобильным биогазовым ДВС

### Влияние объёмной доли $\text{CO}_2$ в топливе на показатели мощности биогазового двигателя

На рис. 2 показано влияние объёмной доли  $\text{CO}_2$  в биогазе ( $r_{\text{CO}_2}$ ) на эффективную мощность двигателя  $N_e$  при разных углах открытия дроссельной заслонки  $\phi_{\text{др}}$ . При этом  $\alpha$  оставалось неизменным ( $\alpha \approx 1$ ).

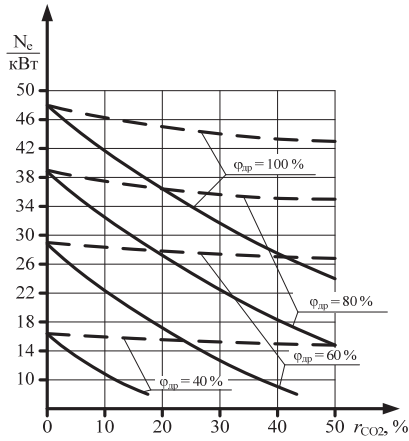


Рис. 2. Влияние  $r_{CO_2}$  на  $N_e$  на различных режимах:

— — — без компенсаторного механизма;  
- - - с компенсаторным механизмом

Из рис. 2 видно, что мощность двигателя при увеличении  $r_{CO_2}$  снижается пропорционально увеличению последней величины, что вызвано снижением низшей теплоты сгорания топлива.

Данное обстоятельство компенсируется увеличением подачи топлива по команде блока управления двигателем через форсунки пропорционально увеличению  $r_{CO_2}$ .

Для компенсации потерь мощности в данном случае предложено использовать следующий компенсаторный механизм.

Расчёт количества подаваемого топлива при этом предложено выполнять с помощью зависимости

$$m_{ц} = \frac{m_{ц0}}{1 - r_{CO_2}}, \quad (1)$$

где  $m_{ц}$  – цикловая подача топлива с учётом содержания  $CO_2$  в нём;  $m_{ц0}$  – потребная цикловая подача чистого метана, г.

Зависимость (1) предложено использовать в блоке управления двигателем, программируя его при каждой заправке биогазом на определённое  $r_{CO_2}$ . Содержание  $CO_2$  в биогазе на заправке можно определить с помощью газоанализатора-хроматографа типа АМТ-03, определяющего объёмную долю  $CH_4$  в биогазе.

Результаты испытания биогазового ДВС с использованием данного компенсаторного

механизма приведены на рис. 2. Из данного рисунка видно, что падение мощности по сравнению с природным газом в данном случае составляет 6–10 %, в зависимости от режима.

### Влияние содержания $CO_2$ в топливе на показатели экономичности биогазового ДВС

На рис. 3 и 4 приведены графики изменения показателей экономичности биогазового ДВС по внешней скоростной характеристике двигателя (ВСХД) с использованием компенсаторного механизма и без него соответственно.

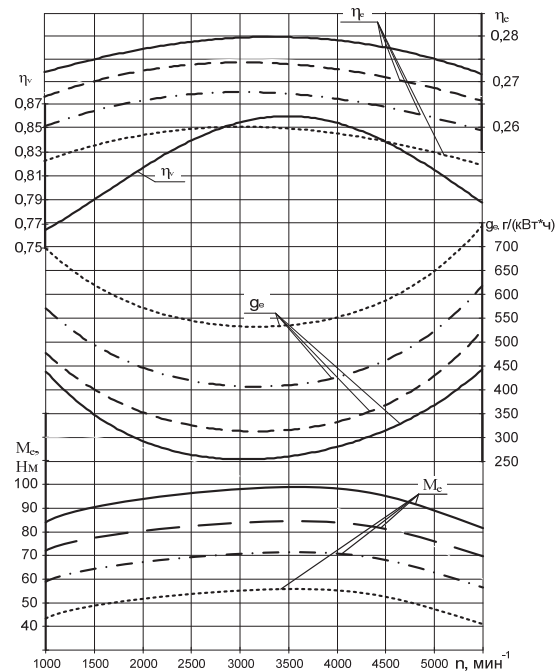


Рис. 3. ВСХД биогазового ДВС без использования компенсаторного механизма:

— — —  $r_{CO_2} = 0$ ;  
- - -  $r_{CO_2} = 0,15$ ;  
- · - · -  $r_{CO_2} = 0,30$ ;  
- - - -  $r_{CO_2} = 0,50$

Анализ данных характеристик показывает, что в качестве критерия экономичности биогазового ДВС следует брать эффективный КПД двигателя  $\eta_e$ . Это вызвано тем, что удельный эффективный расход топлива  $g_e$  не может быть объективным показателем, так как при увеличении  $r_{CO_2}$  расход биогазового топлива будет увеличиваться.

Если при анализе экономичности биогазового ДВС отдельно проанализировать удель-

ный эффективный расход метана  $g_e(\text{CH}_4)$ , содержащегося в биогазе, то, как видно из рис. 4, отличие данного показателя для чистого метана и биогаза будет незначительным.

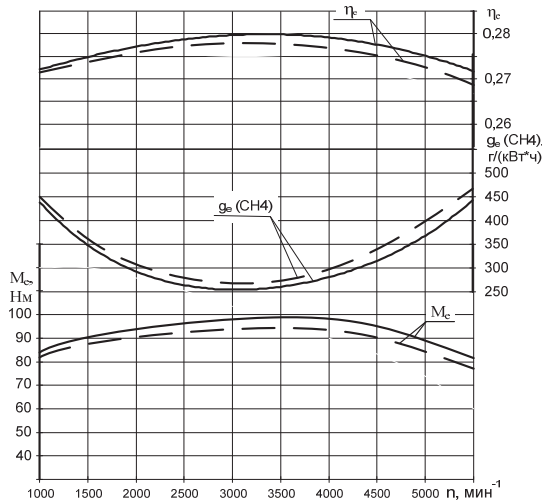


Рис. 4. ВСХД биогазового ДВС с использованием компенсаторного механизма  
 ———— — природный газ ( $r_{\text{CO}_2} = 0$ );  
 - - - - - биогаз ( $r_{\text{CO}_2} = 0,50$ )

Небольшое ухудшение экономичности при использовании компенсаторного механизма обусловлено поступлением с топливом в цилиндр большого количества  $\text{CO}_2$  и, как следствие, отклонением фактического значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от оптимального с точки зрения экономичности значения в сторону увеличения.

Таким образом, очевидной становится необходимость автоматической корректировки  $\alpha$  на всех режимах работы биогазового ДВС при увеличении  $r_{\text{CO}_2}$ .

#### Влияние содержания $\text{CO}_2$ в топливе на показатели токсичности биогазового ДВС

Влияние  $r_{\text{CO}_2}$  на показатели токсичности биогазового ДВС без использования компенсаторного механизма и с его использованием приведено соответственно на рис. 5 и 6.

Из рис. 5 видно, что уменьшение содержания метана в топливе при сохранении его цикловой подачи приводит к снижению выбросов  $\text{CO}$  на режимах максимальных нагрузок, что является следствием увеличения количества кислорода, приходящегося на 1 кмоль метана, в цилиндре биогазового ДВС. Последнее

обстоятельство также приводит к ухудшению условий сгорания топлива (увеличиваются выбросы несгоревших углеводородов) и снижению максимальной температуры данного процесса (снижаются выбросы  $\text{NO}_x$ ).

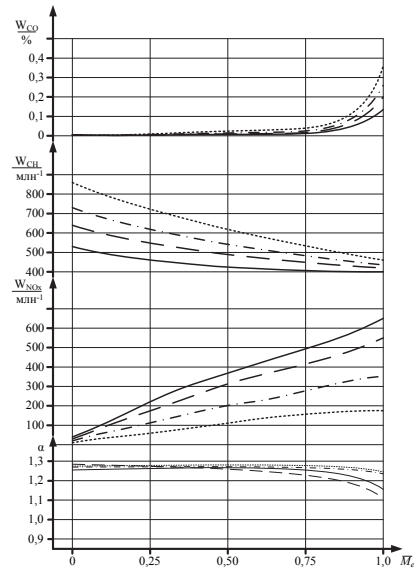


Рис. 5. Нагрузочная характеристика биогазового ДВС ( $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ), полученная без компенсаторного механизма:  
 ———— —  $r_{\text{CO}_2} = 0$ ; - - - - -  $r_{\text{CO}_2} = 0,15$ ;  
 ······ —  $r_{\text{CO}_2} = 0,30$ ; - · - · - · —  $r_{\text{CO}_2} = 0,50$

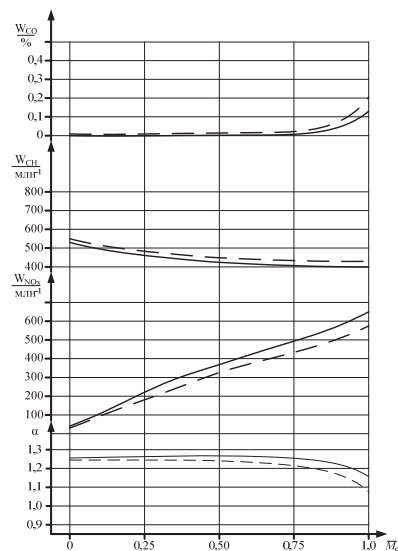


Рис. 6. Нагрузочная характеристика биогазового ДВС ( $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ), полученная с компенсаторным механизмом:  
 ———— — природный газ ( $r_{\text{CO}_2} = 0$ );  
 - - - - - биогаз ( $r_{\text{CO}_2} = 0,50$ ).

Применение компенсаторного механизма (рис. 6) приводит к тому, что выбросы  $\text{CO}$

при использовании данного механизма и без него практически не отличаются. Появление в камере сгорания большого количества  $\text{CO}_2$  приводит к ухудшению условий сгорания, немного увеличивая выбросы  $\text{CH}$  и снижая выбросы  $\text{NO}_x$ .

### Корректировка угла опережения зажигания в зависимости от объёмной доли $\text{CO}_2$ в биогазе

Изменение  $\alpha$ , а также  $r_{\text{CO}_2}$  приводит к необходимости адаптации угла опережения зажигания  $\theta$ , град. п.к.в. до ВМТ. Значение данной величины выбиралось исходя из обеспечения максимума  $\eta_e$  на режиме. С использованием экспериментальных данных был получен массив данных для значений  $\theta$  в зависимости от  $r_{\text{CO}_2}$  во всём диапазоне рабочих режимов двигателя. Анализ данного массива позволил получить следующую эмпирическую зависимость

$$\theta = \theta_0 + 18,6 \left( \frac{\alpha}{(1 - r_{\text{CO}_2})} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $\theta_0$  – угол опережения зажигания, град. п.к.в. до ВМТ, при  $r_{\text{CO}_2} = 0$ .

Формулу (2), наряду с зависимостью (1), предлагается использовать в системе управления биогазовым двигателем для коррекции регулировочных параметров при изменении химического состава топлива.

### Выводы

Предложен механизм компенсации потери мощности биогазовым ДВС при увеличении объёмной доли  $\text{CO}_2$  в топливе за счёт увеличения цикловой подачи биогаза. Экспериментально установлено, что при использовании данного механизма при  $r_{\text{CO}_2} \leq 0,5$  снижение эффективной мощности биогазо-

вого ДВС, в сравнении с работой на природном газе, составляет не более 10 %.

Приведены результаты экспериментального исследования биогазового ДВС при различных значениях  $r_{\text{CO}_2}$ . Показано, что механизм компенсации наличия  $\text{CO}_2$  в биогазе позволяет компенсировать ухудшение показателей экономичности и токсичности, возникающее вследствие увеличения  $r_{\text{CO}_2}$ .

Получена эмпирическая зависимость для системы управления автомобильным биогазовым ДВС, позволяющая данной системе автоматически подбирать, в зависимости от содержания  $\text{CO}_2$  в биогазе, оптимальное, с точки зрения экономичности, значение угла опережения зажигания.

### Литература

1. <http://www.nvpress.ru>.
2. Диб Рамадан. Исследование работы легкового автомобиля на биогазе (на примере ВАЗ-2103): автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация и ремонт автомобильного транспорта» / Р. Диб. – Х., 1997. – 28 с.
3. Имад С. Разработка мероприятий по повышению эффективности использования биогаза в условиях Республики Судан: дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / С. Имад. – М., 2007. – 188 с.

Рецензент: А.Н. Врублевский, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 01 июня 2013 г.