

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С БИОГАЗОВЫМ ДВС

## EXPERIMENTAL TEST BENCH FOR THE STUDY OF A POWER PLANT WITH A BIOGAS INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**П.А. БОЛОЕВ**<sup>1</sup>, д.т.н.  
**В.П. ДРУЗЬЯНОВА**<sup>2</sup>, д.т.н.  
**Н.В. ПЕТРОВ**<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Бурятский государственный университет, Улан-Удэ, Россия,

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, Якутск, Россия, petnikvad1988@mail.ru

**P.A. BOLOEV**<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
**V.P. DRUZ'YANOVA**<sup>2</sup>, DSc in Engineering  
**N.V. PETROV**<sup>2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Buryat State University, Ulan-Ude, Russia

<sup>2</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia, petnikvad1988@mail.ru

Биогаз является альтернативным источником энергии, в настоящее время его также можно использовать в качестве моторного топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием. В данной статье рассмотрен биогаз, полученный путем переработки навоза КРС. Полученный биогаз был обогащен и компримирован до уровня природного газа. Дана принципиальная схема экспериментального стенда для исследования автомобильного биогазового ДВС. Приведено описание измерительных приборов, используемых на данном экспериментальном стенде. В данной работе поставлена задача создания автоматизированного стенда для исследования рабочего процесса двигателя, который приспособлен для работы на биогазе. Для выбора и обоснования параметров рабочего процесса необходим полный комплекс измерительной аппаратуры, удовлетворяющий следующим требованиям: возможность работы на бензине и биогазе; возможность управления составом рабочей смеси, как при работе на бензине, так и на биогазе; возможность принудительного управления величиной угла опережения зажигания; измерение момента сопротивления на валу двигателя во всем диапазоне изменения частоты вращения ( $n = 800...5590 \text{ мин}^{-1}$ ); регистрация давления в цилиндре двигателя (индикаторная диаграмма) с последующим определением индикаторных показателей; регистрация расхода воздуха и топлива; поддержание стабильного температурного режима двигателя. Кроме того, автоматизированная система исследования должна обеспечивать сбор экспериментальных данных для оперативной обработки и набора базы данных. Применение биогаза в качестве топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания позволит сохранить природные ресурсы и улучшить экологическое и экономическое состояние как Республики Саха (Якутия), так и России в целом.

**Ключевые слова:** биогаз, экспериментальный стенд, датчик, измерительный прибор.

Biogas is an alternative source of energy, now it can also be used as a motor fuel for gasoline engines of internal combustion with spark ignition. This article describes the biogas obtained by processing cattle manure. The obtained biogas was enriched and compressed to the level of natural gas. A schematic diagram of the experimental test bench for the study of automotive biogas engine is given. A description of the measuring instruments used in this experimental test bench is shown. In this paper, the task is to create an automated test bench for the study of the workflow of the engine, which works on biogas. To select and justify the parameters of the workflow, a full range of instrumentation is needed, which satisfies the following requirements: the ability to work on gasoline and biogas; the ability to control the composition of the working mixture, both when working on gasoline and biogas; the possibility of forced control of the value of ignition advance angle; measurement of the moment of resistance on the motor shaft in the whole range of rotational speed variation ( $n = 800...5590 \text{ min}^{-1}$ ); registration of pressure in the engine cylinder (indicator diagram) with the subsequent determination of indicator characteristics; registration of air and fuel consumption; maintaining a stable temperature mode of the engine. In addition, an automated research system should provide for the collection of experimental data for on-line processing and for the collection of a database. The use of biogas as a fuel for gasoline internal combustion engines will save natural resources and improve the ecological and economic status of the Republic of Sakha (Yakutia) and whole Russia.

**Keywords:** biogas, experimental test bench, sensor, measuring device.

## Введение

Важным этапом при создании биогазового двигателя является его экспериментальное исследование. На этом этапе проверяется адекватность математических моделей, применяемых для расчетного исследования различных процессов в двигателе, а также основные расчетные результаты, полученные с их помощью.

Кроме того, с использованием экспериментального стенда выполняется доводка рабочего процесса биогазового ДВС.

## Цель исследования

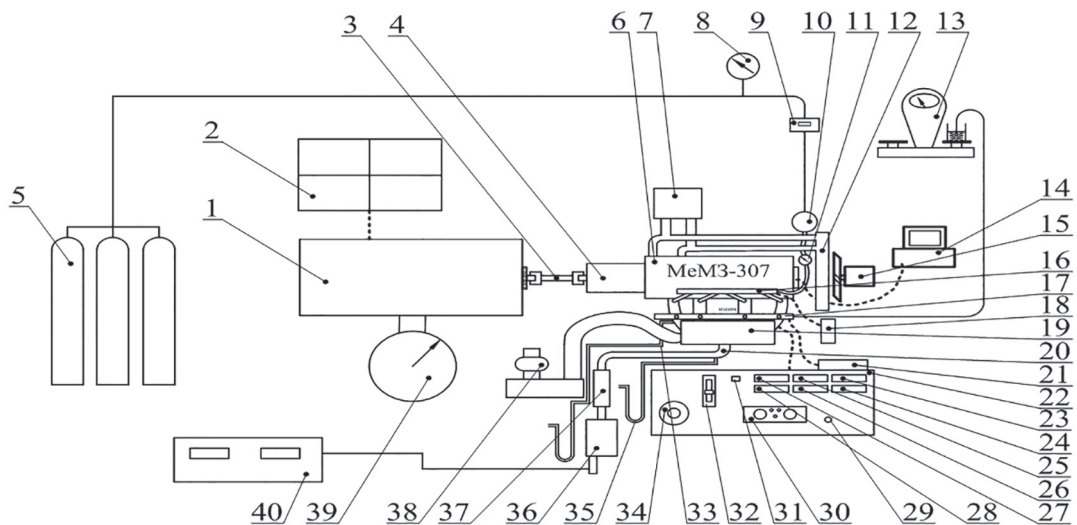
Создание экспериментального стенда на базе автомобильного биогазового ДВС. Достижение этой цели является наиболее ответственным этапом в его исследовании и в этой связи актуальной задачей.

## Методы и средства проведения исследования

В настоящее время накоплен значительный опыт создания специальных стендов для довод-

ки газовых двигателей [1–3]. Такие стенды оборудованы классическими системами топливоподачи и зажигания, которые дают возможность ручного управления параметрами. Микропроцессорные системы управления, которыми оснащены современные двигатели, не позволяют изменять коэффициент избытка воздуха и угол опережения зажигания (УОЗ) в ручном режиме. Поэтому поставлена задача дополнительно разработать ряд устройств, которые позволят изменять количество топлива и УОЗ в широком диапазоне, не изменяя характеристических карт микропроцессорной системы управления.

В качестве базы для создания биогазового ДВС был выбран серийно выпускаемый в настоящее время заводом АвтоЗАЗ-Мотор ЗАО «ЗАЗ» и устанавливаемый на автомобили ZAZ Sens двигатель MeM3-307 (основное топливо – бензин АИ-95). В серийном исполнении этот двигатель имеет следующие конструктивные и эксплуатационные характеристики: диаметр цилиндра 75 мм; ход поршня 73,5 мм; степень сжатия 9,8; эффективная мощность 51,5 кВт



**Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда на базе автомобильного биогазового ДВС:**

- 1 – балансирная машина; 2 – набор сопротивлений; 3 – карданная передача; 4 – коробка передач;
- 5 – баллоны с биогазом; 6 – двигатель MeM3-307; 7 – водяной теплообменник; 8 – манометр;
- 9 – расходомер газа; 10 – двухступенчатый газовый редуктор; 11 – манометр; 12 – радиатор двигателя;
- 13 – весы для измерения расхода жидкого топлива; 14 – измерительно-вычислительный комплекс;
- 15 – вентилятор; 16 – газовая рампа с форсунками; 17 – бензиновая рампа с форсунками; 18 – ЭБУ газовой системы; 19 – впускной коллектор; 20 – выпускной коллектор; 21 – ЭБУ двигателя; 22 – пульт управления;
- 23 – прибор для измерения температуры охлаждающей жидкости; 24 – прибор для измерения температуры масла; 25 – прибор для измерения температуры ОГ; 26 – прибор для измерения давления масла в системе смазки; 27 – прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала; 28 – прибор для измерения частоты вращения ротора балансирной машины; 29 – замок зажигания; 30 – панель приборов автомобиля;
- 31 – переключатель вида топлива; 32 – рукоятка для управления дроссельной заслонкой; 33 – устройство для изменения сопротивления впускной системы; 34 – устройство для управления нагрузкой на ДВС;
- 35 – прибор для измерения сопротивления выпускной системы; 36 – глушитель шума; 37 – резонатор;
- 38 – расходомер воздуха; 39 – весовое устройство для измерения нагрузки; 40 – газоанализатор

при частоте вращения коленчатого вала  $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$ . Микропроцессорная система управления двигателем – «Микас 10.3».

При переводе данного двигателя на биогаз степень сжатия была увеличена до  $\varepsilon = 13,5$ .

Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

Для возможности плавного изменения момента сопротивления на валу двигателя, при проведении испытаний стенд оборудован электрическим нагрузочным устройством МПБ-100 1 (рис. 1). Для передачи мощности от двигателя к балансирной машине используется механическая коробка передач ВАЗ 2103, которая позволяет работать в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя, а также карданной передачи. Стенд оборудован дополнительным воздушным вентилятором 15, а также дополнительным теплообменником 7, при помощи которых можно моделировать температурный режим, максимально приближенный к реальным условиям эксплуатации. С той же целью на стенде установлен глушитель шума и резонатор от штатной системы выпуска отработавших газов автомобиля ZAZ Sens. Для изменения сопротивления выпускной системы предусмотрена заслонка 33.

Для исследования работы двигателя на альтернативных газообразных видах топлива стенд оборудован газовой системой 4-го поколения, которая включает в себя: каскад баллонов с запасом газа 5, двухступенчатый газовый редуктор 10, магистраль высокого и низкого давления, газовую рампу с форсунками 16, блок управления газовой системой 18. Для выбора вида топлива на панели пульта управления 22 предусмотрен переключатель 31.

Исследования в области эргономики рабочего места оператора [5] показывают, что наибольшую информативность для человека несет визуальное наблюдение за низкочастотным процессом, поэтому в качестве регистрирующих приборов используются демпфированные стрелочные измерители (8, 11, 13, 30, 39), а также светоизлучающие цифровые индикаторы (23–28).

Основной задачей системы автоматического сбора данных (САСД) является обеспечение исследования набором данных, характеризующих ход протекания эксперимента. Для экспериментов различного рода необходимо охватить достаточно много параметров. А построение многоканальной измерительной системы для сигналов различного рода является

трудоемкой и дорогостоящей работой. Поэтому, используя опыт, полученный при построении автоматизированной системы исследования двигателей [4], для построения САСД было решено использовать альтернативные функции электронного блока управления (ЭБУ).

На двигателе МеМЗ-307 установлен ЭБУ «Микас-10.3», который, кроме основной функции управления, имеет встроенные функции мониторинга и диагностики. Используя ПК со специальным программным обеспечением (ПО) и устройство связи (K-line адаптер) (рис. 2), производится опрос ЭБУ с целью получения текущие значения сигналов датчиков и управляющих воздействий. Кроме того, ПО позволяет использовать и функцию диагностики для быстрого поиска и устранения неисправностей.

Система управления впрыском газа использует ЭБУ «OMVL», который также имеет функцию мониторинга и подключается к ПК посредством специального OMVL адаптера.

САСД позволяет получать следующие параметры:

- частота вращения коленчатого вала двигателя ( $\text{мин}^{-1}$ );
- положение дроссельной заслонки (%);
- угол опережения зажигания (град. п.к.в.);
- длительность импульса впрыска топлива (мс);
- массовый расход воздуха ( $\text{кг/ч}$ );
- давление во впускном коллекторе (мм р. ст.);
- температура охлаждающей жидкости ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ );
- расчетный часовой расход топлива ( $\text{л/ч}$ );
- расчетный путевой расход топлива ( $\text{л/100 км}$ );
- скорость автомобиля ( $\text{км/ч}$ );
- напряжение бортовой сети (В);
- фактическое положение шагового мотора РХХ (шаг);
- напряжение на датчике кислорода (В);
- время накопления импульса зажигания (мс);
- температура газа в редукторе ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температура газа в рампе ( $^{\circ}\text{C}$ );
- давление газа в рампе (Па);
- время открытия газовой форсунки (мс).

Частота опроса ЭБУ составляет 5 Гц, что, в связи с инерционностью двигателя, вполне достаточно для записи перечисленных параметров не только для статических, но и для переходных режимов.

Задачей измерительного комплекса является регистрация быстротекущих процессов ДВС. В диагностических целях для этого в основном используют осциллограф, но для исследования ДВС, в особенности на переходных режимах, требуются наборы статистических данных подряд записанных циклов. Кроме того, количество требуемых параметров зачастую превышает количество каналов осциллографов общего применения.

Одним из таких параметров является кривая изменения давления в цилиндре (индикаторная диаграмма), которая дает наглядное представление о протекании параметров состояния рабочего тела в течение цикла. Для обработки индикаторная диаграмма должна сопровождаться различными метками синхронизации, такими как верхняя мертвая точка (ВМТ), нижняя мертвая точка (НМТ), момент зажигания (МЗ) и т.п. Поэтому для разработки измерительного комплекса было решено использовать многоканальное устройство ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в персональных компьютерах на базе платы L-783 (ЗАО «Л-Кард»).

Технические характеристики платы L-783:

- интерфейс связи РСІ;
- 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей для аналогового ввода;
- максимальная частота работы 12-битного АЦП – 2857(3300) кГц;
- два входа для внешней синхронизации при вводе сигнала;
- порт цифрового ввода/вывода, имеющий 16 входных и 16 выходных линий;
- диапазоны входного сигнала  $\pm 5$  В,  $\pm 2,5$  В,  $\pm 1,25$  В,  $\pm 0,625$  В.

Структурная схема измерительного комплекса представлена на рис. 2.

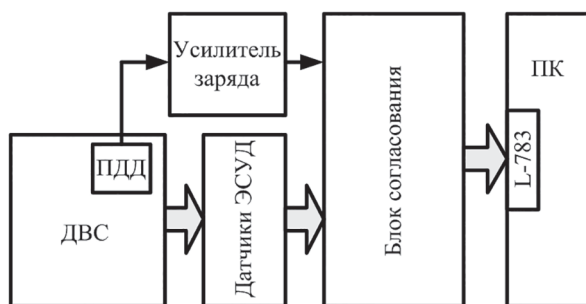


Рис. 2. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

Здесь сигналы штатных датчиков ЭСУД и пьезоэлектрического датчика давления (ПДД) через усилитель заряда поступают на блок согласования, в котором происходит преобразование и нормирование сигналов по уровню во избежание превышения предельно-допустимых значений по входу устройства ввода-вывода. Далее посредством АЦП сигналы оцифровываются и поступают в компьютер. В качестве программного обеспечения ПК используется программа Power Graph, которая имеет расширенные функции предварительной настройки. Это позволяет настроить канал измерения давления на отображения сигнала в МПа для адекватного восприятия получаемых данных во время эксперимента.

Для установки датчика давления в первом цилиндре головки цилиндров был выполнен специальный канал. Обеспечение стабильного температурного режима датчика достигалось принудительным водяным охлаждением.

Для работы ДВС на обедненных смесях, а также для доводки параметров рабочего процесса двигателя при работе на газовом топливе необходимо обеспечить возможность принудительного управления количеством топлива в составе топливоздушного смеси и углом опережения зажигания. Для этого на стенде задействована система управления двигателем, приведенная на рис. 3.

Применение ЭБУ не дает возможности управлять бензовоздушной смесью в ручном режиме, а изменение программы блока, во-первых, приводит к нарушению заводских настроек, во-вторых, не позволяет изменять коэффициент избытка воздуха динамически, непосредственно во время эксперимента. Поэтому было разработано устройство, в задачи которого входят: измерение текущего времени впрыска, динамическое изменение времени впрыска на заданную величину, отображение информации о текущих параметрах. Устройство включено в разрыв цепи управления клапанами форсунок и обеспечивает дискретное изменение текущего времени впрыска в пределах  $\pm 20$  %.

Для нормального функционирования устройства управления топливоподачей необходимо использовать имитатор датчика кислорода, чтобы исключить коррекцию электронного блока по сигналу обратной связи с датчика кислорода. Имитатор отключает датчик и на вход ЭБУ подает сигнал о том, что коэффициент избытка воздуха находится в пределах 1.



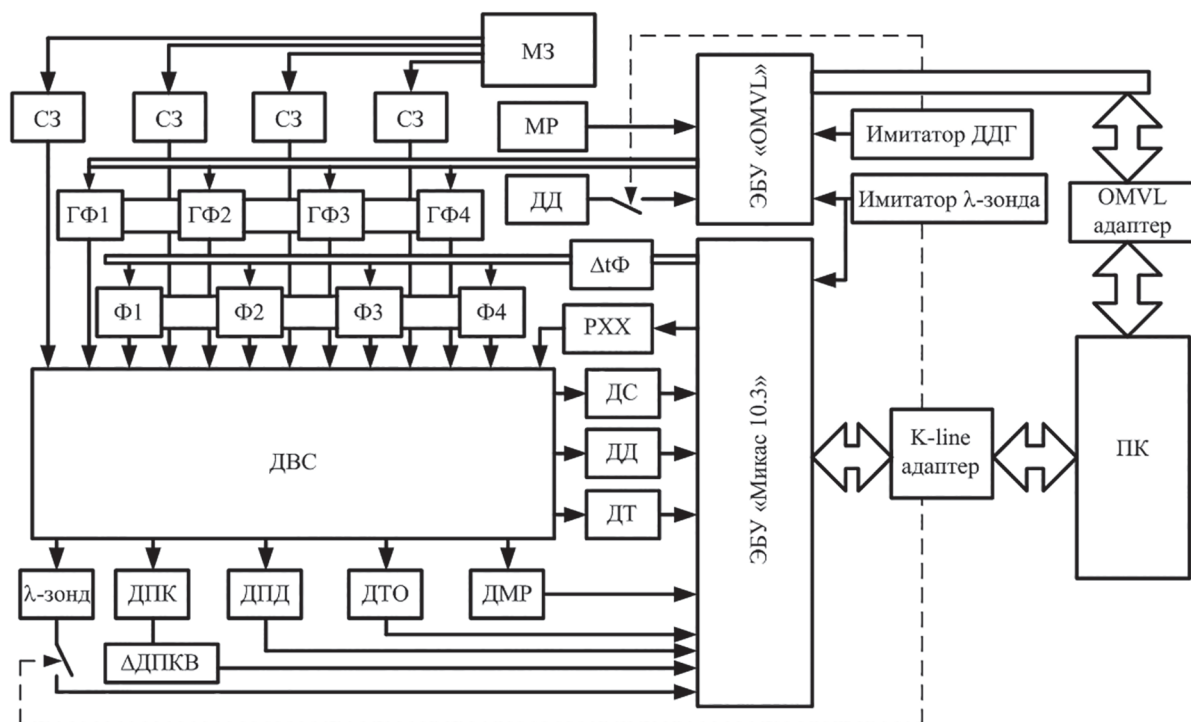


Рис. 3. Система управления биогазовым ДВС на стенде

Контроллер газовой системы OMVL производит коррекцию времени открытия газовых форсунок по сигналу датчика давления в газовой рампе (ДДГ). Принудительное управление газоздушной смесью обеспечивается на двух уровнях: на первом – установкой необходимого давления в газовой рампе при помощи редуктора; на втором – отключением штатного ДДГ и подачей сигнала с имитатора датчика давления (им. ДДГ) на вход ЭБУ. Такой способ управления охватывает широкий диапазон изменения коэффициента избытка воздуха и позволяет производить оперативные воздействия во время эксперимента.

Синхронизация работы двигателя и ЭСУД производится по сигналу датчика положения коленчатого вала (ДПКВ). Из всех управляющих воздействий электронного блока только момент зажигания имеет жесткую привязку к положению КВ. Используя этот фактор разработан вариатор сигнала ДПКВ (ΔДПКВ), который включается в разрыв цепи датчика и позволяет смещать сигнал ДПКВ на заданный угол.

Для получения топлива для проведения экспериментальных исследований была задействована биогазовая заправка, приведенная на рис. 4.

Биогаз из реактора 1 объемом 0,7 м<sup>3</sup> попадает в барботажную камеру 2, в которой очищается от механических примесей, сероводорода и части углекислого газа. Далее топливо по-

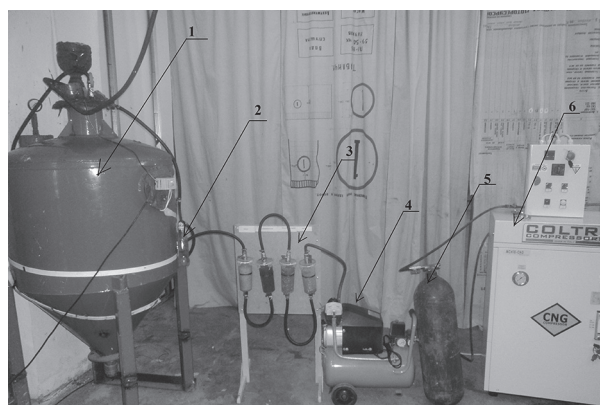


Рис. 4. Технологическая схема автобиогазовой заправки:

- 1 – биогазовый реактор; 2 – барботажная камера;
- 3 – сепаратор; 4 – компрессор низкого давления КПП-230-24; 5 – ресивер; 6 – компрессор высокого давления МСН-10

дает в сепаратор, состоящий из четырех последовательно расположенных фильтров со следующими наполнителями: древесная стружка, активированный уголь, металлическая стружка, природный цеолит. Данный сепаратор удаляет из биогаза водяные пары, а также большую часть CO<sub>2</sub>. Меняя толщину фильтрующего слоя в угольном и цеолитовом фильтрах, можно получать биогаз с содержанием CO<sub>2</sub> от 7 до 50 % по объему. Далее биогаз с помощью заправочной установки МСН-10 закачивается в расходные баллоны под давлением до 20 МПа.

## Заключение

В результате проведенных исследований создан исследовательский стенд для автомобильного биогазового ДВС. Стенд оснащен полным комплексом измерительной аппаратуры для определения индикаторных и эффективных показателей двигателя.

Кроме этого разработана автоматизированная система управления двигателем на стенде, позволяющая по команде с поста управления изменять параметры подачи топлива и угол опережения зажигания.

## Литература

1. Бганцев В.Н., Левтеров А.М., Мараховский В.П. Газовый двигатель на базе четырехтактного дизеля общего назначения // Техно – plus. Харьков. 2003. № 10. 92 с.
2. Захарчук В.І., Сітовський О.П., Козачук І.С. Розрахунково-експериментальні дослідження газового двигуна, переобладнаного з дизеля // Автомобільний транспорт. Харків: ХНАДУ. 2005. Вип. 16. С. 276–278.
3. Богомолов В.А., Абрамчук Ф.И., Манойло В.М., Кабанов А.Н., Салдаев С.В. Экспериментальная установка для доводки систем зажигания и управления газовым двигателем с искровым зажиганием 6Ч 13/14 // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. М.: АГЗК+АТ. 2005. № 4 (22). С. 42–45.
4. Абрамчук Ф.И., Пойда А.Н., Ефремов А.А., Сивых Д.Г., Проскурин А.В. Новая автоматизированная система исследования и диагностированная автотракторных двигателей // Авто-

мобильный транспорт. Харьков: ХНАДУ. 2005. Вып. 17. С. 28–34.

5. Мунипов В.М., Зинченко В.П. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды // Логос. 2001. 356 с.

## References

1. Bgancev V.N., Levterov A.M., Marahovskij V.P. Gas engine based on a four-stroke general purpose engine. Tekhno – plus. Har'kov. 2003. No 10. 92 p. (in Russ.).
2. Zaharchuk V.I., Sitovs'kij O.P., Kozachuk I.S. Rozrahunkovo-eksperimental'ni doslidzhennya gazovogo dviguna, pereobladnanogo z dizelya. Avtomobil'nij transport. Har'kiv: HNADU Publ. 2005. Vip. 16, pp. 276–278.
3. Bogomolov V.A., Abramchuk F.I., Manojlo V.M., Kabanov A.N., Saldaev S.V. Experimental device for maintaining of ignition systems and control of a gas engine with spark ignition 6H 13/14. Avto-GazoZapravochnyj kompleks + Al'ternativnoe toplivo. Moscow: AGZK+AT Publ.. 2005. No 4 (22), pp. 42–45 (in Russ.).
4. Abramchuk F.I., Pojda A.N., Efremov A.A., Sivyh D.G., Proskurin A.V. New automated system for study and diagnosis of automotive and tractor engines. Avtomobil'nyj transport. Har'kov: HNADU Publ.. 2005. Vyp. 17, pp. 28–34 (in Russ.).
5. Munipov V.M., Zinchenko V.P. EHrgonomika: chelovekoorientirovannoe proektirovanie tekhniki, programmnyh sredstv i sredy [Ergonomics: person-oriented design of equipment, software and environment]. Logos Publ. 2001. 356 p.