

УДК 621.433

**Конвертация быстроходного дизеля для работы по газодизельному циклу с минимизированной запальной порцией дизельного топлива**

**Шатров М.Г., Хачиян А.С., Синявский В.В., Шишлов И.Г.,  
Вакуленко А.В.**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)*

**Diesel Engine Conversion for Operation by Gas-Diesel  
Cycle with Minimized Ignition Portion of Diesel Fuel**

**Shatrov M.G., Khatchiyani A.S., Sinyavski V.V., Shishlov I.G.,  
Vakulenko A.V.**

*Moscow State Automobile and Road Construction Technical University (MADI)*

#### **АННОТАЦИЯ**

Перевод двигателей на питание природным газом актуален в связи с меньшей стоимостью газового топлива и улучшением экологических показателей. В рамках работ по созданию высоко- и среднеоборотного газодизеля были разработаны и изготовлены система электронного управления двигателем и модульная система питания газом. Такой подход позволил использовать три модуля для обеспечения питанием среднеоборотного газодизеля 6ЧН20/28 и один модуль – высокооборотного газодизеля 6ЧН10,7/12,4. С целью экспериментальной отработки систем в МАДИ выполнена конвертация дизеля 6ЧН10,7/12,4 в газодизель с минимизированной запальной порцией дизельного топлива, подаваемого системой Common Rail. Калибровка систем газодизеля проводилась с использованием результатов экспериментальных исследований и расчетного комплекса, разработанного для моделирования рабочего процесса газодизеля. Стендовые испытания высокооборотного газодизеля показали, что разработанные системы питания газом и электронного управления позволяют получить большую долю замещения газом дизельного топлива, высокие эффективные показатели, а также заметное снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ .

## **ANNOTATION**

Diesel engine conversion for operation on gas fuel is relevant due to lower price of diesel fuel and better environment behavior. As a part of research for development of high- and medium speed gas-diesel engines, electronic engine control system and modular gas fuel supply system were developed and produced. This approach enabled to use tree modules for feeding an average-speed 6-cylinder engine with  $S/D=20/28$  and one module – a high-speed 6-cylinder engine with  $S/D=10,7/12,4$ . For experimental perfection of these systems, in MADI, a conversion of a high-speed diesel engine into a gas-diesel engine using a minimized ignition portion of diesel fuel supplied with a CR system was made. Calibration of the systems was effected using experimental methods and computer modelling complex of a gas-diesel engine working process. Bench tests of the high-speed gas-diesel engine demonstrated that gas fuel and electronic control systems that were developed made it possible to assure a high percentage of diesel fuel substitution with gas, high fuel efficiency and considerable decrease of  $NO_x$  и  $CO_2$  emissions.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Конвертация, газодизель, наддув, моделирование, токсичные выбросы.

## **KEY WORDS**

Conversion, gas-diesel engine, turbocharging, modelling, toxic emissions.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Истощение запасов нефти, трудности, связанные с ее добычей и транспортировкой из новых разведанных месторождений, а также вызванная этим высокая стоимость нефти делают актуальным применение в ДВС компримированного природного газа, поскольку разведанные запасы природного газа значительно больше, чем нефти, а его стоимость в России значительно меньше. Применение газового топлива в ДВС позволяет повысить топливную экономичность, снизить выбросы  $NO_x$ ,  $CO$ , частиц и  $CO_2$ .

В МАДИ на накоплен многолетний опыт конвертации высокооборотных дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием. Задача настоящего исследования заключается в конвертации в газодизель высокооборотного дизеля Камминс-КАМА 6ЧН10,7/12,4 путем формирования его систем питания

газом и электронного управления с последующей калибровкой этих систем на основе экспериментальных исследований и моделирования. Данное исследование выполняется с конечной целью отработки технологии конвертации в газодизель среднеоборотного дизеля 6ЧН20/28.

## **ОБЗОР СПОСОБОВ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВС, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Предварительно выполнен анализ с целью определения наиболее эффективных методов конвертации средне- и высокооборотных двигателей для работы на природном газе [1]. Любой способ конвертации позволяет снизить выбросы  $\text{CO}_2$ , поскольку на 1 МДж подводимой теплоты при сжигании природного газа приходится на 25% меньше выбросов  $\text{CO}_2$ , чем при сжигании дизельного топлива [2].

Для средне- и высокооборотных двигателей рассматривались два рабочих цикла: газового двигателя, работающего на бедных смесях, и газодизеля.

Газовый двигатель, работающий на бедных смесях, позволяет повысить степень форсирования, получить высокую топливную экономичность и низкие выбросы  $\text{NO}_x$ . Такие двигатели успешно применяются для грузовиков и автобусов, но для среднеоборотных двигателей больших размеров становится острой проблема детонация, требующая ограничивать степень форсирования (как правило,  $p_e < 1,5$  МПа) или прибегать к сложным методам борьбы с детонацией.

Примером успешного создания форсированных газовых двигателей, работающих на бедной смеси, служат газовые двигатели Jenbacher серии 6 размерности D/S=190/220 для генерации электроэнергии. У них максимальная величина  $p_e$  достигает 2,4-2,6 МПа [3]. Для получения высокой степени форсирования, низкого расхода топлива, бездетонационной работы и низких токсичных выбросов используется целый ряд мер: работа на бедной смеси с коэффициентом избытка воздуха порядка 2,0, форкамера, цикл Миллера, двухступенчатая система наддува, работа с постоянной высокой частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . Это идеальный рабочий процесс для стационарных двигателей, так как можно подводить газ непосредственно от газопровода,

поскольку согласно [4] стоимость такого газа до 4 раз меньше стоимости того же газа на газозаправочной станции. Но для больших транспортных среднеоборотных двигателей этот рабочий процесс требует ограничения форсирования из-за детонации на малых частотах вращения.

Газодизельный процесс представляется более перспективным для высоко- и среднеоборотных транспортных двигателей, поскольку у него нет ограничений, связанных с детонацией. При сохранении ТПА конвертируемого дизеля и подачи в цилиндры запальной дозы дизельного топлива удастся заместить часть дизельного топлива газом, улучшить по сравнению с базовым дизелем топливную экономичность и снизить токсичные выбросы. Так у газодизеля ЯМЗ 236Д трактора РТМ-160 запальная доза дизельного топлива составляет 30% от номинальной в дизельном режиме [5], а у газодизеля ДМ самосвалов БелАЗ удалось достичь запальной дозы дизельного топлива 18% и снизить выбросы частиц в 5 раз, СО – в 2...3 раза, NO<sub>x</sub> – в 1,3...1,4 раза [6]. В целом, у таких газодизелей доля замещения дизельного топлива газом получается невысокой (40-60%), так как они запускаются и работают на холостом ходу на дизельном топливе.

По мнению автора [7] минимальная запальная доза дизельного топлива 20...25% определяется минимальным количеством топлива, которое может устойчиво подавать ТНВД традиционного типа. Если на двигателе установить специальный ТНВД только для впрыска запального жидкого топлива, двигатель может устойчиво работать при запальной дозе топлива 3...5%. Наконец, возможен инновационный процесс, при котором происходит воспламенение газовойоздушной смеси запальной порцией тонко распыленного дизельного топлива, подаваемого системой CR, когда при правильной организации рабочего процесса доза дизельного топлива может быть доведена всего до 5% от общей цикловой подачи дизельного и газового топлива. При этом доля дизельного топлива остается низкой при снижении нагрузки.

По результатам проведенного анализа была поставлена задача создания систем питания топливом и электронного управления для высоко- и среднеоборотного газодизеля «нового поколения» с воспламенением газа

минимизированной порцией дизельного топлива. Для отработки систем было решено конвертировать дизель 6ЧН10,7/12,4 в газодизель с использованием разработанной модульной системы питания газом .

### **ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Использовался разработанный в МАДИ программный комплекс расчетов показателей дизеля/газодизеля/газового двигателя [8]. В дополнение к экспериментальным исследованиям, были проведены расчеты рабочего процесса газодизеля 6ЧН10,7/12,4 в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, которые использовались для калибровки систем питания газом и управления. После проведения стендовых испытаний газодизеля была выполнена серия расчетов для анализа полученных результатов.

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПИТАНИЯ ГАЗОМ И УПРАВЛЕНИЯ**

Предложена система питания газом газодизеля, состоящая из нескольких модулей, соединенных между собой. Каждый газовый модуль обеспечивает редуцирование и подачу природного газа. Это позволяет использовать в зависимости от размерности газодизеля соответствующее количество модулей. Так для газодизеля 6ЧН10,7/12,4 требуется один модуль, а для газодизеля 6ЧН20/28 – 3 модуля. Экспериментальный образец системы подачи газа (рис. 1) обеспечивает подачу природного газа для газодизеля с внешним смесеобразованием с рабочим давлением 1 МПа. По своим конструктивным признакам она относится к газовым редуцирующим топливным системам с электроуправляемыми дозаторами природного газа. Для подачи запальной порции дизельного топлива использовалась штатная аккумуляторная топливная система дизеля 6ЧН10,7/12,4 с электрогидроуправляемыми форсунками.

Экспериментальный образец системы электронного управления подачей и воспламенения газовых топлив для 6-цилиндрового газодизеля (рис. 2) на основании данных, получаемых от информационных элементов систем подачи газа и запальной порции дизельного топлива, формирует электрические импульсы управления исполнительными элементами этих систем, обеспечивает синхронизацию и распределение импульсов управления по цилиндрам в соответствии с режимом работы двигателя.

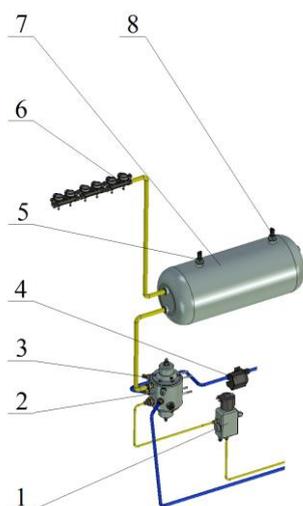


Рис. 1. Схема системы подачи природного газа на стендовой установке газодизеля:

1 – магистральный электромагнитный клапан высокого давления; 2 – двухступенчатый газовый редуктор; 3 – датчики температуры газа в редукторе; 4 – регулятор теплоносителя; 5 – датчик давления газа; 6 – газовые форсунки; 7 – газовый ресивер; 8 – датчик температуры газа

Результаты испытаний газодизеля по точкам скоростной и нагрузочной характеристик представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, на малых частотах вращения не удалось достигать высоких величин  $p_e$ . Это может объясняться снижением коэффициента избытка воздуха газодизеля из-за частичного замещения воздуха газом, а также тем, что у дизеля все топливо находится в камере сгорания, а в газодизеле газ заполняет зазоры между поршнем-гильзой и поршнем-головкой цилиндров и сгорает неполностью. Высокий эффективный КПД газодизеля  $\eta_e=0,43$  получен в диапазоне частот вращения  $1300...1600 \text{ мин}^{-1}$ . При минимальной частоте вращения экспериментальное значение  $\eta_e=0,34$  заметно меньше расчетного  $\eta_e=0,42$ . Это может объясняться неполным сгоранием топлива в зазорах, что особенно заметно влияет на малых частотах вращения, когда турбулизация заряда снижается. При расчетах последствия попадания топлива в зазоры не учитываются.

На рис. 5. приводится сравнение ряда показателей газодизеля и базового дизеля 6ЧН10,7/12,4 при 3 частотах вращения и двух нагрузках – максимальной и частичной (30-40% от максимальной). Здесь указана доля запальной порции дизельного топлива по отношению к количеству дизельного топлива, впрыскиваемого на соответствующем режиме базового дизеля. На полных нагрузках доля дизельного топлива составляет 4,5...6,2%, а на малых нагрузках – 8,8-16,7%. На холостом ходу доля дизельного топлива равна

33%. Эффективный КПД газодизеля в среднем на 3% выше, чем базового дизеля. Получено среднее снижение на полных и частичных нагрузках  $\text{CO}_2$  на 1,17 и 1,46%, а  $\text{NO}_x$  – на 1,52 и 7,4%.

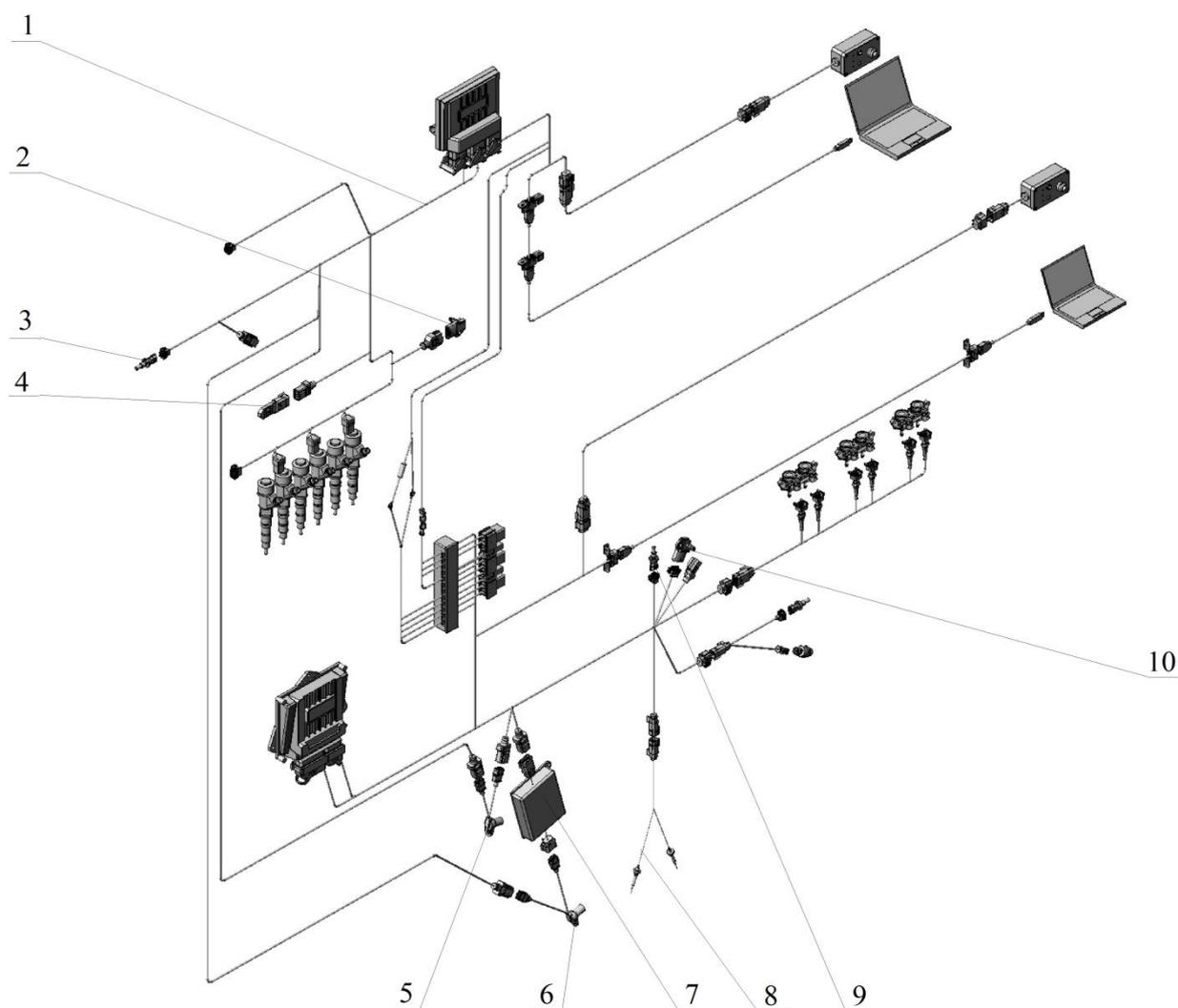


Рис. 2. Экспериментальная система электронного управления подачей и воспламенения газового топлива для газодизеля:

1 – информационно-вычислительный блок (ИВБ-ГД); 2, 10 – датчик температуры и давления во впускном коллекторе; 3, 9 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 4 – датчик барометрической коррекции; 5 – датчик положения коленчатого вала; 6 – датчик положения распределительного вала; 7 – адаптер сигналов датчиков положения распределительного вала; 8 – блок термопар

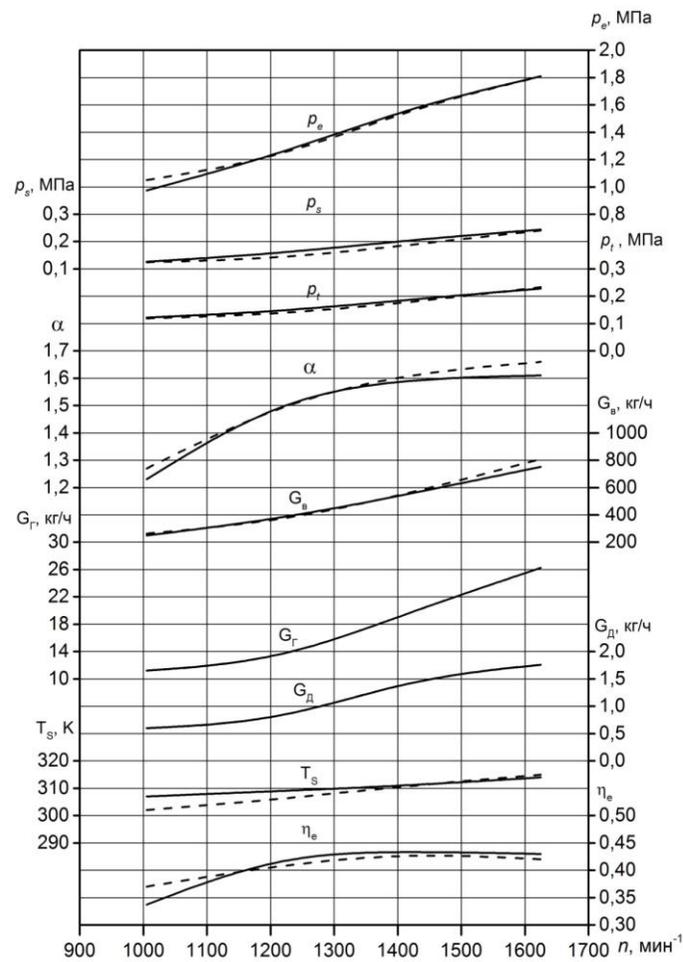


Рис. 3. Внешняя скоростная характеристика газодизеля 6ЧН10,7/12,4  
 ----- расчет; - - - - - эксперимент

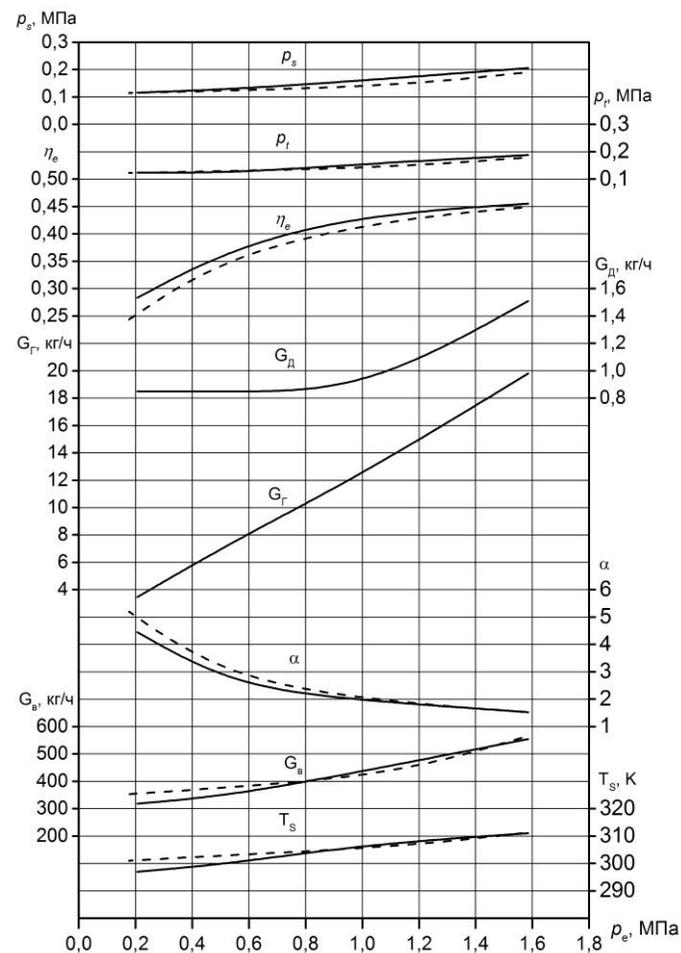


Рис. 4. Нагрузочная характеристика газодизеля 6ЧН10,7/12,4 при  $n=1420 \text{ мин}^{-1}$   
 ----- расчет; - - - - - эксперимент

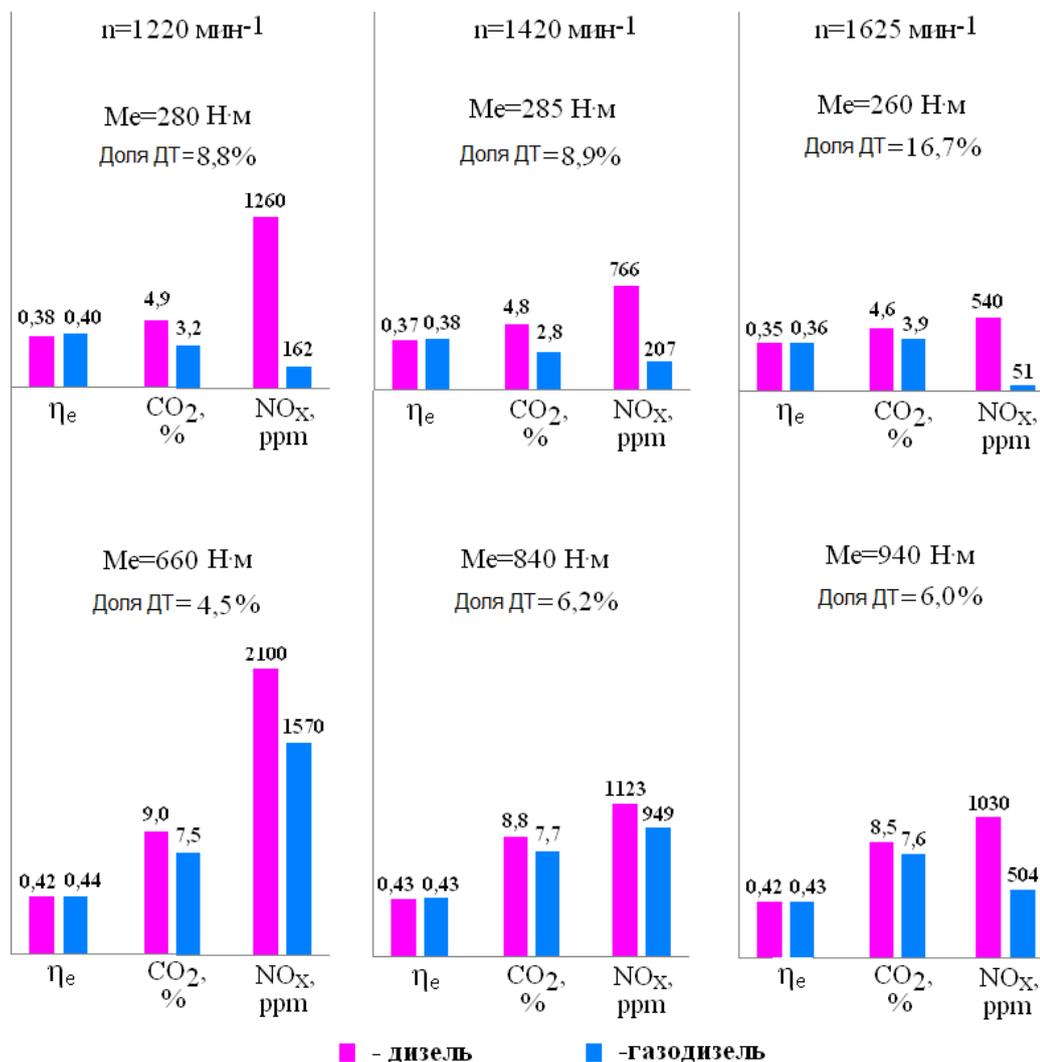


Рис. 5. Сравнение показателей газодизеля и базового дизеля 6ЧН10,7/12,4

## ВЫВОДЫ

1. Разработана модульная система питания газом и электронная система управления для газодизеля. С использованием этих систем выполнена конвертация в газодизель базового дизеля 6ЧН10,7/12,4.
2. Проведена калибровка систем питания газом и электронного управления газодизеля 6ЧН10,7/12,4
3. Определены экспериментальные показатели газодизеля 6ЧН10,7/12,4, показавшие возможность работы на нагрузках 100%, 35% и холостом ходу со средними долями дизельного топлива, соответственно, 5,5, 11,5 и 33%, что превышает показатели газодизелей с топливной аппаратурой традиционного типа.

4. Достигнуты высокие показатели газодизеля 6ЧН10,7/12,4: на полных нагрузках эффективный КПД достигает 43%, выбросы NO<sub>x</sub> снижаются в среднем в 1,52 раза, а выбросы CO<sub>2</sub> – в 1,18 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Шатров М.Г., Хачиян А.С., Синявский В.В. Шишлов И.Г. *Анализ способов конвертации автомобильных дизелей на питание природным газом.* Транспорт на альтернативном топливе, № 4 (34), 2013, с. 29-33

[2] Шатров М.Г., Хачиян А.С., Голубков Л.Н., Дунин А.Ю. *Совершенствование рабочих процессов автотракторных двигателей и их топливных систем, работающих на альтернативных топливах.* Монография. Москва, МАДИ, 2012. 220 с.

[3] M. Grotz, R. Böwing, J. Lang and J. Thalhauser (GE), P. Christiner and A. Wimmer (LEC). *Efficiency Increase of a High Performance Gas Engine for Distributed Power Generation.* 6th CIMAC Cascades. Dual fuel and gas engines – Their Impact on Application, Design and Components, February 27, 2015

[4] Лукшо В.А. *Комплексный метод повышения энергоэффективности газовых двигателей с высокой степенью сжатия и укороченными тактами впуска и выпуска.* Дис. ... докт. техн. наук, Москва, 2015. 365 с.

[5] Б.П. Загорских, Ю.А. Коцарь, Е.Б. Бабенич. *Совершенствование подачи газа для работы двигателя по газодизельному циклу.* АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2012, № 5 (65), с. 3-6.

[6] Кудрявцев А., Ломашов В. *Белазы XXI века с газодизелями семейства ДМ.* АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2010, № 3 (51), с. 3-6.

[7] А.А.Капустин. *Система питания и управления газодизелем, работающим на природном газе.* Транспорт на альтернативном топливе. 2008, № 4 (4), с. 46-49.

[8] Синявский В.В. Хачиян А.С., Шишлов И.Г., Карпов Д.М. *Моделирование показателей и характеристик двигателей, питаемых природным газом.* Транспорт на альтернативном топливе, 2010, №3 (15), с. 14-19.