

# АВТОТРАКТОРНЫЙ ДИЗЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, АДАПТИРОВАННЫЙ К РАБОТЕ НА СЖИЖЕННОМ УГЛЕВОДОРОДНОМ ГАЗЕ ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ПРОЦЕССУ

академик РАН Измайлов А.Ю., д.т.н. Савельев Г.С.,  
к.т.н. Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Уютов С.Ю.  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия  
evo-xpro-info@yandex.ru

Проведены исследования на тормозном стендовом оборудовании дизельного двигателя Д-243 производства Минского моторного завода. Испытаниям подвергли систему распределенной подачи сжиженного углеводородного газа с запальной дозой дизельного топлива путем автоматического изменения угла подачи газа и включением в систему рециркуляции отработавших газов во всасывающий коллектор. Адаптация дизельного двигателя позволяет работать системе питания как в дизельном, так и в газодизельном режиме, при этом электронное регулирование подачи дизельного топлива в режиме «дизель» происходит более точно и способствует снижению расхода и более полному сгоранию дизельного топлива в выпускном коллекторе. Для распределенной подачи сжиженного углеводородного газа применяется стандартное оборудование, которое имеет широкое распространение для перевода бензиновых двигателей с воспламенением от свечной искры. Электронный блок управления отечественного производства был настроен согласно разработанной в лаборатории методике управления подачей газа по цилиндрам. Исследования показали, что выброс загрязняющих веществ в атмосферу снизился на всех нагрузочных режимах работы двигателя по газодизельному процессу и соответствует стандарту «Евро 4». За счет в половину меньшей стоимости сжиженного углеводородного газа по сравнению с дизельным топливом затраты на использование последнего снижаются на 20...25 %. Использование сжиженного углеводородного газа в газодизельных двигателях обеспечивает снижение себестоимости производства сельскохозяйственной продукции на 10...12 %. Данные показатели подтверждают актуальность научных исследований по созданию системы адаптации дизельного автотракторного двигателя для работы на альтернативных видах топлива.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, газомоторное топливо, экономическая эффективность, расход топлива.

## Введение

Начиная с 90-х годов 20 века количество загрязняющих веществ, попадающих в окружающую среду от дизельных автотракторных двигателей неумолимо растет. Загрязняются почвенные покровы, атмосфера, гидросфера, происходит аккумуляция загрязняющих элементов в биосфере. Использование сжиженного природного газа в качестве альтернативного топлива помогает устранить ряд недостатков, связанных с составом газа-воздушной смеси. Первостепенной задачей является разработка средств и методов снижения загрязнения окружающей среды, а именно исследований в области альтернативного топлива с минимальными вредными выбросами в окружающую среду,

увеличение доступности данной технологии путем снижения стоимости адаптации топливной аппаратуры дизельных двигателей.

Сжиженный углеводородный газ – это пропан-бутановая смесь, которую заправляют в бытовые газовые баллоны. Она же составляет основную долю газа, который сгорает в факелах нефтедобывающих и перерабатывающих предприятий.

Пропорциональный состав топливной пропан-бутановой смеси может различаться по температурным свойствам получаемого горючего. Чистый бутан ( $C_4H_{10}$ ) переходит в жидкое состояние уже при  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении. Поэтому к нему добавляют пропан ( $C_3H_8$ ) с температурой кипения –  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Со-

отношение этих газов в смеси задает нижний температурный предел применения топлива, которое по этой же самой причине бывает «летним» и «зимним».

Система распределенного впрыска газодизеля предназначена для переоборудования дизельных двигателей для работы в режиме двойного топлива – дизель-газ. При этом дизельное топливо используется как запальная доза для воспламенения смеси ввиду отсутствия на дизельных двигателях искровой системы зажигания [1, 2].

Основной целью данных исследований является обоснование параметров автотракторного дизельного двигателя, работающего по газодизельному процессу с воспламенением от запальной дозы. Замещающим дизельное топливо является сжиженный углеводородный газ (СУГ). Испытания проводились на всех режимах работы двигателя, включая режим максимального крутящего момента с определением состава загрязняющих выбросов в отработавших газах. Режим максимального крутящего момента является самым важным, так как расход топлива при этом имеет максимальное значение, как на максимальной мощности, но частота вращения имеет малые значения, а соответственно угол подачи дизельного топлива остается тем же. Дизельное топливо в большом количестве впрыскивается слишком рано. Поэтому для воспламенения большого количества топлива необходима высокая компрессия, что не обеспечивает данный двигатель. В связи с этим догорание происходит во выпускном коллекторе, что сопровождается повышением температуры выпускных газов на выходе из камеры сгорания. Соответственно применение СУГ в газодизельном режиме исключает возможность неполного сгорания топливно-воздушной смеси, что улучшает экологические показатели двигателя по вредным выбросам [3].

### **Цель исследования**

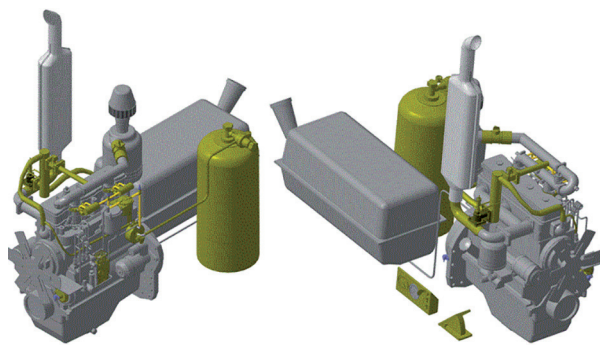
Целью исследования является автотракторный дизельный двигатель, адаптированный к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу.

### **Основная часть**

Система распределенной подачи газа по цилиндрам обеспечивает в газодизельном режиме регулирование подачи газа для

работы двигателя по внешней и частичным регуляторным характеристикам с одновременным обеспечением подачи запальной дозы дизельного топлива. В дизельном режиме она регулирует подачу топлива как всережимный центробежный регулятор топливного насоса высокого давления (ТНВД). На рис. 1 показана принципиальная схема системы адаптации дизельного двигателя к работе на двухтопливном режиме.

Одно из главных преимуществ дизельного двигателя, работающего на смешанном топливе, состоит в отсутствии необходимости внесения существенных изменений в конструкцию топливной системы двигателя. Кроме этого, после полного расхода запаса газа агрегат моментально переводится обратно на дизельное топливо и начинает работать в классическом режиме [4].



**Рис. 1. Принципиальная схема системы адаптации серийного дизельного двигателя к работе на СУГ**

Наилучшие экономические показатели достигаются при использовании в виде замещающего топлива газа пропана. Максимальный процент замещения при использовании пропана составляет 80 %, средний процент замещения – 70 %. Высокий процент замещения и высокая эффективность работы достигаются за счет использования комбинированной технологии. Расход газа и дизельного топлива, а также процентное замещение представлены в табл. 1.

В комплексе с системой подачи газа разработана система рециркуляции выпускных газов, обеспечивающая автоматически регулируемый перепуск отработавших газов из выпускного коллектора во впускной. Система позволяет избежать появления детонационного сгорания газо-воздушной смеси от воспламенения запальной дозы дизельного топлива при высоких и номинальных нагрузках двигателя.

Таблица 1

## Параметры подачи газа, обеспечивающие бездетонационную работу двигателя

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка, %	Запальная доза, %	Угол начала впрыска, град.	Угол впрыска, град.	Открытие заслонки рециркуляции, %
800...1000	0–5	15	28	40	10
	Более 5	17	28	45	15
1000...1200	0...15	15	28	45	20
	Более 15	19	28	50	25
1200...1400	0...25	20	28	50	20
	Более 25	21	29	60	30
1400...1600	0...35	21	29	60	30
	Более 35	23	29	70	100
1600...1800	0...50	23	30	80	50
	Более 50	25	31	90	100
1800...2000	0...70	25	32	110	80
	Более 70	28	32	130	100
1800...2200	0...85	28	32	140	100
	Более 85	29	32	180	100
2200...2400	0...85	29	32	110	100
	Более 85	30	32	180	100
1100...1600	$M_{кр\ max}$	35	32	180	100

На диаграмме (рис. 2) показаны кривые изменения частоты вращения двигателя от мощности, изменения топливоподачи дизельного топлива и газа в отдельности, а также изменения расхода топлива. Благодаря оригинальному алгоритму в каждый момент времени работы двигателя происходит мониторинг нагрузки и частоты вращения двигателя и данных, поступающих с собственных датчиков. После обработки этих данных блок управления газодизеля выдает управляющие сигналы на форсунки газового впрыска, обеспечивая подачу газа в двигатель и на шаговый двигатель/электронный блок, ограничиваю-

щий подачу дизельного топлива. Таким образом, поддерживается оптимальный топливный баланс, что в разы увеличивает эффективность работы по сравнению с аналогами, использующими жесткие ограничения ТНВД в комбинации с эжекторной системой подачи газа.

Кроме того, электронный блок управления отслеживает необходимый угол подачи газа, который при переключении на газ должен быть больше, чем для бензиновых двигателей, при прочих равных условиях. Газовое топливо горит медленнее, тем самым объем газа в газо-воздушной смеси должно быть больше для получения необходимого давления отработавших газов. По этой же причине возрастает тепловая нагрузка на клапаны и их седла, а также появляется детонация. Но газ не смывает масло со стенок цилиндров и в газовом топливе не содержится катализаторов старения металлов, проходит более полное сгорание топлива, уменьшается токсичность выхлопа и нагар в цилиндрах.

С целью исключения детонации при сгорании газа в цилиндре двигателя и снижения порога ее возникновения, а также для улучшения экологических показателей установлена система рециркуляции отработавших газов, разработанная авторами. Конструкция системы рециркуляции была изменена в части расположения соединительных элементов систе-

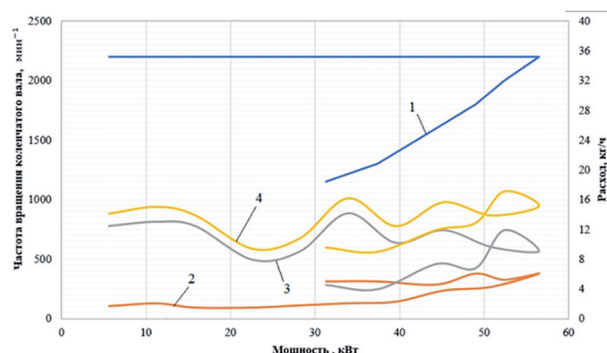


Рис. 2. Диаграмма расхода топлива двигателя:

- 1 – частота вращения вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;  
 2 – часовой расход дизельного топлива, кг/ч;  
 3 – расход газа, кг/ч; 4 – часовой расход топлива, кг/ч

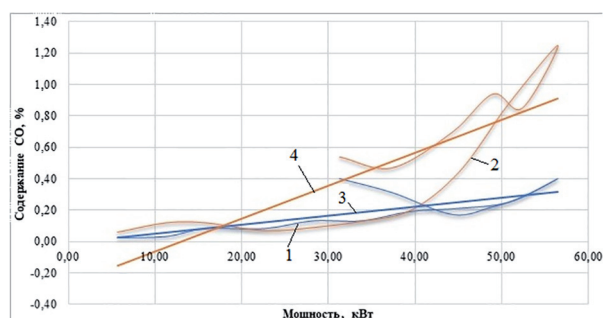
мы охлаждения, системы впуска и выпуска для обеспечения компоновочных решений на мобильной сельскохозяйственной технике с сохранением функциональных особенностей.

Система рециркуляции обеспечивает перепуск отработавших газов во впускной коллектор на режимах холостого хода и малой мощности (до 50 % от номинальной мощности) в пределах 10...20 %, что обеспечивает снижение выбросов вредных веществ до 50 %. На режимах более 50 % от номинальной мощности и корректорного режима регулятора система рециркуляции обеспечивает перепуск до 50 % отработавших газов во впускной коллектор, что обеспечивает увеличение порога возникновения детонации в цилиндре двигателя [5].

Двигатель, работающий в газодизельном режиме, обладает более совершенными экологическими характеристиками, чем двигатель, работающий на дизельном топливе.

Однако степень уменьшения эмиссии экологических вредных веществ сильно зависит от режима работы двигателя и степени замещения дизельного топлива газовым.

По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств при уровне замещения дизельного топлива на 50 % газовым достигается падение вредных выбросов в 3 раза. Соответственно в нашем случае замещение происходит до 70 % и вредные выбросы меньше в 4 раза от базовых. На диаграмме (рис. 3) показаны соотношения вредных выбросов в окружающую среду дизельного двигателя Д-243 серийного исполнения и с системой адаптации к работе на СУГ по газодизельному процессу.



**Рис. 3. Зависимость выбросов углекислого газа CO от мощности двигателя:**

1 – CO газодизель; 2 – CO дизель; 3 – линейная (CO газодизель); 4 – линейная (CO дизель)

## Выводы

1. Использование альтернативных моторных топлив позволяет снизить долю затрат на топливо в выражении себестоимости производства сельскохозяйственной продукции, уменьшить негативную экологическую нагрузку от токсичных выбросов с отработавшими газами двигателей сельскохозяйственных тракторов, обеспечивают выполнение Правил ЕЭК ООН № 96, Директивы 97/68 ЕС и соответствующего отечественного стандарта ГОСТ Р.41.96.

2. СУГ обладает уникальной комбинацией коммерческих и экологических преимуществ по сравнению с другими альтернативными топливами, что обеспечило в последнее десятилетие значительное расширение его использования в качестве моторного топлива в различных странах [6].

3. Полученные результаты являются подтверждением рациональности использования СУГ для неполного замещения дизельного топлива: газ – 70 % и дизельное топливо – 30 %. Двухтопливная система питания двигателя – система переключения с газодизельного на дизельный режим работы – обеспечивает бесперебойную работу трактора в отличие от зарубежных аналогов, не способных обеспечить работу трактора при выработке газа в баллонах.

## Литература

1. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Уютов С.Ю. Определение экономически целесообразного вида газомоторного топлива для мобильной сельскохозяйственной техники // Агропанорама. 2016. № 3. С. 26–29.
2. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Родионов А.В., Родионов А.В., Уютов С.Ю., Фурман В.В. Система питания газодизеля: патент на полезную модель № 160771, Российская Федерация. Опубликовано 27.03.2016. Бюл. № 9.
3. Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Родионов А.В., Уютов С.Ю., Савельев Г.С. Экономическая эффективность использования сжиженного углеводородного газа в качестве топлива в сельскохозяйственной автотракторной технике // Будущее машиностроения России: сб. докл. Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 281–282.
4. Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Родионов А.В., Уютов С.Ю., Савельев Г.С. Способы



устранения детонации при работе дизеля на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // Будущее машиностроения России: сб. докл. Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 283–286.

5. Савельев Г.С., Годжаев З.А., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Коклин И.М. Комплексный подход к использованию газомоторного топлива в агропромышленном комплексе РФ // Газовая промышленность. 2015. № S3(728). С. 96–99.
6. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Овчинников А.В. ВИМ – Пионер в создании тракторов, работающих на газе // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. С. 164–168.

## References

1. Savel'ev G.S., Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Uyutov S.Yu. Determination of an economically appropriate type of gas engine fuel for mobile agricultural vehicles. *Agropanorama*. 2016. No 3, pp. 26–29 (in Russ.).
2. Savel'ev G.S., Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Rodionov A.V., Rodionov A.V., Uyutov S.Yu., Furman V.V. *Sistema pitaniya gazodizelya* [The diesel-gas feed supply system]: patent na poleznuyu model' No 160771, Rossiyskaya Federatsii. Opublikovano 27.03.2016. Byul. No 9.
3. Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Rodionov A.V., Uyutov S.Yu., Savel'ev G.S. Economic efficiency of the using of liquefied hydrocarbon gas as fuel in the agricultural automobile and tractor vehicles. *Budushchee mashinostroeniya Rossii: Sb. dokl. Desyatoy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [The future of mechanical engineering in the Russian Federation: collection of the reports of the Tenth All-Russian conference of young scientists and specialists (with the international participation)]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2017, pp. 281–282 (in Russ.).
4. Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Rodionov A.V., Uyutov S.Yu., Savel'ev G.S. Methods for eliminating detonation during the operation of a diesel engine on the liquefied hydrocarbon gas on the gas-diesel process. *Budushchee mashinostroeniya Rossii: Sb. dokl. Desyatoy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [The future of mechanical engineering in the Russian Federation: collection of the reports of the Tenth All-Russian conference of young scientists and specialists (with the international participation)]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2017, pp. 283–286 (in Russ.).
5. Savel'ev G.S., Godzhaev Z.A., Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Koklin I.M. Comprehensive approach to the using of gas engine fuel in the agroindustrial complex of the Russian Federation. *Gazovaya promyshlennost'*. 2015. No S3 (728), pp. 96–99 (in Russ.).
6. Savel'ev G.S., Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Ovchinnikov A.V. ВИМ – Pioneer in the creation of tractors working on the gas. *Sistema tekhnologii i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovopolozhnika zemledel'cheskoy mekhaniki V.P. Goryachkina* [The system of technologies and vehicles for an innovative development of the agroindustrial complex of the Russian Federation: a collection of scientific reports of the International scientific and technical conference dedicated to the 145th anniversary of the birth of the founder of agricultural mechanics V. Goryachkin]. Moscow: RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva Publ., 2013, pp. 164–168 (in Russ.).

## THE AUTOMOBILE AND TRACTOR DIESEL ENGINE, ADAPTED TO WORK ON THE LIQUEFIED HYDROCARBON GAS ON THE GAS-DIESEL PROCESS

Academician of the Russian Academy of Sciences **A.Yu. Izmaylov**, Dr.Eng. **G.S. Savel'ev**,  
Ph.D. **M.N. Kochetkov**, **E.V. Ovchinnikov**, **S.Yu. Uyutov**  
Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM, Moscow, Russia  
evo-xpro-info@yandex.ru

*The investigations were carried out on the brake bench equipment of the D-243 diesel engine manufactured by the Minsk motor plant. The system of distributed supply of the liquefied hydrocarbon gas with an ignition charge of diesel fuel by automatically changing the gas injection angle and incorporating into the exhaust gas recirculation system into the intake manifold was subjected to the tests. Adaptation of the diesel engine allows the feed system to work as in diesel mode and as well in gas-diesel mode, with the electronic control of diesel fuel supply in the «diesel» mode is more accurate and contributes to lower fuel consumption and more complete combustion of the diesel fuel into the exhaust manifold. Standard equipment which is widely used for the transfer gasoline engines with ignition from a spark plug, used for distributed supply of the liquefied hydrocarbon gas. The electronic control unit of domestic production was adjusted according to the methodology for controlling the supply of gas through the cylinders developed in the laboratory. The investigations have shown that the emission of pollutants into the atmosphere has decreased on all loading modes of the engine on the gas-diesel process and corresponds to the standard «Euro 4». Due to half of the cost of liquefied hydrocarbon gas compared to the diesel fuel, the cost of using the latter is reduced by 20...25 %. The usage of liquefied hydrocarbon gas in the gas-diesel engines ensures a reduction in the cost of production of agricultural products by 10...12 %. These indicators confirm the relevance of scientific researches on the development of a system for adapting the diesel automobile and tractor engine to work on alternative types of fuel.*

**Keywords:** diesel engine, gas engine fuel, economic efficiency, fuel consumption.