

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-123187>

Оригинальное исследование



Применение сжиженного углеводородного газа в качестве топлива в тракторных дизельных двигателях

С.Ю. Уютов, З.А. Годжаев

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование сжиженного углеводородного газа (СУГ) в качестве альтернативного топлива помогает устранить ряд недостатков, связанных с составом газозооной смеси. Первоочередной задачей является разработка средств и методов снижения загрязнения окружающей среды, а именно направленных исследований в области альтернативного топлива с минимальными вредными выбросами в окружающую среду, увеличение доступности данной технологии путем снижения стоимости адаптации топливной аппаратуры дизельного двигателя.

Цель. Основной целью данных исследований является обоснование параметров дизельного двигателя, работающего по газодизельному процессу с воспламенением от запальной дозы.

Методы и средства. Проведены исследования на тормозном стендовом оборудовании дизельного двигателя ММЗ Д-243. Испытаниям подвергли систему распределенной подачи СУГ с запальной дозой дизельного топлива путем автоматического изменения угла подачи газа и включением в систему рециркуляции отработавших газов во впускной коллектор. Адаптация дизельного двигателя на СУГ позволяет работать системе питания как в дизельном, так и в газодизельном режимах, при этом электронное регулирование подачи дизельного топлива в режиме «дизель» происходит более точно и способствует снижению расхода и догоранию дизельного топлива в выпускном коллекторе. Оборудование для распределенной подачи СУГ применяется стандартное, широко используемое для перевода бензиновых двигателей с воспламенением от искры. Взят электронный блок управления отечественного производства и настроен согласно разработанной методике управления подачей газа по цилиндрам в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Результаты. Исследования показали, что выброс загрязняющих веществ в атмосферу снизился на всех режимах работы двигателя в газодизельном режиме и соответствует евро-стандарту «Евро 5». За счет в 2,5 раза меньшей цены СУГ по сравнению с дизельным топливом затраты использования СУГ в качестве замещения дизельного топлива в режиме «газодизель» снижаются на 25–30% от себестоимости сельскохозяйственных культур. Использование СУГ в газодизельных двигателях обеспечивает снижение себестоимости сельскохозяйственной продукции на 15–18%.

Заключение. Данные показатели подтверждают актуальность научных исследований в создании системы адаптации дизельного двигателя. Газодизельная система питания двигателя – основной эффективный способ снижения расходов на дизельное топливо.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ; адаптация на СУГ; детонационная работа газодизельного двигателя; пропан-бутан в режиме газодизель; улучшенные экологические показатели.

Для цитирования:

Уютов С. Ю., Годжаев З.А. Применение сжиженного углеводородного газа в качестве топлива в тракторных дизельных двигателях // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 6. С. 387–393. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-123187>

Рукопись получена: 29.08.2022

Рукопись одобрена: 15.11.2022

Опубликована: 15.12.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-123187>

Original Study Article

The use of liquefied petroleum gas as fuel in tractor diesel engines

Sergey Yu. Uyutov, Zakhid A. Godzhaev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The use of liquefied petroleum gas (LPG) as alternative helps to eliminate a number of drawbacks related to fuel-air ratio. The high-priority problem is development of means and methods of reduction of environment pollution, specifically targeted researches in the field of alternative fuel with minimal harmful emissions into the environment, increase of availability of this technology by means of reducing the costs of adaptation of the fuel injection system of a diesel engine.

AIMS: The main aim of the study is justification of parameters of the diesel engine operating according to gas-diesel cycle with the spark dose ignition.

METHODS: The studies were carried out at the brake bench equipment of the MMZ D-243 diesel engine. The distributed liquefied petroleum gas (LPG) supply system with an ignition dose of diesel fuel was tested with automatic change of the gas supply angle and including exhaust gases in the intake manifold in the recycling system. Adaptation of the diesel engine to LPG allows the fuel injection system to operate in both diesel and gas-diesel mode, while the electronic regulation of the diesel fuel supply in the "diesel" mode occurs more accurately and helps to reduce the consumption and final combustion of diesel fuel in the exhaust manifold. The standard equipment for distributed LPG supply widely used for transferring gasoline engines with spark ignition is applied. The chosen domestically made electronic control unit was configured according to the methodology for controlling the gas supply in the cylinders developed in Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

RESULTS: The studies showed that the emission of pollutants into the atmosphere decreased in all operation modes of the engine in the gas-diesel mode and complies with the Euro-5 standard. Due to the 2,5 times lower price of LPG compared to diesel fuel, the cost of using LPG as a replacement for diesel fuel in the "gas diesel" mode is reduced by 25–30% of the cost of agricultural crops. The use of LPG in gas-diesel engines reduces the cost of agricultural products by 15–18%.

CONCLUSIONS: These indicators confirm the relevance of scientific research in the development of the diesel engine adaptation system. The gas-diesel fuel injection system of the engine is the main effective way to reduce diesel fuel costs.

Keywords: *liquefied petroleum gas; adaptation to LPG; detonating operation of the gas-diesel engine; propane-butane in the gas-diesel mode; improved environmental indicators.*

Cite as:

Uyutov SYu, Godzhaev ZA. The use of liquefied petroleum gas as fuel in tractor diesel engines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6): 387–393. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-123187>

Received: 29.08.2022

Accepted: 15.11.2022

Published: 15.12.2022

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 90-х годов 20 века количество загрязняющих веществ, попадающих в окружающую среду от дизельных двигателей, неумолимо растет. Загрязняются почвенные покровы, атмосфера, гидросфера, происходит аккумуляция загрязняющих элементов в биосфере. Научные разработки во многом способствуют снижению степени загрязнения окружающей среды. Использование сжиженного углеводородного газа (СУГ) 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 направленных исследований в области альтернативного топлива с минимальными вредными выбросами в окружающую среду, увеличение доступности данной технологии путем снижения стоимости адаптации топливной аппаратуры дизельного двигателя.

СУГ – это пропан-бутановая смесь, данную смесь направляют 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. Как моторное топливо – чистый бутан (C_4H_{10}), но он переходит в жидкое состояние уже при $0,5\text{ }^{\circ}C$ при атмосферном давлении. Поэтому к нему добавляют пропан (C_3H_8) с температурой кипения – $43\text{ }^{\circ}C$. Соотношение этих газов в смеси задает нижний температурный предел применения топлива, которое по этой же самой причине бывает «летним» и «зимним».

Система распределенного впрыска газодизельного двигателя 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].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью данных исследований является обоснование параметров дизельного двигателя, работающего по газодизельному процессу с воспламенением от запальной дозы, замещающей дизельное топливо, а также определение состава загрязняющих выбросов в отработавших газах.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Замещающим дизельное топливо является СУГ. Определение состава загрязняющих выбросов в отработавших газах. Испытания проводились на всех режимах работы двигателя, включая режим максимального

крутящего момента. Режим максимального крутящего момента является самым важным, так как при данной работе двигателя, расход топлива максимальный, но обороты при этом низкие, для полного сгорания топлива. Соответственно, применение СУГ в газодизельном режиме дает возможность более полного догорания топливно-воздушной смеси, что улучшает экологические показатели на выпуске отработавших газов.

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 регулирует подачу дизельного топлива аналогичную с работой всережимного центробежного регулятора топливного насоса высокого давления (ТНВД).

На рис. 1 показана принципиальная система адаптации дизельного двигателя к работе на двухтопливном режиме [2].

Создание дизеля, работающего на смешанном топливе. Его большим плюсом является тот факт, что не приходится кардинально перерабатывать топливную систему двигателя, да и возвращение к первоначальной схеме работы также возможно. Кроме этого, по израсходованию всего запаса газа такой силовой агрегат автоматически переводится на дизельное топливо и начинает работать в классическом режиме [3].

Наилучшие экономические показатели достигаются при использовании в виде второго топлива СУГ (пропан). Максимальный процент замещения при использовании пропана составляет 85%, средний процент замещения – 75% [4]. Высокий процент замещения и высокая эффективность работы достигаются за счет использования комбинированной технологии.

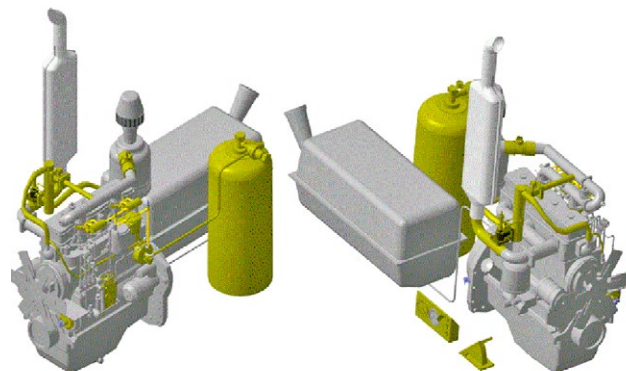


Рис. 1. Система адаптации дизельного двигателя (элементы выделены зеленым).

Fig. 1. The diesel engine adaptation system (the elements are marked green).

Расход газа и дизельного топлива, а также процентное замещение представлены в табл. 1. В комплексе с системой подачи газа также принимает участие система рециркуляции выпускных газов, обеспечивающая автоматически регулируемый перепуск из выпускного коллектора во впускной коллектор отработавших газов. Данная система позволяет избежать появления детонационного сгорания газозвушной смеси от воспламенения запальной дозы дизельного топлива при высоких и номинальных нагрузках двигателя [5].

На рис. 2 показаны кривые изменения оборотов двигателя от нагрузки, а также изменение топливopодачи дизельного топлива и газа как отдельно, так и на общей кривой расхода топлива. Благодаря оригинальному алгоритму программного обеспечения в каждый момент времени работы двигателя происходит мониторинг нагрузки оборотов двигателя и данных, поступающих с 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, ограничивающий подачу дизельного топлива. Таким образом поддерживается оптимальный топливный баланс, что в разы увеличивает эффективность работы

системы 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 газозвушной смеси должен быть больше для получения необходимого давления отработанных 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, что уменьшает 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 системы охлаждения, системы впуска, системы выпуска для обеспечения

Таблица 1. Параметры подачи газа, обеспечивающие бездетонационную работу двигателя

Table 1. The gas supply parameters ensuring nondetonating operation of the engine

Частота вращения, мин ⁻¹	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	22	29	70	100
1600–1800	0–50	22	30	80	50
	Более 50	23	31	90	100
1800–2000	0–70	23	32	110	80
	Более 70	24	32	130	100
1800–2200	0–85	24	32	140	100
	Более 85	24	32	180	100
2200–2400	0–85	24	32	110	100
	Более 85	25	32	180	100
1100–1600	$M_{кр\ max.}$	25	32	180	100

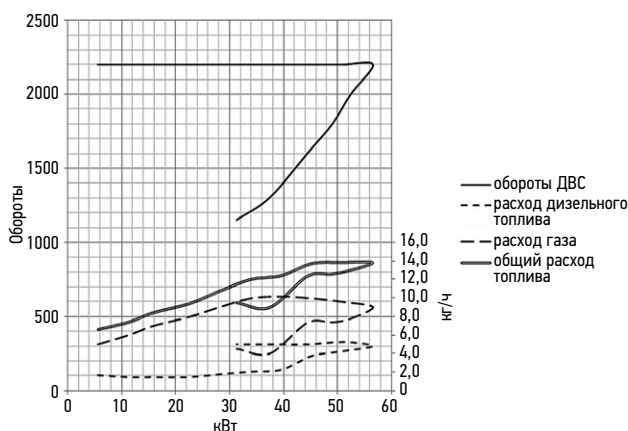


Рис. 2. Расход топлива от нагрузки.
Fig. 2. The fuel consumption depending on loading.

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 режимах корректорной ветви регулятора система рециркуляции обеспечивает перепуск до 50% отработавших газов во впускной коллектор, что обеспечивает увеличение порога возникновения детонации в цилиндре двигателя [6].

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 [7].

По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств при уровне замещения 50% дизельного топлива газовым достигается падение вредных выбросов в 3 раза. Соответственно, в нашем случае замещение происходит до 70% и вредные выбросы становятся меньше в 4 раза, чем базовые. На рис. 3 показаны соотношения вредных выбросов в окружающую среду как базового дизельного двигателя ММЗ Д243, так и его же вариантас системой адаптации к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу.

При проведении исследований двигателя в целях определения токсичности отработавших газов комплектация соответствовала условиям определения номинальной мощности по ГОСТ 18509-88. Режимы работы дизеля определяли согласно ГОСТ Р 41.96-2005 и правилам ЕЭК

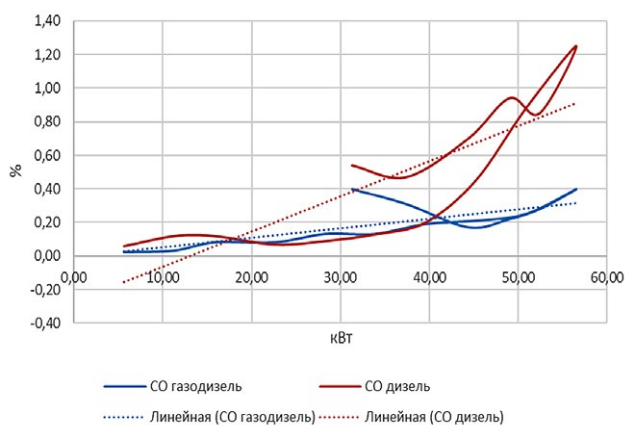


Рис. 3. Соотношение выбросов углекислого газа CO₂.
Fig. 3. The carbon dioxide emissions ratio.

ООН № 49 по процедуре ESC. Погрешности измерений газоаналитического оборудования: абсолютная погрешность ± 0,5%; относительная погрешность ± 5%.

Необходимо отметить, что использование регулируемой рециркуляции отработавших газов позволяет исключить детонационную работу дизеля на сжиженном углеводородном газе и снизить выброс вредных веществ в окружающую среду. С использованием сжиженного углеводородного газа по предлагаемой технологии общий выброс CO, оксидов азота и углеводородов (CH) снизился на 40...62%.

ВЫВОДЫ

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

СУГ обладает коммерческими и экологическими преимуществами по сравнению с другими альтернативными топливами, что обеспечило в последнее десятилетие значительное расширение его использования в качестве моторного топлива в различных странах благодаря низкой себестоимости на переоборудование и использование.

Полученные результаты являются подтверждением рациональности использования сжиженного углеводородного газа в качестве неполного замещения дизельного топлива: газ – 70% и дизель – 30%. Двухтопливная система питания двигателя, переключения с газодизеля на дизель, обеспечивает бесперебойную работу трактора, в отличие от аналогов, которые не способны обеспечить работу трактора при выработке газа в баллонах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. С.Ю. Уютов — обработка полученных исследовательских данных, написание и редактирование текста рукописи, создание изображений; З.А. Годжаев — экспертная оценка, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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. Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Родионов А.В., и др. Способы устранения детонации при работе дизеля на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // *Будущее машиностроения России: сборник докладов Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием)*, 25–28 сентября. Москва, 2017. С. 283–286.
3. Патент РФ на изобретение № RU 2617017 C1 / Заявка № 2015151499, 2015.12.02. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., и др. Система питания газодизеля. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2617017C1_20170419 Дата обращения: 15.12.2022.
4. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Овчинников А.В. ВИМ — пионер в создании тракторов, работающих

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.Yu. Uytov — processing of received research data, writing and editing the text of the manuscript, creating images; Z.A. Godzhaev — expert opinion, editing the text of the manuscript, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

- 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, 17–18 сентября. Т. 2. Москва, 2013. С. 164–168.
5. Савельев Г.С., Годжаев З.А., Кочетков М.Н., и др. Комплексный подход к использованию газомоторного топлива в агропромышленном комплексе РФ // *Газовая промышленность*. 2015. № S3. С. 96–99.
6. Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Родионов А.В., и др. Экономическая эффективность использования сжиженного углеводородного газа в качестве топлива в сельскохозяйственной автотракторной технике // *Будущее машиностроения России: сборник докладов Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием)*, 25–28 сентября. Москва, 2017. С. 281–282.

REFERENCES

1. Savelyev GS, Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, Uytov SYu. Determination of an economically feasible type of gas engine fuel for mobile agricultural machinery. *Agrapanorama*. 2016;(3):26–29. (In Russ).
2. Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, Rodionov AV, et al. Ways to eliminate detonation when a diesel engine is running on liquefied petroleum gas using a gas-diesel process. In: *The Future of Machine Building in Russia: Collection of reports of the Tenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation)*, September 25–28. Moscow; 2017. P. 283–286. (In Russ).
3. Patent RUS No. RU 2617017 C1 / Application No. 2015151499, 2015.12.02. Savelyev GS, Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, et al. Gas diesel power system. (In Russ). Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2617017C1_20170419 Accessed: 15.12.2022.
4. Saveliev GS, Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, Ovchinnikov AV. VIM — pioneer in the creation of tractors running on gas. In: *System of technologies and machines for innovative development of the agro-industrial complex of Russia: 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.P. Goryachkin, September 17–18. Vol. 2. Moscow; 2013. P. 164–168. (In Russ).*
5. Saveliev GS, Gojaev ZA, Kochetkov MN, et al. An integrated approach to the use of gas engine fuel in the agro-industrial complex of the Russian Federation. *Gas industry*. 2015;(S3):96–99. (In Russ).

6. Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, Rodionov AV, et al. Economic efficiency of using liquefied petroleum gas as fuel in agricultural automotive machinery. In: The Future of Machine Building in

Russia: Collection of reports of the Tenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation), September 25–28. Moscow; 2017. P. 281–282. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Уютов Сергей Юрьевич,**

младший научный сотрудник лаборатории
«Автоматизированного привода сельскохозяйственной
техники»;
адрес: Российская Федерация, 109428, Москва,
1-й Институтский проезд, д. 5;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>;
eLibrary SPIN: 7350-1489;
e-mail: s_ujutov@mail.ru

Годжаев Захид Адыгезалович,

член-корреспондент РАН, профессор, д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, заведующий отделом
мобильных энергетических средств;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

***Sergey Yu. Ujutov,**

Junior Research Scientist of the Automated Drivetrain
of the Agricultural Machinery Laboratory;
address: 5 1st Institutsky passage, 109428 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>;
eLibrary SPIN: 7350-1489;
e-mail: s_ujutov@mail.ru

Zakhid A. Godzhaev,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Professor, Dr. Sci. (Tech.),
Chief Research Scientist, Head of the Mobile Energy Facilities
Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

*Corresponding author