

Разработка способов адаптации газодизельных двигателей сельскохозяйственных тракторов к работе на СУГ

З.А. Годжаев, С.Ю. Уютов, Е.В. Овчинников

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящей статье изложены способы организации без детонационного сгорания сжиженных углеводородных газов (пропан-бутановых смесей) (СУГ) в цилиндре газодизельного двигателя с запальной дозой не более 25% на режимах максимальной мощности. Добавление части отработавших газов и воды в парообразном состоянии в топливную смесь при использовании катализатора на основе никеля в камере сгорания газодизельного двигателя, который запускает реакцию конверсии низших алканов, обеспечивает надёжное бездетонационное сгорание топливного заряда.

Цель работы — проведение анализа исследований по окислительной конверсии низших алканов в присутствии никелевых катализаторов с разработкой технических решений по исключению детонации на всех эксплуатационных режимах, а также исследования по повышению надёжности системы, оптимизации подачи дизельного и газообразного топлива для улучшения топливной экономичности и снижения вредных выбросов с отработавшими газами при адаптации дизельного двигателя в газодизель.

Материалы и методы. Никелевый катализатор, который является переносчиком кислорода, что обеспечивает цикличность реакций около его поверхности в камере сгорания газодизельного двигателя: окисление металла при продувке камеры сгорания; конверсию алканов на тактах сжатия и сгорания. Проблема науглероживания катализатора решается выжиганием отложений при сгорании топливного заряда.

Результаты. Организация топливной парогазовоздушной смеси с последующим сгоранием в присутствии катализатора обеспечивает бездетонационное сгорание сжиженных углеводородных газов, улучшенные экологические, топливно-экономические характеристики газодизельного двигателя во всем диапазоне эксплуатационных режимов и повышает его надёжность.

Заключение. Применение предлагаемой системы в дизелях, используемых в тракторах для выполнения сельскохозяйственных технологических операций, позволяет снижать затраты на топливо более чем на 38%.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ; пропан-бутановая смесь; конверсия низших алканов; газомоторное топливо; система питания.

Как цитировать:

Годжаев З.А., Уютов С.Ю., Овчинников Е.В. Разработка способов адаптации газодизельных двигателей сельскохозяйственных тракторов к работе на СУГ // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 2. С. **x–y**. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624202>

Development of methods of adaptation of gas-diesel engines of agricultural tractors to operation using LPG

Zakhid A. Godzhaev, Sergey Yu. Uyutov, Evgeny V. Ovchinnikov

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation***ABSTRACT**

BACKGROUND: The methods of ensuring detonation-free combustion of liquefied petroleum gases (propane-butane mixtures) (LPG) in a cylinder of the gas-diesel engine with an ignition dose of no more than 25%, at maximal power modes are covered in this paper. Addition of a part of the exhaust gases and vaporous water to the fuel mixture, when using a nickel-based catalyst in the combustion chamber of the gas-diesel engine, which triggers the conversion reaction of lower alkanes, ensures reliable detonation-free combustion of the fuel charge.

AIM: Conducting the analysis of studies on the oxidative conversion of lower alkanes in the presence of nickel catalysts with the development of technical solutions to eliminate detonation in all operating modes. Conducting the research to improve system reliability, to optimize the supply of diesel and gaseous fuel for fuel efficiency improvement and reduction of harmful emissions from exhaust gases when turning the diesel engine into the gas-diesel engine.

METHODS: A nickel catalyst, which is an oxygen carrier, ensures cyclical reactions near its surface in the combustion chamber of the gas-diesel engine, which are metal oxidation when purging the combustion chamber and conversion of alkanes during the compression and combustion strokes. The problem of catalyst carburization is solved by burning off deposits during combustion of the fuel charge.

RESULTS: The preparation of a fuel steam-gas-air mixture with subsequent combustion in the presence of a catalyst ensures improved environmental, fuel consumption characteristics of the gas-diesel engine over the entire range of operating conditions and increases its reliability without detonation combustion of liquefied petroleum gases.

CONCLUSION: The use of the proposed system in diesel engines used in tractors aimed to agricultural technological operations helps to reduce fuel costs by more than 38%.

Keywords: liquefied petroleum gas; propane-butane mixture; conversion of lower alkanes; gas engine fuel; supply system.

TO CITE THIS ARTICLE:

Godzhaev ZA, Uyutov SYu, Ovchinnikov EV. Development of methods of adaptation of gas-diesel engines of agricultural tractors to operation using LPG. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;181(2):x-y. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624202>

Введение

При существующих в сельском хозяйстве затратах на топливо до 25% от себестоимости сельскохозяйственных культур использование сжиженных углеводородных газов (пропан-бутановых смесей) (СУГ) в газодизельных двигателях обеспечит снижение себестоимости сельскохозяйственной продукции на 12%, что связано с более низкой ценой (в 2,5 раза) СУГ по сравнению с дизельным топливом.

Адаптация тракторной техники к работе на газомоторном топливе производится по следующим вариантам: дизельные двигатели тракторов адаптируются для работы по газодизельному циклу, бензиновые — по газовому циклу с искровым зажиганием [1]. Тракторы, выполняющие транспортные работы и работы по обслуживанию животноводческих ферм, могут адаптироваться в монотопливные с зажиганием от искры.

Применение СУГ в тракторной технике по газодизельному процессу сдерживается появлением детонации в цилиндропоршневой группе на режимах более 80% мощности с возможным последующим разрушением двигателя. На настоящий момент известны разработанные образцы газодизельных двигателей, работающих на сжиженном углеводородном газе, с запальной дозой 45–70% при бездетонационном сгорании газозоудушной смеси [2].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ длительное время проводились исследования по переводу сельскохозяйственной техники на газомоторное топливо, были разработаны и изготовлены опытные образцы тракторов, работающих на компримированном и сжиженном природном газе: газодизельные модификации сельскохозяйственных тракторов К-701, К-700А, Т-150К, ДТ-75, МТЗ-82, ЮМЗ-6, ЛТЗ-55 и газоискровые двигатели дизелей ММЗ-243; RABA-MAN-2156; RABA D-10; КамАЗ-740.10 и 740.15. (14 образцов). В том числе разработана система питания газодизельного двигателя для работы на сжиженных углеводородных газах с запальной дозой 15–25% на различных режимах с исключением появления детонации.

Задачей является исключение детонации при работе двигателя на всех эксплуатационных режимах в газодизельном режиме, повышение надёжности системы, оптимизация подачи дизельного и газообразного топлива, улучшение топливной экономичности, снижение вредных веществ, выделяемых с отработавшими газами, при помощи электронного управления подачей топлив и изменении скоростного и нагрузочного режимов работы газодизельного двигателя, организации газопарозоудушной топливной смеси, обеспечение сгорания в присутствии катализатора.

Для реализации решения перевода на газовое топливо дизельных двигателей разработана микропроцессорная система управления газодизельным двигателем, предназначенная для управления впрыском запальной дозы дизельного топлива, подачей газомоторного топлива и автоматического регулирования частоты вращения. Система обеспечивает устойчивую работу двигателя, исключая детонационное сгорание СУГ от запальной дозы дизельного топлива во всем диапазоне частот вращения, нагрузок, с коэффициентом избытка воздуха до 1,8.

Обеспечение бездетонационного сгорания достигается за счёт интегрированных в систему питания и систему выпуска отработавших газов дизельного двигателя следующих технических средств:

- электронной системы управления;
- системы подачи запальной дозы;
- системы подачи газа;
- системы подачи воды / пара во впускной коллектор;
- системы рециркуляции отработавших газов;
- системы подготовки рабочей смеси.

Система подачи газа реализована из существующего газобаллонного оборудования и обеспечивает дозированную подачу газа непосредственно перед впускным клапаном.

Воспламенение газозоудушной смеси в цилиндре происходит от запальной дозы. Система подачи запальной дозы реализована с доработкой штатной системы подачи дизельного топлива, с ограничением подачи и обеспечивает подачу запальной дозы дизельного топлива в

диапазоне 15–25% от цикловой подачи в зависимости от режима работы двигателя [3].

Сгорание СУГ в цилиндре в газодизельном режиме работы двигателя на 80% от максимальной мощности и на корректорной ветви сопровождается появлением детонации. Использование системы рециркуляции отработавших газов позволяет повысить уровень появления детонации и обеспечить бездетонационное сгорание СУГ на 90% от максимальной мощности, при запальной дозе 25%. Перепуск 50% отработавших газов на режимах до 95% мощности исключает детонацию при запальной дозе дизельного топлива 30%, дальнейшее увеличение мощности до номинальной приводит к существенному увеличению запальной дозы.

С целью снижения запальной дозы дизельного топлива до 25% разработана система впрыска воды, встроенная в систему рециркуляции отработавших газов во впускной коллектор, которая обеспечивает испарение распылённой через форсунку воды за счёт высокой температуры отработавших газов и всасывается двигателем во впускной коллектор.

При использовании водных паров в рабочей смеси в объёме 2% на цикл, на номинальных режимах работы двигателя снижается теплонапряжённость цилиндропоршневой группы и скорость распространения пламени от горения СУГ, что позволяет исключить детонацию на режимах номинальной мощности, а также на корректорной ветви. Вода впрыскивается в поток горячих отработавших газов в системе рециркуляции, температура которых составляет 200–800 °С, где испаряется, и далее в состоянии пара с отработавшими газами поступает во впускной коллектор. Во впускном коллекторе происходит подготовка парогазовоздушной смеси перед впускным клапаном. СУГ подаётся через электромагнитные форсунки в смесительную рампу непосредственно перед впускным клапаном, где обеспечивается предварительное смешивание парогазовоздушного заряда, который через впускной клапан попадает в камеру сгорания, выполненную из никелевой жаропрочной стали (рис. 1).

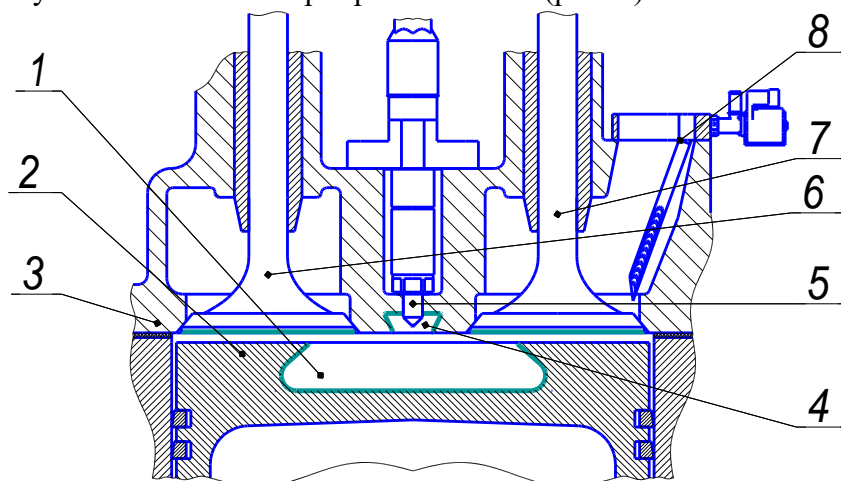


Рис. 1. Разрез поршневого газодизельного двигателя: 1 — камера сгорания; 2 — поршень; 3 — головка цилиндра; 4 — накопительная камера; 5 — распылитель форсунки; 6 — выпускной клапан; 7 — впускной клапан; 8 — смесительная рампа.

Fig. 1. Section of a piston gas-diesel engine: 1 — a combustion chamber; 2 — a piston; 3 — a cylinder head; 4 — a plenum chamber; 5 — a spray nozzle; 6 — an exhaust valve; 7 — an intake valve; 8 — a mixing ramp.

Газодизельный двигатель имеет камеру сгорания 1, ограниченную поршнем 2 и головкой цилиндра 3, накопительную камеру 4, объединённую с камерой сгорания 1. В накопительной камере 4, изготовленной из никелевой жаропрочной стали, установлен распылитель форсунки 5. Газообмен двигателя осуществляется через выпускной клапан 6 и впускной клапан 7. Подготовка парогазовоздушной смеси осуществляется в смесительной рампе 8.

Цель исследований — проведение анализа исследований по окислительной конверсии низших алканов в присутствии никелевых катализаторов с разработкой технических решений по исключению детонации на всех эксплуатационных режимах, а также исследования по повышению надёжности системы, оптимизации подачи дизельного и газообразного топлива для улучшения топливной экономичности и снижения вредных выбросов с отработавшими газами

при адаптации дизельного двигателя в газодизель.

Материал и методы

Экспериментальные исследования по определению мощностных, топливно-экономических и экологических характеристик двигателя проводились в стендовых условиях на лабораторной базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ с использованием электрических тормозных стендов GPF-17-b, топливного расходомера фирмы AVL, экологические показатели определялись при помощи газоаналитического оборудования MultiGaz (Италия) и МЕТА (Россия).

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 ООН № 49, по процедуре ESC. Погрешности измерений газоаналитического оборудования составляли: абсолютная погрешность — $\pm 0,5\%$; относительная погрешность — $\pm 5\%$. [4]

Для испытаний был использован дизельный двигатель ММЗ Д-243 с доработанной системой управления подачей дизельного топлива, которая обеспечивала устойчивую работу двигателя на двух режимах работы: дизель и газодизель с фиксированной установкой запальной дозы.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводили на пилотной установке, представленной на рис. 2.

В данной установке основные элементы камеры сгорания производятся из легированных никелем жаропрочных сплавов, таких как АК12М2МгН и др. В свою очередь никель является катализатором реакции комбинированной конверсии [5, 6]. Дополнительно на огневую поверхность камеры сгорания, тарелки клапанов, поршень, накопительную камеру наносится слой никелевого катализатора поверхностным никелированием. Способ нанесения никелевого покрытия на алюминий и его сплавы основан на обезжиривании органическим растворителем, травлении, промывке в горячей проточной воде, промывке в холодной проточной воде, осветлении, промывке в холодной проточной воде, электрохимическом нанесении никелевого покрытия, промывке в горячей проточной воде, промывке в холодной проточной воде, сушке, позволяющей не повредить детали цилиндра-поршневой системы, применяя сплавы указанные ранее [7].

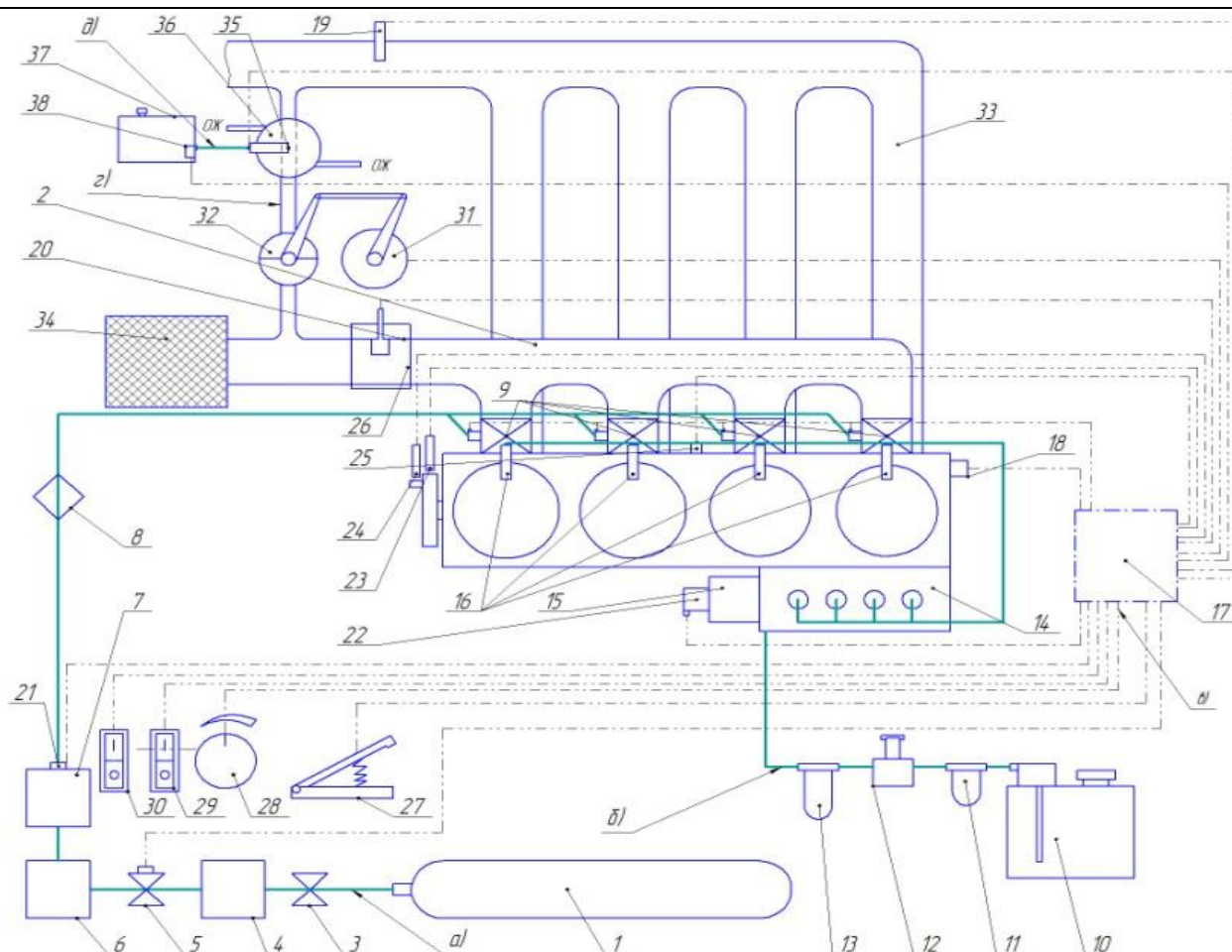


Рис. 2. Схема системы питания газодизельного двигателя Д-243: *a* — линия подачи газа, включающая: 1 — источник газового топлива; 2 — впускной коллектор двигателя; 3 — вентиль; 4 — заправочное устройство; 5 — запорный электромагнитный клапан; 6 — газовый фильтр; 7 — газовый редуктор; 8 — фильтр тонкой очистки газа; 9 — электромагнитные клапаны подачи газа; *b* — линия питания жидким топливом, включающая: 10 — топливный бак; 11 — фильтр грубой очистки топлива; 12 — топливоподкачивающий насос; 13 — фильтр тонкой очистки топлива; 14 — топливный насос высокого давления; 15 — исполнительное устройство топливного насоса высокого давления; 16 — форсунки; *c* — электронная система регулирования подачи и переключения топлив, включающая: 17 — блок управления; 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 — датчики; 27 — электронная педаль подачи топлива; 28 — ручной регулятор подачи топлива; 29, 30 — переключатели режимов; *d* — система перепуска отработавших газов, включающая: 31 — исполнительное устройство управления заслонкой; 32 — заслонка; 33 — выпускной коллектор; 34 — воздушный фильтр; *e* — система подачи воды в парообразном состоянии, включающая: 35 — форсунка; 36 — испаритель; 37 — водяной бак; 38 — насос.

Fig. 2. Diagram of the D-243 diesel engine supply system: *a* — the gas supply line, including: 1 — a gas fuel source; 2 — an engine intake manifold; 3 — a valve; 4 — a filling device; 5 — a shut-off solenoid valve; 6 — a gas filter; 7 — a gas pressure regulator; 8 — a gas fine filter; 9 — electromagnetic gas supply valves; *b* — the liquid fuel supply line, including: 10 — a fuel tank; 11 — a fuel coarse filter; 12 — a fuel pump; 13 — a fuel fine filter; 14 — a high-pressure fuel pump; 15 — a high-pressure fuel pump actuator; 16 — injectors; *c* — the electronic fuel supply and switching control system, including: 17 — a control unit; 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 — sensors; 27 — an electronic pedal of fuel supply; 28 — a manual fuel supply regulator; 29, 30 — mode switches; *d* — the exhaust gas bypass system, including: 31 — a damper control actuator; 32 — a damper; 33 — an exhaust manifold; 34 — an air filter; *e* — the vaporous water supply system, including: 35 — a nozzle; 36 — an evaporator; 37 — a water tank; 38 — a pump.

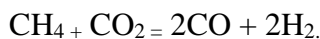
Рабочий процесс газодизельного двигателя организован следующим образом. На такте наполнения обеднённая парогазовоздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха до 1,8 предварительно смешивается в смесительной рампе 8 и поступает через впускной клапан 7 в цилиндр двигателя, при этом в накопительной камере 4 и камере сгорания 1 сохраняются остаточные газы температурой 200–600 °С, в составе которых по объёму содержится 7% углекислого газа, 6,5% кислорода, 13% водяного пара, при коэффициенте избытка воздуха 1,5 [8]. В

процессе сжатия в камеру зажигания, температура которой 200–400 °С, поступает газозвдушная смесь, температура и давление которой возрастает до 550 °С и 5,5 МПа к моменту впрыска запальной дозы в камеру зажигания. При наличии катализатора, перечисленные факторы запускают в камере зажигания реакцию комбинированной конверсии низших алканов (метан, этан, пропан, бутан) в водород и окись углерода [9].

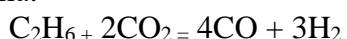
Углекислотная конверсия:



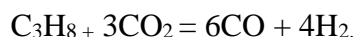
Для метана:



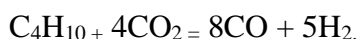
Для этана:



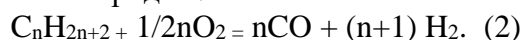
Для пропана:



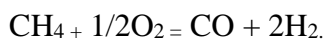
Для бутана:



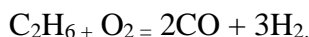
Парциальная конверсия кислородом:



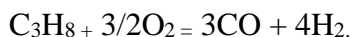
Для метана:



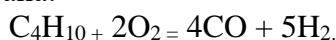
Для этана:



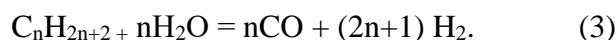
Для пропана:



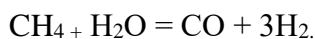
Для бутана:



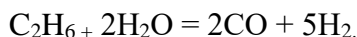
Паровая конверсия:



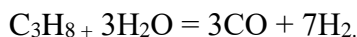
Для метана:



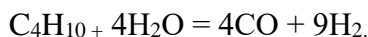
Для этана:



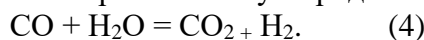
Для пропана:



Для бутана:



Параллельно идёт паровая конверсия окиси углерода и воды:



Водород за счёт своего минимального веса скапливается в накопительной камере 4. В камере сгорания сохраняются остаточные газы продуктов сгорания, в том числе окись углерода. Водород имеет очень широкие концентрационные пределы воспламенения по объёму в воздухе от 4,09 до 80%, как и окись углерода до 80%, в отличие от метана до 15,4%. Водород имеет более высокий коэффициент диффузии $0,66 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в отличие от метана $0,196 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Для воспламенения водорода необходимо меньше энергии приблизительно в 17 раз. Минимальная энергия воспламенения водорода 19 кДж, метана — 33 кДж [10]. Указанные характеристики позволяют воспламенить водород с минимальными затратами энергии. После самовоспламенения запальной дозы горящие дизельное топливо, водород, окись углерода распространяются широким фронтом в камере сгорания 1, зажигая основную парогазозвдушную смесь, обеспечивая устойчивую работу двигателя без детонации с высокой степенью сжатия во всём необходимом диапазоне частот вращения, нагрузок и при переходных режимах работы. При этом повышается надёжность, а также эффективные и экологические показатели двигателя.

Конфигурация и объём накопительной камеры 4 определяется с использованием математической модели и уточняется экспериментально для оптимизации рабочего процесса двигателя. При этом нет необходимости жёстко контролировать состав остаточных газов и концентрацию водородовоздушной смеси в накопительной камере 4. Объём накопительной камеры 4 составляет не более 5% камеры сгорания 1 и зависит от ряда параметров двигателя: конструкции, размерности, быстроходности двигателя.

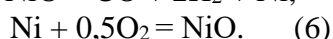
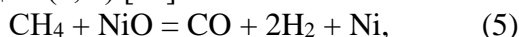
Следует отметить, что реакции паровой и углекислотной конверсии сильно эндотермические, что снижает вероятность возникновения детонации при сгорании рабочего заряда в камере сгорания, окисление кислородом протекает с выделением небольшого количества тепла. Температура начала окисления метана CH_4 , этана C_2H_6 и пропана C_3H_8 соответственно 370, 252 и 180 °С, т. е. с увеличением молекулярной массы углеводорода повышается его реакционная способность, при этом конверсия на никелевых катализаторах пропана до 95% достигается при температурах на 70–100 °С ниже, чем 75% конверсия метана [11].

В практическом осуществлении всех методов конверсии низших алканов связаны со значительным тепловым эффектом, что является проблемой при использовании в промышленности, тогда как в газодизельном двигателе данный процесс повышает КПД двигателя до 2%.

При выборе катализаторов и оптимизации условий совместной конверсии низших углеводородов особенно важно учитывать стабильность катализатора, так как с переходом к гомологам метана появляется вероятность крекинга алкана и науглероживания катализатора увеличивается [12].

Выбор никеля в качестве основного катализатора камеры сгорания обусловлен рядом факторов: ковкий и пластичный металл; высокая температура плавления 1455 °С; на поверхности присутствует тонкая плёнка оксида никеля NiO ; при нагревании до температуры свыше 800 °С металлический никель реагирует с кислородом с образованием оксида NiO ; наличие его в стали повышает химическую стойкость сплава; сплавы никеля характеризуются высокой вязкостью и обладают низким коэффициентом термического расширения; высокая коррозионная стойкость никелевых покрытий; дисперсный никель используется как катализатор самых разных химических реакций [13].

В промышленности одним из основных катализаторов конверсии низших алканов является никель. При этом никелевый катализатор является переносчиком кислорода и работает в циклическом режиме: после стадии получения синтез-газа восстановленный катализатор окисляется воздухом (реакции (5), (6) [14]:

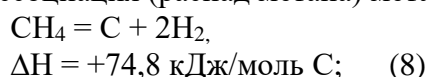


Суммарный тепловой эффект реакций (5) и (6) будет равен количеству тепла, выделяющегося при паровой конверсии (36 кДж/моль).

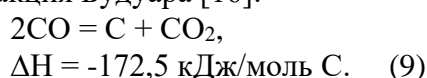
Очень важна проблема дезактивации катализаторов. Потеря каталитической активности обусловлена чаще всего спеканием активных компонентов и зауглероживанием катализатора. Образовавшийся углерод представляет собой нанотрубки, рост которых блокирует активные центры и разрушает гранулы катализатора [15].

Возможны два пути образования кокса при использовании никелевых катализаторов при разложении метана [16]:

- диссоциация (распад метана) метана:



- реакция Будуара [16]:



Первая из них эндотермическая, вторая — экзотермическая. Обе реакции могут быть представлены как стадии суммарной реакции (1). Однако в реальности они протекают при разных температурах: реакция (8) — преимущественно при высоких температурах, реакция (9)

— при низких температурах, и в реальных условиях кокс почти всегда образуется. Согласно термодинамическим соображениям, суммарное углеотложение должно снижаться с повышением температуры и основное количество углерода образуется по реакции (8).

Предотвратить отложение углерода в камере сгорания можно, увеличив долю окислителя в смеси (кислорода O_2 , воды H_2O или диоксида углерода CO_2), что может быть достигнуто обеднением рабочей смеси и увеличением содержания пара. В том числе, твёрдые растворы оксида никеля NiO , нанесённые на металлические пены, активны при паровой конверсии при высокой объёмной скорости газовой смеси метана и кислорода (до $19 \text{ л} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) [17]. Скорость накопления углерода на твёрдых растворах существенно ниже, чем в присутствии порошкообразных оксидов никеля без носителя. Характер взаимодействия активного компонента с носителем может быть изменён путём модифицирования последнего [18]. Способ приготовления носителя влияет на активность и стабильность никелевых катализаторов, что может обеспечить высокодисперсное состояние Ni , что способствует предотвращению зауглероживания катализатора в ходе реакции.

На разложение алканов влияет наличие в реакционной смеси паров воды, присутствие которой существенно снижает отложения углерода.

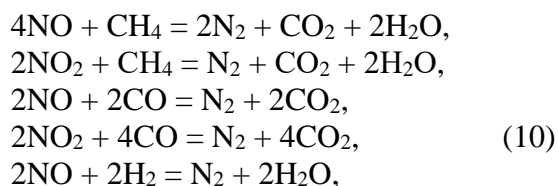
При использовании метан-этановой смеси не происходит заметного отложения углерода. Переработка смесей, содержащих пропан и бутан, сильно осложнена образованием углерода на стенках камеры, и в этом случае возможно протекание реакции по двухстадийной схеме: на первом этапе происходит окисление C_3H_8 и C_4H_{10} до CO_2 при температуре ниже $600 \text{ }^\circ\text{C}$, далее смесь $CH_4-C_2H_6-CO_2-O_2$ конвертируется на никелевом катализаторе, вблизи стенок камеры сгорания при более высоких температурах. Цикличность процесса в камере сгорания обеспечивает выполнение условий для двухстадийной схемы реакции: охлаждение до $395 \text{ }^\circ\text{C}$ на тактах выпуска-впуска с последующим нагревом на такте сжатия. При увеличении температуры в камере сгорания до $648 \text{ }^\circ\text{C}$ пропан-бутановой фракции степень конверсии может увеличиваться до 94% [19].

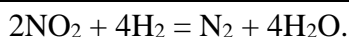
В углекислотной конверсии метана (1) при $700-800 \text{ }^\circ\text{C}$ на никелевых катализаторах достигается равновесная конверсия в синтез-газ $CO + H_2$. В этих условиях одновременно с реакцией (1) осуществляется взаимодействие монооксида углерода с водяным паром (4). Протекающие реакции (4) приводит к тому, что в равновесии (1) отношение $CO : H_2$ оказывается меньше 1, а конверсия CO_2 больше конверсии CH_4 . С повышением температуры выход водорода и CO возрастает, достигая предела вблизи $900 \text{ }^\circ\text{C}$. С ростом давления равновесная конверсия уменьшается [20].

Восстановление нитрозных газов в отработавших газах. Применение никелевого катализатора в камере сгорания повышает эффективность высокотемпературной очистки отработавших газов от оксидов азота [21].

Очистка отходящих газов от оксидов азота в камере сгорания протекает на завершающей стадии сгорания высокотемпературным каталитическим восстановлением. Процесс происходит при контакте нитрозных газов с газами восстановителями на поверхности катализаторов присутствующим в отработавших газах. Восстановителями являются метан, оксид углерода, водород и азотоводородная смесь. Эффективность обезвреживания оксидов азота зависит прежде всего от активности катализатора. Отходящие нитрозные газы нагреты выше температуры зажигания восстановителя ($450-480 \text{ }^\circ\text{C}$ — для метана, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ — для пропана и бутана, $150-200 \text{ }^\circ\text{C}$ — для водорода и оксида углерода) [22].

Суть протекающих восстановительных процессов выражается следующими реакциями [17]:





Восстановление нитрозных газов происходит в отработавших газах, выходящих из камеры сгорания возле слоя никелевого катализатора в камере сгорания. Все процессы восстановления оксидов азота экзотермичны, в процессе восстановления температура отработавших газов быстро возрастает до 700 °С и более.

Результаты исследований газодизельного двигателя. Согласно проведённому анализу и выполненным работам предлагаемая система работы двигателя на СУГ позволит улучшить заполняемость и равномерность заполняемости камеры сгорания газомоторным топливом, что приведёт к снижению появления детонации на номинальной мощности работы двигателя в газодизельном процессе, а также обеспечит стабильное горение СУГ в камере сгорания. Кроме того, достигается снижение теплонапряжённости двигателя при использовании впрыска воды в поток рециркуляционного газа. 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 ООН № 49, по процедуре ESC. Погрешности измерений газоаналитического оборудования составляли: абсолютная погрешность — ±0,5%; относительная погрешность — ±5% [23].

Необходимо отметить, что использование регулируемой рециркуляции отработавших газов позволяет исключить детонационную работу дизеля на СУГ и снизить выброс вредных веществ в окружающую среду благодаря дополнительному впрыску воды в поток рециркуляционного газа. С использованием СУГ по предлагаемой технологии, общий выброс CO, оксидов азота и углеводородов (CH) снизился на 27–40% (табл. 1).

При наличии катализатора в камере сгорания во время работы двигателя в газодизельном процессе протекает реакция комбинированной конверсии низших алканов (метан, этан, пропан, бутан) в водород и окись углерода, что позволяет контролировать процесс сгорания СУГ и не допустить появления детонации на режимах близких к номинальной мощности.

Таблица 1

Испытания газодизельного двигателя по процедуре ESC
Table 1. Tests of the gas-diesel engine according to the ESC procedure

Результаты испытаний по процедуре ESC, согласно ГОСТ Р 41.96-2005 и правилам ЕЭК ООН № 49 / Test results according to ESC procedure, according to GOST R 41.96-2005 and UNECE Regulation No. 49	Удельный расход загрязняющих веществ, г/(кВт·ч) / Specific consumption of pollutants, g/(kWh)		
	CO _{ср.}	CH _{ср.}	NO _{xср.}
Выбросы вредных веществ без использования катализатора / Emissions of harmful substances without the use of a catalyst	0,0382	0,6342	12,2751
Выбросы вредных веществ при использовании никелевого катализатора на поверхности камеры сгорания / Emissions of harmful substances when using a nickel catalyst on the surface of the combustion chamber	0,0363	0,4542	7,9708

Выводы

1. На основе использования электронного управления подачей топлив при изменении скоростного и нагрузочного режимов работы газодизельного двигателя сельскохозяйственных тракторов подготовки газопаровоздушной топливной смеси, в том числе сгорания в присутствии катализатора. Обеспечивает бездетонационное сгорание пропан-бутановых смесей на эксплуатационных режимах газодизеля при запальной дозе не более 25%.
2. Катализатор камеры сгорания на основе никеля, нанесённого на стенки камеры сгорания, позволяет обеспечить более эффективное сгорание топливного заряда, повышая при этом надёжность и эффективные показатели двигателя.
3. На завершающей стадии сгорания катализатор обеспечивает высокотемпературное каталитическое восстановление оксидов азота в камере сгорания, что обеспечивает

улучшенные экологические характеристики двигателя, количество выбросов вредных газов сокращается до 40% по сравнению с дизельным топливом.

4. Применение предлагаемой системы в дизелях, используемых в тракторах для выполнения сельскохозяйственных технологических операций, позволяет снижать затраты на топливо более чем на 38%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. З.А. Годжаев — руководство исследованием, концептуализация, методология, администрирование проекта; Е.В. Овчинников — формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация; С.Ю. Уютов — проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование. 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).

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. Z.A. Godzhaev — study management, conceptualization, methodology, project administration, E.V. Ovchinnikov — formal analysis, conducting the study, writing the draft of the manuscript, visualization, S.Y. Uyutov — conducting the study, writing the draft of the manuscript, writing and editing the final version of the manuscript. 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.

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

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashok B., Ashok S.D., Kumar C.R. LPG diesel dual fuel engine – A critical review // Alexandria Engineering Journal. 2015. Vol. 54, N 2. P. 105–126. doi: 10.1016/j.aej.2015.03.002
2. Фролов В.Н., Гаранин И.В. Экспериментальные исследования иницирования детонации и режимов работы модели камеры пульсирующего детонационного двигателя // Труды МАИ. 2010. № 38. EDN: MQPNWB
3. Мамаев А.В., Кисленко Н.Н., Снежко Д.Н. Автотранспорт на сжиженном углеводородном газе –перспективы развития // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2003. № 4(10). С. 6–12. EDN: JYGBX
4. 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. EDN: LAJKDN doi: 10.17816/0321-4443-123187
5. Третьякова С.Г., Растунова И.Л., Розенкевич М.Б. Исследование возможности использования реакции Сабатье как способа обращения потоков для изотопного обмена в системе углекислый газ – вода // Успехи в химии и химической технологии. 2008. Т. 22. С. 70–75. EDN: QZVPOX
6. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009.
7. Патент РФ 2259429 / 27.08.2005. Бюл. 24. Симунова С.С., Ершова Т.В. Электролит и способ никелирования изделий из алюминия и его сплавов. EDN: UKRGHA
8. Гайнуллин Ф.Г., Грищенко А.И., Васильев Ю.Н., Золотаревский Л.С. Природный газ как моторное топливо на транспорте. М.: Недра, 1986.
9. Федин К. Инновационная технология создания газовых поршневых двигателей с искровым

- зажиганием // Информационные ресурсы России. 2012. № 2. С. 11–15. EDN: OXASAJ
10. Патент РФ № 2700866 / 23.09.2019. Бюл. 27. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В. и др. Способ организации рабочего процесса газодизельного двигателя. EDN: ONZNAJ
 11. Усачев Н.Я., Харламов В.В., Беланова Е.П. и др. Окислительная переработка низших алканов: состояние и перспективы // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 4. С. 22–31. EDN: JTFEKR
 12. Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Российский химический журнал. 2000. Т. 44, № 1. С. 19–33.
 13. Patent Canada CA2811937C / 29.03.2012. Palmer M.R., Allam R.J., Fetvedt J.E. et al. Method of using carbon dioxide in recovery of formation deposits. Дата доступа: Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/25/2d/f5/09fe81942f06e3/CA2811937C.pdf>
 14. Асаченко Е.В., Родина О.В. Особенности дезактивации кислотных Zn – содержащих катализаторов ароматизации пропана // Нефтехимия. 2008. Т.48. №2. С. 100–104.
 15. Тагирова Л.М. Актуальность применения синтез-газа в качестве альтернативного источника энергии // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 2-1. С. 133–137. EDN: XXVJQR
 16. Кудряшова Е. Ю. Усовершенствование и применение каталитических нейтрализаторов отработавших газов для улучшения экологических характеристик дизельных двигателей. Дисс. Канд. техн. наук. Москва, 2017.
 17. Wang Chizhang, Yang Shijian, Chang Huazhen, et al. Structural effects of iron spinel oxides doped with Mn, Co, Ni and Zn on selective catalytic reduction of NO with NH₃ // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2013. Vol. 376. P. 13–21. doi: 10.1016/j.molcata.2013.04.008
 18. Stanciulescu M., Caravaggio G., Dobri A., et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over Mn-containing catalysts // Applied Catalysis B: Environmental. 2012. Vol. 123–124. P. 229–240. doi: 10.1016/j.apcatb.2012.04.012
 19. Wu ZB, Jiang BQ, Liu Y, Wang H, Jin R. DRIFT study of manganese/titania-based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃ // Environmental Science & Technology. 2007. Vol. 41, N 16. P. 5812–5817. doi: 10.1021/es0700350
 20. Кувшинов Г.Г., Попов М.В., Тонкодубов С.Е., Кувшинов Д.Г. Влияние давления на эффективность никелевых и никель- медных катализаторов в процессе разложения метана // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. Вып. 11. С.1407–1416.
 21. Голосман Е.З. Ефремов В.Н. Промышленные катализаторы гидрирования оксидов углерода // Катализ в промышленности. 2012. №5. С. 36–55.
 22. Ковалевская Л.Л., Дорофеева Е.А. Исследование влияния условий термообработки на дезактивацию катализаторов конверсии углеводородов. В кн.: Инновационные процессы в химии, нефтехимии и нефтепереработке. Сборник трудов международной конференции. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2016. С. 16–18.
 23. Измайлов А.Ю., Савельев Г.С., Кочетков М.Н. и др. Автотракторный дизельный двигатель, адаптированный к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 1(35). С. 10–15. EDN: YSSQLA

REFERENCES

1. Ashok B, Ashok SD, Kumar CR. LPG diesel dual fuel engine – A critical review. *Alexandria Engineering Journal*. 2015;54(2):105–126. doi: 10.1016/j.aej.2015.03.002
2. Frolov VN, Garanin IV. Experimental studies of detonation initiation and ra modes-bots of the pulsating detonation engine camera model. *Proceedings of MAI*. 2010;38. (In Russ). EDN: MQPNWB
3. Mamaev A, Kislenco N, Snezhko D. Vehicles powered by liquefied petroleum gas – development prospects. *Gas station complex + Alternative fuel*. 2003;(4(10)):6–12. (In Russ). EDN: JIYGBX
4. Uyutov SYu, Gojaev ZA. The use of liquefied petroleum gas as fuel in tractor diesel engines / S. Yu. Uyutov. *Tractors and agricultural machinery*. 2022;89(6):387–393. (In Russ). doi: 10.17816/0321-4443-123187
5. Tretyakova SG, Rastunova IL, Rozenkevich MB. Investigation of the possibility of using the sabatier reaction as a method of flow reversal for isotope exchange in the carbon dioxide –water system.

- Uspechi in chemistry and chemical technology*. 2008;22:70–75. (In Russ). EDN: QZVPOX
6. Dyachenko VG. *Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya*. Kharkov: NTU «KhPI»; 2009. (In Russ).
 7. Patent RUS 2259429 / 27.08.2005. Byul. 24. Simunova S.S., Ershova T.V. Elektrolit i sposob nikelirovaniya izdeliy iz alyuminiya i ego splavov. (In Russ). EDN: UKRGHA
 8. Gaynullin F.G., Grishchenko A.I., Vasilyev Yu.N., Zolotarevskiy L.S. Prirodnyy gaz kak motornoe toplivo na transporte. M.: Nedra, 1986. (In Russ).
 9. Fedin K. Innovative technology for creating gas piston engines with spark ignition. *Information resources of Russia*. 2012;2. (In Russ). EDN: OXASAJ
 10. Patent RUS № 2700866 / 23.09.2019. Byul. 27. Savelyev GS, Kochetkov MN, Ovchinnikov EV, et al. Sposob organizatsii rabocheho protsessa gazodizelnogo dvigatelya. EDN: ONZNAJ
 11. Usachev NYa, Kharlamov VV, Belanova EP, et al. Oxidative processing of lower alkanes: state and prospects. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. Vol. LII. No. 4. 2008. (In Russ).
 12. Krylov O.V. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas. M.: J. Russian Chemical. The D.I. Mendeleev Society. 2000. Vol. XLIV. No. 1. pp. 19-33. (In Russ).
 13. Patent Canada CA2811937C / 29.03.2012. Palmer MR, Allam RJ, Fetvedt JE. et al. Method of using carbon dioxide in recovery of formation deposits. Accessed: Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/25/2d/f5/09fe81942f06e3/CA2811937C.pdf>
 14. Asachenko EV, Rodina OV. Osobennosti dezaktivatsii kislotnykh Zn – soderzhashchikh katalizatorov aromatizatsii propane. *Neftekhimiya*. 2008;48(2):100–104.
 15. Tagirova LM. Aktualnost primeneniya sintez-gaza v kachestve alternativnogo istoch-nika energii. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2017. № 2-1. S. 133–137. EDN: XXVJQR
 16. Kudryashova EYu. Uovershenstvovanie i primeneniye kataliticheskikh neytralizatorov otrabotavshikh gazov dlya uluchsheniya ekologicheskikh kharakteristik dizelnykh dvigateley [dissertation] Moscow; 2017.
 17. Wang Chizhang, Yang Shijian, Chang Huazhen, et al. Structural effects of iron spinel oxides doped with Mn, Co, Ni and Zn on selective catalytic reduction of NO with NH₃. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2013;376:13–21. doi: 10.1016/j.molcata.2013.04.008
 18. Stanciulescu M, Caravaggio G, Dobri A, et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over Mn-containing catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2012;123–124:229–240. doi: [10.1016/j.apcatb.2012.04.012](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.04.012)
 19. Wu ZB, Jiang BQ, Liu Y, Wang H, Jin R. DRIFT study of manganese/titania-based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃. *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41, N 16. P. 5812–5817. doi: 10.1021/es0700350
 20. Kuvshinov GG, Popov MV, Tonkodubov SE, Kuvshinov DG. Vliyanie davleniya na ef-fektivnost nikelovykh i nikel- mednykh katalizatorov v protsesse razlozheniya metana. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2016;89(11):1407–1416.
 21. Golosman EZ, Efremov VN. Promyshlennyye katalizatory gidrirovaniya oksidov ugle-roda. *Kataliz v promyshlennosti*. 2012. №5. С. 36–55.
 22. Kovalevskaya LL, Dorofeeva EA. Issledovanie vliyaniya usloviy termoobrabotki na dezaktivatsiyu katalizatorov konversii uglevodorodov. In: *Innovatsionnyye protsessy v khimii, neftekhimii i neftepererabotke. Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferen-tsii*. Sankt Petersburg: SPbGTI(TU); 2016:16–18.
 23. Izmaylov AYu, Savelyev GS, Kochetkov MN, et al. Avtotraktorny dizelnyy dviga-tel, adaptirovanny k rabote na szhizhennom uglevodorodnom gaze po gazodizelnomu protsessu. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2018;1(35):10–15. EDN: YSSQLA

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

Уютов Сергей Юрьевич,

младший научный сотрудник лаборатории 2.2
«Автоматизированного привода сельскохозяй-
ственной техники»;

адрес: Российская Федерация, 109428, Москва,
1-й Институтский проезд, д. 5;

ORCID: 0000-0001-9394-5916;

eLibrary SPIN: 7350-1489;

e-mail: s_ujutov@mail.ru

Соавторы:

Годжаев Захид Адыгезалович,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук,
заместитель директора по инновационной и
внедренческой деятельности;

ORCID: 0000-0002-1665-3730;

eLibrary SPIN: 1892-8405;

e-mail: fic51@mail.ru

Овчинников Евгений Валентинович,

научный сотрудник лаборатории 4.1

ORCID: 0000-0002-6942-5950;

eLibrary SPIN: 4972-8390;

e-mail: vim@vim.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Sergey Yu. Ujutov

Junior Researcher of the Automated Drive of Agri-
cultural Machinery Laboratory 2.2;

address: 1st Institutsky drive, 109428 Moscow, Rus-
sian Federation;

ORCID: 0000-0001-9394-5916;

SPIN-код: 7350-1489;

e-mail: s_ujutov@mail.ru

Co-Authors:

Zahid A. Godzhaev,

Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Dr. Sci. (Engineering),

Deputy Director for Innovational and Implemental
Activities

ORCID: 0000-0002-1665-3730;

eLibrary SPIN: 1892-8405;

e-mail: fic51@mail.ru

Evgeniy V. Ovchinnikov,

Researcher of the Laboratory 4.1;

ORCID: 0000-0002-6942-5950;

eLibrary SPIN: 4972-8390;

e-mail: vim@vim.ru