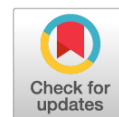


DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635739>

Оригинальное исследование



Исследование работоспособности дизельной топливной аппаратуры в нетрадиционных условиях

С.А. Плотников¹, Е.Г. Зыков¹, Н.Ю. Кутергин¹, Д.В. Плехов¹, А.Н. Карташевич²¹ Вятский государственный университет (ВятГУ), Киров, Россия;² Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (БГСХА), Горки, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Обоснование. К настоящему времени российскими и зарубежными учёными предлагается множество различных составов многокомпонентных смесевых топлив (МСТ), а также методов высокотемпературного форсирования. Известно, что некачественная настройка топливоподающей аппаратуры (ТПА) влечёт рост затрат до 30...35%, сокращает ресурс самих двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в 1,5...2 раза, ухудшает показатели их работы. Исследование работы ТПА на нетрадиционных топливах и в условиях термофорсирования дизельного топлива (ДТ) представляет определённый интерес.

Цель работы — исследование работоспособности дизельной топливной аппаратуры в нетрадиционных условиях.

Материалы и методы. В экспериментальном исследовании использовался стенд для регулировки дизельной топливной аппаратуры КИ-22210-02М-11 при работе на чистом ДТ без подогрева, с подогревом до 100 °С и с подогревом до 150 °С. На втором этапе проводились сравнительные испытания работы на многокомпонентных составах смесевых топлив, включающих ДТ, рапсовое масло (РМ) холодного отжима и спирт этиловый ректифицированный.

Результаты. По результатам испытаний построены внешние скоростные характеристики топливного насоса высокого давления (ТНВД) с включённым регулятором во всем скоростном интервале. Установлено влияние подогрева дизельного топлива, а также раздробленность состава многокомпонентного смесевых топлива на величину цикловой подачи и её неравномерность. Научная новизна исследования заключается в определении необходимости регулировок топливного насоса для достижения заданных заводом-изготовителем показателей цикловой подачи и прогнозирования надёжности и долговечности ТПА при работе в нетрадиционных условиях.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных составов многокомпонентных смесевых топлив и режимов подогрева дизельного топлива при работе дизеля.

Ключевые слова: дизель; дизельное топливо; этанол; растительное масло; подогрев; скоростная характеристика; цикловая подача.

Как цитировать:

Плотников С.А., Зыков Е.Г., Кутергин Н.Ю., Плехов Д.В., Карташевич А.Н. Исследование работоспособности дизельной топливной аппаратуры в нетрадиционных условиях // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 4. С. 305–311. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635739>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635739>

Original Study Article

Study of operability of the diesel fuel injection equipment in non-conventional conditions

Sergey A. Plotnikov¹, Evgeny G. Zykov¹, Nikolay Yu. Kutergin¹,
Dmitry V. Plekhov¹, Anatoly N. Kartashevich²

¹ Vyatka State University, Kirov, Russia;

² Belarussian State Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus

ABSTRACT

BACKGROUND: By now Russian and foreign scientists have proposed many different compositions of multicomponent mixed fuels (MMF), as well as methods of high-temperature boosting. It is known that poor-quality tuning of fuel injection equipment (FIE) leads to an increase in costs up to 30...35%, decreases the internal combustion engines lifespan by 1.5 ... 2 times, worsens their performance. The study of the operation of the FIE with non-conventional fuels and under conditions of thermal boosting of diesel fuel is of particular interest.

OBJECTIVE: Study of the efficiency of diesel fuel injection equipment in non-conventional conditions.

METHODS: In the experimental study, the bench for adjustment of the KI-22210-02M-11 diesel fuel injection equipment when operating with pure diesel fuel without heating, heated to 100 °C and heated to 150 °C was used. At the second stage, comparative tests were carried out on multicomponent compositions of mixed fuels, including diesel fuel, cold-pressed rapeseed oil (RSO) and rectified ethyl alcohol.

RESULTS: According to the test results, the full load curves of the high-pressure fuel pump with the regulator turned on at the full speed range were built. The effect of diesel fuel heating, as well as the fragmentation of the composition of the multicomponent mixed fuel on the value of the cyclic supply and its unevenness has been found. The scientific novelty of the study lies in determining the need for adjustments of the fuel pump to achieve the cyclic supply parameters set by the manufacturer and predicting the reliability and durability of the fuel injection equipment when operating in non-conventional conditions.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the opportunity of using the proposed compositions of multicomponent mixed fuels and diesel fuel heating modes during diesel operation.

Keywords: diesel; diesel fuel; ethanol; seed oil; heating; load curve; cyclic supply.

To cite this article:

Plotnikov SA, Zykov EG, Kutergin NYu, Plekhov DV, Kartashevich AN. Study of operability of the diesel fuel injection equipment in non-conventional conditions. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(4):305–311. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635739>

Received: 06.09.2024

Accepted: 13.01.2025

Published online: 13.01.2025

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени российскими и зарубежными учёными предлагается множество различных составов многокомпонентных смесевых топлив (МСТ) для использования в дизеле [1–4] в качестве моторных, а также методов высокотемпературного форсирования. Известно, что эффективные и экологические показатели работы ДВС напрямую зависят от правильности настройки топливopодpядующей аппаратуры (ТПА) и характера эксплуатации [5, 6]. Некачественная настройка ТПА влечёт рост затрат до 30...35%, сокращает ресурс самих ДВС в 1,5...2 раза, ухудшает показатели их работы.

В общем виде МСТ, включающее смесь дизельного топлива (ДТ), рапсового масла (РМ) и этанола (Э), характеризуется как микрогетерогенная грубодисперсная концентрированная эмульсия обратного типа — «вода в масле», у которой полярная дисперсная фаза находится в неполярной дисперсионной среде. Раздробленность дисперсной системы, связанная с увеличением поверхности раздела фаз, придаёт МСТ новые физико-химические и механические свойства, которые могут существенно повлиять на характеристики работы ТПА [7].

Высокотемпературный нагрев ДТ (свыше 100 °С) влечёт снижение его кинематической вязкости. Данное обстоятельство, несомненно, оказывает влияние на величину цикловой подачи топлива и неравномерности его подачи при изменении скоростного режима работы. Кроме того, увеличение теплонaпряжённости деталей системы питания может вызвать нештатные ситуации, механические неисправности и поломки и, как следствие, снижение ресурса работы ТПА.

Соответственно, исследование работы ТПА на нетрадиционных топливах, а также в условиях термофорсирования ДТ представляет определённый научный интерес.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель — исследование работоспособности дизельной топливной аппаратуры в нетрадиционных условиях.

Для достижения цели было необходимо решить следующие задачи:

- разработать устройство для подогрева дизельного топлива на стенде для испытаний дизельной ТПА;
- определить характеристики работы дизельной ТПА на многокомпонентном топливе различного состава;
- определить характеристики работы дизельной ТПА на дизельном топливе без подогрева и с подогревом до 150 °С.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований явился топливный насос высокого давления ЯЗДА-773-40.28 дизеля 4ЧН 11,5/12,0 (Д-245.5S2) в комплекте с четырёхдырчатыми форсунками закрытого типа 455.1112010-50 (ФД-22), с распылителем

и гидравлически управляемой иглой, с диаметром распиливающих отверстий 0,32 мм. Исследовались работоспособность и характеристики работы ТПА при подаче подогретого ДТ и многокомпонентного смесового топлива в условиях внешней скоростной характеристики.

В экспериментальном исследовании использовался стенд для регулировки дизельной топливной аппаратуры КИ-22210-02М-11 (рис. 1).

Испытания проводились согласно ГОСТ 10578-2020 [8] в два этапа.

На первом этапе использовалось чистое ДТ по ГОСТ 305-2013 без подогрева, с подогревом до 100 °С и с подогревом до 150 °С.

На втором этапе проводились сравнительные испытания работы на многокомпонентных составах смесовых топлив, включающих ДТ, РМ холодного отжима по ГОСТ-31759-2012 и спирт этиловый ректификованный по ГОСТ 5962-2013.

Многокомпонентные смесовые составы топлив приготавливались с помощью смесительной установки, кинематическая схема которой приведена на рис. 2 [9].

Смесительная установка включала корпус, представляющий собой усечённый конус с окнами для подвода ДТ, Э и РМ, внизу которого расположено отверстие для выхода МСТ. В центре установлен вращающийся шнек с лопастями. Внутри шнека находится перфорированный цилиндр для перелива излишек топлив.



Рис. 1. Стенд для испытания топливной аппаратуры КИ-22210-02М-15.

Fig. 1. The bench for testing the KI-22210-02M-15 fuel injection equipment.

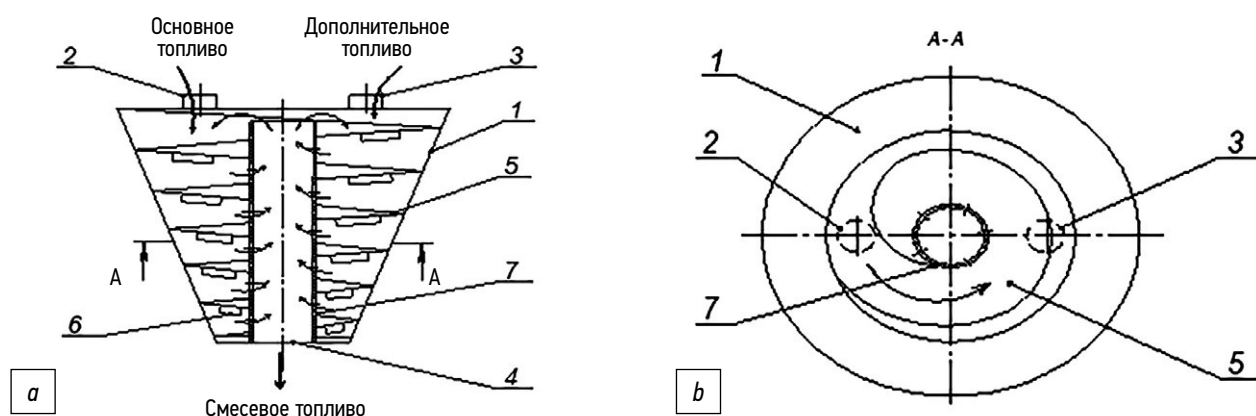


Рис. 2. Схема смесительной установки: *a* — вид спереди; *b* — разрез; 1 — корпус; 2, 3 — окна подачи основного (дизельного) и дополнительного топлива; 4 — окно для выхода МСТ; 5 — шнек; 6 — лопасти; 7 — перфорированный цилиндр.

Fig. 2. Layout of the mixing facility: *a* — front view; *b* — section; 1 — a body; 2, 3 — windows of supply of main (diesel) and additional fuel; 4 — a window for multicomponent mixed fuel output; 5 — an auger; 6 — vanes; 7 — a drilled cylinder.

Во время работы смесительной установки ДТ поступает в окно 2, а Э и РМ — через окно 3. Шнек при вращении лопастями 6 смешивает компоненты, при этом МСТ начинает вращаться внутри. Одновременно МСТ перемещается к окну выхода 4. С учётом того, что объём МСТ на входе больше, чем на выходе, возникают излишки топлива. Эти излишки выдавливаются вращающимся шнеком 5 через отверстия перфорированного цилиндра 7, затем заново поступают к окнам входа.

Использовались следующие составы топлив: ДТ-100%, ДТ-70% + Э-15% + РМ-15%, ДТ-50% + Э-25% + РМ-25%.

Определялись характеристики работы ТПА в условиях внешней скоростной характеристики при изменении частоты вращения от пусковой (100 мин^{-1}) до максимальной (1020 мин^{-1}).

Высокотемпературный подогрев дизельного топлива осуществлялся с использованием технического электрофена ЗТФ-2000ДК и изготовленного конфузора специальной конструкции, установленных на трубках высокого давления перед форсунками (рис. 3).

Текущие показания температуры топлива фиксировались инфракрасным термометром Fluke 574 (рис. 4).



Рис. 3. Схема установки электрофена ЗТФ-2000ДК и конфузора.
Fig. 3. Scheme of installation of the ZTF-2000DK electric fan and a confuser.



Рис. 4. Инфракрасный термометр Fluke 574.
Fig. 4. The Fluke 574 infrared thermometer.

Массовое содержание компонентов МСТ отмерялось на электронных весах, затем осуществлялось механическое диспергирование ингредиентов смеси на смесительной установке (см. рис. 2).

Перед началом испытаний проверялась исправность самого ТНВД и комплекта форсунок, плавность перемещения рейки; отсутствие течей топлива и правильность их регулировок [10].

Снималась внешняя скоростная характеристика ТНВД с включённым регулятором во всем скоростном интервале.

Замерялась цикловая подача топлива секциями насоса, определялась неравномерность подачи секциями. Характеристики распыливания топлива оценивались визуально. При проведении испытаний не допускались стуки, заедания рейки, местные нагревы свыше $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Параметры процесса топливоподачи определялись и контролировались для всех скоростных режимов работы топливного насоса, однако оптимизировались они, прежде всего, для номинального режима, так как на других режимах их удаётся оптимизировать лишь частично [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 приведена внешняя скоростная характеристика насоса ЯЗДА-773-40.28 при его работе на ДТ с подогревом.

Анализ кривых показывает, что параметры работы насоса на чистом дизельном топливе соответствуют технической характеристике.

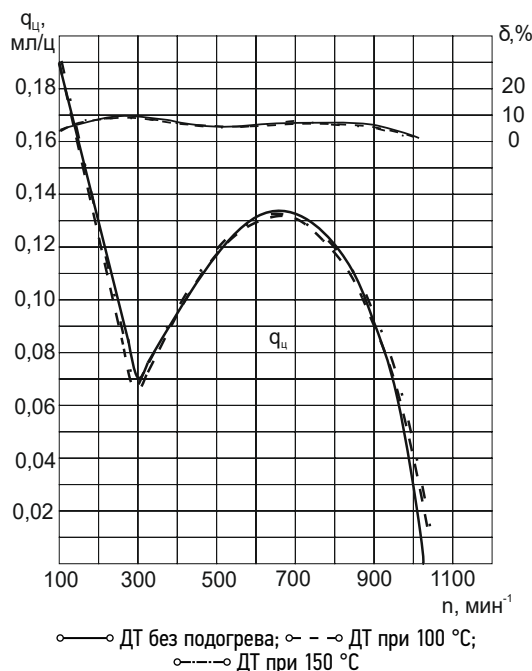


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика ТНВД при работе на ДТ с подогревом.

Fig. 5. Full load curve of the high-pressure fuel pump when operating with diesel fuel with heating.

Подогрев дизельного топлива влечёт некоторое снижение величины средней цикловой подачи. Так, если значение цикловой подачи топлива ТНВД на номинальной частоте вращения его вала при $n=900\text{ мин}^{-1}$ составляет $q_{ц}=0,090\text{ мл/цикл}$, то при подогреве ДТ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет место снижение значения подачи до $q_{ц}=0,088\text{ мл/цикл}$.

Дальнейший подогрев топлива до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ также вызывает снижение средней цикловой подачи до $q_{ц}=0,087\text{ мл/цикл}$. Указанное обстоятельство возможно объяснить изменением физического объёма топлива вследствие подогрева. Изначально определено, что цикловая подача отдельно взятой секции неизменна. Примем во внимание, что возле форсунки ДТ подогрето до высокой температуры. После впрыскивания это топливо попадает в мерную ёмкость, далее остывает, в итоге ДТ принимает меньший объём [11,12].

Параллельно изменению цикловой подачи ДТ происходит снижение её неравномерности, неравномерность подачи при номинальной частоте вращения падает от 5,9% (ДТ без подогрева) до 5,0% (ДТ подогрето до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Механических отказов в работе как форсунок, так и самого топливного насоса за время испытаний не наблюдалось, что означает сохранение показателей их надёжности и долговечности.

На рис. 6 приведена внешняя скоростная характеристика насоса ЯЗДА-773-40.28 при работе на ДТ и МСТ различного состава.

Анализ кривых показывает, что параметры работы насоса на чистом ДТ также соответствуют его технической характеристике.

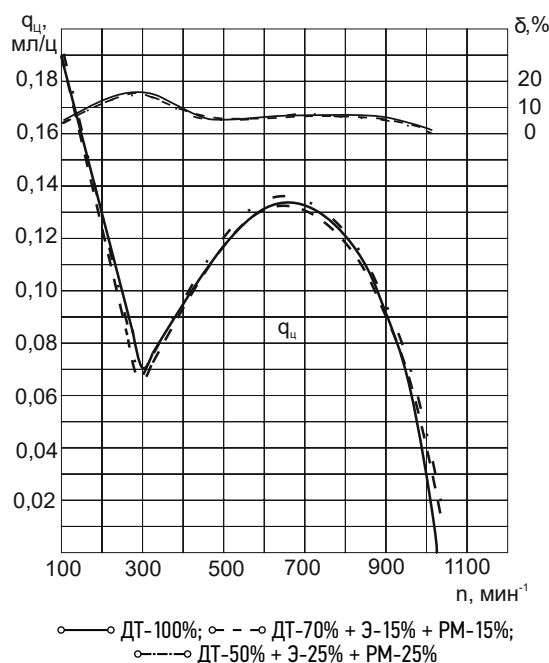


Рис. 6. Внешняя скоростная характеристика ТНВД при работе на МСТ.

Fig. 6. Full load curve of the high-pressure fuel pump when operating with multicomponent mixed fuel.

Цикловая подача смесового топлива, содержащего 15% Э и 15% РМ незначительно увеличивается на всех скоростных режимах работы в сравнении с работой на чистом ДТ. Величина цикловой подачи чистого дизельного топлива на номинальной частоте вращения вала ТНВД при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ составляет $q_{ц} = 0,090 \text{ мл/цикл}$, а цикловая подача МСТ, содержащего Э-15% и РМ-15% $q_{ц} = 0,092 \text{ мл/цикл}$. Однако на пусковой частоте вращения при $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, на минимальной частоте вращения холостого хода при $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ имеет место снижение цикловой подачи МСТ в сравнении с работой на чистом ДТ. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом. При малых частотах преобладающее действие оказывает рост утечек через неплотность плунжерных пар, а при возрастании частоты — увеличение вязкости и плотности МСТ [13].

Рост же концентрации Э и РМ до 25% вызывает увеличение интенсивности отмеченных процессов. Соответственно, и на пусковой частоте вращения, и на минимальной частоте вращения холостого хода снижение цикловой подачи МСТ в сравнении с ДТ ещё заметнее.

Неравномерность подачи чистого ДТ при номинальной частоте вращения составляет 5,7%, для МСТ, содержащего Э-15% и РМ-15%, значение равно 5,0%, для МСТ, содержащего Э-25% и РМ-25%, соответственно, 4,8%.

Неисправностей работы на МСТ самого ТНВД, а также деталей топливopодающей аппаратуры за время испытаний не наблюдалось.

ВЫВОДЫ

1. Высокотемпературный подогрев дизельного топлива незначительно снижает значение её цикловой подачи, что может быть компенсировано изменением активного хода плунжера.
2. Применение многокомпонентных смесовых топлив не изменяет показатели работы дизельной топливной аппаратуры.
3. Работа дизельной топливной аппаратуры на подогретом топливе и многокомпонентных смесовых топливах не снижает показателей её надёжности и долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Markov VA, Gayvoronskiy AI, Grekhov LV, et al. Operation of diesel engines on non-traditional fuels. Moscow: Legion-Avtodata; 2008.
2. Markov VA, Patrahaltsev NN. Alcohol fuels for diesel engines. Transport on alternative fuels. 2009;6:40–46. EDN: KXVHTJ
3. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Glushkov MN, et al. Creation and study of the properties of multicomponent biofuels for tractor diesel engines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:6–12. doi: 10.31992/0321-4443-2020-6-6-12 EDN: QVZUAQ

4. Представляет научный интерес исследование работы дизеля на МСТ и подогретом топливе в эксплуатационных условиях.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Плотников — общее руководство, формулировка идеи, структурирование текста, утверждение финальной версии; Е.Г. Зыков — редактирование материалов экспериментальных исследований; Н.Ю. Кутергин — написание текста рукописи; Д.В. Плехов — редактирование текста рукописи; А.Н. Карташевич — теоретическая разработка материалов рукописи. 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.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Plotnikov — general guidance, formulation of the idea, structuring of the text, approval of the final version; E.G. Zykov — editing the experimental study materials; N.YU. Kutergin — writing the text of the manuscript; D.V. Plekhov — editing the text of the manuscript, A.N. Kartashevich — theoretical development of manuscript materials. 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 that they have no competing interests.

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

4. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Zykov EG, et al. Development of technologies for the use of non-traditional fuels in diesel engines. *Bulletin of NGIEI*. 2023;2(141):7–18. doi: 10.24412/2227-9407-2023-2-7-18 EDN: KUKDVR
5. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Motovilova MV. Study of the effective performance of a tractor diesel engine when operating on activated fuel. *Proceedings of NSTU im RE Alekseeva*. 2019;4(127):179–186. EDN: DQMZJG
6. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Motovilova MV. Study of environmental characteristics of diesel when working

on activated fuel. *Izvestia MGTU MAMI*. 2021;1(47):54–62. EDN: HDIXIS

7. Gelfman MI, Kovalevich OV, Yustratov VP. Colloidal chemistry. St. Petersburg: Lan; 2010.

8. GOST 10578-2020. Diesel fuel pumps. Technical requirements and test methods. Moscow: Standartinform; 2020.

9. Ivanov IA, Belyavtsev AV, Protserov AS. Review of patents on homogenization and emulsification of fuels and the results of their operation. *Shipbuilding abroad*. 1982;1:36–48.

10. Belyavtsev AV, Protserov AS. Fuel equipment for automotive and tractor diesel engines. M.: Rosagropromizdat; 1988.

11. Molchanova TG. Hydraulics. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2021.

12. Zevin VG. Mechanics of liquid and gas: a tutorial. Chelyabinsk: SUSU; 2016.

13. Savelyev GS, Krasnoshchekov NV. Biological motor fuel for diesel engines based on rapeseed oil. *Tractors and agricultural machinery*. 2005;10. EDN: UCRVLD

ОБ АВТОРАХ

* Плотников Сергей Александрович,

д-р техн. наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»;
адрес: Россия, 610000, Киров, ул. Московская, д. 36;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: Plotnikovsa@bk.ru

Зыков Евгений Георгиевич,

аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0009-0007-9488-1820;
eLibrary SPIN: 6970-0947;
e-mail: edgeki@mail.ru

Кутергин Николай Юрьевич,

аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0009-0005-7096-9321;
eLibrary SPIN: 1065-5919;
e-mail: nik03071983@yandex.ru

Плехов Дмитрий Викторович,

аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0009-0003-1851-2856;
e-mail: WILDERHUND43@yandex.ru

Карташевич Анатолий Николаевич,

д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и машины
для природообустройства»;
ORCID: 0000-0002-3649-1521;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: Kartashevich@yandex.ru

AUTHORS' INFO

* Sergey A. Plotnikov,

Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Technology of Mechanical Engineering Department;
address: 36 Moskovskaya st, Kirov, Russia, 610000;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: Plotnikovsa@bk.ru

Evgeniy G. Zykov,

Postgraduate of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
ORCID: 0009-0007-9488-1820;
eLibrary SPIN: 6970-0947;
e-mail: edgeki@mail.ru

Nikolay Yu. Kutergin,

Postgraduate of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
ORCID: 0009-0005-7096-9321;
eLibrary SPIN: 1065-5919;
e-mail: nik03071983@yandex.ru

Dmitrij V. Plekhov,

Postgraduate of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
ORCID: 0009-0003-1851-2856;
e-mail: WILDERHUND43@yandex.ru

Anatoliy N. Kartashevich,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Head of the Tractors, Vehicles and Machines for Environmental
Management Department;
ORCID: 0000-0002-3649-1521;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: Kartashevich@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author