

УДК: 05.22.10

EDN: [IPNWMZ](https://www.edn.net/IPNWMZ)

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0101-0113>



## Диагностика дизельных форсунок с помощью ультразвука: дизель-ЭКО

М.С. Бугаков, Б. А. Хивинцев, Р.Е. Шутемов, В.А. Соха

*Енисейский многопрофильный техникум, Красноярский край, г. Енисейск, Россия*

**Аннотация.** В статье решается актуальная задача диагностики дизельных форсунок с целью определения исправной (неисправной) работы данных устройств при помощи ультразвука. Установлено, что исправная дизельная форсунка работает при частоте от 17 000 – 21 000 Гц, а неисправная от 4 000 – 12 000 Гц. Предоставлен наиболее простой, доступный и в тоже время эффективный способ диагностики механических дизельных форсунок.

**Ключевые слова:** ультразвук, форсунка, диагностика, простота, экология, эффективность, доступность, машиностроение.

**Благодарности:** Исследования выполнены при поддержке «Красноярского краевого фонда науки» в рамках конкурса «Юных техников-изобретателей Енисейской Сибири».

**Для цитирования:** Бугаков, М.С., Хивинцев, Б. А., Шутемов, Р.Е., & Соха, В.А. (2022). Диагностика дизельных форсунок с помощью ультразвука: дизель-ЭКО. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(2), 0101–0113. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0101-0113>

## Diagnostics of diesel injectors using ultrasound: Diesel-ECO

M.S. Bugakov, B.A. Khivintsev, R.E. Shutemov, V.A. Sokha

*Yenisei multidisciplinary technical school, Krasnoyarsk Territory, Yeniseisk, Russia*

**Abstract.** The article solves the actual problem of diagnosing diesel injectors in order to determine the correct (faulty) operation of these devices using ultrasound. It has been established that a serviceable diesel injector operates at a frequency of 17,000 - 21,000 Hz, and a faulty one - from 4,000 - 12,000 Hz. The most simple, affordable and at the same time effective method for diagnosing mechanical diesel injectors is provided.

**Keywords:** ultrasound, nozzle, diagnostics, simplicity, ecology, efficiency, accessibility, mechanical engineering.

**Acknowledgements:** The research was carried out with the support of the Krasnoyarsk Regional Science Fund within the framework of the Young Technicians-Inventors of the Yenisei Siberia competition.

**For citation:** Bugakov, M., Khivintsev, B., Shutemov, R., & Sokha, V. (2022). Diagnostics of diesel injectors using ultrasound: Diesel-ECO. Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(2), 0101–0113. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0101-0113>

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире довольно много экологических проблем, которые не всегда достаиваются внимания общественности. Но есть и такие, о которых знают все, но меры принимаются, как правило, на глобальном, а не локальном уровне. Отталкиваясь от смысла фразы «Начни с себя», команда студентов по руководством наставника решила помочь диагностировать форсунки владельцам и предприятиям, имеющим в эксплуатации дизельные автомобили с механическими форсунками. При этом проект стал участником конкурса «Юных техников-изобретателей Енисейской Сибири», который проводится «Красноярским краевым фондом науки».

Как известно любому автомеханику, механическую форсунку невозможно проверить на качество распыла, не сняв ее с двигателя автомобиля. А так как диагностика со снятием требует определенного времени и специального оборудования, то далеко не каждый владелец или механик проводит эти манипуляции при выполнении технического обслуживания автомобиля.

Зная устройство механического «Дизеля», можно предположить, что качество распыла (факела) форсунки напрямую влияет на экономичность и, как следствие, на экологичность грузового автомобиля. Отталкиваясь от конструкции форсунки, также можно предположить, что при работе она должна издавать какой-то определенный звук, что позволяет применить для диагностики микрофон.

С использованием микрофона было проведено исследование звука, что позволило выявить прямую зависимость частоты издаваемого звука во время работы форсунки и качества распыления дизельного топлива. В процессе эксперимента стало очевидно, что нормально работающая форсунка в момент впрыска издает звуковые волны с частотой, близкой к ультразвуковому диапазону [1-4].

На начальном этапе экспериментов замер частоты звука осуществлялся с использованием ноутбука с помощью выносного микрофона, но, с точки зрения организации работ, это оказалось громоздко и неудобно, тогда было принято решение

привязать экспериментальные исследования к мобильному устройству, а именно смартфону. Ведь в каждом смартфоне есть микрофон, и он вполне корректно сможет воспринимать частоты, с которыми нам необходимо работать, выполняя диагностику дизельных форсунок.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

### **Звуковые волны**

Касаясь характеристик ультразвука, отметим, что это звуковые волны высокой частоты (выше 15 000 - 20 000 герц), которые практически не воспринимаются человеческим ухом, но специальные чувствительные приборы способны его распознать и оценить. Ультразвук нашел довольно широкое применение в современном мире, его свойства применяют и в промышленности, и в медицине и даже в быту [2].

В промышленности широко применяют ультразвук для приготовления смесей: краски, лаки, грунты, лекарства, косметика. Ультразвук помогает смешивать несмешиваемые или плохо смешиваемые жидкости, например воду и масло. Ультразвук позволяет получить эмульсию без температурных и физических воздействий, что очень важно во многих отраслях производства [4].

Установлено, возможно и с учетом конструктивных особенностей исследуемых устройств, что во время срабатывания исправной механической форсунки возникают ультразвуковые волны на частоте от 17 до 19, а иногда и до 21 КГц.

Именно от этих свойств механических дизельных форсунок следовало отталкиваться при диагностике частот как на стенде в помещении (где нет посторонних шумов), так и на работающем двигателе, где спектр разно частотных звуковых волн намного шире.

### **Автопарк механических дизелей**

Так как официальных источников информации о количестве эксплуатируемых автомобилей с механическими дизельными двигателями в настоящее время нет, то при работе за основу была принята имеющаяся информация, связанная с частью периода выпуска автомобилей КАМАЗ с двигателем КАМАЗ 740, что позволило определить оценку примерного количества автомобилей с нужными для исследования двигателями.

На рисунке 1 представлены количественные характеристики производства грузовиков КАМАЗ с 1980 по 1995 годы. Из данной диаграммы видно, что за 15 лет Камский автомобильный завод выпустил 1 425 027 единиц техники с двигателем КАМАЗ 740. Предположительно до наших дней в эксплуатации находится около 30% автомобилей, а это не менее 427 508 грузовиков. Диаграмма взята из статьи «Заводы терпят убытки (Камаз)» канала «Мужская консультация» сайт: <https://dzen.ru/a/XduG-Y5bhG1QWq2W>.



Рисунок 1. Производство грузовиков КАМАЗ с 1980 по 1995 годы.

Figure 1. Production of KAMAZ trucks from 1980 to 1995.

Исходя из этих данных, можно сделать вывод о целесообразности проводимого исследования, так как предлагаемая разработка обеспечит существенную помощь не только владельцам автомобилей КАМАЗ, но и позволит автопаркам легко диагностировать и ремонтировать дизельные форсунки, вследствие чего будет получена не только экономия топлива, но и проделанная работа внесет свой вклад в сохранение окружающей среды и стабилизацию экологической обстановки.

В среднем, один автомобиль КАМАЗ с исправным двигателем и форсунками, потребляет 25 литров топлива на 100 км пути. При одной не работающей форсунке этот показатель увеличивается на 12,5 %, а это примерно 3,1 литра на 100 км. При этом следует учесть, что машин с неработающими или плохо работающими форсунками достаточно много. Наблюдение на городских улицах, в частности, там, где проходят автомобильные маршруты лесозаготовителей, показали, что каждый пятый лесовоз КАМАЗ имеет более черный цвет выхлопных газов, чем остальные. Именно черный дым

говорит о недогоревшем топливе. Причины недогоревшего топлива могут быть разные, но большинство причин связаны с функционированием топливной системы механического дизельного двигателя. Таким образом, можно предположить, что у 10% от общего числа эксплуатируемых автомобилей есть проблемы с корректностью функционирования топливной системы.

Проведя не сложные расчеты ( $427\,508 \times 10\% \times 3,1 = 132\,527,48$ ), можно показать, что на каждые 100 километров пути сжигается, по меньшей мере, на 132 527 литров топлива больше, чем это происходило бы при исправных форсунках, а в день подобные машины могут проезжать до 500 км.

И эти показатели лишь часть той катастрофической ситуации, которая складывается при эксплуатации дизельной автомобильной техники. Следует отметить, что кроме автомобилей КАМАЗ в нашей стране с механическими «дизелями» эксплуатируются и УРАЛы, и МАЗы, и различная специальная техника: тракторы, бульдозеры, экскаваторы, дизельные генераторы и компрессоры. Очевидно, что оборудование этой техники требует серьезного вмешательства для оценки качества работы той или иной топливной форсунки.

## ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как представлено во введении, направление исследований связано с обеспечением доступной диагностики форсунок владельцам и предприятиям, имеющим в эксплуатации дизельные автомобили различных марок [5-10] с механическими форсунками, неисправная эксплуатация которых повышает интенсивность загрязнения окружающей среды. Таким образом, целью работы является разработка приложения для смартфона на платформе Android, с помощью которого каждый владелец, механик или просто любопытный человек сможет самостоятельно за несколько минут продиагностировать все форсунки работающего дизельного двигателя.

Исходя из поставленной цели, между членами команды были распределены следующие задачи:

1. Сбор данные о потенциально неисправных грузовых дизельных автомобилях, которые встречаются на городских маршрутах.
2. Поиск (покупка) оборудования для тестирования механических форсунок.

3. Сбор и обработка данных о частоте звука, с которой работает исправная и неисправная форсунка. Поиск приложения, с помощью которого можно получить эти данные.

4. Подготовка технического задания для разработки приложения «Дизель-ЭКО».

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе необходимо было определить количество потенциально неисправных автомобилей, эксплуатируемых на городских магистралях. Для этого был организован учет автотранспорта на перекрестке, через который проходит основной транспортный поток лесовозов. Осуществлялось наблюдение за количеством машин, проходящих по автостраде, и визуально оценивалось отличие цвета выхлопных газов. Наблюдения показали, что примерно каждый пятый (примерно 20% от общего числа) грузовой автомобиль не соответствует исправным параметрам работы двигателя. Однако, черный цвет выхлопных газов является показателем неисправности не только форсунок, но и других элементов транспортного средства, поэтому за основу взяли половину от этой величины, т.е. 10% от общего числа механических «дизелей» на городских дорогах.

Проведенные наблюдения подтвердили актуальность и своевременность выполняемых исследований, так как планируемые результаты потенциально будут полезны многим специалистам, отвечающим за эксплуатацию дизельных двигателей с механическими форсунками.

Во-вторых, требовалось определить оборудование для проверки дизельных форсунок. На начальном этапе использовался учебный автомобиль техникума, и вопреки опасениям, что будет высокая зашумленность, было обнаружено что при тесном контакте микрофона с топливопроводом на экране начинают отображаться высокочастотные волны.

В дальнейшем при поддержке «Красноярского краевого фонда науки» было приобретено оборудование в виде стенда, на котором размещается форсунка, и с помощью плунжера, приводимого в действие рычагом, вручную создается давление, и в определенный момент происходит срабатывание форсунки.

С помощью стенда удалось в условиях аудитории сравнить показатели, полученные на работающем автомобиле, с показателями на стенде, где, помимо давления срабатывания, можно было наблюдать факел распыла. Значение давления, на

котором срабатывает форсунка и факел распыла, характеризует ее состояние, а если в момент срабатывания форсунки анализировать частоту звука на трубопроводе, то можно определить зависимость качества распыливания дизельного топлива и частоты звуковой волны, издаваемой распылителем форсунки в момент впрыска.

Третьим этапом был поиск приложения, которое обеспечило бы успешное проведение исследований. Было испытано более 20 различных бесплатных программ для смартфона по измерению и анализу частоты звука, но ни одно из них не удовлетворяло сформулированным требованиям. Требовалось определить, какая пиковая частота достигнута в момент измерения, но ни одно приложение это не обеспечивало. Можно только получить пик по всему спектру частот, а требуется зафиксировать полученное максимальное значение. Момент впрыска происходит очень быстро, и сфотографировать или сделать скриншот просто физически невозможно в нужный момент. Поэтому, необходимо вести запись экрана во время измерений и делать скриншоты уже из записанного видео.

Для проведения измерений использовалось приложение Spectrum, так как оно оказалось наиболее информативным и визуально привлекательным.

На рисунках 2, 3 и 4 приведены результаты анализа форсунок.

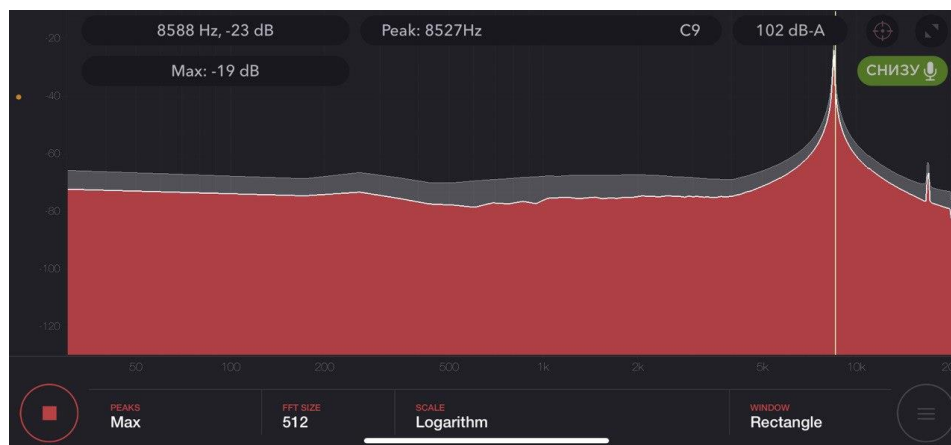


Рисунок 2. Неисправная форсунка, максимальная частота 8 588 герц.

Figure 2. Faulty injector, maximum frequency 8,588 hertz.



Рисунок 3. Форсунка с плохим распылом, максимальная частота 12 425 герц.

Figure 3. Nozzle with poor atomization, maximum frequency 12,425 hertz.

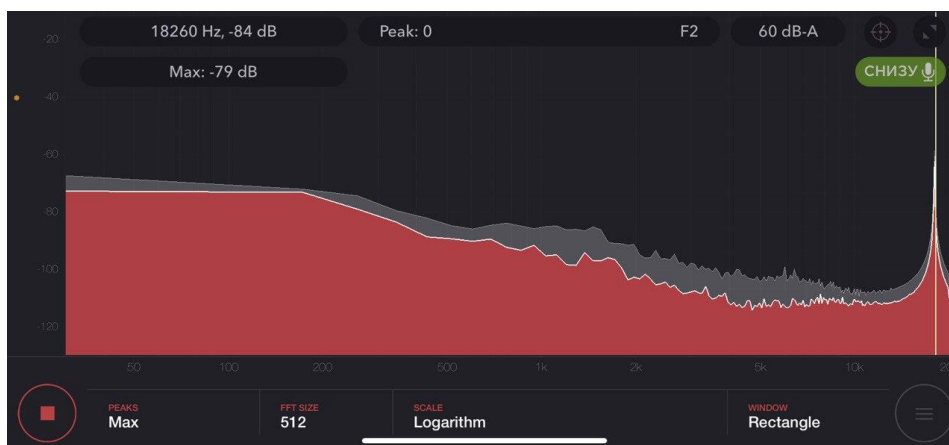


Рисунок 4. Исправная форсунка работает на частоте 18 260 герц.

Figure 4. A working nozzle operates at a frequency of 18,260 hertz.

После того, как в результате экспериментов были получены исходные данные, появилась возможность подготовить техническое задание для специалистов-разработчиков требуемого для диагностики форсунок приложения.

Причем, главным требованием было обеспечить простоту использования приложения. Интерфейс должен быть максимально прост и интуитивно понятен пользователю.

В первую очередь, была разработана инструкция пользователя для приложения, которая совершенствовалась на каждой итерации разработки. Имея шаблон инструкции, стало возможным расширять функционал и прорабатывать дизайн приложения.



Фактически, приложение должно работать, как анализатор звука, и сравнивать полученные данные с диапазоном частот, который был выведен опытным путем в рамках предыдущих экспериментов. Данный диапазон частот представлен следующим образом:

- полностью рабочая форсунка: 17 000 – 21 000 Гц;
- плохой распыл: 12 000 – 17 000 Гц;
- форсунка не работает: ниже 12 000 Гц.

На рисунке 5 показаны варианты выводимых приложением на экран результатов диагностики форсунок.



Рисунок 5. Результаты измерений.

Figure 5. Measurement results.

#### Схема взаимодействия пользователя с приложением

Исходя из стремления сделать максимально простое и интуитивно понятное приложение, инструкция по взаимодействию пользователя с приложением также формулируется в несколько шагов:

- пользователь запускает двигатель и открывает капот (или поднимает кабину) для непосредственного доступа к двигателю;
- пользователь запускает приложение;
- пользователь нажимает кнопку записи;
- пользователь подносит смартфон к топливопроводу измеряемой форсунки и прикладывает телефон к нему той стороной, где находится микрофон;
- ожидание 10-15 секунд, пока идет запись звуковых колебаний;
- прерывание контакта телефона и двигателя, остановка записи;
- в этот момент на экране должна отображаться максимальная частота звука, достигнутая за время записи.

В результате, на основе проведенных измерений приложение самостоятельно определяет состояние форсунки (исходя из диапазона частот) и рядом с числовым показателем определяется одно из трех состояний устройства: «Полностью рабочая» / «Плохой распыл» / «Не работает» (см. рисунок 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что представленное исследование было выполнено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности». Благодаря конкурсу «Юных техников-изобретателей Енисейской Сибири», который организует Красноярский краевой фонд науки, данная разработка была инициирована и полученные результаты представлены в материалах данной статьи. Как победителями конкурса, в рамках грантовой поддержки авторами было приобретено необходимое оборудование и авторский коллектив получил возможность завершить исследования и подготовить необходимые исходные данные для разработки приложения.

В результате проведенных исследований решена актуальная задача диагностики дизельных форсунок с целью диагностики их состояния при помощи ультразвука. Установлено, что исправная дизельная форсунка работает при частоте от 17 000 – 21 000 Гц, а неисправная от 4 000 – 12 000 Гц. В работе представлен наиболее простой, доступный и в тоже время эффективный способ диагностики механических дизельных форсунок. Данный способ нашел свое отражение в виде этапов, описанных в статье, и схемы взаимодействия пользователя с приложением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та; 2010. 272.
- [2] Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та; 2010. 203.
- [3] Хмелев, В.Н., Цыганок С.Н., Левин С.В. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та; 2013. 196.
- [4] Хмелев, В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та; 2015. 688.
- [5] John S. Mead. Ford Transit. 1986-1999. Модели с дизельными двигателями. Ремонт и техническое обслуживание. М.: Алфамер Паблишинг; 2018. 462.
- [6] Mitsubishi L300 Delica 2WD & 4WD. Модели 1986-1999 гг. выпуска с дизельными двигателями. Устройство, техническое обслуживание и ремонт. М.: Легион-Автодата; 2013. 121.
- [7] Mitsubishi Pajero. Модели 1991-2000 гг. выпуска с дизельными двигателями 4D56 (2,5 л) и 4M40 (2,8 л). Устройство, техническое обслуживание и ремонт. М.: Легион-Автодата; 2019. 884.
- [8] Nissan Terrano, Pickup, Pathfinder. Модели выпуска 1985-1994 гг. с бензиновыми и дизельными двигателями. Устройство, техническое обслуживание и ремонт. М.: Автонавигатор; 2013. 620.
- [9] Корп Д., Бройштедт К. Ford Escort/Orion. Выпуск с октября 1990 г. Бензиновый и дизельный двигатели. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. М.: Motorbuch Verlag, Кладезь, АСТ, Астрель; 2018. 272.
- [10] Mercedes Vito 1995-2002 гг. выпуска. Бензиновые и дизельные двигатели. Руководство по эксплуатации, техническое обслуживание, ремонт, особенности конструкции, электросхемы. М.: Автомастер; 2017. 342.

## REFERENCES

- [1] Hmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova A.V. Ul'trazvukovoe raspylenie zhidkostej: monografiya. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta; 2010. 272.
- [2] Hmelev V.N., Slivin A.N., Barsukov R.V., Cyganok S.N., Shalunov A.V. Primenenie

ul'trazvuka vysokoj intensivnosti v promyshlennosti. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta; 2010. 203.

[3] Hmelev, V.N., Cyganok S.N., Levin S.V. Istochniki ul'trazvukovogo vozdejstviya. Osobennosti postroeniya i konstrukcii. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta; 2013. 196.

[4] Hmelev, V.N., Shalunov A.V., Hmelev S.S., Cyganok S.N. Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii: monografiya. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta; 2015. 688.

[5] John S. Mead. Ford Transit. 1986-1999. Modeli s dizel'nymi dvigatelyami. Remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie. M.: Alfamer Publishing; 2018. 462.

[6] Mitsubishi L300 Delica 2WD & 4WD. Modeli 1986-1999 gg. vypuska s dizel'nymi dvigatelyami. Ustrojstvo, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont. M.: Legion-Avtodata; 2013. 121.

[7] Mitsubishi Pajero. Modeli 1991-2000 gg. vypuska s dizel'nymi dvigatelyami 4D56 (2,5 l) i 4M40 (2,8 l). Ustrojstvo, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont. M.: Legion-Avtodata; 2019. 884.

[8] Nissan Terrano, Pickup, Pathfinder. Modeli vypuska 1985-1994 gg. s benzinovymi i dizel'nymi dvigatelyami. Ustrojstvo, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont. M.: Avtonavigator; 2013. 620.

[9] Korp D., Brojshtedt K. Ford Escort/Orion. Vypusk s oktyabrya 1990 g. Benzinovyy i dizel'nyj dvigateli. Rukovodstvo po ekspluatatsii, tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu. M.: Motorbuch Verlag, Kladez', AST, Astrel'; 2018. 272.

[10] Mercedes Vito 1995-2002 gg. vypuska. Benzinovye i dizel'nye dvigateli. Rukovodstvo po ekspluatatsii, tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont, osobennosti konstrukcii, elektroskhemy. M.: Avtomaster; 2017. 342.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Бугаков Михаил Сергеевич**, мастер производственного обучения (старший мастер производственного обучения по внутреннему совместительству) по направлению «Автомеханика», КГБ ПОУ «Енисейский многопрофильный техникум», Енисейск, Российская Федерация  
e-mail: emt-24@mail.ru

**Mikhail S. Bugakov**, master of industrial training (senior master of industrial training in internal part-time work) in the direction of "Automechanics", Yenisei multidisciplinary technical school, Yeniseisk, Russian Federation  
e-mail: emt-24@mail.ru

**Хивинцев Богдан Алексеевич**, студент II курса по профессии «Слесарь по ремонту строительных машин», КГБ ПОУ «Енисейский многопрофильный техникум», Енисейск, Российская Федерация

**Bogdan A. Khivintsev**, 2nd year student in the profession "Mechanic for the repair of construction machines", Yenisei multidisciplinary technical school, Yeniseisk, Russian Federation

**Шутемов Роман Евгеньевич**, студент I курса по профессии «Слесарь по ремонту строительных машин», КГБ ПОУ «Енисейский многопрофильный техникум», Енисейск, Российская Федерация

**Roman E. Shutemov**, student of the 1st year in the profession "Mechanic for the repair of construction machines", Yenisei multidisciplinary technical school, Yeniseisk, Russian Federation

**Соха Вячеслав Андреевич**, студент I курса по профессии «Слесарь по ремонту строительных машин», КГБ ПОУ «Енисейский многопрофильный техникум», Енисейск, Российская Федерация

**Vyacheslav A. Sokha**, 1st year student in the profession "Mechanic for the repair of construction machines", Yenisei multidisciplinary technical school, Yeniseisk, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 20.04.2023; принята к публикации 15.05.2023.*

*The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 20.04.2023; accepted for publication 15.05.2023.*