

## МАЛОГАБАРИТНОЕ УСТРОЙСТВО С АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ДЛЯ БУРЕНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.Н. Хмелёв<sup>1</sup>, Р.В. Барсуков<sup>1</sup>, Р.Н. Голых<sup>1</sup>, А.Р. Барсуков<sup>1</sup>, В.А. Нестеров<sup>1</sup>, QiQuan Quan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

<sup>2</sup> Harbin Institute of Technology, Harbin, China

Статья посвящена устройству, способному обеспечить эффективное бурение неизвестного до посадки космических модулей грунта, в котором решена проблема бурения под разными углами для выявления и добычи воды из лунного грунта, установки исследовательских датчиков и иных устройств в грунте на заданной глубине для исследования планет, комет, астероидов и других небесных тел. В статье представлен обзор конструкций существующих буров, выявлены их основные достоинства и недостатки. Подробно рассмотрена конструкция и работа предлагаемого ультразвукового бура. Особенности конструкции предлагаемого УЗ бура в сочетании со встроенной в электронный генератор системой контроля импеданса пробуруваемого грунта в ходе его бурения позволяет получать оперативную информацию о его свойствах, оптимизировать работу УЗ бура по мере изменения свойств грунта в процессе заглужения.

*Ключевые слова:* ультразвук, бурение, бур, электронный генератор.

### ВВЕДЕНИЕ

При исследовании космических объектов и планет возникает необходимость выполнения отверстий (бурения) для решения задач закрепления посадочного модуля на космические объекты с малой силой притяжения и неизвестным до посадки типом грунта, забора образцов грунта с необходимой глубины без изменения структуры и состава исследуемого материала или установки датчиков для контроля процессов в грунте.

При этом к устройству для бурения грунта предъявляются вполне определенные требования, обусловленные необходимостью обеспечения максимальной скорости бурения при креплении посадочного модуля на астероид при минимальном энергопотреблении и отсутствии отталкивающих воздействий, а также в обеспечении минимального разрушающего воздействия для обнаружения признаков жизнедеятельности или добычи воды из лунного грунта.

При этом, как установлено в результате многолетних исследований и отмечено в отчете NASA [1], при неизвестных свойствах грунта наиболее эффективным является реализация ультразвукового бурения с одновременным вращательным и ударно-колебательным воздействием [2].

При этом, степень дополнительного, к ультразвуковому, вращательного или ударно-колебательного воздействия зависит от свойств грунта. В частности, скорость бурения твердых грунтов и льда увеличивается при дополнительном

ударном воздействии, а скорость бурения пористых грунтов увеличивается при вращательном движении бура [3].

Очевидно, что бурение при этом должно осуществляться под различными углами к поверхности внеземного объекта, а необходимость обеспечения максимально эффективного воздействия, заключающегося в оптимальном сочетании ультразвукового с вращательным и ударно-колебательным воздействиями при бурении неизвестного по свойствам грунта под различными углами, требует решения проблемы непрерывного контроля свойств грунта, на который осуществляется комплексное воздействие.

Такой метод контроля при использовании пьезоэлектрических устройств бурения теоретически возможен [4], однако его техническая реализация невозможна при одновременном обеспечении ударных и вращательных движений инструмента отдельно от пьезоэлектрической колебательной системы.

Конечной целью работы является создание устройства, способного обеспечить максимальную скорость бурения неизвестного до посадки грунта и решить проблему эффективного бурения под разными углами для выявления и добычи воды из лунного грунта, установки исследовательских датчиков и иных устройств в грунте на заданной глубине для исследования планет, комет, астероидов и других небесных тел.

### ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ БУРОВ

Имеющиеся в настоящее время устройства ультразвукового бурения вземных объектов можно условно разделить на следующие части.

Механическая часть (ультразвуковая колебательная система – УЗКС), предназначенная для непосредственного воздействия на объект, в котором производится бурение.

Электронная хснтм, которая представляет собой генератор, предназначенный для преобразования электрической энергии бортовой сети космических аппаратов в электрическое напряжение ультразвуковой частоты, необходимое и достаточное для питания УЗКС.

Такие устройства реализуют одновременно три различных механизма воздействия для бурения твердых и хрупких материалов:

- низкочастотное воздействие, которое заключается в ударном высокоамплитудном воздействии рабочего инструмента на пробуриваемый объект с низкой частотой воздействия (около 10 Гц). При реализации такого механизма бурения происходит механическое откалывание крупных частиц пробуриваемого объекта, которые далее должны удаляться из зоны бурения, в противном случае они будут дополнительно измельчаться и «тромбоваться» в зоне бурения, снижая скорость бурения;

- ультразвуковое воздействие, которое заключается в ударном низкоамплитудном воздействии рабочего инструмента на пробуриваемый объект с ультразвуковой частотой (более 20000 Гц). За счет высокой частоты УЗ воздействия процесс бурения протекает не менее эффективно, и при своевременном удалении продуктов износа, не уступает, а в большинстве случаев выигрывает, по сравнению с бурением макроударами;

- бурение вращательным воздействием, заключается в наложении на бур вращательного движения одновременно с поступательным движением. Такой механизм является самым неэффективным и энергозатратным. Однако, в некоторых случаях бурение вращением является наиболее целесообразным способом.

На практике реализуется несколько конструкций ультразвуковых буров, предназначенных для бурения вземных объектов, эскизы наиболее типичных из них представлены на рисунке 1.

Каждый из представленных буров состоит из следующих основных элементов: 1 – рабочий инструмент (сверло); 2 – концентратор; 3 – пьезоэлектрический преобразователь; 4 – корпус; 5 – муфта; 6 – двигатель; 7 – свободная масса.

Устройства, эскизы которых представлены на рисунках 1б, и 1в, реализуют бурение рабочим

инструментом 1 за счет ударного воздействия на него свободной массы 7, которая в свою очередь получает импульс при периодических соударениях с УЗ колебательной системой.

Устройство, эскиз которого представлен на рисунке 1а, осуществляет комбинированное воздействие на пробуриваемый объект, включающее ультразвуковое воздействие, низкочастотное ударное воздействие, дополнительное вращательное воздействие ультразвукового бура.

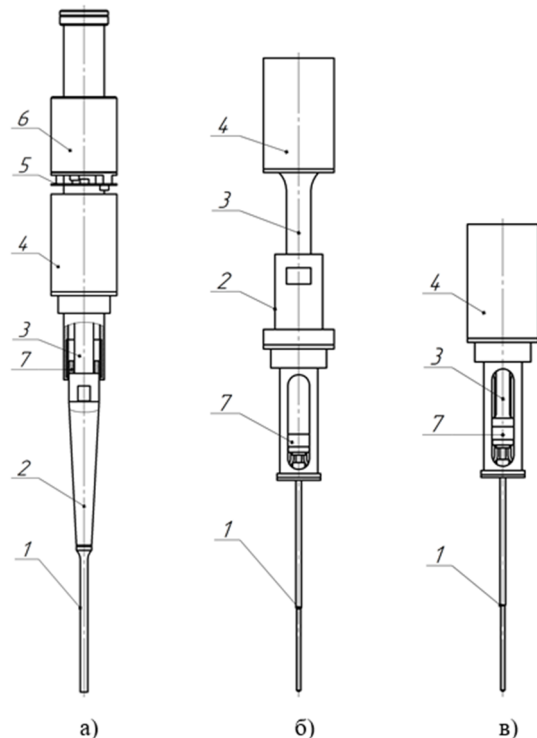


Рис. 1. Эскизы различных ультразвуковых буров

Устройство бурения, конструкция которого представлена на рисунке 1а, реализует все три механизма воздействия, соотношение которых и вклад каждого из них в процессе бурения не регламентирован. Такая конструкция реализует в основном ультразвуковой способ воздействия, который существенно преобладает над двумя другими механизмами воздействия, содействующими процессу бурения, а именно низкочастотными колебаниями рабочего инструмента 1 и его вращением. Основным достоинством конструкции, представленной на рисунке 1а, является возможность оперативного косвенного контроля физических свойств пробуриваемых объектов, поскольку рабочий инструмент 1 является частью волноводной системы, а в процессе его заглубления изменяются электромеханические параметры УЗ бура. Возможность контроля физических свойств пробуриваемых объектов позволяет оперативно получать предварительную информацию об их физических свойствах, корректировать параметры УЗ

воздействия на пробуруваемый объект, контролировать степень заглубления бура и т.п.

Недостатком конструкции, представленной на рисунке 1а, является ее сложность и очень низкий вклад в процесс бурения макроколебаний рабочего инструмента и его вращательного движения.

Конструкции, представленные на рисунках 1б и 1в, реализуют бурение за счет ударного воздействия на пробуруваемый объект рабочим инструментом 1. В процессе работы устройств такого типа реализуется только один механизм воздействия (за счет низкочастотных макроударов бура). Наложение УЗ колебаний и вращения на рабочий инструмент данной конструкции невозможно, поскольку рабочий инструмент 1 имеет осевую степень свободы, а так же имеет возможность свободного вращения вокруг этой оси. Таким образом, производительность конструкций, представленных на рисунках 1б и 1в, уступает производительности бура, конструкция которого представлена на рисунке 1а.

Кроме того, в конструкциях устройств бурения, представленных на рисунках 1б и 1в, рабочий инструмент 1 не имеет непосредственного акустического контакта с УЗ преобразователем, т.е. не является элементом волноводной структуры. Таким образом, физические свойства пробуруемого объекта, контактирующего с рабочим инструментом 1, не оказывают влияния на акустические параметры УЗ преобразователя и, как следствие, отсутствует возможность оперативного косвенного контроля процесса бурения, а так же физических свойств пробуруемого объекта, путем контроля параметров УЗ преобразователя.

Отличия конструкций, представленных на рисунках 1б и 1в, заключаются только в том, что конструкция 1б, имеет дополнительный концентратор 2, что обеспечивает его более стабильную работу бура при больших осевых давлениях на него.

Практические исследования известных и представленных на рисунке 1 устройств бурения, показали их общий недостаток – недостаточную производительность, обусловленную:

- реализацией за счет энергии УЗ колебаний только одного механизма бурения, а именно низкочастотного ударного воздействия на пробуруваемый объект (варианты исполнения бура 1б и 1в);

- низким вкладом низкочастотных макроударов в процесс бурения, которые формируются за счет УЗ колебаний при его соударении пьезопреобразователя со свободной массой.

Таким образом, для повышения эффективности бурения, дальнейшее развитие конструкций УЗ буров должно заключаться в оптимальном сочетании в одной конструкции различных механизмов бурения для повышения эффективности каждого из воздействий. При этом связь физических свойств

пробуруемых объектов с электромеханическими свойствами УЗ бура должна быть максимально возможной, что необходимо для реализации контроля и управления процессом бурения.

Предлагаемая далее конструкция устройства УЗ бурения способна обеспечить значительное повышение скорости бурения практически любых по свойствам грунтов вземных объектов под различными углами.

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАЗРАБОТАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО БУРА

На рисунке 2 представлен эскиз разработанной конструкции УЗ бура [5].

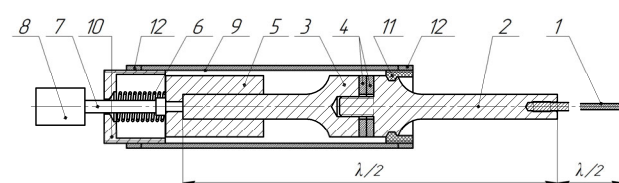


Рис. 2. Эскиз конструкции разработанного УЗ бура

Предлагаемое устройство ультразвукового бурения состоит из рабочего инструмента 1, концентрирующей накладки 2, отражающей накладки 3, пьезокерамических колец 4, свободной массы 5, пружины 6, кронштейна УЗКС 7, виброразвязывающего узла для присоединения устройства бурения к манипулятору 8, корпуса пьезопреобразователя 9, крышки для регулировки усилия прижима 10, виброразвязывающего узла корпуса преобразователя 11, контргайки 12. Рабочий инструмент 1 представляет собой полуволновой стержень, который, с одной стороны, контактирует с объектом, осуществляя бурение, а с другой стороны прикреплен концентрирующей накладке 2, при помощи резьбового соединения.

Устройство ультразвукового бурения работает следующим образом. На пьезокерамические пьезоэлементы 4 от генератора электрических колебаний поступает переменное напряжение, частота которого равна рабочей (резонансной) частоте УЗ бура. Пьезоэлементы 4, концентрирующая и отражающая накладки 2 и 3 образуют полуволновой электромеханический преобразователь, на излучающих поверхностях которого, за счет формы накладок 2 и 3 достигается максимальная амплитуда колебаний.

Рабочий инструмент 1 в процессе бурения воздействует преимущественно на разрушаемый объект механическими колебаниями с ультразвуковой частотой. В результате такого бурения образуются твердые частицы, размеры которых соизмеримы с амплитудой колебаний рабочего инструмента.

В процессе работы свободная масса 5, совершая низкочастотные колебания, в определенные моменты времени сталкивается с поверхностью отражающей

накладки 3. В момент столкновения свободной массы 5 с колеблющейся поверхностью с максимальной амплитудой отражающей накладки 3 происходит передача максимального по величине импульса. УЗ рабочий инструмент в эти моменты осуществляет дополнительное высокоамплитудное ударное воздействие на пробуриваемый объект.

Наличие свободной массы 5 максимального размера, осуществляющей ударное воздействие на конструкцию ультразвуковой колебательной системы, обеспечивает дополнительное ударное воздействие рабочего инструмента 1 на пробуриваемый объект, что приводит к увеличению интенсивности процесса бурения, связанного с откалыванием в зоне бурения более крупных частиц разрушаемого материала.

Таким образом, более эффективная работа предлагаемого устройства УЗ бурения достигается за счет того, что рабочий инструмент, непосредственно, либо через прослойку из абразивных зерен осуществляет комбинированное механическое воздействие на объект колебаниями с ультразвуковой частотой и интенсивными макроударами с низкой частотой следования.

Процесс бурения с использованием рассматриваемого ультразвукового устройства можно представить в виде следующих, периодически повторяющихся, шагов:

- 1) макроудар, с получением крупной частицы;
- 2) дробление ультразвуковыми колебаниями крупной частицы;
- 3) вынос продуктов дробления;
- 4) ультразвуковое бурение, с отводом продуктов износа;
- 5) переход в пункт 1.

Интервалы времени между макроударами много больше интервала времени между периодом ультразвуковых колебаний рабочего инструмента, т.е. большую часть времени поверхность рабочего инструмента находится в состоянии стабильного акустического контакта с пробуриваемым объектом. Такой режим бурения в дополнении ко всему позволяет в интервалах между макроударами осуществлять измерение электрического импеданса ультразвуковой колебательной системы.

Контроль импеданса УЗ излучателя позволяет изучать (исследовать) свойства обрабатываемых грунтов за счет косвенного контроля импеданса УЗ излучателя, а также его действительной и реактивной составляющих, в частности:

- контролировать упругие и акустические свойства пробуриваемого объекта;
- косвенно определять наличие и количество некоторых материалов в грунте – например, воды или газов;
- оперативно корректировать параметры УЗ воздействия (амплитуду, осевое давление на ультразвуковой бур, условия согласования

электронного генератора с УЗ колебательной системой) с целью оптимизации процесса бурения;

- контролировать изменение физических свойств материала пробуриваемого объекта с глубиной;
- контролировать степень заглупления рабочего инструмента в процессе бурения.

### ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО БУРА

На рисунке 3 представлена структурная схема электронного генератора.



Рис. 3. Структурная схема электронного генератора

К основным функциям УЗ генератора можно отнести: обеспечение работы пьезоэлектрического преобразователя устройства УЗ бурения на его резонансной частоте с учетом внешних дестабилизирующих воздействий (температурные условия, свойства пробуриваемого грунта, статическое осевое давление на бур и т.п.); управление мощностью (амплитудой механических колебаний на рабочем окончании бура); контроль электрических параметров УЗ бура, таких как потребляемая мощность, резонансная частота, импеданс (полный, а так же его действительная и мнимая составляющие), ток и напряжение на УЗКС, а так же фазовый сдвиг между ними. Процессорный модуль имеет интерфейс для связи с бортовой системой управления космического аппарата. На рисунке 4 представлены фото и основные характеристики электронного генератора.

#### Основные характеристики:

Напряжение питания, В.....	12±20%
Максимальная потребляемая мощность, Вт.....	100
Номинальная потребляемая мощность, Вт.....	75
Мощность состояния покоя не более, Вт.....	2
Частота, кГц .....	25
Габариты, мм .....	195x115x45



Рис. 4. Фото и основные технические характеристики генератора

Генератор собран на одной печатной плате, которая размещается в алюминиевом корпусе. Все силовые элементы расположены вдоль одной стороны платы и смонтированы на единую пластину теплоотвода, которая при установке в алюминиевый корпус позволяет передавать выделяющееся тепло на его стенки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное и разработанное устройство ультразвукового бурения внеземных объектов при испытаниях в земных условиях показало эффективную работу при бурении гранита, песчаника, стекла, пенобетонов и т.п.

Потребляемая мощность при этом составила 80 Вт. Малые массогабаритные показатели, низкое энергопотребление позволяют рекомендовать созданное устройство для использования в составе различных космических аппаратов, с электропитанием, как от отдельных аккумуляторных батарей, так и от бортовой сети. Предложенная и рассмотренная конструкция УЗ бура легко комплектуется устройством вращательного движения всей конструкции, что дополнительно повысит ее производительность.

Встроенная в электронный генератор система контроля импеданса пробуриваемого грунта в ходе выполнения бурения может быть использована как источник дополнительной информации о свойствах материалов, а также позволяет оптимизировать работу УЗ бура по мере изменения свойств грунта в процессе заглупления (варьирование мощностью, усилием прижима и т.п.).

## ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-52-53036.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Планетарное бурение и ресурсы на Луне и Марсе [Электронный ресурс] // Отчёт НАСА. Конференция по геонаукам, инженерингу и технологиям бурения. – 2012. – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120016363/downloads/20120016363.pdf>.
2. Разработка ультразвуковой колебательной системы для бурения лунного грунта / В.Н. Хмельёв [и др.] // Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам, EDM. – 2019. – С. 275–280.
3. Пат. 2726495 Российская Федерация, МПК В64G 1/10, E21C 51/00. Устройство ультразвукового бурения внеземных объектов [Текст] / Барсуков Р.В.; заявитель и патентообладатель ООО "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ" – №ГОСТ 7.1-2003 2000131736/09; заявл. 23.12.19; опубл. 14.07.22, Бюл. № 20 – 3 с.: ил.
4. Теоретическая разработка метода контроля свойств твердых внеземных почв при помощи ультразвукового воздействия / В.Н. Хмельёв [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 1(41). – С. 23–29.
5. Пат. 2785271 Российская Федерация, МПК E21C 51/00, E21B 7/24, В64G 4/00. Устройство ультразвукового бурения внеземных объектов [Текст] / Барсуков Р.В.; заявитель и патентообладатель ООО "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ" – №ГОСТ 7.1-2003 2000131736/09; заявл. 29.08.22; опубл. 05.12.22, Бюл. № 34 – 3 с.: ил.

*Хмельёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный Изобретатель Российской Федерации, заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.*

*Барсуков Роман Владиславович – кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.*

*Голых Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.*

*Барсуков Александр Романович – студент магистратуры, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: alex\_bars@u-sonic.ru.*

*Нестеров Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.*

*Quan Qiqian – Ph. D., associate professor, Harbin Institute of Technology, e-mail: quanqiqian@hit.edu.cn.*

# COMPACT DEVICE WITH AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR DRILLING EXTRATERRESTRIAL OBJECTS

V.N. Khmelev<sup>1</sup>, R.V. Barsukov<sup>1</sup>, R.N. Golykh<sup>1</sup>, A.R. Barsukov<sup>1</sup>, V.A. Nesterov<sup>1</sup>, Qiquan Quan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk

<sup>2</sup> Harbin Institute of Technology, Harbin, China

**Abstract** – The article is devoted to a device capable of providing efficient drilling of soil unknown before the landing of space modules. The problem of drilling at different angles is being solved to identify and extract water from the lunar soil. It also solves the problem of installing research sensors and other devices in the ground at a given depth to study planets, comets, asteroids and other celestial bodies. The article presents an overview of the existing drills designs reveals their main advantages and disadvantages. The design and operation of the proposed ultrasonic drill are considered in detail. The design features of the proposed ultrasonic drill in combination with the system for monitoring the impedance of the drilled soil during drilling, built into the electronic generator, makes it possible to obtain operational information about its properties, optimize the operation of the ultrasonic drill as the properties of the soil change in the process of deepening.

*Index terms:* ultrasonic, drilling, drill, electronic generator.

## REFERENCES

1. George, Jeffrey A., *Planetary Drilling and Resources at the Moon and Mars*, accessed December 02, 2022, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120016363/downloads/20120016363.pdf>.

2. Khmelev, V. N., et al, "Development of ultrasonic oscillatory system for the lunar soil drilling," *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*, pp 275–280. June–July, 2019.

3. Barsukov, R. V., "Device for ultrasonic drilling of extraterrestrial objects," RU Patent 2 726 495, July 14, 2020.

4. Khmelev, V. N., R.N. Golykh, Q. Quan, R.V. Barsukov, V.D. Minakov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, V.A. Nesterov, and M.V. Khmelev, "Theoretical development of a method for control of the solid extraterrestrial soils properties using ultrasonic influence," *South-Siberian Scientific Bulletin*, no. 1(41), pp. 23–29, 2022.

5. Barsukov, R. V., "Device for ultrasound drilling of extraterrestrial objects," RU Patent 2 785 271, December 05, 2022.

*Khmelev Vladimir Nikolaevich* – Doctor in Technology, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

*Barsukov Roman Vladislavovich* – Ph. D. in Technology, Head of the Department of Research Work of Employees and Teachers, Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.

*Golykh Roman Nikolaevich* – Doctor in Technology, Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

*Barsukov Aleksandr Romanovich* – Master's student, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: alex\_bars@u-sonic.ru.

*Nesterov Viktor Aleksandrovich* – Ph. D. in Technology, Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

*Quan Qiquan* – Ph. D., Associate Professor, Harbin Institute of Technology, e-mail: quanqiquan@hit.edu.cn.