ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.9

Исследование динамики движения рабочих сред при вибрационной обработке деталей машин

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Р.Г. Тищенко, А.С. Букреева
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
Статья посвящена исследованию динамических характеристик движения гранулированных сред при вибрационной обработке деталей машин. Рассмотрены рабочие камеры различной формы и выполнена их классификация. Описано влияние формы и размеров рабочей камеры вибрационного станка, а также перегородок разнообразной конструкции, наиболее часто применяемых для интенсификации движения массы загрузки. Проведено компьютерное моделирование процесса обработки с использованием высокоскоростной видеосъемки. Программная обработка выполнялась методом прямого моделирования. Идентификация параметров, применяемых при моделировании, осуществлялась на основе результатов экспериментальных исследований, опубликованных различными авторами, а также собственных экспериментальных данных. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования технологий обработки деталей в вибрационных установках различной конфигурации.

Ключевые слова: вибрационная обработка, динамика процесса вибрационной обработки

Для цитирования: Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г., Букреева А.С. Исследование динамики движения рабочих сред при вибрационной обработке деталей машин. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):19–24.

Studying Working Media Motion Dynamics during Vibro-Abrasive Machining of Machine Parts

Mikhail A. Tamarkin, Elina E. Tishchenko, Roman G. Tishchenko, Anastasia S. Bukreeva
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The article analyses the dynamic properties of granular media motion during vibro-abrasive machining of machine parts. Vibratory chambers of various shapes were studied and classified. The influence of the shape and size of a vibratory chamber of a machine, as well as various partition designs most commonly used to intensify the motion of the loaded mass, were described. Computer simulation of the machining process was performed using the high-speed video recording. Software processing was performed by direct modeling method. The parameters used in the simulation were identified based on the experimental study results published by various authors, as well as our own experimental data. The obtained results can be used to design the technologies of machining the parts in vibratory facilities of various configurations.

Keywords: vibro-abrasive machining, dynamics of vibro-abrasive machining process

For Citation: Tamarkin MA, Tishchenko EE, Tishchenko RG, Bukreeva AS. Studying Working Media Motion Dynamics during Vibro-Abrasive Machining of Machine Parts. *Young Researcher of Don.* 2025;10(5):19–24.

Введение. Обработка в вибрирующих резервуарах на протяжении длительного времени применяется для окончательной обработки деталей машин в различных отраслях машиностроительного производства. Существует множество конструкций и модификаций вибрационных станков, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки, выявленные исследователями процесса. При этом популярность процессов обработки с использованием низкочастотных колебаний растет с каждым годом благодаря появлению новых схем, а также отличной возможности комбинирования

https://mid-journal.ru

© Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г., Букреева А.С., 2025

различных видов энергии для интенсификации и управления движением частиц. В работах основоположника вибрационной обработки — профессора А.П. Бабичева и его учеников [1–5] установлено, что форма рабочей камеры, содержащая дополнительные элементы в виде перегородок и вращающихся деталей, оказывает значительное влияние на производительность и качество обработки, существенно увеличивая скорость циркуляции массы загрузки. В результате, за последнее десятилетие было осуществлено множество исследований, посвященных взаимодействию рабочих камер различной формы с частицами рабочих сред. Установлено, что изменение формы рабочей камеры позволяет повысить интенсивность обработки примерно в 5 раз и более, исключая при этом образование застойных зон и встречных потоков, ухудшающих циркуляцию рабочей среды. Исследования по разработке новых конструкций рабочих камер весьма разнообразны — спроектированы различные варианты таких конструкций, некоторые из которых представлены на рис. 1–9 [1, 3, 5].

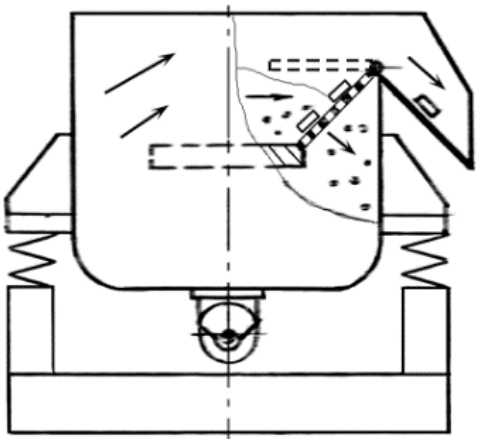

Рис. 1. Камера со вставкой

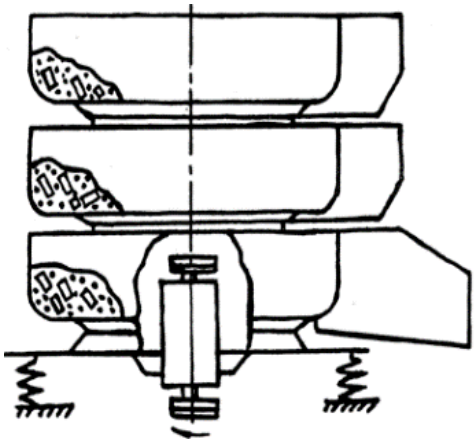

Рис. 2. Многокольцевая камера с вертикальной осью

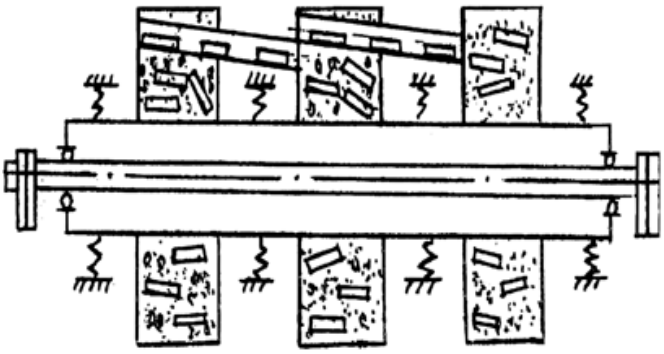

Рис. 3. Многокольцевая камера с горизонтальной осью

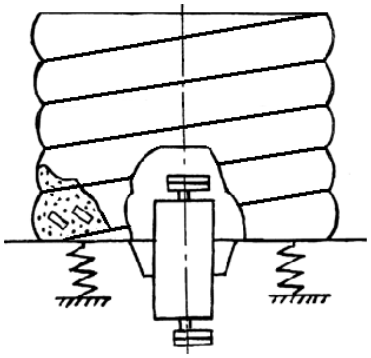

Рис. 4. Многовитковая камера с вертикальной осью

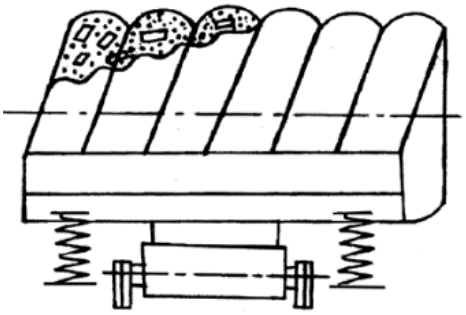

Рис. 5. Многовитковая камера
с горизонтальной осью

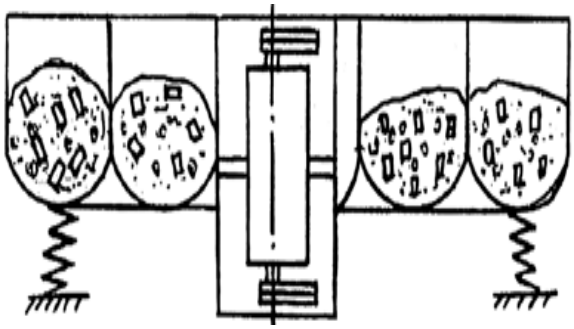

Рис. 6. Многоканальная планетарная камера
с вертикальной осью

https://mid-journal.ru

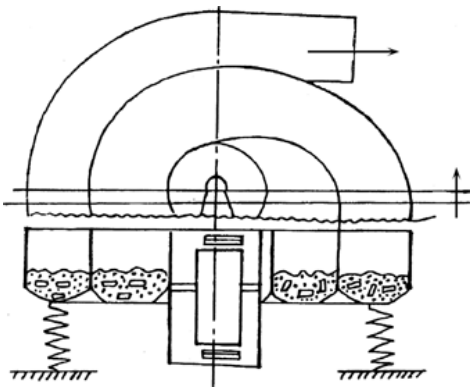

Рис. 7. Многовитковая планетарная камера с вертикальной осью

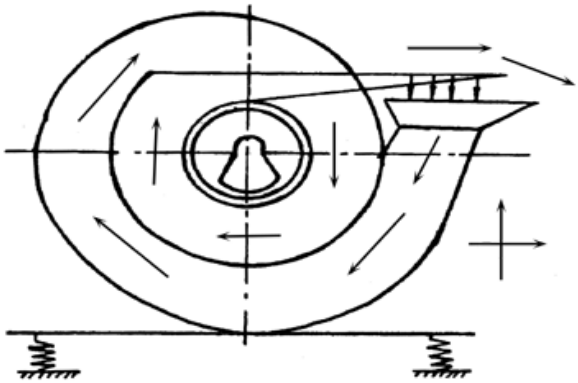

Рис. 8. Многовитковая планетарная камера с горизонтальной осью

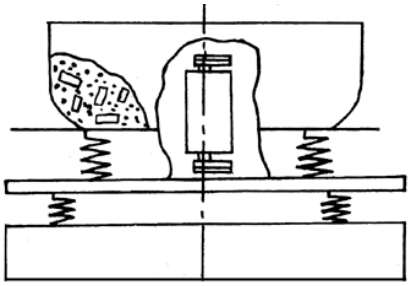

Рис. 9. Схема торового резонансного станка

Основная часть. Для рассмотренных конструкций рабочих камер ученые ведущих научных школ в области финишной обработки проводили теоретические и экспериментальные исследования, предлагая различные технологические решения для интенсификации процесса и расширения его возможностей. Анализируя эти результаты, можно прогнозировать, что все указанные конструкции способны обеспечить увеличение производительности обработки и качества поверхностного слоя деталей. Однако анализ процессов, происходящих в вибрационных камерах усложненной конструкции, не может быть осуществлен в ходе предварительных теоретических исследований, а их экспериментальные исследования требуют значительных затрат живого и овеществленного труда. Указанные обстоятельства вызывают необходимость компьютерного моделирования динамики движения массы загрузки в рабочих камерах вибрационных станков с применением упругих элементов для создания колебательных систем с большим числом степеней свободы. При этом важно создать и использовать компьютерные модели, позволяющие учесть особенности привода колебаний, создаваемых различными источниками (дебалансными, электромагнитными и др.).

В последние годы в механике возникло новое направление, посвященное исследованию движения гранулированных сред в технологических машинах, что требует серьезной математической проработки процессов и их моделирования. Это достаточно сложно выполнить только с использованием вычислительных средств, что привело к необходимости привлечения пакетов прикладных программ, позволяющих осуществлять моделирование процесса обработки и выполнять сложные вычисления за сравнительно короткие промежутки времени.

Многочисленные известные теоретические модели вибрационной обработки в гранулированных рабочих средах описывают единичное взаимодействие частиц рабочей среды с поверхностью обрабатываемых деталей, а также количество этих взаимодействий, приходящихся за единицу времени на единицу площади. Известные модели, используемые для проектирования технологических процессов вибрационной обработки с учетом указанных особенностей, позволяют рассчитывать производительность процесса обработки, а также шероховатость и физико-механические свойства обработанных деталей. Однако следует отметить, что часть технологических факторов, влияющих на результаты обработки, не может быть учтена на основе таких моделей. К ним относятся форма и скорость циркуляции частиц рабочей среды в различных областях рабочих камер, число соседних частиц, оказывающих влияние на процесс единичного взаимодействия, а также скорость и направление ударов гранул по обрабатываемой поверхности.

По мере увеличения интенсивности вибраций обеспечивается значительное повышение ускорения движения абразивных гранул, которое оценивается следующим параметром [4, 5]:

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g}, \quad (1)$$

где A — амплитуда колебаний, ω — угловая частота, g — ускорение свободного падения.

https://mid-journal.ru

Как указывают результаты известных исследований, рабочая среда в камерах вибрационных станков при увеличении скорости циркуляции за счет повышения амплитуды и частоты колебаний приобретает свойства жидкотекучести, а в дальнейшем — состояние псевдокипения.

В стадии псевдокипения можно выделить два характерных состояния: сегрегации частиц и интенсивного перемешивания. Второй режим псевдокипения реализуется при более интенсивных режимах вибрации.

Динамические характеристики циркуляционного движения массы загрузки в значительной мере зависят от формы и размеров гранул, а также сил трения между ними. Следует отметить значительную диссипацию энергии, подводимой к гранулам посредством их взаимодействия со стенками рабочей камеры.

На скорость и форму циркуляционного движения оказывает большое влияние диссипация энергии, которая обуславливает трение и соударение между гранулами, гранул с деталями, гранул со стенками рабочей камеры, деталей со стенками рабочей камеры и деталей между собой. Значительное влияние также оказывают размеры и форма рабочей камеры, высота массы загрузки, размеры, форма и зернистость абразивных гранул, а также материал облицовки рабочей камеры. При использовании смазочно-охлаждающих технологических средств величина диссипации, как правило, снижается. Все вышеуказанные явления вызывают распространение волны деформации массы загрузки. Днище и стенки рабочей камеры передают составляющим массы загрузки (гранулированная среда и детали) ударные импульсы. От пограничных слоев импульсы передаются соседним слоям вплоть до центра циркуляции среды.

Диссипация энергии, передаваемая стенкам рабочей камеры, вызывает ослабление передаваемых ударных импульсов, которое также зависит от абразивных свойств гранулированной среды и деталей, причем значительную роль играет соотношение их объемов, загружаемых в рабочую камеру.

При сохранении параметров вибрационного движения рабочей камеры происходит перемешивание слоев, находящихся на разном расстоянии от стенок. При этом нижние слои после движения вверх осуществляют обратное движение, в то время как верхние слои, испытывающие запаздывание импульсов, могут продолжать движение вверх, что способствует интенсивному перемешиванию компонентов массы загрузки. Сложность динамики движения гранулированной среды и деталей обуславливает применение различных сложных методов ее описания. При этом возможно использование моделей различной сложности: от самых простых до весьма сложных, требующих наличия серьезных пакетов прикладных программ и значительного времени расчета, включая многодневные.

Наиболее простой и известной моделью является одномассная модель вибротранспортирования тела по наклонной плоскости. С помощью известных параметров дифференциальных уравнений, описывающих это движение, можно определить такие характеристики, как режимы скатывания и подъема, а также наличие подбрасывания. Такие модели позволяют рассчитывать конструктивное оформление и режимы работы вибрационных машин [1].

Однако возможности этой модели, хорошо описывающей параметры, способствующие переходу к различным видам движения, не позволяют сравнивать результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований, поскольку в нашем случае движется не одномассное тело, а многослойная масса загрузки по стенкам рабочей камеры сложной формы.

Использование более сложных моделей позволяет учитывать особенности относительного движения слоев компонентов массы загрузки. Моделирование таких слоев в виде цепочки упруго связанных элементов дает возможность рассчитать максимальную высоту движущейся массы загрузки с учетом формы и размеров стенок рабочей камеры, а также коэффициента восстановления скорости при соударении элементов гранулированной среды с облицовкой стенок рабочей камеры и коэффициента трения при ударе. С помощью модели слоя в виде цепочки упруго связанных масс удалось предсказать зависимость максимальной высоты бункеруемой среды от угла вибрации и коэффициента трения.

$$h_{max} = \frac{\lambda}{2-\lambda} \cdot \frac{1-R}{1+R} \cdot l \cdot ctg\beta \,, \qquad (2)$$

где λ — коэффициент мгновенного вязкого трения, l — длины вибрирующей поверхности, R — коэффициент восстановления при ударе масс о вибрирующую поверхность.

Для идентификации свойств перемешиваемых слоев необходимо провести комплексные экспериментальные исследования с целью определения величины технологических параметров, описанных выше, с учетом их изменения в процессе перемещения слоев.

Второй разновидностью моделей с сосредоточенными параметрами является модель, описывающая динамику движения многомассных композиционных упруго-вязко-пластических тел. Данная модель отражает влияние технологических параметров на перемешивание слоев массы загрузки и позволяет оценить диссипацию подводимой энергии в зависимости от расстояния слоев от стенок рабочей камеры. Однако, учитывая особенности моделей с сосредоточенными параметрами, она не позволяет рассчитывать поведение движущихся слоев. Также следует отметить, что эта модель требует расширенного объема комплексных экспериментальных исследований процесса обработки.

Для более точного описания влияния вышеуказанных технологических факторов необходимо разрабатывать новые модели, приближенные к динамическим условиям гранулированной среды в рабочих камерах различной формы. Их создание стало возможным благодаря использованию компьютерного моделирования на современных ЭВМ с высокой скоростью выполнения операций. Специалистам известны модели, которые позволяют, задавая множество технологических параметров процесса вибрационной обработки, рассчитывать динамические параметры движения гранулированной рабочей среды. Однако такие модели не способны описывать взаимодействие гранулированной среды с деталями различной формы и размеров и ограничиваются исключительно описанием движения гранул.

Воспользовавшись цифровыми моделями, можно рассчитать характеристики воздействия стенок рабочей камеры на динамику движения слоев гранулированной среды. Это позволит при технологической подготовке производства выбирать рациональные диапазоны сочетания технологических параметров, включая выбор видов рабочих сред и параметров колебаний рабочей камеры, задаваемых вибраторами с использованием различных типов энергии привода.

Наиболее сложной задачей при создании таких моделей остается расчет параметров взаимодействия гранул с облицовкой рабочей камеры. При этом необходимо учитывать не только характеристики ударного взаимодействия, но и изменения направления и скорости движения гранул после удара. Результаты многочисленных экспериментальных исследований технологических процессов вибрационной обработки отражены в создании сравнительно простых моделей взаимодействия [2–5]. К сожалению, теоретические модели данного явления обеспечивают адекватные результаты лишь для гранул в виде металлических шариков, воздействующих на металлические стенки рабочей камеры. Учет характеристик соударения гранул с упругими материалами облицовок рабочих камер представляет собой значительные сложности.

Учитывая вышеизложенное, было проведено компьютерное моделирование динамики быстрого движения гранулированных сред, применимое к задаче проектирования виброкамер сложной формы с произвольным законом движения. Созданы компоновки различных сочетаний формы рабочей камеры и конфигурации перегородок, что позволило провести сравнительный анализ величин скоростей и ускорений частиц среды при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью, а также количества соседних гранул, влияющих на параметры единичного соударения.

Для оценки адекватности полученных моделей была проведена скоростная киносъемка движения частиц среды в некоторых вышеописанных конструкциях рабочих камер через прозрачную боковую стенку. Схема установки для регистрации движения среды и схема обработки информации представлены на рис. 10 и 11.

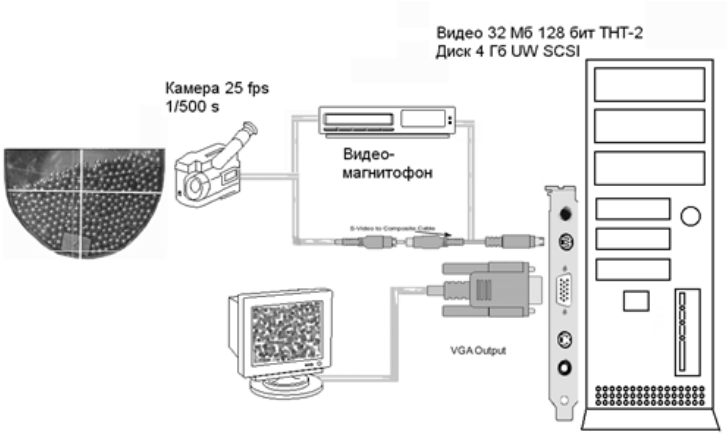

Рис. 10. Схема установки для регистрации кинематики рабочей среды в виброкамере

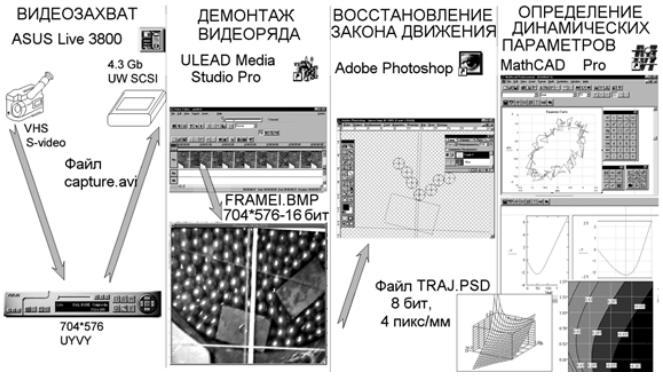

Рис. 11. Схема обработки информации при исследовании динамики рабочей среды в виброкамере

https://mid-journal.ru

Заключение. Компьютерная обработка результатов скоростной киносъемки подтвердила работоспособность полученных компьютерных моделей и совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Разница между показателями экспериментальных исследований и результатами, полученными в процессе компьютерного моделирования, не превышает 15–20%, что свидетельствует о высокой сходимости результатов проведенных исследований. В результате проведенных исследований новых типов рабочих камер и схем вибрационного возбуждения были определены области их эффективного технологического применения. Это позволит использовать полученные результаты при проектировании технологических процессов.

Список литературы

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. *Основы вибрационной технологии*. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ; 2008.

2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. *Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом*. Jermany: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2015. 140 с. URL: https://mybooklist.ru/book/oz154630865?ysclid=mdd4aw1wmi392219345 (дата обращения: 22.07.2025).

3. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Murugova EV. Design of High Precision Machining Part Processes in Free Abrasives. In: Shamtsyan M, Pasetti M, Beskopylny A (Eds.). *Proceedings of the Conference "Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture". Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol 247.* Singapore: Springer; 2022. P. 157–164. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_17

4. Шевцов С.Н. *Моделирование динамики гранулированных сред при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке.* Дис. докт. тех. наук. Ростов-на-Дону; 2001. 322 с.

5. Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Лебедев В.А., Пастухов Ф.А. Технология вибрационной стабилизирующей обработки изделий машиностроения. *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2018;(9(87)):20–26.

Об авторах:

Михаил Аркадьевич Тамаркин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), tehn_rostov@mail.ru

Элина Эдуардовна Тищенко, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), lina_tishenko@mail.ru

Роман Геннадьевич Тищенко, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), tishenkoroma@icloud.com

Анастасия Сергеевна Букреева, аспирантка кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), anastasya.bukreewa@yandex.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Mikhail A. Tamarkin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), tehn_rostov@mail.ru

Elina E. Tishchenko, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), lina_tishenko@mail.ru

Roman G. Tishchenko, Master's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), tishenkoroma@icloud.com

Anastasia S. Bukreeva, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), anastasya.bukreewa@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.