

УДК 62-225.78:62-226

**КОНТРОЛЬ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ
ЛОПАТОК МОНОКОЛЕСА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ**

**CONTROL THE SHAPE AND POSITION OF THE PROFILE BLADES
OF THE BLISK OF A GAS TURBINE**

**Криони Н.К., Новиков А.В., Мингажев А.Д., Наумкин Е.А.,
Сафин Э.В., Янсаитова М.И., Гафарова В.А.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет»,**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»,**

**ООО Производственное предприятие «Турбинаспецсервис»,
г. Уфа, Российская Федерация**

**N.K. Krioni, A.V. Novikov, A.D. Mingazhev, E.A. Naumkin,
E.V. Safin, M.I. Iansaitova, V.F. Gafarova**

**FSBEI HPE “Ufa State Aviation Technological University”,
FSBEI HPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
LLC Production Company “Turbinaspecservice”,
Ufa, the Russian Federation**

e-mail: Flinchik@rambler.ru

Аннотация. Рабочие лопатки и моноколеса газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) подвергаются тщательному контролю по всем важнейшим характеристикам и параметрам, как до сборки, так и после нее. Важнейшими параметрами моноколеса являются его геометрические и размерные характеристики. Одной из задач контроля сложных деталей и узлов ГТД и ГТУ является обеспечение их заданных размерных и геомет-

рических характеристик. Традиционные методики оценки геометрических и размерных характеристик деталей ГТД и ГТУ часто характеризуются отсутствием четких взаимосвязей между несколькими разнородными измеряемыми параметрами деталей, что часто не позволяет объективно оценить соответствие детали или узла их функциональному назначению. Это обстоятельство приводит к их необоснованной отбраковке деталей, находящихся в пределах приемлемого диапазона допустимых значений или, что еще опаснее, не отбраковываются детали, которые по своим эксплуатационным свойствам могут не соответствовать заданным. Традиционные методы контроля формы и положения профиля рабочих лопаток заключается в следующем. Лопатку и шаблон неподвижно фиксируют в базовом приспособлении, форму профиля лопатки в заданном сечении контролируют с помощью шаблонов, а положение контролируют в тангенциальном направлении относительно теоретической оси лопатки с помощью глубиномера. Контроль выполняют не менее чем в трех сечениях. Использование традиционных способов контроля формы и положения рабочих лопаток применительно к оценке параметров моноколеса может привести к возникновению ошибки. Это связано с рядом таких факторов, как неподвижное закрепление шаблона, приводящее к ряду ограничений контроля формы и положения лопатки относительно ее теоретической оси, что приводит к необоснованной отбраковке годного изделия.

В этой связи, на предприятии ООО «Турбинаспецсервис» совместно с Уфимским государственным авиационным техническим университетом и Уфимским государственным нефтяным техническим университетом был разработана и исследована новая методика контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса, применительно как к новым, так и восстанавливаемым при ремонте лопаткам газовых турбин. Целью создания указанной методики являлось повышение достоверности результатов контроля лопаток моноколеса и, как следствие, уменьшение количества отбракованных изделий.

Abstract. Rotor blades and turbine engine blisk and installations are being monitored closely in all important characteristics and parameters as before Assembly and after it. The most important parameters of the blisk are its geometric and dimensional characteristics. One of the objectives of the control of complex parts and assemblies gas turbine engine (GTE) and gas turbine units (GTU) is providing them with the specified dimensional and geometric characteristics. Traditional methods for the assessment of geometric and dimensional characteristics of GTE parts and GTU are often characterized by a lack of clear relationships between multiple heterogeneous measured parameters details that are often not objectively evaluate the part or host their functional purpose. This circumstance leads to unjustified rejection of parts that are within an acceptable range of values, or, even more dangerous, not rejected parts, which on the operational properties may not meet the specified. Traditional methods of controlling the shape and position of the profile blades is as follows. The blade and the template still fixed in the base device, the profile shape of the blade in the specified section of the control using templates, and the position control in the tangential direction relative to the theoretical axis of the scapula using the depth gauge. The monitoring is performed in at least three sections. The use of traditional methods to control the shape and position of the blades with respect to the estimation of the parameters of the blisk may result in an error. It is associated with several factors such as stationary fixation of the template, leading to a number of constraints to control the shape and position of the blade relative to its theoretical axis, which leads to unjustified rejection of a suitable product.

In this regard, the company LLC "Turbinectomies" with Ufa state aviation technical University Ufa state oil technical University was developed and investigated a new method to control the shape and position of the blades of the blisk, in both the new and restored when repairing the gas turbine blades. To create the specified technique was to increase the reliability of the control blades of the blisk and, as a consequence, reducing the number of rejected products.

Ключевые слова: рабочие лопатки ГТД и ГТУ, моноколеса газовых турбин, геометрические и размерные характеристики, измеряемые параметры, необоснованная отбраковка, шаблон, профиль лопатки.

Key words: blades of GTE and GTU, gas turbine blisk, geometric and dimensional characteristics, measured parameters, unjustified rejection, template, profile blades.

Известно, что детали и узлы ГТД и ГТУ, в частности, моноколеса газовых турбин подвергаются тщательному контролю по всем важнейшим характеристикам и параметрам, как до сборки в составе двигателя, так и после нее [1]. При этом к важнейшим параметрам моноколеса относятся его геометрические и размерные характеристики. Одной из задач контроля сложных деталей и узлов ГТД и ГТУ является обеспечение заданных размерных и геометрических характеристик ГТД и ГТУ. В то же время отсутствие взаимосвязи измеряемых параметров деталей, например, между расположением и геометрией элементов изделия и его размерными характеристиками не позволяет объективно оценить соответствие того или иного узла или детали их функциональному назначению. Последнее может привести к необоснованной отбраковке деталей, находящихся в пределах приемлемого диапазона допустимых значений или, что еще опаснее, не отбраковать детали, которые не соответствуют заданным эксплуатационным характеристикам.

Существуют различные методы контроля формы и положения профиля рабочих лопаток моноколеса или диска с лопатками (рисунок 1). Например, традиционная методика оценки формы и положения профиля рабочих лопаток [2,3] заключается в следующем. Лопатку и шаблон неподвижно фиксируют в базовом приспособлении, форму профиля лопатки в заданном сечении контролируют с помощью шаблонов, а положение контролируют в тангенциальном направлении относительно теоретической оси ло-

патки с помощью глубиномера. Контроль выполняют не менее чем в трех сечениях.

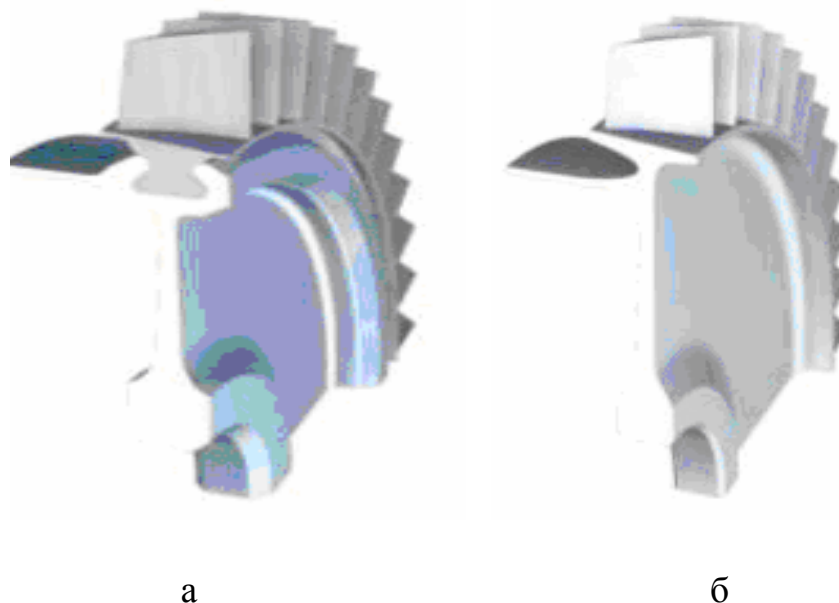


Рисунок 1. Внешний вид моноколеса и диска с лопатками:

- а) соединение лопаток с дисками типа «ласточкин хвост»;
- б) моноколесо – рабочее колесо, в котором лопатки выполнены с диском за одно целое

Однако использование традиционных способов контроля формы и положения рабочих лопаток [2,3] применительно к оценке параметров моноколеса может привести к возникновению ошибки. Поскольку шаблон закреплен неподвижно, то контроль формы и положения лопатки относительно ее теоретической оси может быть осуществлен только в тангенциальном направлении, при этом в аксиальном направлении контроль не осуществляется, т.е. отсутствует вторая координата, что не позволяет определить в контролируемом сечении положение истинной оси лопатки относительно теоретической. Кроме того неподвижное закрепление шаблона не позволяет контролировать форму лопатки в том случае, когда лопатка развернута в сечении, что приводит к необоснованной отбраковке годной лопатки. Все перечисленные факторы влияют на снижение достоверности и информативности результатов проводимого контроля и приводят к необоснованному увеличению количества отбраковываемых изделий.

В этой связи, на предприятии ООО «Турбинаспецсервис» совместно с Уфимским государственным авиационным техническим университетом и Уфимским государственным нефтяным техническим университетом была разработана и исследована новая методика контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса [4], применительно как к новым, так и восстанавливаемым при ремонте лопаткам газовых турбин. Целью создания указанной методики являлось повышение достоверности результатов контроля лопаток с диском и лопаток моноколеса и, как следствие, уменьшение количества необоснованно отбракованных изделий.

Сущность методики контроля формы и положения профиля рабочих лопаток моноколеса [4] заключается в следующем. Последовательно контролируют форму профиля лопатки в заданных сечениях при помощи шаблонов путем совмещения в заданном сечении рабочей поверхности шаблона с лопаткой, исходя из базового положения шаблона по чертежу. Шаблон перемещают в плоскости, перпендикулярной теоретической оси лопатки, а положение лопатки в заданном сечении контролируют в тангенциальном направлении путем определения положения ее профиля относительно теоретической оси лопатки. В заданном сечении контролируют положение профиля лопатки в аксиальном направлении и наличие отклонения реальной оси лопатки от теоретической, для чего лопатки фиксируют в заданном положении и диск закрепляют неподвижно. Диск перемещают на шаг расположения с возможностью поворота шаблона вокруг теоретической оси лопатки, затем в заданном сечении прикладывают эталон к поверхности лопатки и, перемещая шаблон в тангенциальном и аксиальном направлениях, и поворачивая шаблон, добиваются наиболее полного совмещения поверхности лопатки с рабочей поверхностью шаблона. Фиксируют величину смещения шаблона от исходного положения: в тангенциальном и аксиальном направлениях, а также угол и направление поворота лопатки. Затем моноколесо пошагово поворачивают и контролируют положение профиля остальных лопаток.

Использование шаблонов для контроля формы профиля лопатки путем совмещения рабочей поверхности шаблона с поверхностью лопатки, позволяет выявить в контролируемом сечении наличие отклонения истинной формы профиля лопатки от заданной формы. Последовательное выполнение контроля формы и положения профиля лопатки в заданных сечениях обеспечивает контроль любого сечения лопатки и позволяет получить общее представление о соответствии изготовленной лопатки требуемым нормам.

Благодаря тому, что при контроле шаблон перемещают в плоскости, перпендикулярной теоретической оси лопатки, обеспечивается возможность контроля формы и положения профиля лопатки в тангенциальном и в аксиальном направлениях относительно теоретической оси лопатки, что повышает достоверность и информативность методики контроля. Возможность поворота шаблона позволяет, перемещая и поворачивая шаблон в тангенциальном и аксиальном направлениях, получить наиболее полное совмещение поверхности профиля лопатки с рабочей поверхностью шаблона. В результате, возможность поворота шаблона вокруг теоретической оси позволяет получить информацию о форме профиля и положении лопатки в заданном сечении относительно теоретической оси лопатки, т.е. получить информацию, максимально приближенную к реальной, максимально снизить ошибку результатов контроля и, тем самым, исключить брак изделий.

Кроме того, возможность поворота шаблона автоматически позволяет проконтролировать форму профиля лопатки в случае, если она развернута.

Закрепление шаблона с возможностью поворота позволяет контролировать наличие отклонения реальной оси лопатки от теоретической, для чего фиксируют угол и направление поворота шаблона относительно лопатки. Кроме того, фиксируемые величины смещения шаблонов от исходного состояния в тангенциальном и аксиальном направлениях можно рассматривать как пространственные координаты, определяющие истинное

положение реальной оси лопатки относительно теоретической, что в совокупности с вышеизложенным позволяет не только зафиксировать наличие отклонения реальной оси лопатки от теоретической, но и определить пространственное положение реальной оси лопатки в контролируемом сечении.

Вследствие того, что фиксируется величина смещения шаблона относительно теоретической оси лопатки в тангенциальном и в аксиальном направлениях, а также фиксируется направление и угол поворота лопатки, возникает возможность количественной оценки результатов контроля. Наличие количественных результатов, характеризующих истинную форму и положение лопатки, позволяет сравнить их с расчетными параметрами и сделать выводы в отношении пригодности моноколеса к эксплуатации.

Реализация разработанной методики [4] осуществлялось при помощи следующего устройства (рисунок 2). Устройство, содержит моноколесо 1, фиксатор для закрепления лопатки, выполненный с пазом 2, вертикальную стойку 3, каретку 4, шаблоны 5 для контроля формы профиля рабочей лопатки моноколеса. Рабочая поверхность шаблонов 5 имеет форму, конгруэнтную форме теоретического профиля лопатки в контролируемом сечении. Фиксатор для закрепления лопатки имеет паз 2, который может, например, совпадать по форме и геометрическим размерам с центральным отверстием на диске моноколеса. Фиксатор снабжен нониусом со шкалой для фиксации угла поворота. Вертикальная стойка 3 перпендикулярна фиксатору и соединена с ним с возможностью поворота относительно пера лопатки моноколеса. На вертикальной стойке 3 под прямым углом установлен с возможностью перемещения в тангенциальном и аксиальном направлениях шаблон 5. На вертикальной стойке 3 выполнены отметки для установки шаблона 5 в контролируемое сечение лопатки. Шаблоны 5-сменные. Для этого на вертикальной стойке 3 установлена каретка 4 с пазом 6 для шаблона 5. Шаблон 5 размещен в пазу 6 каретки 4 с возможностью перемещения в тангенциальном направлении, а каретка 4 закреплена

на горизонтальной рейке 7 с возможностью перемещения в аксиальном направлении. Для количественной оценки величины отклонения положения шаблонов от исходного при их перемещении в тангенциальном и аксиальном направлениях устройство содержит нониусы 8, 9, которые выполнены на поверхностях шаблона 5 и горизонтальной рейки 7 соответственно. При этом одна из встречных кромок 10 паза 6 каретки 4 снабжена указателем 11 перемещения шаблона в тангенциальном направлении. Выполнение паза 2 совпадающим по форме и геометрическим размерам с центральным отверстием моноколеса обеспечивает возможность надежного закрепления моноколеса в фиксаторе. Использование вертикальной стойки 3 перпендикулярной фиксатору и контролируемые лопатки находятся в вертикальном положении, а также положение оси вертикальной стойки 3 параллельно теоретической оси лопатки позволяет зафиксировать в пространстве теоретическую ось лопатки и обеспечивает возможность перемещения шаблонов в плоскости, перпендикулярной теоретической оси лопатки.

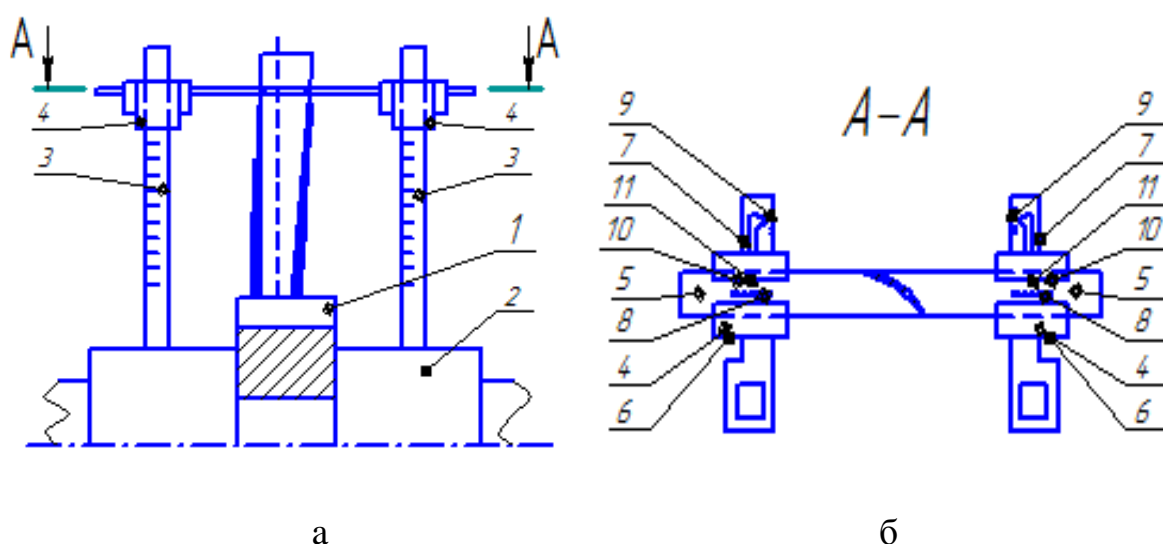


Рисунок 2. Устройство для контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса: а - устройство для контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса; б - устройство вид сверху (сечение): 1- моноколесо, 2- фиксатор для закрепления лопатки, 3- вертикальная стойка, 4- каретка, 5- шаблоны для контроля формы профиля рабочей лопатки моноколеса, 6 паз каретки, 7 горизонтальная рейка, 8, 9, нониусы, 10 кромка паза каретки 11 указатель перемещения шаблона в тангенциальном направлении

В процессе оценки технических характеристик использовалось следующее измерительное оборудование: координатно-измерительная машина ROMER Multi GAGE, трехмерная оптическая система «ATOS II», координатно-измерительная машина ACCURA II фирмы Carl Zeiss. Погрешность линейного измерения указанного оборудования: ROMER - 10 мкм, «ATOS II» - 5 мкм, ACCURA II - 1,6 мкм.

Результаты исследования методики оценки контроля формы и положения рабочих лопаток моноколес и лопаток с дисками показал, что при использовании традиционных методик [2,3] часто происходит необоснованная отбраковка изделий, величина которой составляет от 7 до 11% от всего объема контролируемой продукции. При этом при замере ремонтных вариантов необоснованная отбраковка изделий составляет от 8 до 11%, а при оценке новых изделий от 7 до 10%. Характерная картина разброса значений отбраковки изделий приведена на рисунке 3.

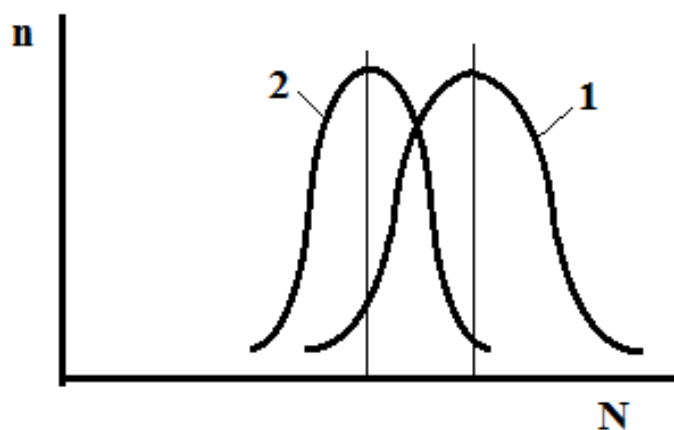


Рисунок 3. Характерная картина разброса значений отбраковки изделий: 1 – при традиционном контроле; 2 – при разработанной методике контроля

Выводы

Таким образом, разработанная авторами новая методика контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса позволяет повысить достоверность результатов контроля лопаток с диском и лопаток моноколеса и, как следствие, уменьшить количество необоснованно отбракованных

изделий. Средняя величина необоснованно отбракованных изделий составляет от 7 до 11% от всего объема контролируемой продукции. Величина необоснованно отбракованных изделий при оценке ремонтных вариантов составляет от 8 до 11%, а при оценке новых изделий от 7 до 10%.

Список используемых источников

1 Pat. 8,931,184. United States C1G01B 5/008 Method for dimensionally inspecting a component of a gas turbine system./ Fulton; Blake Allen, Baummer; James Carroll, Bellino; Mark Carmine and etc. applicant and assignee General Electric Company.– № 13/476,253; declared 21.05. 2012; published 13.01.2015; 8 p.

2 Технология производства паровых и газовых турбин/ Бауман Н.Я. [и др.] М.: Машиностроение. 1973. 466 с.

3 Бушуев М.Н. Технология производства турбин. М.: Машиностроение. 1966. 418 с.

4 Способ контроля формы и положения рабочих лопаток моноколеса/ Мингажев А.Д. [и др.]: пат. РФ № 2014120582; заявл. 21.05.2014. 8 с.

References

1 Pat. 8,931,184. United States C1G01B 5/008 Method for dimensionally inspecting a component of a gas turbine system./ Fulton; Blake Allen, Baummer; James Carroll, Bellino; Mark Carmine and etc. applicant and assignee General Electric Company. № 13/476,253; declared 21.05. 2012; published 13.01.2015; 8 p. [in English].

2 Tehnologiya proizvodstva parovyh i gazovyh turbin/ Bauman N.Ya. [i dr.] M.: Mashinostroenie. 1973. 466 s. [in Russian].

3 Bushuev M.N. Tehnologiya proizvodstva turbin. M.: Mashinostroenie. 1966. 418 s. [in Russian].

4 Sposob kontrolya formy i polozheniya rabochih lopatok monokolesa/
Mingazhev A.D. [i dr.]: pat. zayavka № 2014120582, Ros. Federaciya; zayavl.
21.05.2014. 8 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Криони Н.К., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
«Технология машиностроения», ректор ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа,
Российская Федерация

N.K. Krioni, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair
“Technology of Mechanical Engineering”, Rector of FSBEI HPE USATU, Ufa,
the Russian Federation

e-mail: krioni@mail.rb.ru

Новиков А.В., генеральный директор ООО «Производственное
предприятие Турбинаспецсервис», г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Novikov, General Director of LLC “Turbinaspezservis”, Ufa,
the Russian Federation

e-mail: info@turbinass.ru

Мингажев А.Д., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические
машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская
Федерация

A.D. Mingazhev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of
the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa,
the Russian Federation

e-mail: MAD-20007@yandex.ru

Наумкин Е.А., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E.A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: ynaumkin@mail.ru

Сафин Э.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Стандартизации и сертификации» ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E.V. Safin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Standardization and Certification”, FSBEI HPE USATU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: edsafin@ufamail.ru

Янсаитова М.И., аспирант кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа, Российская Федерация

M.I. Iansaitova, Post-graduate Student of the Chair “Technology of Mechanical Engineering”, FSBEI HPE USATU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: mily-008@mail.ru

Гафарова В.А., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.A. Gafarova, Post-graduate Student of the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: flinchik@rambler.ru