

УДК 621.7.06

## Исследование взаимодействия частиц в магнитном поле рабочего пространства магнитно-абразивного устройства

В.А. Полетаев, Л.К. Чернов  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
Иваново, Российская Федерация  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Ввиду того, что при магнитной галтовке полирование деталей происходит за счет соударения перемещаемого магнитным полем наполнителя и обрабатываемых деталей, а магнитное поле в качестве средства передачи обрабатывающего усилия позволяет управлять потоком наполнителя, движущегося в соответствии с конфигурацией магнитного поля, индуцируемого постоянными магнитами, необходим метод расчета взаимодействия частиц в магнитном поле.

**Материалы и методы:** Используется математическое моделирование магнитного поля на основе метода конечных элементов. Исследуется магнитное поле около частиц наполнителя и обрабатываемой детали.

**Результаты:** Рассмотрено общее строение и принцип магнитной галтовки. Приведено описание взаимодействия частицы галтовочного наполнителя и постоянного магнита при магнитной галтовке. Приведен метод расчета результирующей силы взаимодействия магнита и частицы наполнителя.

**Выводы:** Представленный метод расчета взаимодействия частиц в магнитном поле позволяет определять не только направление вектора магнитного взаимодействия в системе постоянный магнит – частица галтовочного наполнителя, но и его модуль, траекторию движения отдельной частицы в рабочем объеме магнитно-абразивного устройства, объем наполнителя и силу действия наполнителя на обрабатываемую поверхность детали.

**Ключевые слова:** галтовка, магнитная галтовка, частица наполнителя, постоянный магнит, математическое моделирование.

## Research of Particle Interactions in Magnetic Field of Operating Space of Magnetoabrasive Device

V.A. Poletayev, L.K. Chernov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Abstract

**Background:** The calculation method of particle interactions in magnetic field is necessary because of two reasons. First of all, while the magnetic tumbling the parts polishing is possible because of the impact of filler, moving with magnetic field, and workpieces. The magnetic field as a means of operating effort transmission allows to control the filler flow, which moves in accordance with the configuration of the magnetic field induced by the permanent magnets. Therefore, a method for calculating the interaction of particles in the magnetic field.

**Materials and methods:** The authors apply the method of mathematical simulation of the magnetic field on the basis of the finite element method. The magnetic field around the filler particles and the workpiece are studied.

**Results:** The article describes the general structure and the principle of magnetic tumbling. The description of particle interaction of tumbling filler and a permanent magnet with magnetic tumbling is given. The calculation method of the interaction net force of the magnet on the filler particles is presented.

**Conclusions:** The presented calculation method of particle interactions in magnetic field allows to determine not only the direction of the magnetic interaction vector in the system of permanent magnet – particle of the tumbling filler, but also its module, the trajectory of a particle movement in the working volume of magnetoabrasive device, the volume of filler and filler efficiency on the operational surface of details.

**Key words:** tumbling, magnet tumbling, filler particle, permanent magnet.

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель. Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, окруженном постоянными магнитами, в который загружены наполнитель, представляющий короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая жидкость. Полирование деталей

происходит за счет соударения перемещаемого магнитным полем наполнителя и обрабатываемых деталей. Магнитное поле в качестве средства передачи обрабатывающего усилия позволяет управлять потоком наполнителя, так как он движется в соответствии с конфигурацией магнитного поля, индуцируемого постоянными магнитами.

Устройство для магнитной галтовки состоит из двигателя, вращающего подвижный диск с закрепленными на нем постоянными магнитами и неподвижным рабочим объемом с наполнителем, в котором происходит магнитно-абразивная обработка [1, 2].

Под воздействием подвижного магнитного поля ферромагнитный галтовочный наполнитель в рабочем объеме перемещается и создает обрабатывающее усилие на поверхности детали.

Рассмотрим взаимодействие частицы галтовочного наполнителя и постоянного магнита, индуцирующего магнитное поле, в рабочем объеме магнитно-абразивного устройства. Возможны четыре схемы взаиморасположения частицы и магнита при обработке деталей:

- 1) постоянный магнит приближается к частице, находящейся в покое;
- 2) постоянный магнит находится под частицей;
- 3) частица подброшена силой магнитного взаимодействия;
- 4) частица следует за постоянным магнитом.

Наиболее сложными являются условия взаимодействия между частицей и магнитом для четвертой позиции. Ферромагнитное тело, находящееся в магнитном поле, намагничивается и становится постоянным магнитом, поэтому можно рассматривать частицу наполнителя как слабый постоянный магнит.

Примем, что частица обращена своим южным полюсом к южному полюсу постоянного магнита. Определим поведение частицы наполнителя в данном случае. Для этого необходимо знать модуль и направление вектора силы магнитного взаимодействия  $F_m$ . Сложив вектор  $F_m$  со всеми действующими на частицу силами, получим итоговый вектор направления движения частицы  $V_{д.ч}$ . Его модуль будет определять суммарную силу, действующую на частицу. Силе магнитного взаимодействия противодействуют сила трения, сила сопротивления среды и сила тяжести частицы.

Определяя вектор  $F_m$ , рассмотрим магнитное взаимодействие как сумму четырех составляющих (рис. 1):

- 1)  $F_{m1}$  – сила магнитного отталкивания, приложенная к северному полюсу частицы  $N_1$  в точке А (центральная точка боковой поверхности частицы) и направленная от северного полюса постоянного магнита  $N_2$ ;
- 2)  $F_{m2}$  – сила магнитного отталкивания, приложенная к южному полюсу частицы  $S_1$  в точке Б (центральная точка боковой поверхности частицы) и направленная от южного полюса постоянного магнита  $S_2$ ;
- 3)  $F_{m3}$  – сила магнитного притяжения, приложенная к северному полюсу частицы  $N_1$  в

точке А и направленная от северного полюса постоянного магнита  $N_2$ ;

4)  $F_{m4}$  – сила магнитного притяжения, приложенная к южному полюсу частицы  $S_1$  в точке Б и направленная от южного полюса постоянного магнита  $S_2$ .

Рассчитаем результирующие векторы сил притяжения и сил отталкивания. Совместим точки А и Б, для того чтобы проанализировать группу из четырех векторов (рис. 2,а). Сложим векторы сил магнитного отталкивания и магнитного притяжения и получим результирующие векторы  $F_{m\text{отт}}$  и  $F_{m\text{пр}}$  (рис. 2,б). Сравним их модули (рис. 3,а) и сложим (рис. 3,б).

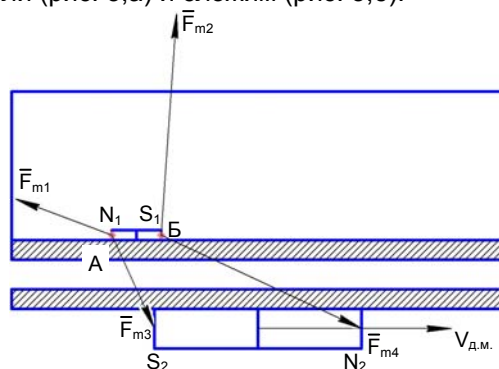


Рис. 1. Схема частица–постоянный магнит с нанесенными векторами  $F_{m1}$ ,  $F_{m2}$ ,  $F_{m3}$  и  $F_{m4}$ :  $N_1$  – северный полюс частицы;  $N_2$  – северный полюс постоянного магнита;  $S_1$  – южный полюс частицы;  $S_2$  – южный полюс постоянного магнита; А – центральная точка северного полюса частицы; Б – центральная точка южного полюса частицы;  $V_{д.м.}$  – направление движения постоянного магнита

Очевидно, что модуль вектора силы отталкивания частицы меньше силы притяжения. Результирующий вектор – сумма векторов силы магнитного притяжения и силы магнитного отталкивания. Сложение векторов дает результирующий вектор силы магнитного взаимодействия, указывающий направление действия силы и откладываемый от геометрического центра частицы.

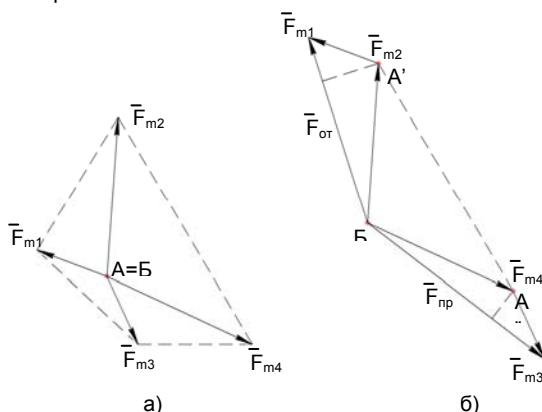


Рис. 2. Векторы сил магнитного притяжения и отталкивания: а – совмещение векторов в одной начальной точке; б – сложение векторов

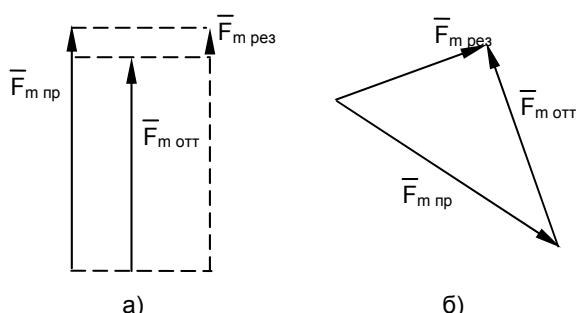


Рис. 3. Сравнение модулей силы магнитного притяжения и силы магнитного отталкивания: а – сумма результирующего вектора магнитного притяжения и магнитного отталкивания; б – вектор магнитного взаимодействия

Рассмотрим одновременно векторы сил магнитного притяжения, магнитного отталкивания и результирующего вектора магнитного взаимодействия, нанеся их на схему частица–постоянный магнит (рис. 4).

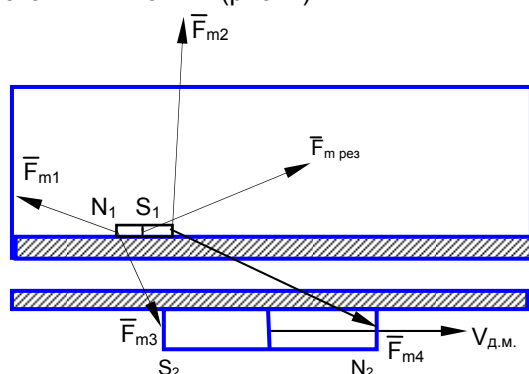


Рис. 4. Результирующий вектор силы магнитного взаимодействия:  $F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}$  и  $F_{m4}$  – векторы магнитного взаимодействия;  $F_{m\text{ рез}}$  – результирующий вектор магнитного взаимодействия;  $N_1$  – северный полюс частицы;  $N_2$  – северный полюс постоянного магнита;  $S_1$  – южный полюс частицы;  $S_2$  – южный полюс постоянного магнита; А – центральная точка северного полюса частицы; Б – центральная точка южного полюса частицы;  $V_{д.м.}$  – направление движения постоянного магнита

Поведение частицы определяется модулем и направлением результирующего вектора силы магнитного взаимодействия, ей противостоят сила тяжести, сила сопротивления среды и сила трения. Нанесем на схему постоянный магнит–частица противодействующие силы и вектор силы магнитного взаимодействия  $F_{m\text{ рез}}$ .

Методом сложения векторов определим искомый вектор  $V_{д.ч}$  – вектор направления движения частицы (рис. 5).

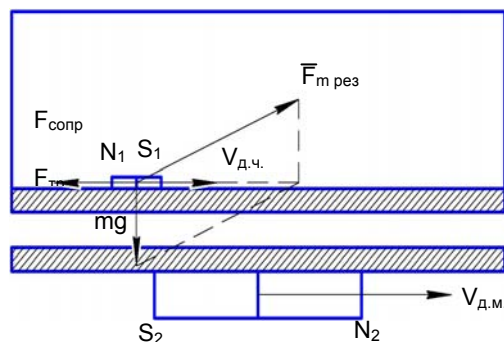


Рис. 5. Векторы сил, действующих на частицу:  $V_{д.ч}$  – вектор направления движения частицы;  $F_{сопр}$  – сопротивление среды;  $F_{тр}$  – сила трения;  $mg$  – сила тяжести;  $N_1$  – северный полюс частицы;  $N_2$  – северный полюс постоянного магнита;  $S_1$  – южный полюс частицы;  $S_2$  – южный полюс постоянного магнита;  $V_{д.м.}$  – направление движения постоянного магнита

Для определения направления и модуля вектора  $V_{д.ч}$  необходимо знать направление и модуль всех сил, воздействующих на частицу. Направление и модули сил трения, сопротивления среды, тяжести, действующих на частицу, известны, следовательно, необходимо рассчитать направление и модуль  $F_{m\text{ рез}}$ .

Нахождение вектора сил магнитного притяжения и отталкивания позволит определить направление движения частиц и модуль  $F_{m\text{ рез}}$  для случая рассчитанных углов отклонения векторов  $F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4}$  при известных модулях.

Рассчитаем углы отклонения для сил отталкивания  $F_{m1}, F_{m2}$  (рис. 6):

$$\angle\alpha = \text{arctg}(h/l);$$

$$\angle\beta = \text{arctg}(l_2/h) + 90^\circ,$$

где  $l$  – проекция на ось  $x$  расстояния между северным полюсом постоянного магнита и северным полюсом частицы;  $l_2$  – проекция на ось  $x$  расстояния между южным полюсом постоянного магнита и южным полюсом частицы;  $h$  – проекция на ось  $y$  расстояния между центром постоянного магнита и центром частицы.

Угол между векторами  $F_{m1}, F_{m2}$  (рис. 7) составляет

$$\angle\gamma = \angle\alpha + \angle\beta.$$

Итак, известны модули  $F_{m1}, F_{m2}$  и угол  $\gamma$ .

Рассчитаем модуль силы отталкивания:

$$F_{\text{мощ}} = \sqrt{F_{m1}^2 + F_{m2}^2 - 2F_{m1}F_{m2}\cos\gamma}.$$

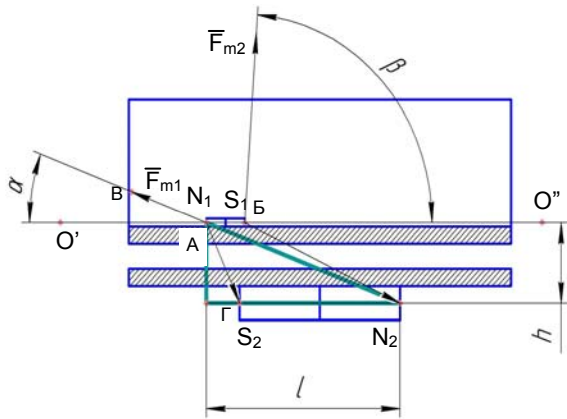


Рис. 6. Схема взаимодействия постоянного магнита и частицы наполнителя с нанесенными размерами и углами:  $l$  – проекция на ось  $x$  расстояния между северным полюсом постоянного магнита и северным полюсом частицы;  $h$  – проекция на ось  $y$  расстояния между центром постоянного магнита и центром частицы;  $O'O''$  – горизонталь;  $\angle\alpha$  – отклонение вектора  $F_{m1}$  от горизонтали  $O'O''$ ;  $\angle\beta$  – отклонение вектора  $F_{m2}$  от горизонтали  $O'O''$

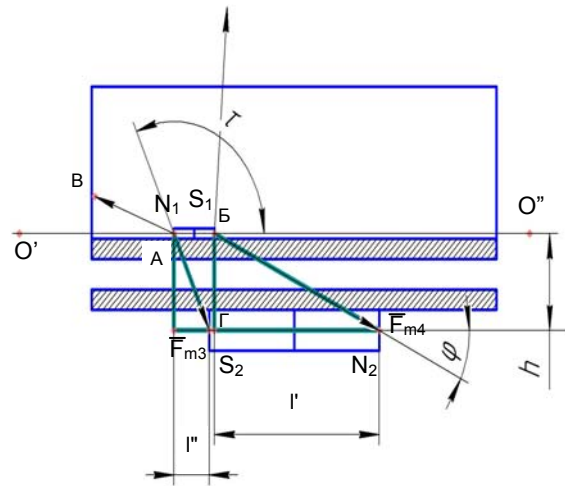


Рис. 8. Схема взаимодействия постоянного магнита и частицы наполнителя с нанесенными размерами и углами:  $l'$  – проекция на ось  $x$  расстояния между северным полюсом постоянного магнита и южным полюсом частицы;  $l''$  – проекция на ось  $x$  расстояния между южным полюсом постоянного магнита и северным полюсом частицы;  $h$  – проекция на ось  $y$  расстояния между центром постоянного магнита и центром частицы;  $O'O''$  – горизонталь;  $\angle\varphi$  – отклонение вектора  $F_{m4}$  от горизонтали  $O'O''$ ;  $\angle\tau$  – отклонение вектора  $F_{m3}$  от горизонтали  $O'O''$

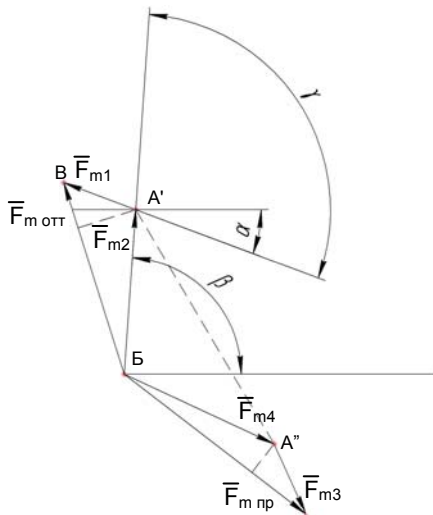


Рис. 7. Расчет угла  $\gamma$  и модуля силы магнитного отталкивания

Углы отклонения для сил отталкивания  $F_{m1}$ ,  $F_{m2}$  (рис. 8) рассчитываются, соответственно, как

$$\angle\varphi = \arctg(h/l'); \\ \angle\tau = \arctg(l''/h) + 90^\circ,$$

где  $l'$  – проекция на ось  $x$  расстояния между северным полюсом постоянного магнита и южным полюсом частицы;  $l''$  – проекция на ось  $x$  расстояния между южным полюсом постоянного магнита и северным полюсом частицы;  $h$  – проекция на ось  $y$  расстояния между центром постоянного магнита и центром частицы.

Рассчитаем угол между векторами  $F_{m3}$ ,  $F_{m4}$  (рис. 9):  $\angle\omega = \angle\varphi + \angle\tau$ .

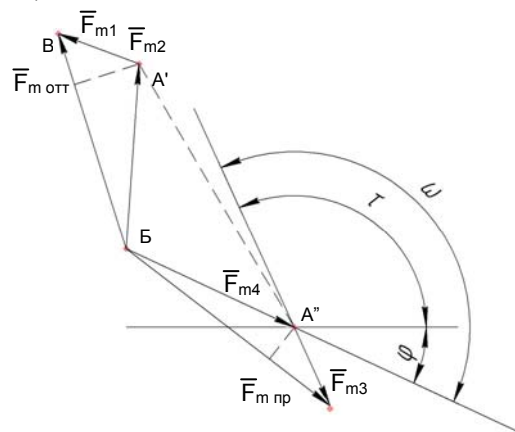


Рис. 9. Расчет угла  $\omega$  и модуля силы магнитного отталкивания

Модули  $F_{m3}$ ,  $F_{m4}$  и угол  $\omega$  определены, следовательно, модуль силы притяжения находим из выражения

$$F_{m пр} = \sqrt{(F_{m3}^2 + F_{m4}^2 - 2F_{m3}F_{m4}\cos\omega)}$$

Модули  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$  позволяют определить углы их отклонения.

Представим векторную сумму  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$  в виде двух треугольников со сторонами  $F_{m1}$ ,  $F_{m2}$ ,  $F_{m отт}$  и  $F_{m3}$ ,  $F_{m4}$ ,  $F_{m пр}$ . Их вершины –  $BA'B$  и  $BA''B$  соответственно. Проведем горизонталь через точку  $B$  – прямую  $O'O''$ , тогда углы отклонения векторов  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$  будут являться угол  $O'B\Gamma$  –  $\angle\sigma$  и угол  $O''BB$  –  $\angle\delta$  (рис.10).

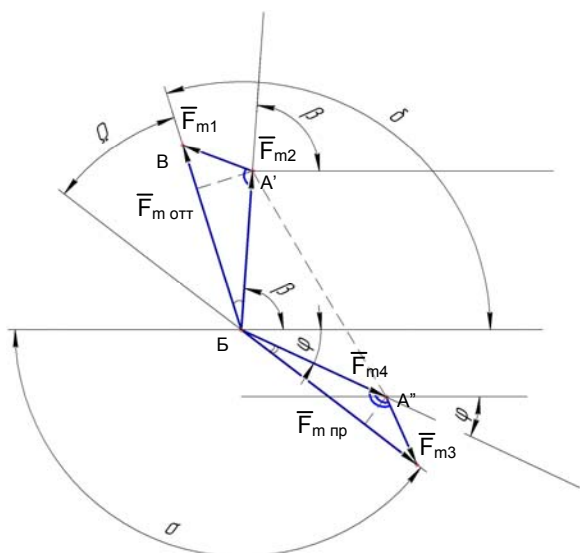


Рис. 10. Углы отклонения  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$

Значения  $\angle\sigma$  и  $\angle\delta$  определяются из выражений  $\angle\sigma=180-(\angle\varphi+\angle A''BG)$  и  $\angle\delta=\angle\beta+\angle A'BB$ .

Найдем  $\angle A'BB$  и  $\angle A''BG$ :

$$\angle A'BB = \sin^{-1}\left(\sin\gamma \cdot \frac{F_{m1}}{F_{m отт}}\right),$$

$$\angle A''BG = \sin^{-1}\left(\sin\omega \cdot \frac{F_{m4}}{F_{m пр}}\right).$$

Модуль силы магнитного взаимодействия  $F_m$  запишется в следующем виде:

$$F_m = \sqrt{(F_{m пр}^2 + F_{m отт}^2 - 2F_{m пр}F_{m отт}) \cos\Omega},$$

где угол между  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$  равен разнице между двумя углами отклонения (рис. 11):

$$\angle\Omega = \angle\sigma - \angle\delta.$$

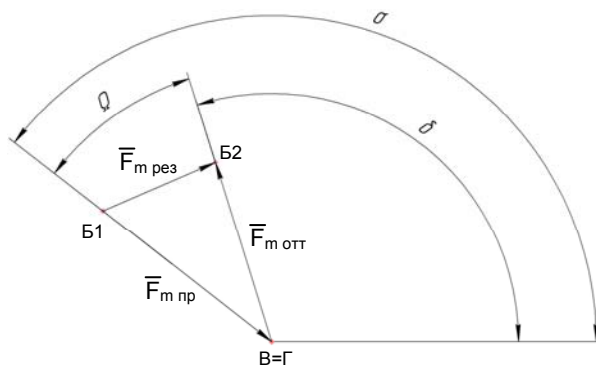


Рис. 11. Расчет угла между  $F_{m пр}$  и  $F_{m отт}$

Представленный метод расчета позволяет определять не только направления вектора магнитного взаимодействия в системе постоянный магнит-частица галтовочного наполнителя, но и его модуль, а следовательно, траекторию движения отдельной частицы в рабочем объеме магнитно-абразивного устройства, объем наполнителя в целом и силу действия наполнителя на обрабатываемую поверхность детали. Достоинством метода является возможность определения параметров отделочной обработки, от которых зависит траектория движения частицы при магнитно-абразивной обработке.

#### Список литературы

1. Патент на полезную модель РФ №97076. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / В.А. Полетаев, Н.Л. Павлюкова, Л.К. Чернов; опубл. в Б.И. № 24, 27.08.2010.
2. Патент на полезную модель РФ №111795. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / В.А. Полетаев, Л.К. Чернов; опубл. в Б.И. № 36, 27.12.2011.

#### References

1. Poletaev, V.A., Pavlyukova, N.L., Chernov, L.K. *Ustroystvo dlya magnitno-abrazivnoy galtovki* [Device for Magnetoabrasive Tumbling]. Patent RF, no. 97076, 2010.
2. Poletaev, V.A., Chernov, L.K. *Ustroystvo dlya magnitno-abrazivnoy galtovki* [Device for Magnetoabrasive Tumbling]. Patent RF, no. 111795, 2011.

Полетаев Владимир Алексеевич,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
телефон (4932) 26-97-72,  
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Чернов Леонид Константинович,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
телефон (4932) 26-97-73,  
e-mail: led@dsn.ru