

УДК 621.9.048.6

DOI:

А.П. Шишкина, В.А. Лебедев, М.М. Чаава

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ КОСТОЧКОВЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

На основании анализа подходов к моделированию процессов виброотделки гранулированными средами для описания процесса обработки средами органического происхождения предложен подход, рассматривающий энергетическое воздействие потока гранул на обрабатываемую поверхность без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим эффектом. Разработана модель про-

цесса виброобработки, обеспечивающая эффективную отделку поверхностей деталей средами органического происхождения.

**Ключевые слова:** виброобработка, косточковая органическая среда, удельный металлосъём, давление среды, пороговая амплитуда колебаний, пороговая частота колебаний, высота загрузки, отделка поверхности.

A.P. Shishkina, V.A. Lebedev, M.M. Chaava

## ENERGY ASPECTS OF PARTS VIBRATING PROCESSING WITH KERNEL ORGANIC ENVIRONMENT

This paper reports the fulfilled analysis of approaches to the simulation of the processes of a vibration treatment with granulated media. A model of the vibration treatment process ensuring an efficient finishing of parts surfaces with granules of kernel organic media is developed the basis of which is formed by the approach based on an energetic impact of a granule flow upon the surface under treatment. As a basic characteristic of the process of the organic media treatment a specific volume metal removal is used a physical sense of which consists in the velocity of a thickness growth of material removed from the surface at specified velocity and medium pressure. It is shown that metal removal depends upon the velocity of medium flow, the height of a loading column of granulated medium and conditions of the formation of a medium stationary circulating motion. On the basis of the analysis of experimental investigations results of amplitude-

frequency characteristics influence upon metal removal during the vibrating processing with abrasive granules the dependence of a specific volume metal removal is offered at the treatment with organic media, taking into account a threshold amplitude and oscillation frequency of the working chamber at which the effect of a surface treatment is observed. The defined aggregate of dependences, describing the efficient conditions of vibrating processing with kernel organic media, is obtained with the application of experimental data which allows supposing the reasonableness of the model obtained.

**Key words:** vibrating processing, kernel organic medium, specific metal removal, environment pressure, threshold amplitude of oscillations, threshold frequency of oscillations, loading height, surface finishing.

### Введение

Органические среды представляют собой самостоятельную группу обрабатывающих сред, применение которых в технологии изготовления деталей машин расширяет спектр технологических возможностей вибрационной обработки и повышает её эффективность. Однако недостаточная изученность этих сред, отсутствие методик проектирования отделочных

операций с их использованием ограничивает область их технологического применения. В этой связи разработка модельных представлений условий, обеспечивающих разработку на их основе эффективных технологий отделки поверхностей деталей косточковыми органическими средами, представляет научный и практический интерес.

### Основные подходы к моделированию процессов виброотделки гранулированными средами

Технологический эффект отделочной обработки в условиях вибрационных тех-

нологических систем обусловлен режущим и деформирующим воздействием потоков

частиц рабочей среды на поверхность изделия. Процесс виброабразивной обработки и достигаемый при этом технологический эффект достаточно подробно изучены и представлены в научно-технической литературе [1 - 3].

В числе первых основополагающих работ по раскрытию физической сущности технологических процессов виброабразивной обработки следует выделить работы А.П. Бабичева [1]. Проведённые им исследования механики взаимодействия абра-

зивной среды и детали при вибрационном воздействии позволили ему сформулировать механико-физико-химическую модель процессов разрушения поверхности детали в среде вибрирующих абразивных гранул, которая явилась исходной предпосылкой для дальнейших исследований в этой области. Для определения удельного съема металла в зависимости от различных параметров им предложено обобщенное эмпирическое уравнение в виде

$$q = 3,8 \cdot A^{1,25} \cdot HB^{-0,91} \cdot K_n \cdot K_3 \cdot K_G \cdot K_d \cdot K_V \text{ (кг/с)},$$

где  $A$  - амплитуда колебаний, мм;  $HB$  - твёрдость обрабатываемого материала;  $K_n, K_3, K_G, K_d, K_V$  - коэффициенты, отражающие влияние частоты колебаний, зернистости абразивных гранул, массы детали, грануляции обрабатываемой среды, объёма загрузки рабочей камеры соответственно.

Дальнейшее развитие исследования в области виброабразивной обработки получили в работе [2]. На основе теоретических и экспериментальных исследований в ней доказано, что наиболее целесообразным и соответствующим реальному процессу удаления металла представляется метод, заключающийся в определении съема металла при единичном взаимодействии абразивной частицы с поверхностью детали с последующим умножением на количество таких взаимодействий за время обработки. Для определения удельного съема металла с поверхности при виброабразивной обработке предложена зависимость

$$\gamma_{\text{во}} = P_1 \cdot P_2 \cdot \omega \cdot q \cdot \frac{S_{\text{дет}}}{4R^2} \text{ (кг/с)},$$

где  $P_1$  - геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных гранул;  $P_2$  - вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию;  $\omega$  - частота колебаний рабочей камеры,  $\text{с}^{-1}$ ;  $q$  - съем металла при единичном взаимодействии абразивной гранулы с поверхно-

стью детали, кг;  $S_{\text{дет}}$  - площадь поверхности обрабатываемой детали,  $\text{мм}^2$ ;  $R$  - радиус абразивной гранулы, мм.

В работе [3] предлагается при анализе технологического воздействия движущейся обрабатывающей гранулированной среды рассматривать только эффект удаления металла без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим воздействием абразивных гранул, наблюдаемость которых, по мнению автора, затруднена тем, что процесс деформации поверхности микроударами гранул постепенно стабилизируется за счет сглаживания шероховатости и упрочнения. Эффект удаления металла обусловлен не интенсивностью воздействия абразивных гранул, а объёмным удельным металлосъёмом, который пропорционален плотности потока энергии абразивной среды. Этот подход качественно правильно отражает установленную в многочисленных исследованиях закономерность, что повышение скорости и давления независимо увеличивает удельный металлосъём.

Специфика органических гранулированных сред обусловлена растительным происхождением. Их физико-механические, биолого-химические и режущие свойства формируются в процессе созревания и последующей переработки. В отличие от неорганических сред дробленые косточковые среды обладают невысокой твёрдостью (0,37061...0,58165 ГПа) и малой массой. В результате этого характеристики динамического состояния органической среды, формообразующие и энерге-

тические свойства имеют более низкие показатели по сравнению с виброобработкой деталей природными и синтетическими средами при аналогичных амплитудно-частотных характеристиках процесса. Режущие свойства косточковые органические среды приобретают в результате их дробления. При разрушении корки косточек формируются гранулы размером 4-6 мм, имеющие кромки с разными углами. Наличие угловых кромок у частиц предо-

пределяет их режущую способность при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью при виброобработке. В этой связи технологическую эффективность процесса обработки органическими гранулированными средами наиболее предпочтительно рассматривать с точки зрения интенсивности энергетического воздействия потока гранул на обрабатываемую поверхность без учёта явлений, обусловленных деформационно-упрочняющим эффектом.

### Моделирование процесса обработки потоками гранул косточковых органических сред

Эксперименты по изучению связи параметров движения абразивной среды в виброконтейнерах с интенсивностью металлосъема, представленные в работе [3], указывают на следующие закономерности. Металлические поверхности, обтекаемые средой с большей скоростью, при прочих равных условиях демонстрируют больший съём металла. При постоянной скорости набегания потока среды съём всегда выше при увеличении давления - собственного со стороны среды (за счет большей ее высоты над образцом) или внешнего, создаваемого нагружающим устройством. В этих экспериментах материал, форма, размер и ориентация образцов в потоке намеренно поддерживались неизменными, чтобы выделить чистый вклад параметров движущейся абразивной среды в динамику металлосъема.

В качестве основной характеристики процесса обработки органическими средами используем удельный объёмный металлосъём  $\gamma_{уд}$  (м/ч), физический смысл которого заключается в скорости нарастания толщины удалённого с поверхности материала при заданных скорости и давлении среды, а в качестве основных факторов процесса - плотность среды  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), добавочное внешнее и внутреннее «гидростатическое» давление в среде  $p$  (Па), среднюю скорость потока среды  $v$  (м/ч).

Считая, согласно принятой концепции описания съема, органическую гранулированную среду сплошной, воспользуемся гидродинамической аналогией.

Одной из характеристик движущихся сплошных сред является плот-

ность потока энергии, представляющая собой количество энергии, вытекающей в единицу времени из единичного объема, выделенного в среде [4]:

$$E = \rho \cdot v \cdot \left( \frac{v^2}{2} + \varepsilon \right) + p \cdot v,$$

где  $\rho$  - плотность;  $v = |v|$  - скорость;  $p$  - давление;  $\varepsilon$  - внутренняя энергия единицы объема среды.

Пренебрегая тепловыми эффектами в гранулированной среде, выражение плотности потока энергии представим в виде

$$E = \left( \frac{\rho \cdot v^2}{2} + p \right) \cdot v. \quad (1)$$

Первый член представляет собой кинетическую энергию, переносимую в единицу времени проходящей через единичную поверхность массой среды, второй - работу, производимую над средой силами давления. Таким образом, выражение (1) характеризует как кинематику, так и энергетику потока среды, а при фиксации режущих свойств гранул и ориентации подвергаемой обработке поверхности также и режущие свойства потока.

При фиксированном направлении потока относительно поверхности выражение для металлосъема можно записать в скалярном виде:

$$\gamma_{уд} = E \cdot \Pi_{\varphi},$$

где индекс  $\varphi$  указывает на взаимную ориентацию поверхности и потока.

С учетом размерности потока энергии  $E$  (кг/ч<sup>3</sup>) и объемного металлосъема размерность величины  $\Pi_{\varphi}$  - м·ч<sup>2</sup>/кг. От-

сюда следует, что величина  $\Sigma$ , обратная  $P_\phi$ , имеет размерность механического напряжения - кг/м·ч<sup>2</sup>. Тогда выражение для металлосъема будет иметь вид

$$\gamma_{уд} = \frac{E}{\Sigma_\phi} = \frac{(\rho \cdot v^2 / 2 + p) \cdot v}{\Sigma_\phi}, \quad (2)$$

т.е. удельный объемный металлосъем пропорционален плотности потока энергии органической гранулированной среды. При этом параметры  $\Sigma$  и  $P$  имеют смысл соответственно модуля сопротивления и параметра податливости разрушению, присущих поверхности данного материала, подвергаемой воздействию потока данной гранулированной среды. Соотношение (2) качественно описывает установленную закономерность, состоящую в том, что повышение скорости и давления независимо увеличивает удельный металлосъем, а при остановке среды съем прекращается.

Для практического использования этого соотношения необходимо, чтобы были известны скорость среды в рабочей камере и параметр  $\Sigma$ .

Исследования, приведённые в работах [3; 5], убедительно показали, что металлосъем зависит от скорости потока среды, высоты столба загрузки гранулированной среды. Условия образования стационарного циркуляционного движения среды по слабо эксцентричным (близким к окружности) эллипсам:

$$\frac{H}{L} \cong 1; \frac{H}{d_\phi} > 6; \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5,$$

где  $H$  - высота загрузки среды;  $L$  - ширина сечения камеры;  $d_\phi$  - средний диаметр частиц среды.

Величина  $\Sigma$ , названная модулем абразивного изнашивания, зависит только от природы абразива и свойств материала. Она является неким комплексным параметром, характеризующим микромеханику абразивного изнашивания в данной трибосистеме [6]. Модуль  $\Sigma$ , являющийся кон-

стантой, не зависящей от динамического состояния среды, может быть выражен в функции от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Полагая, что рабочая камера не является сильно вытянутой или сплюснутой вдоль оси, можно выразить высоту загрузки  $H$  через рабочий объем  $v$  камеры. Тогда формула, определяющая «гидростатическое» давление, создаваемое в рабочей камере, будет иметь вид

$$p = \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot \sqrt[3]{v}. \quad (3)$$

Для определения скорости потока среды учтем то, что в состоянии установившегося движения потока по вибрирующей поверхности скорость потока пропорциональна виброскорости самой поверхности. Согласно [1], максимальная скорость циркуляционного движения среды внутри U-образной камеры определяется соотношением

$$v_{max} = \frac{A \cdot \omega}{2} = \frac{A \cdot 2\pi \cdot f}{2} = A \cdot \pi \cdot f, \quad (4)$$

справедливость которого доказана независимыми экспериментальными результатами [6].

Подставляя (4) и (3) в (2), получим

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot A \cdot \pi \cdot f}{\Sigma} \cdot \left( \frac{A^2 \cdot f^2}{2} + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v} \right). \quad (5)$$

В полученном выражении  $\rho$ ,  $\Sigma$  характеризуют свойства обрабатываемой среды, а  $A$ ,  $f$ ,  $\sqrt[3]{v}$  - динамический режим и размеры камеры.

Однако, основываясь на анализе экспериментальных данных, представленных в [3; 5], следует отметить существенный недостаток формулы (5), а именно отсутствие в ней пороговой амплитуды и пороговой частоты колебаний, ниже которых движение гранулированной органической среды и, следовательно, съём материала отсутствуют.

На рис. 1 приведены результаты измерения скорости потока при вариации амплитуды и частоты вибрации камеры.

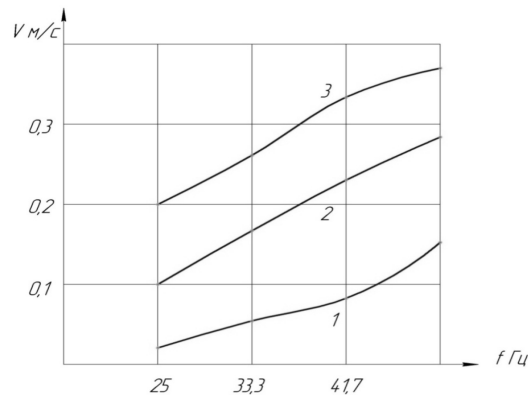


Рис. 1. Зависимость циркуляционной скорости потока среды от амплитуды и частоты вибрации камеры [1]: 1 - A=0,5 мм; 2 - A=1,5 мм; 3 - A=2,5 мм

В работе [1] исследовалась зависимость съема металла от амплитуды колебаний на станке с U-образной камерой объемом 25 л, загруженной на 2/3. Эксперименты проводились без использования технологической жидкости. Абразивная среда - дробленая крошка - промывалась

кальцинированной содой. Частота колебаний равнялась 25 Гц. По результатам исследований были построены графические зависимости, представленные на рис. 2, на которых хорошо виден рост съема с увеличением амплитуды колебаний.

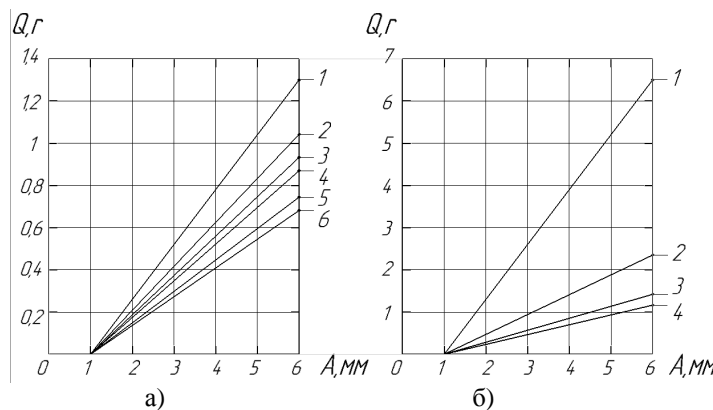


Рис. 2. Зависимость массового съема металла с образцов от амплитуды колебаний (абразив ЭБ63СТК грануляции 25-40 мм, частота - 25 Гц, время - 3 ч):  
 а: 1 - СЧ-12-28; 2 - Ст3; 3 - ПФ-КЧ; 4 - сталь 45; 5 - Ст6 (закал.); 6 - У10А(закал.);  
 б: 1 - баббит Б-83; 2 - бронза Бр014; 3 - Д1; 4 - А13[1]

Как следует из рис. 2, пороговой амплитудой является амплитуда несколько меньше 1 мм. Анализ достаточно большого числа экспериментальных данных показывает, что пороговая амплитуда зависит от частоты вибрации. Причем с ростом частоты пороговая амплитуда снижается. Обоснование этого явления содержится в работе [7], посвященной динамике сыпучих тел, подвергаемых вибрации. Анализ уравнений динамики частиц, находящихся на шероховатой вибрирующей поверхно-

сти, показывает, что движение в режиме «с подбрасыванием» (а именно такой режим реализуется в вибростанках) может начаться при величине виброперегрузки [7]

$$\Gamma = A \cdot \omega^2 / g > 1,$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

Возвращаясь к рис. 2, убеждаемся, что при частоте 25 Гц, на которой проводился опыт, пороговой амплитудой будет

$$A_0 \cdot \omega^2 \geq g \Rightarrow A_0 \cong \frac{g}{4\pi \cdot f^2}, A_0 > 0,4 \text{ мм.} \quad (6)$$

Как следует из [7], величина  $A_0$  зависит от трения частиц о несущую поверхность, толщины слоя частиц и их плотности. Однако при отсутствии уплотняющих факторов  $A_0$  может с достаточной степе-

нью точности (ошибка до 15%) определяться из формулы (6).

С учётом представленных выше исследований зависимость удельного объёмного съема (5) с учётом пороговой амплитуды запишем следующим образом:

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho(A - A_0) \cdot f}{\Sigma} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot f^2}{2} + \pi g \sqrt[3]{v} \right), A > A_0.$$

Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что при малых частотах, когда движение среды отсутствует, съема металла не наблюдается. С увеличением частоты выше некоторой оптимальной, соответствующей наиболее интенсивному движению загрузки, прирост съема снижается.

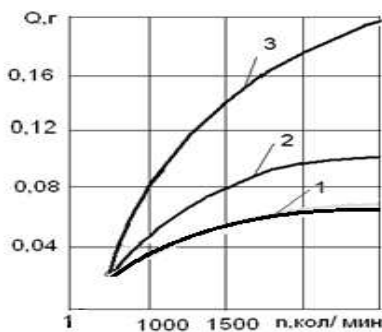


Рис. 3. Зависимость массового съема металла с образцов от частоты колебаний (абразив ЭБ63СТК грануляции 25-40 мм, амплитуда - 1,5 мм, время - 1 ч): 1 - бронза Бр014; 2 - Al3; 3 - сталь Ст3 [1]

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot (A - A_0) \cdot (f - f_0)}{\Sigma} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot (f - f_0)^2}{2} + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v} \right); A > A_0, f > f_0.$$

Выразим модуль  $\Sigma$  в функции от физико-механических характеристик обрабатываемого материала, в частности от его твёрдости:  $\Sigma = K \cdot HV$ , где  $K$  - экспериментально устанавливаемый комплексный коэффициент, характеризующий физико-механические и биологические свойства

Поэтому представляется корректным ввести аналогично амплитуде пороговую частоту, начиная с которой абразивная среда может прийти в движение. Естественно, эта пороговая частота  $f_0$  будет зависеть от амплитуды возбуждаемых колебаний. Однако, как показывают экспериментальные данные работ [1; 3; 5], величина  $f_0$  находится в интервале 10-15 Гц для большинства вибростанков с циркуляционным характером движения.

Таким образом, модель удельного объёмного съема, включающая амплитудную и частотную зависимости, будет иметь вид

гранул органической среды, а также условия обработки (с применением технологической жидкости или без неё). Получим совокупность зависимостей, описывающих процесс виброобработки органическими гранулированными средами, состоящими из дробленых косточек плодовых деревьев:

$$\gamma_{уд} = \frac{\rho \cdot (A - A_0) \cdot (f - f_0)}{K \cdot HV} \cdot \left( \frac{(A - A_0)^2 \cdot (f - f_0)^2}{2} \right) + \pi \cdot g \cdot \sqrt[3]{v};$$

$A > A_0, f > f_0;$

$$A_0 = \pi \cdot \frac{g}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2};$$

$$\frac{H}{L} \cong 1; \frac{H}{d_{\text{ч}}} > 6; \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5.$$

## Выводы

Полученные в результате моделирования зависимости съема металла и условия, представленные в виде неравенств, которые соответствуют стационарному циркуляционному движению органической гранулированной среды, обеспечивают эффективность виброотделки поверхности

деталей косточковыми органическими средами. Неучет этих условий может привести к тому, что динамическое состояние процесса будет отличаться от нормального, а формула для металлосъема станет некорректной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2008. - 693 с.
2. Тамаркин, М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Тамаркин. - Ростов н/Д, 1995. - 32 с.
3. Шевцов, С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С.Н. Шевцов. - Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001. - 194 с.
4. Яцун, С.Ф. Вычислительный эксперимент в динамике сыпучих материалов / С.Ф. Яцун, Е.В. Журавлева // Вибрационные машины и технологии: сб. докл. IV науч.-техн. конф. - Курск, 1999. - С. 143-147.
5. Лебедев, В.А. Повышение эффективности вибрационной отделочной обработки деталей на основе применения сред органического происхождения / В.А. Лебедев, Е.Ю. Крупеня, А.П. Шишкина // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / под ред. А.Н. Киричика. - М.: Спектр, 2015. - Т. 6. - С. 268-326.
6. Bremen, C.E. Vertical oscillation of a bed of granular material / C.E. Bremen, S. Ghosh, C.R. Wasgren // J. of Appl. Mech. - 1996. - Vol. 63. - № 1. - P. 156-161.
7. Блехман, И.И. Поведение сыпучих тел под действием вибраций / И.И. Блехман, Э.Э. Лавендел, И.Ф. Гончаревич // Вибрации в технике. - М.: Машиностроение, 1979. - Т. 4. - С. 78-98.
1. Babichev, A.P. *Vibration Technology Fundamentals* / A.P. Babichev, I.A. Babichev. - 2-d Edition revised and expanded. - Rostov-upon-Don: DSTU, 2008. - pp. 693.
2. Tamarkin, M.A. Optimization technological fundamentals of parts machining with free abrasives: *Author's Abstract of D. Eng. Thesis* / M.A. Tamarkin. - Rostov-upon-Don, 1995. - pp. 32.
3. Shevtsov, S.N. *Computer Simulation of Granulated Media Dynamics in Vibrating Technological Machines* / S.N. Shevtsov. - Rostov-upon-Don: SKNC VSh, 2001. - pp. 194.
4. Yatsun, S.F. Computer experiment in bulk material dynamics / S.F. Yatsun, E.V. Zhuravlyova // *Vibrating Machines and Techniques: Proceedings of the IV-th Scientific-Pract. Conf.* - Kursk, 1999. - pp. 143-147.
5. Lebedev, V.A. Efficiency increase of parts vibration finishing based on application of media of organic origin / V.A. Lebedev, E.Yu. Krupenya, A.P. Shishkina // *Efficient Engineering Technologies, Equipment and Tools*: author group's monograph / under the editorship of A.N. Kirichek. - M.: Spectrum, 2015. - Vol. 6. - pp. 268-326.
6. Bremen, C.E. Vertical oscillation of a bed of granular material / C.E. Bremen, S. Ghosh, C.R. Wasgren // J. of Appl. Mech. - 1996. - Vol. 63. - № 1. - P. 156-161.
7. Blekhman, I.I. Bulk material behavior affected with vibrations / I.I. Blekhman, E.E. Lavendel, I.F. Goncharevich // *Vibration in Engineering*. - M.: Mechanical Engineering, 1979. - Vol. 4. - pp. 78-98.

Статья поступила в редколлегию 27.03.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Донского государственного технического университета  
Бабичев А.П.

## Сведения об авторах:

**Шишкина Антонина Павловна**, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского госу-

дарственного технологического университета, e-mail: [shishkina56646@yandex.ru](mailto:shishkina56646@yandex.ru).

**Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технологического университета, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).

**Shishkina Antonina Pavlovna**, Post graduate student of the Dep. "Engineering Techniques", Don State Technological University, e-mail: [shishkina56646@yandex.ru](mailto:shishkina56646@yandex.ru).

**Чава Михаил Мегонович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технологического университета, e-mail: [miho\\_ch@list.ru](mailto:miho_ch@list.ru).

**Lebedev Valery Alexandrovich**, Can. Eng., Prof. of the Dep. "Engineering Techniques", Don State Technological University, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru).

**Chaava Mikhail Megonovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Techniques", Don State Technological University, e-mail: [miho\\_ch@list.ru](mailto:miho_ch@list.ru).





