

Завгородний А. И.

Обыхвост А. В.

Харьковский  
национальный  
технический  
университет  
сельского  
хозяйства имени  
Петра Василенко

УДК 631.362

## АНАЛИЗ ВИБРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ЧАСТИЦ МАЛОГАБАРИТНОЙ ДЕКОЙ

*Проведені теоретичні дослідження процесу вібротранспортування плоских частинок зернової суміші по поверхні малогабаритної деки. На основі проведених розрахунків даються рекомендації щодо раціонального вибору деяких параметрів технологічного процесу.*

*The theoretical researches of process of vibrating transportation of flat particles of a grain mix on a surface of a working body of the machine are carried out. On the basis of the carried out accounts the recommendations concerning a rational choice of some parameters of technological process are given.*

**Постановка проблемы.** Из-за невысокой производительности безрешетные вибрационные сепараторы нашли свое применение там, где на первый план выносятся качество разделения зерновых смесей (селекция, семеноводство и т. п.) [3]. Одним из направлений повышения производительности таких сепараторов является использование малогабаритных дек [4]. Разделение зерновых смесей на малогабаритных деках происходит вследствие того, что движение семян основной культуры и примесей происходит в различных режимах, причем движение примесей осуществляется в режиме вибротранспортирования. Работа посвящена изучению этого режима.

**Анализ последних исследований.** Снабжение малогабаритной деки отражателем [4] и ее периодические колебания дают возможность использовать для сортирования семян округлой формы (рапс, горох, просо, мак, капуста и т. д.) периодический виброударный режим движения. Наличие плоских примесей (стебли, половинки семян, и др.) затрудняет сортировку семян основной культуры. Под плоскими подразумевают частицы, которые перемещаются по деке без опрокидывания – не перекатываются. Движение таких частиц достаточно точно аппроксимируется материальной точкой [1]. В работах [4-6] исследовано движение по поверхности

малогабаритной деки, как материальной точки, так и округлой частицы. Показано, что при настройках сепаратора, соответствующих периодическому виброударному режиму движения семян основной культуры, движение частиц примесей в том же режиме невозможно, поэтому дека дополняется предварительным прямоугольным участком для выделения примесей в режиме вибротранспортирования.

Вибротранспортированию посвящено много работ, например [1, 2], однако специфика устройства сепаратора, которая проявляется в способе организации наклонов рабочих поверхностей дек и направленности их колебаний (поперечно продольной оси) не позволяет применить непосредственно без изменений имеющиеся наработки.

**Результаты исследований.** Расчетная схема вибрационного перемещения плоских частиц, как материальных точек, представлена на рис.1. Загрузка смеси, происходит в окрестности точки О. Отражательная пластина в реальной конструкции, закреплена перпендикулярно деке вдоль линии ОС, но в целях упрощения восприятия чертежа – на рисунке не показана. Предполагается, что вначале из смеси на прямоугольном участке OABC отбираются плоские примеси, а затем происходит сортировка основного семенного материала на трапециевидном участке BCDE.

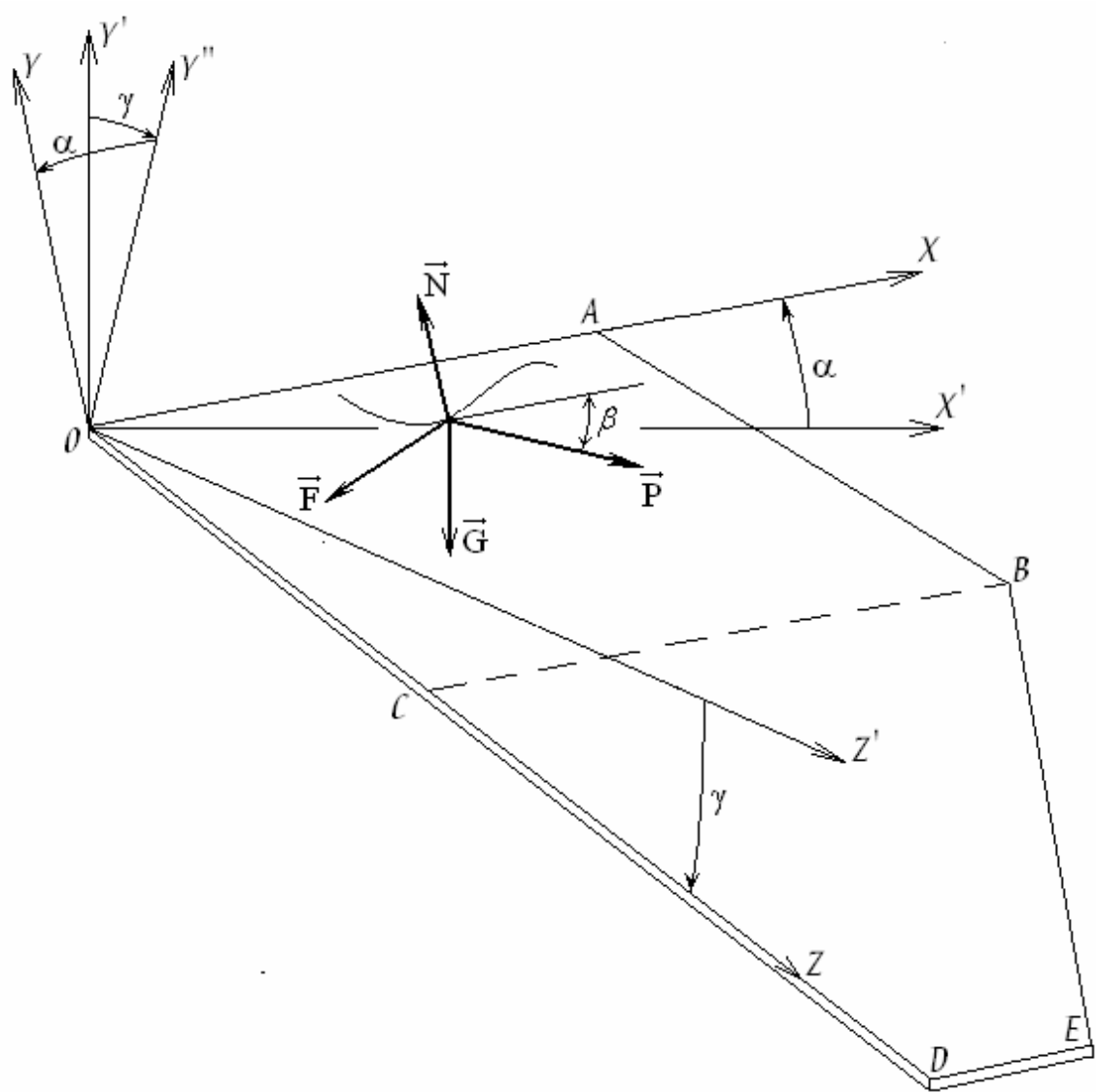


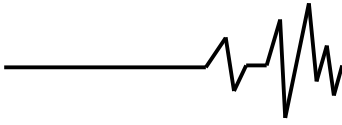
Рис. 1. Расчетная схема вибрационного перемещения плоской частицы

В этом случае исключается негативное влияние примесей на процесс сортировки и, кроме того, округлые частицы приобретают необходимый периодический режим движения еще до попадания на участок сортировки BCDE. Параметры работы сепаратора (углы наклона деки, характеристики колебаний) следует подобрать так, чтобы примеси перемещались по несущей поверхности деки в пределах указанного прямоугольника OABC за линию AB.

С поверхностью деки неподвижно связана пространственная система координат XYZ, начало которой совмещено с местом загрузки зерновой смеси. В поперечном и вертикальном направлениях расположены,

соответственно, оси OX и OY. Ось OZ расположена в продольном направлении.

В начальном состоянии дека была размещена горизонтально, а оси XYZ занимали положение X'Y'Z'. В рабочее положение дека устанавливается двумя поворотами. Первый поворот происходит вокруг оси OX' на угол  $\gamma$  (продольный наклон) при этом ось OY' занимает положение OY''. Второй поворот происходит вокруг продольной оси OZ на угол  $\alpha$ . При этом ось OX' занимает положение OX, а ось OY'' – положение OY. Инерционный вибратор закреплен вместе с деками на общей раме и, следовательно, поворачивается вместе с ними на те же углы.



На частицу, движущуюся в контакте с декой, действуют следующие силы. Сила тяжести  $\vec{G}$  (направлена противоположно оси  $OY'$ ), нормальная реакция  $\vec{N}$  (направлена вдоль оси  $OY$ ), сила инерции  $\vec{P} = mA\omega^2 \sin \omega t$  (направлена под углом  $\beta$  к поверхности деки и расположена в поперечной плоскости, параллельной  $OXY$ ), сила трения  $\vec{F}$  (направлена по касательной к траектории противоположно направлению движения и расположена на поверхности деки – плоскость  $OXZ$ ). Здесь  $A, \omega$  – соответственно, амплитуда и частота колебаний деки.

Исходя из вышеизложенного, дифференциальные уравнения движения плоских частиц в относительной системе координат можно записать в виде:

$$m\ddot{X} = -mg \cos \gamma \sin \alpha - F \frac{\dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Z}^2}} + mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta \quad (1)$$

$$m\ddot{Y} = -mg \cos \gamma \cos \alpha + N - mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta \quad (2)$$

$$m\ddot{Z} = mg \sin \gamma - F \frac{\dot{Z}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Z}^2}} \quad (3)$$

Так как рассматриваемое движение частицы безотрывное, то  $\ddot{Y} = 0$ . С учетом этого из уравнения (1) легко находится выражение для нормальной реакции  $N$  и силы трения  $F = fN$ . Исключая силу трения из уравнений (1) и (2), получим систему, которая описывает движение плоских частиц по поверхности деки. Для численного решения этой системы средствами «Mathcad» рекомендуется представить ее в безразмерных величинах [7]. Используем для этого обозначения:  $t = T\tau$ ,  $X = Ax^*$ ,  $Z = Az^*$ ,  $K = A\omega^2/g$ ,  $T = 2\pi/\omega$ .

Тогда  $dt = Td\tau$ ,  $dX = Adx^*$ ,  $dZ = Adz^*$  и для замены соответствующих производных найдем:  $\dot{X} = (A\omega/2\pi)\dot{x}^*$ ;  $\ddot{X} = (A\omega^2/4\pi^2)\ddot{x}^*$ ;

$$\dot{Z} = (A\omega^2/4\pi^2)\dot{z}^*$$

После введения принятых безразмерных координат, полученную систему двух дифференциальных уравнений второго порядка, необходимо представить в виде нормальной системы четырех уравнений первого порядка. Это можно сделать введением обозначений

$\dot{x}^* = \xi$ ,  $\dot{x}^* = \dot{\xi}$ ,  $\dot{z}^* = \zeta$ ,  $\dot{z}^* = \dot{\zeta}$ . После описанных выше действий и надлежащих преобразований,

в конечном виде получим следующую запись системы:

$$\dot{x}^* = \xi \quad (4)$$

$$\dot{\xi} = 4\pi^2 \left[ \sin 2\pi\tau \cos \beta - f \left( \frac{\cos \gamma \cos \alpha}{K} + \sin 2\pi\tau \sin \beta \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \zeta^2}} \right) - \frac{\cos \gamma \sin \alpha}{K} \right]; \quad (5)$$

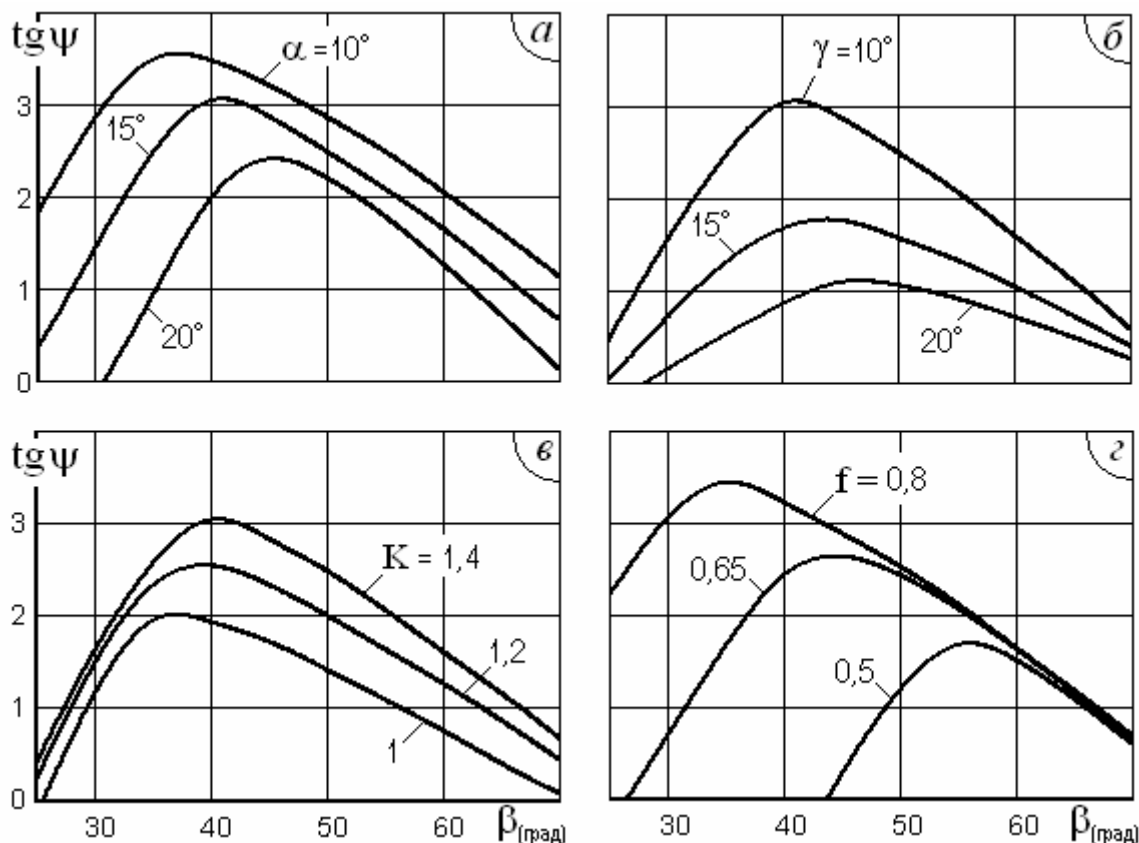
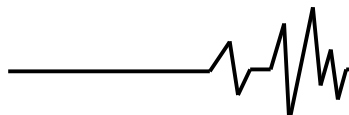
$$\dot{z}^* = \zeta \quad (6)$$

$$\dot{\zeta} = 4\pi^2 \left[ \frac{\sin \gamma}{K} - f \left( \frac{\cos \gamma \cos \alpha}{K} + \sin 2\pi\tau \sin \beta \right) \frac{\zeta}{\sqrt{\xi^2 + \zeta^2}} \right] \quad (7)$$

Численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений приспособлены для систем, записанных именно в таком стандартном виде. Кроме того, для численного решения требуется задавать начальные условия движения. Естественно предположить, что в момент загрузки (падения на деку) частицы собираются у ее нижней кромки и контактируют с отражательной пластиной. При движении частиц вместе с декой до момента отрыва от отражательной пластины их относительное движение отсутствует, поэтому начальные значения координат и скоростей частиц равны нулю. Расчеты также показывают, что изменение начального значения  $\tau_0^*$  безразмерного времени (момента отрыва от отражательной пластины) в приемлемом для рассматриваемой задачи диапазоне практически не оказывают влияния на дальнейшее движение частицы, которое уже на начальном этапе (в начале первого же периода) переходит в установившееся. В этом случае можно рекомендовать для расчетов принимать  $\tau_0^* = 0$  и не требовать применения дополнительной формулы для вычисления указанного времени. Таким образом, с достаточной для практического применения точностью, можно рекомендовать нулевые начальные условия:

$$\begin{aligned} x^* = 0; \quad z^* = 0; \quad \dot{x}^* = 0; \\ \dot{z}^* = 0 \quad \text{при} \quad \tau = \tau_0^* = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Решение системы проводилось с помощью вычислительного блока «Given-Odesolve» пакета «Mathcad». Следует отметить, что из всего арсенала методов, доступных в «маткаде» (AdamsBDF, Fixed, Adaptive, Radau), с задачей справляется только один – Fixed (метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом).

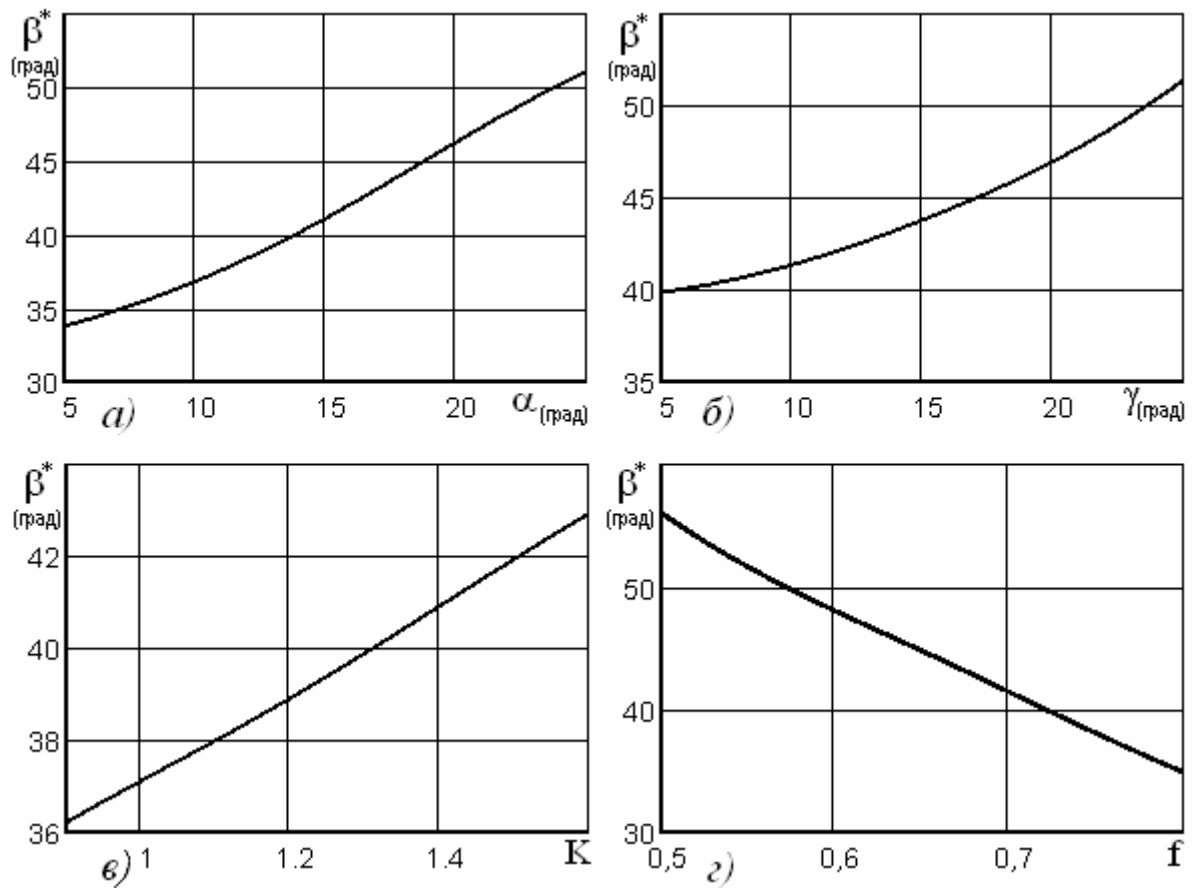


**Рис. 2.** Зависимость наклона усредненных траекторий плоских частиц от угла направленности колебаний при: **а)**  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\beta = -45^\circ$ ;  $f = 0,7$ ;  $K = 1,4$ ; **б)**  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\beta = -50^\circ$ ;  $f = 0,7$ ;  $K = 1,4$ ; **в)**  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\beta = -35^\circ$ ;  $f = 0,7$ ; **г)**  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\beta = -50^\circ$ ;  $K = 1,4$

Остальные “зависают” на первом же периоде движения частицы, что можно объяснить использованием усложненного алгоритма и, вместе с этим, случаем сложного решения в виде пульсирующей функции с множеством экстремумов.

Как показывают расчеты, установившееся движение частиц является периодическим с периодом, равным периоду колебаний деки, причем “в среднем” скорости движения частицы вдоль осей  $OX$  и  $OZ$  постоянны, а траектория движения – прямолинейна. Она может характеризоваться углом наклона  $\psi$  по отношению к оси абсцисс:  $\text{tg } \psi = [x^*(2) - x^*(1)] / [z^*(2) - z^*(1)]$  (здесь учтено, что безразмерный период колебаний деки

равен единице). Отметим, что с увеличением поперечного ( $\alpha$ ) и продольного ( $\gamma$ ) углов наклона деки траектории становятся более пологими, а с увеличением шероховатости частиц ( $f$ ) – более отвесными, чего и следовало ожидать. Что же касается угла  $\beta$ , то он оказывает на траекторию движения частицы более сложное влияние с наличием экстремума (максимума) наклона  $\psi$  при различных сочетаниях параметров  $\alpha, \gamma, K, f$  (рис.2). Максимальный же наклон траектории положительно характеризует процесс транспортирования плоских частиц, которые при малых продольных габаритах дек будут качественно выделяться из смеси.



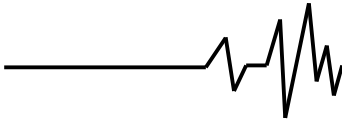
**Рис. 3. Зависимость экстремального значения угла направленности колебаний от параметров  $\alpha, \gamma, K, f$  при: а)  $\gamma = 10^\circ; \beta = -45^\circ; f = 0,7; K = 1,4$ ; б)  $\alpha = 15^\circ; \beta = -50^\circ; f = 0,7; K = 1,4$ ; в)  $\alpha = 15^\circ; \gamma = 10^\circ; \beta = -35^\circ; f = 0,7$ ; г)  $\alpha = 15^\circ; \gamma = 10^\circ; \beta = -50^\circ; K = 1,4$**

На рис.3. показано изменение экстремального значения угла направленности колебаний (по абсолютной величине  $\beta^* = |\beta|$ ) в зависимости от параметров  $\alpha, \gamma, K, f$ . Как видим, поперечный ( $\alpha$ ) и продольный ( $\beta$ ) наклоны, также, как и интенсивность колебаний деки ( $K$ ), повышают указанную величину угла  $\beta^*$  и только с увеличением шероховатости ( $f$ ) угол  $\beta^*$  снижается. Последнее обстоятельство очень важно, так как мы знаем [6], что при больших значениях угла  $|\beta|$  нарушается технологически целесообразный периодический виброударный режим движения округлых частиц при сортировке. Таким образом, высокая шероховатость это не только высокое качество выделения плоских примесей из смеси, но и обеспечение необходимого режима сортировки округлых частиц.

### Выводы

1. Полученная система уравнений (3)-(6) с начальными условиями (7) рекомендуются для исследования виброперемещений плоских примесей на предварительном прямоугольном участке малогабаритной деки. При этом для численного решения этой системы следует преимущественно применять метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом.

2. Существует оптимальное значение угла направленности колебаний  $\beta$ , при котором проявляется наибольшая "транспортабельность" деки на предварительном участке. Указанное значение соответствует максимуму угла наклона соответствующей траектории движения частиц по отношению к продольной оси деки и может быть получено расчетным путем.



3. Лучший технологический эффект (более “крутая” траектория, меньше габариты предварительного участка, меньшее значение угла  $\beta$ , при котором не нарушатся условия безотрывного движения) наблюдается при высоком коэффициенте трения частиц о поверхность деки. Достичь желаемого (как можно большего) коэффициента трения можно только путем изменения шероховатости поверхности деки. На практике можно рекомендовать для этого применять шероховатые наклейки, например, в виде абразивной шкурки.

#### **Литература**

1. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964.– 410с.  
2. Заика П.М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин. – М: Машиностроение, 1977. – 278с.

3. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств.– М.: Колос, 1978.– 240с.

4. Завгородний А.И., Обыхвост А.В. Периодический режим движения частиц по деке вибросепаратора // Вибрации в технике и технологиях: Всеукраинский научно-технический журнал. – Харьков. ХНТУСХ, 2003. – Вып.6. – С.43.

5. Завгородний А.И., Обыхвост А.В. Устойчивость периодического режима движения частиц по деке вибросепаратора // Вибрации в технике и технологиях: Всеукраинский научно-технический журнал. – Полтава. ПНТУ ім.Юрія Кондратюка, 2006. – Вып. 1. – С.37.

6. Завгородній О.І., Обихвіст О.В. Періодичний рух частинок в процесі вібросепарації з упродовженням зміни напрямку коливань деки // Науковий вісник НАУ, №92, Ч.1, 2005.– С.228-238.

7. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 14 (+CD).– СПб.: Питер, 2007.– 592с.