

УДК 631.362

Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей

А.И. Завгородний, Хессро Монтасер

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко (г. Харьков, Украина)

Рассмотрено движение частиц зерновой смеси по поверхности малогабаритной деки вибросепаратора, которая выполнена в виде цилиндрического желоба и оснащена отражателем в нижней его части. Показано, что рациональные режимы движения частиц (основной культуры и примесей) можно получить за счет надлежащего выбора интенсивности колебаний деки.

Ключевые слова: малогабаритная дека, криволинейный профиль, режим движения, интенсивность колебаний, коэффициент кинематического режима.

Постановка проблемы. Одним из направлений повышения производительности вибрационных безрешетных сепараторов является использование малогабаритных дек [1-3]. Особенностью работы таких сепараторов является использование режимов движения дек с малой интенсивностью колебаний [4]. При этом если примеси существенно отличаются по физико-механическим свойствам от основной культуры – возникает опасность засорения дек и снижения качества разделения. Это вызывает необходимость изучения совместного движения тех и других частиц по поверхности деки с целью определения рациональной интенсивности ее колебаний.

Анализ последних исследований. Снабжение малогабаритной деки отражателем [1, 2] и ее периодические колебания дают возможность использовать для сортирования семенных смесей периодический виброударный режим движения, обладающий высокой устойчивостью, а выполнение поверхностей дек в виде желоба с криволинейным профилем – дополнительное преимущество: влияние на процесс центробежной силой, которая управляется формой профиля [2, 5]. Движение семян плоской и округлой формы в этом режиме изучено в работах [6, 7]. Под плоскими подразумевают частицы, которые перемещаются по деке без опрокидывания – не перекатываются. Это стебли растений, мертвые насекомые, комочки грунта, половинки семян, а также семена многих культурных растений, таких как огурцы, арбузы, дыни, тыква, кабачки, патиссоны и др. Движение этих частиц достаточно точно описывается движением материальной точки. К округлым частицам можно отнести семена рапса, гороха, проса, мака, капусты и др. Очевидно, что форма этих семян аппроксимируется сферой. Совместное движение плоских и округлых семян по рабочим поверхностям

дек с криволинейным профилем с целью определения рациональной интенсивности колебаний до настоящего времени не изучалось.

Результаты исследований. Одним из распространенных примеров зерновой смеси, включающей округлые и плоские частицы, является горох с половинками зерен. Рассмотрим совместное движение плоских (половинки гороха) и округлых (целые зерна гороха) семян по криволинейному профилю деки в виде дуги окружности. Расчетная схема вибрационного перемещения плоской частицы, как материальной точки, представлена на рис. 1.

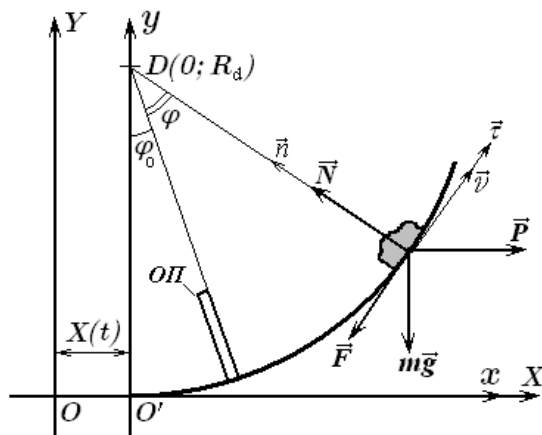


Рис. 1. Расчетная схема виброударного движения плоской частицы

Движение деки отсчитывается от неподвижной системы координат XOY . Относительная система координат $xO'y$ жестко связана с декой и движется вместе с ней по гармоническому закону $X(t) = A \sin \omega t$ с амплитудой A и частотой ω . Указанное движение осуществляется в гори-

зонтальной плоскости вдоль оси OX . В нижней части деки закреплена отражательная пластина – ОП, положение которой в относительной системе координат определяется углом φ_0 . Положение самой частицы во время движения определяется углом φ .

Таким образом, при $\varphi = 0$ происходит соударение частицы с отражательной пластиной затем отскок частицы и ее скольжение по деке до тех пор, пока угол φ снова не станет равным нулю. В этот момент опять происходит упомянутое соударение и т.д.. Причем, при периодическом движении промежутки времени между двумя последовательными соударениями равняется периоду колебаний деки.

На частицу, движущуюся в контакте с декой, в относительной системе координат действуют следующие силы: сила тяжести $m\vec{g}$; нормальная реакция \vec{N} ; сила инерции \vec{P} и сила трения \vec{F} (направления действия указанных сил понятно из рисунка). Следовательно, дифференциальные уравнения движения частицы в естественных координатах \vec{n} , $\vec{\tau}$ запишутся так:

$$m \frac{v^2}{R_d} = N - mg \cos(\varphi + \varphi_0) - P \sin(\varphi + \varphi_0); \quad (1)$$

$$m \frac{dv}{dt} = P \cos(\varphi + \varphi_0) - mg \sin(\varphi + \varphi_0) - F \operatorname{sign} \dot{\varphi}. \quad (2)$$

При скольжении частицы справедливы соотношения: $F = fN$; $\dot{v} = \dot{\varphi}R_d$, причем сила инерции равна $P = m\omega^2 \sin \omega(t + t_y)$. Здесь f – коэффициент трения, а t_y – момент соударения частицы с отражательной пластиной. С учетом этого дифференциальное уравнение изменения угла φ можно записать в виде:

$$\ddot{\varphi} = \frac{A\omega^2}{R_d} [\cos(\varphi + \varphi_0) - f \sin(\varphi + \varphi_0) \operatorname{sign} \dot{\varphi}] \sin \omega(t + t_y) - \frac{g}{R_d} [\sin(\varphi + \varphi_0) + f \cos(\varphi + \varphi_0) \operatorname{sign} \dot{\varphi}] - f \dot{\varphi}^2 \operatorname{sign} \dot{\varphi}. \quad (3)$$

Численный анализ полученного нелинейного дифференциального уравнения удобно проводить, записав его в безразмерном виде. Для этого примем следующие обозначения:

$$\tau = \frac{t}{T}; \quad K = \frac{A\omega^2}{g}; \quad \varepsilon_\tau = \frac{A}{R_d}. \quad (4)$$

Таким образом, безразмерное время τ измеряется в долях периода колебаний, величину ε можно определить как относительную амплитуду колебаний, а показатель K обычно называется коэффициентом кинематического режима и характеризует интенсивность колебаний деки. Для обозначения производной по безразмерному времени вместо “точки” будем использовать “звездочку”. Тогда:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\dot{\varphi}^*}{T}; \quad (5)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{d\dot{\varphi}}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \frac{d\dot{\varphi}}{d\tau} = \frac{1}{T^2} \cdot \frac{d\dot{\varphi}^*}{d\tau} = \frac{\ddot{\varphi}^*}{T^2}.$$

После введения принятых выше безразмерных величин, окончательно из выражения (3) найдем:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}^* &= 4\pi^2 \varepsilon_\tau \times \\ &\times \{ [\cos(\varphi + \varphi_0) - f \sin(\varphi + \varphi_0) \operatorname{sign} \dot{\varphi}^*] \sin 2\pi(\tau + \tau_y) - \\ &- \frac{1}{K} [\cos(\varphi + \varphi_0) - f \sin(\varphi + \varphi_0) \operatorname{sign} \dot{\varphi}^*] \} - \\ &- f \dot{\varphi}^{*2} \operatorname{sign} \dot{\varphi}^*. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогичное дифференциальное уравнение для сферической частицы получено в работе [7]:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}^* &= \frac{4\pi^2 \varepsilon}{1 + \mu} \times \\ &\times \left[\cos(\varphi + \varphi_0) \sin 2\pi(\tau + \tau_y) - \frac{1}{K} \sin(\varphi + \varphi_0) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

В этом уравнении угол φ_0 указывает на положение сферической частицы в момент удара о пластину и, кроме того, обозначено: $\varepsilon = A/(R_d - r)$; $\mu = (\rho/r)^2$, где ρ , r – соответственно, радиус инерции и радиус частицы.

Уравнения (6), (7) нелинейные, поэтому для их решения использовался численный метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом. Особенность исследования состояла в том, что требовалось найти решение, соответствующее периодическому режиму движения рассматриваемых частиц, на который указывалось выше. Для этого в среде «Mathcad» разработаны две программы, одна из которых показана на рис. 2.

Программа включает подпрограмму-функцию $W(\omega_0, \tau, \varepsilon, \mu, \varphi_0, K)$, которая по значениям параметров $\tau_y, \varepsilon, \mu, \varphi_0, K$, а также начальным значениям угла $\varphi = 0$ и угловой скорости ω_0 возвращает значения того же угла в конце безразмерного периода движения $T \approx 1$. Численные значения указанных параметров для работы подпрограммы помещаются в скобках при обращении к ней.

В первой строке подпрограммы задается число шагов для численного метода решения дифференциального уравнения. В строках 2 - 4 задаются начальные условия для указанного решения.

Выражение $D(t, x)$ представляет собой правую часть уравнения (7) в стандартной форме. В строке 6 происходит решение этого уравнения с помощью встроенной функции “rkfixed” системы «Mathcad». В последующих двух строках происходит считывание значений угла φ_k и угловой скорости Ω_k в конце расчетного промежутка.

Для удобства использования программы в строках 9 - 15 дополнительно подсчитывается максимальное значение X угла φ и время t_o остановки частицы в верхней точке в момент

изменения направления движения. Последняя строка предназначена для вывода вектора - столбца $(\varphi_k \ \Omega_k \ X \ t_o)^T$ вычисленных данных, где T – оператор транспонирования.

$$\begin{aligned}
 W(\omega, \tau, R, \varepsilon, \mu, \varphi_0, K) := & \left| \begin{array}{l}
 N \leftarrow 100 \\
 \Omega_0 \leftarrow \omega \\
 \tau_y \leftarrow \tau \\
 x \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \Omega_0 \end{pmatrix} \\
 D(t, x) \leftarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{4\pi^2 \cdot \varepsilon}{1 - \mu} \cdot \left[\cos(x_0 + \varphi_0) \cdot \sin[2\pi \cdot (t - \tau_y)] - \frac{1}{K} \cdot \sin(x_0 + \varphi_0) \right] \end{bmatrix} \\
 U \leftarrow \text{rkfixed}(x, 0, 1, N, D) \\
 \varphi_k \leftarrow U_{N, 1} \\
 \Omega_k \leftarrow U_{N, 2} \\
 X \leftarrow \max(U^{(1)}) \\
 Z \leftarrow \text{match}(X, U^{(1)}) \\
 \text{if } \text{rows}(Z) \neq 0 \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 k \leftarrow \text{last}(Z) \\
 Z_o \leftarrow \frac{Z_0 + Z_k}{2}
 \end{array} \right. \\
 Z_o \leftarrow Z \text{ otherwise} \\
 t \leftarrow \frac{Z_o}{N} \\
 (\varphi_k \ \Omega_k \ X \ t)^T
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Начальные условия: $\Omega_0 := 2 \quad K := 1$

Given

$$\Omega_0 = -R \cdot W(\Omega_0, \tau_y, R, \varepsilon, \mu, \varphi_0, K)_1 \quad W(\Omega_0, \tau_y, R, \varepsilon, \mu, \varphi_0, K)_0 = 0$$

$$L(R, \varepsilon, \mu, \varphi_0, \tau_y) := \text{Find}(\Omega_0, K)$$

Рис. 2. Mathcad-программа поиска параметров Ω_0, K при периодическом режиме движения сферической частицы по криволинейному профилю деки в виде дуги окружности

В качестве основной программы используется блок "Given-Find" решения систем нелинейных уравнений (рис.2). Перед блоком задаются начальные значения искомых величин – Ω_0, K .

Внутри блока записывается решаемая система, которая в нашем случае представляют собой условия периодичности движения частицы. Первое из уравнений системы задает требова-

ние, чтобы угловая скорость движения частицы по истечению периода движения и удара равнялась начальной угловой скорости (R – коэффициент восстановления скорости при ударе). Второе уравнение задает требование, чтобы угол φ в конце периода движения равнялся нулю, как и в начале движения.

Следует отметить, что устойчивость периодического движения частиц соблюдается только тогда, когда время соударения частиц с отражательной пластиной приходится на первую четверть периода движения: $0 < \tau_y < 0,25$. Причем, устойчивость движения будет тем выше, чем дальше значение времени τ_y от границ приведенного интервала [5]. Учитывая некоторый разброс свойств частиц, в качестве рационального следует принять такое значение коэффициента K , которое соответствует моменту соударения в средней части указанного промежутка: $\tau_y = 0,125$. Минимально возможное же значение коэффициента K , наблюдается, если $\tau_y = 0$ [4].

Программа вычисления рационального и минимально возможного значений коэффициента K для плоских частиц имеет аналогичный вид и в основном отличается от приведенной выражением $D(t, x)$ (строка 5), зависящим от вида правой части дифференциального уравнения.

Графики изменения рационального значения коэффициента K для округлой – $K_{\text{сф}}$ и плоской – $K_{\text{точ}}$ частиц представлены на рис. 3 а. Как видим, рациональная интенсивность колебаний деки для округлых частиц намного ниже (в 2,4 - 4,4 раза), чем для плоских. Более того, при рациональной интенсивности колебаний для округлых частиц исключается периодический режим движения для плоских, так как минимально возможная для этого интенсивность – $K_{\text{мин}}$ также превышает рациональную – K (рис.3 б).

Таким образом, попавшая на поверхность деки примесь в виде плоской частицы не будет совершать движение в периодическом виброударном режиме, как округлая частица. Но эта примесь не должна оставаться неподвижной, засоряя рабочую поверхность. Она должна совершать движение в направлении торцевого приемника продуктов разделения. Выясним далее условие, при котором будет наблюдаться такое движение.

Для неподвижной плоской частицы ($v = 0$) из условий равновесия (1), (2) можно записать:

$$N = mA\omega^2 \sin \omega t \sin(\varphi + \varphi_0) + mg \cos(\varphi + \varphi_0); \quad (8)$$

$$F = mA\omega^2 \sin \omega t \cos(\varphi + \varphi_0) - mg \sin(\varphi + \varphi_0). \quad (9)$$

В долях силы тяжести нормальная реакция и сила трения переписуются так:

$$N^* = K \sin \omega t \sin(\varphi + \varphi_0) + \cos(\varphi + \varphi_0); \quad (10)$$

$$F^* = K \sin \omega t \cos(\varphi + \varphi_0) - \sin(\varphi + \varphi_0). \quad (11)$$

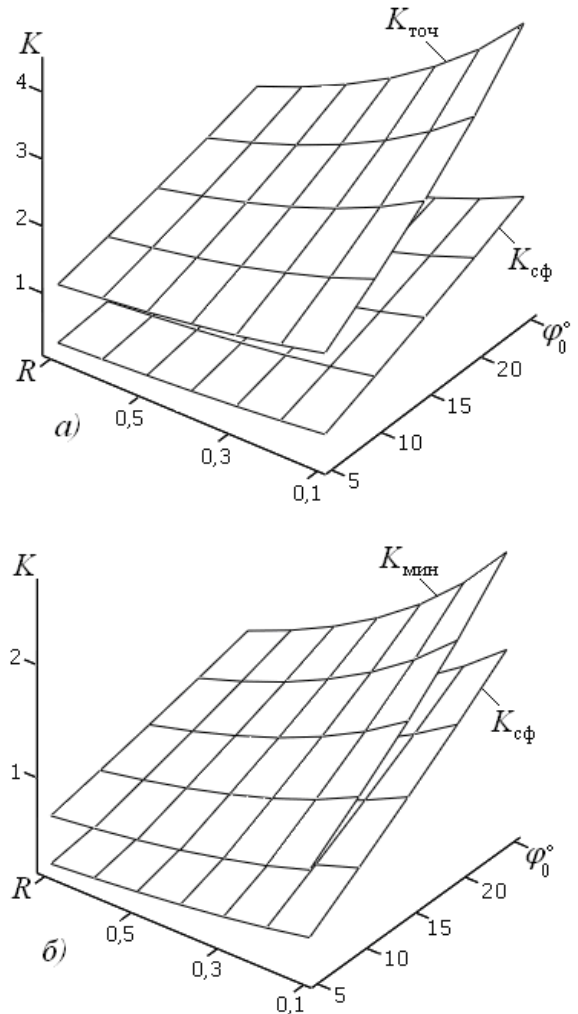


Рис. 3. Зависимость рационального значения коэффициента кинематического режима для сферических ($K_{\text{сф}}$) и точечных ($K_{\text{точ}}$) частиц, а также минимально возможного значения ($K_{\text{мин}}$) для точечных частиц от упругости (R) и положения отражательной пластины (φ_0°) при:

$$\mu = 0,2; f = 0,35; \varepsilon = 0,05$$

Условием отсутствия отрыва частицы от поверхности деки является $N^* \geq 0$ или:

$$K \sin \omega t \sin(\varphi + \varphi_0) + \cos(\varphi + \varphi_0) \geq 0. \quad (12)$$

Скольжение частицы наступит в момент, когда сила трения превысит максимально

возможное ее значение $|F^*| > fN^*$. Таким образом, имеем:

$$|K \sin \omega t \cos(\varphi + \varphi_0) - \sin(\varphi + \varphi_0)| > f [\cos(\varphi + \varphi_0) + K \sin \omega t \sin(\varphi + \varphi_0)] \quad (13)$$

Технологически важным является условие, при котором рассматриваемые частицы смогут из состояния относительного покоя начать движение по поверхности деки в сторону подъема. Это даст гарантию того, что они не будут “зависать” на поверхности деки (особенно в нижней ее части), создавая помеху для движения других частиц. Уравнения равновесия записаны для схемы на рис.1, где направление силы трения как раз соответствует указанному случаю движению частицы. Поэтому далее необходимо проследить, чтобы сила трения не меняла знак на противоположный или, что то же самое, чтобы выполнялось неравенство:

$$K \sin \omega t \cos(\varphi + \varphi_0) - \sin(\varphi + \varphi_0) > 0. \quad (14)$$

С учетом неравенств (12), (14) из соотношения (13) получаем:

$$K > \frac{\sin(\varphi + \varphi_0) + f \cos(\varphi + \varphi_0)}{\sin \omega t [\cos(\varphi + \varphi_0) - f \sin(\varphi + \varphi_0)]} \quad (15)$$

Скольжение наступит уже тогда, когда коэффициент кинематического режима будет больше минимального значения выражения в правой части (15), которое наблюдается при $\sin \omega t = 1$. Следовательно:

$$K > \operatorname{tg}(\varphi_f + \varphi + \varphi_0). \quad (16)$$

где φ_f – угол трения.

Это условие можно еще упростить, учитывая, что зерно поступает на поверхность деки в нижней ее части, где $\varphi = 0$. В итоге получаем:

$$K > \operatorname{tg}(\varphi_f + \varphi_0). \quad (17)$$

Выполнение этого требования гарантирует, что в течение каждого периода колебаний будет наблюдаться проскальзывание частицы с одновременным перемещением ее в сторону торцевого приемника.

При $\varphi_0 = 0$ из условия (17) получаем: $K > \operatorname{tg} \varphi_f = f$. Поскольку $f < 1$, то благоприятным для процесса разделения зерновых смесей следует считать значение коэффициента кинематического режима, близкое к единице.

Выводы.

1. В среде «Mathcad» на основе встроенной функции “rkfixed” решения дифференциальных уравнений и блока “Given-Find” решения систем нелинейных уравнений разработаны программы для определения рационального значения коэффициента кинематического режима, при

котором поддерживается технологически оправданный периодический виброударный режим движения частиц зерновой смеси по поверхности малогабаритной деки сепаратора, выполненной в виде цилиндрического желоба и снабженной отражательной пластиной в нижней ее части.

2. Рассмотрен распространенный случай, когда частицы основной культуры имеют округлую форму (рапс, горох, просо, мак, капуста), а примеси имеют вид плоских частиц (стебли растений, мертвые насекомые, половинки семян и др.). Показано, что при рациональных настройках сепаратора, соответствующих семенам основной культуры, периодический режим движения примесей по рабочим поверхностям дек невозможен, так как рекомендуемая интенсивность колебаний меньше, чем минимально допустимая для перемещения примесей в этом режиме.

3. Получено условие в виде неравенства, связывающего коэффициент кинематического режима, угол трения для плоских частиц и угол установки отражательной пластины, выполнение которого исключает “неподвижное зависание” примесей на рабочих поверхностях и их засорение. С помощью этого условия установлено, что для успешного разделения зерновых смесей на малогабаритных деках с криволинейным профилем следует принимать значение коэффициента кинематического режима, близкое к единице.

Литература

1. Пат. 87911 Україна, МПК7 В07В 13/00. Пристрій для розділення зернових сумішей по крупності і пружним властивостям / Завгородній О.І., Обихвіст О.В., Хессро Монтасер, Сіняєва О.В.; заявл. 23.08.13; опубл. 25.02.14, Бюл. №4..

2. Пат. 88016 Україна, МПК7 В07В 13/00. Пристрій для розділення сипучих матеріалів / Завгородній О.І., Хессро Монтасер, Обихвіст О.В., Сіняєва О.В.; заявл. 07.10.13; опубл. 25.02.14, Бюл. №4.

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

4. Завгородній А.И. Обоснование минимальной интенсивности колебаний в процессе вибросепарации / Завгородній А.И., Обихвист А.В. // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник харківського державного

технічного університету сільського господарства, Вип.20. – Харків: СПДФО, 2003. – С.105 - 115.

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

6. Завгородний А.И. Периодический режим движения плоских частиц по колеблющейся дуге окружности / Завгородний А.И., Хессро Монтасер, Обыхвост А.В. // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, Вип.131. – Харків, ХНТУСГ, 2012. – С.66 - 74.

7. Завгородний А.И. Периодический виброударный режим движения шара по дуге окружности / Завгородний А.И., Хессро Монтасер. // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукраїнський науково-технічний журнал, №2(66). – Вінниця: ВНАУ, 2012. – С.35 - 41.

Анотація

Визначення раціональної інтенсивності коливань робочих органів вібросепаратора зернових сумішей

О.И. Завгородний, Хессро Монтасер

Розглянуто рух частинок зернової суміші по поверхні малогабаритної деки вибросепаратора, яка виконана у вигляді циліндричного жолоба і обладнана відбивачем в нижній його частині. Показано, що раціональні режими руху частинок (основної культури та домішок) можна одержати за рахунок належного вибору інтенсивності коливань деки.

Ключові слова: *малогабаритна дека, криволінійний профіль, режим руху, інтенсивність коливань, коефіцієнт кінематичного режиму.*

Abstract

Determination of rational intensity of vibrations of workings organs of vibration separator of corn mixtures

A.I.Zavgorodniy, Khessro Montaser

The process of division of corn mixtures is explored on small workings organs as a cylindrical chamfer, equipped a reflecting plate in his lower part. A widespread case is considered, when the seed of basic culture have the rounded form, and including of litters - flat. Including of litters can be stems of plants, dead insects, lumps of soil, halves of seed. Seed of basic culture can be approximated a sphere. The feature of flat particles is that their motion suffices exactly described a financial point. Technologically expedient is the periodic mode of motion of particles, at which the period of their motion coincides with the period of vibrations of working surface. It is therefore necessary rational to count such intensity of vibrations, at which the periodic mode of motion of particles is most steady. On the base of differential equalizations of motion of particles the programs of determination of rational intensity of vibrations of working organ are created for a basic culture and including of litters. Intensity of vibrations was estimated the coefficient of the kinematics mode. It is set by the indicated programs, that at the use of rational intensity of vibrations for the seed of basic culture the periodic mode of motion of including of litters on a working surface is impossible. It is shown that acceptable combination of the modes of motion of particles of corn mixture is observed technologically, if the coefficient of the kinematics mode is adopted by a value near to unit.

Keywords: *small working organ, curvilinear type, mode of motion, intensity of vibrations, coefficient of the kinematics mode.*

Представлено: В.М.Лук'яненко / Presented by: V.M.Luk'yanenko

Рецензент: О.А.Шептур / Reviewer: O.A.Sheptur

Подано до редакції / Received: 19.03.2015