

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 534.111:63

И.Я. Федоренко, А.С. Федоренко
I.Ya. Fedorenko, A.S. Fedorenko

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗОТРЫВНОГО ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

NUMERICAL SIMULATION OF PARTICLE'S CONTINUOUS VIBRATIONAL DISPLACEMENT PROCESS

Ключевые слова: моделирование, компьютер, процесс, вибрация, виброперемещение, частица, поверхность отклика, сепаратор, решето, планка.

Предложено несколько моделей движения зернового материала под действием вибрации. Для процесса сепарации зерна, характеризующегося малой толщиной слоя ($h \leq 20d$, где d – диаметр частицы), возможно его представление моделью одиночной частицы. Моделью систем с вибропреобразованным трением является модель плоской частицы на вибрирующей шероховатой поверхности, которая расположена под некоторым углом к горизонту. Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая движение зернового материала на вибрирующей поверхности, не имеет точного решения. Она может быть решена только численным методом. Решение системы дифференциальных уравнений представлено в виде графиков, при помощи которых было проанализировано динамическое поведение частицы на вибрирующей шероховатой поверхности. Вычислительный эксперимент проводили с двумя переменными (факторами) z и ε , как наиболее значимых факторов, влияющих на производительность сепаратора и просеивание частиц через решето. Первый фактор z характеризует интенсивность вибрации, второй ε – угол наклона решета к горизонту. Для этого применили метод планирования эксперимента. В ходе исследований был проведен полный факторный эксперимент. В качестве выходных величин (параметров отклика) рассматривались: 1) средняя безразмерная скорость частицы по оси y ; 2) среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x . Определение выходных величин проводили путем численного решения безразмерной системы дифференциальных уравнений. Получены зависимость средней безразмерной скорости частицы по оси y и среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x

от параметра наклона решета (ε) и интенсивности вибрации (z).

Keywords: simulation, computer, process, vibration, vibrational displacement, particle, response surface, separator, screen, bar.

Several models of grain material displacement under the action of vibration are discussed. Grain separation process characterized by low thickness of the layer ($h \leq 20d$, where d is a particle's diameter) may be represented by a single particle's model. The model of a flat particle on a vibrating rough surface which is located at some angle to the horizon is the model of systems with vibration friction. The system of nonlinear differential equations which describe the motion of grain material on a vibrating surface does not have exact solution. It may be solved by numerical method only. The solution of the system of differential equations is presented in the form of graphs by which the dynamic behavior of a particle on a vibrating rough surface was analyzed. Computational experiment was conducted with two variables (factors) z and ε as the most significant factors that affected the performance of the separator and sifting of particles through the screen. The first factor z characterizes vibration intensity, and the second factor ε is the angle of screen's inclination to the horizon. The design method was used to run the experiment, and a full factorial experiment was conducted. The following was studied as output values (response parameters): 1) the average particle's dimensionless speed along Y-axis; 2) the average effective value of velocity along X-axis. The determination of the output values was performed by numerical solution of dimensionless system of differential equations. The dependence of the average dimensionless velocity of a particle on Y-axis and the average effective (operating) value of the velocity on X-axis on the screen inclination (ε) and vibration intensity (z) was derived.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., проф., зав. каф. «Механизация животноводства», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-387. E-mail: IJFedorenko@mail.ru.
Федоренко Антон Сергеевич, ассистент, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-390. E-mail: Fedoreanton@yandex.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Animal Farming Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-387. E-mail: IJFedorenko@mail.ru.
Fedorenko Anton Sergeevich, Asst., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-390. E-mail: fedoreanton@yandex.ru.

Введение

Теоретические исследования вибрационных процессов были начаты еще в начале прошлого столетия, но эти процессы настолько сложны и неординарны, что создание какой-то одной адекватно описывающей поведение обрабатываемого вибрацией материала математической модели не существует. Исторически сложилось так, что все существующие модели поведения зернистого материала под действием вибрации можно разделить на две группы. Модели одиночной частицы рассматривают зернистый материал как дискретную среду, в которой каждая частица движется сама по себе, не взаимодействуя с другими частицами, либо это взаимодействие просматривается очень слабо. Модели сплошной среды рассматривают зернистый материал как некую единую целую и непрерывную среду, движущуюся особым образом под действием колебаний [1, 2].

Для нашего случая при малой толщине слоя ($h \leq 20d$, где d – диаметр частицы) возможно его моделирование моделью одиночной частицы [3].

Математическая модель и метод решения

При помощи компьютеров и компьютерных программ можно без труда проанализировать более сложные модели.

Моделью систем с вибропреобразованием трением является модель плоской частицы на вибрирующей шероховатой поверхности, которая расположена под некоторым углом к горизонту (рис. 1). При отсутствии колебаний плоскости частица остается неподвижной относительно нее, при появлении вибраций наклонной поверхности частица движется вниз, что объясняется уменьшением трения в направлении линии наибольшего ската плоскости [4].

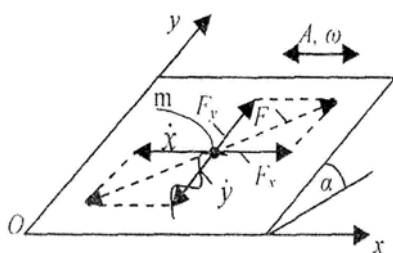


Рис. 1. Расчетная схема движения частицы

Рассмотрим динамику частицы, расположенной на наклонной шероховатой поверхности.

Плоскость совершает колебания по закону (рис. 1):

$$\eta = A \sin(\omega t), \tag{1}$$

где A, ω – амплитуда и угловая частота колебаний.

Дифференциальные уравнения движения частицы записываются в виде [4]:

$$m\ddot{x} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - mA\omega^2 \sin(\omega t); \tag{2}$$

$$m\ddot{y} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = mg \sin \alpha; \tag{3}$$

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0, \tag{4}$$

где f – коэффициент трения между частицей и плоскостью;

α – угол наклона плоскости к горизонту;

g – ускорение свободного падения.

Данную систему дифференциальных уравнений подвергнем изменениям, разделим каждый член уравнений на произведение $mA\omega^2$.

Тогда система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\ddot{x}}{A\omega^2} + \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} &= \sin(\omega t); \end{aligned} \right. \tag{5}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\ddot{y}}{A\omega^2} + \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} &= \frac{g \sin \alpha}{A\omega^2}; \end{aligned} \right. \tag{6}$$

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0. \tag{7}$$

Далее введем безразмерные величины:

$$u = \frac{\dot{x}}{A\omega}; v = \frac{\dot{y}}{A\omega}; \dot{u} = \frac{\ddot{x}}{A\omega^2}; \dot{v} = \frac{\ddot{y}}{A\omega^2};$$

$$\tau = \omega t; X = \frac{x}{A}; Y = \frac{y}{A};$$

$$z = \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2}; \varepsilon = \frac{g \sin \alpha}{fg \cos \alpha} = \frac{tg \alpha}{f}. \tag{8}$$

С учетом принятых обозначений уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{u} + z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} &= \sin(\tau); \end{aligned} \right. \tag{9}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{v} + z \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} &= z\varepsilon; \end{aligned} \right. \tag{10}$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} \neq 0. \tag{11}$$

В конечном итоге безразмерная система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{u} + z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} &= \sin(\tau); \end{aligned} \right. \tag{12}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{v} + z \left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} - \varepsilon \right) &= 0; \end{aligned} \right. \tag{13}$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} \neq 0. \tag{14}$$

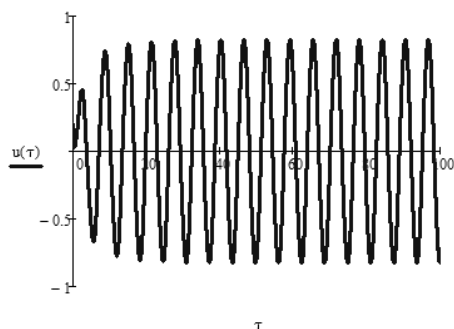


Рис. 2. Безразмерная скорость частицы по оси x

Безразмерная система нелинейных дифференциальных уравнений (12, 13) не имеет точного решения. Она может быть решена только численным методом, при этом частица совершает прямолинейные колебания без отрыва в горизонтальной плоскости. Система (12, 13) решалась нами при помощи программы MatchCAD и функции Odesolve, которая использует алгоритм Adams/BDF. В качестве примера приведем графики зависимостей безразмерных скоростей частицы по осям x и y, от параметра безразмерного времени, которые представлены на рисунках 2-4.

Как видно из рисунка 2, среднее значение безразмерной скорости частицы по этой оси равно 0, для этого введем понятие «эффективное значение скорости» по оси x. Эффективное (действующее) значение скорости по оси x – это величина средней скорости по этой оси, действие которой произведет такую же работу, что и рассматриваемая скорость по оси x за время одного периода:

$$U_{эф} = \sqrt{u^2}, \quad (15)$$

где $U_{эф}$ – эффективное (действующее) значение безразмерной скорости по оси x;

u – безразмерная скорость частицы по оси x.

Исходя из этого график зависимости эффективного значения безразмерной скорости по оси x от параметра безразмерного времени примет вид рисунка 3. Анализ рисунка 3 показывает, что частица имеет разгонный участок от 0 до 20, и далее эффективное значение безразмерной скорости приобретает вид периодических колебаний.

На рисунке 4 представлен график зависимости безразмерной скорости (v) от безразмерного времени (τ). Анализ рисунка 4 показывает, что в начале движения частица под действием вибрации разгоняется (разгонный участок от 0 до 40), и далее частица совершает постоянные гармонические колебания, причем средняя скорость (скорость сноса вдоль оси y) постоянна и не равна нулю.

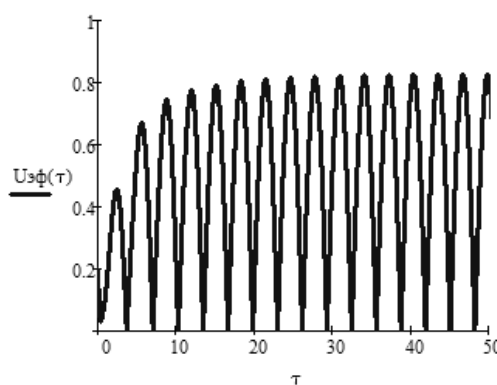


Рис. 3. Эффективное (действующее) значение скорости по оси x

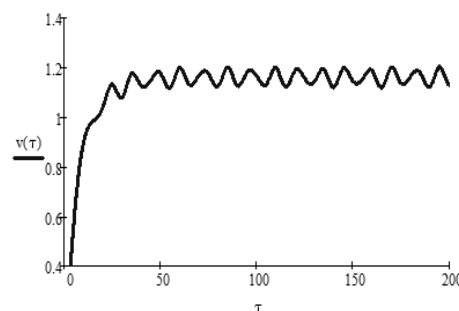


Рис. 4. Безразмерная скорость частицы по оси y

Для определения среднего эффективного значения безразмерной скорости по оси x используем уравнение:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} u^2(\tau) d\tau}. \quad (16)$$

Для определения безразмерной средней скорости по оси y воспользуемся формулой:

$$\bar{v} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} v(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Проведем вычислительный эксперимент с двумя переменными (факторами) z и ε, для определения наиболее значимых факторов, влияющих на производительность сепаратора и просеивание частиц через решето. Для этого применяем метод планирования эксперимента, предложенный в книге Хартмана К. и др. [5]. Интервалы варьирования факторов приведены в таблице.

Таблица

Кодирование факторов в эксперименте

Факторы и их обозначения		Интервалы и уровни варьирования		
		-1	0	1
z	x1	0,1	0,5	0,9
ε	x2	0,1	0,5	0,9

Применяем ортогональный центральный композиционный план для двух факторов (ОЦКП), для которого плечо $\alpha = 1$ [5].

В ходе исследований был проведен полный факторный эксперимент. В качестве выходных величин (параметров отклика) рассматривались: 1) средняя безразмерная скорость частицы по оси y (17); 2) среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x (15). Определение выходных величин проводили путем численного решения безразмерной системы дифференциальных уравнений (12, 13).

По результатам эксперимента при помощи компьютерной программы STATISTICA получены уравнения регрессии, в которых отражены значимые факторы и их сочетания [6]. Уравнение регрессии по критериям оптимизации при кодированном значении факторов имеет вид:

$$Y_1 = 0,2161 - 0,07826x_1 + 0,63229x_2 - 0,04763x_1x_2 - 0,02938x_1^2 + 0,46870x_2^2; \quad (18)$$

$$Y_2 = 0,41764 - 0,21297x_1 + 0,13201x_2 - 0,13330x_1x_2 - 0,04739x_1^2 + 0,13262x_2^2; \quad (19)$$

где Y_1 , Y_2 – выходные параметры, средняя безразмерная скорость частицы по оси y и среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x ;

x_1 – кодированное обозначение интенсивности вибрации z ;

x_2 – кодированное обозначение параметра поперечной вибрации ε .

Расчет полученных уравнений регрессии проводили при помощи компьютера в программе Microsoft Excel, погрешность уравнений не превышает 9%.

По уравнениям (18), (19) были построены сечения поверхности отклика для сочетаний факторов x_1 и x_2 .

Анализ сечений показывает, что целесообразно использовать сочетание факторов максимального значения параметра ε и минимального значения фактора z .

Для определения рациональных значений факторов, которые бы удовлетворяли всем двум критериям оптимальности средней безразмерной скорости частицы по оси y (17) и среднему эффективному (действующему) значению скорости по оси x (15), необходимо решить многокритериальную задачу.

Для ее решения используем метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов [7]. Его сущность заключается в том, что целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев, входящих в целевую функцию J с некоторым весом α , определяющим важность каждого критерия.

Из решения компромиссной задачи условные оптимальные факторы будут следующими: $x_1 = -1$; $x_2 = 1$.

Из полученных оптимальных параметров выбранных факторов можно составить таб-

лицу значений критериев оптимизации, при которых достигается максимальное значение средней безразмерной скорости по y ($\bar{v} = 1,414$) и среднего эффективного значения скорости по оси x ($\bar{u} = 0,981$).

Таким образом, в раскодированном виде факторы оптимизации будут следующими: $z = 0,1$ – интенсивность вибрации; $\varepsilon = 0,9$ – параметр наклона решета к горизонту.

Выводы

1. Из анализа литературных источников и собственных исследований выходными величинами процесса безотрывного виброперемещения частицы являются средняя безразмерная скорость по оси y (\bar{v}) и среднее эффективное значение скорости по оси x (\bar{u}).

2. При решении многокритериальной задачи, по оптимизации средней безразмерной скорости частицы по оси y и среднего эффективного значения скорости по оси x , получены рациональные параметры ($z = 0,1$ – интенсивность вибрации; $\varepsilon = 0,9$ – параметр наклона решета к горизонту), при которых достигаются максимальная производительность и максимальное значение просеивания зерна через решето.

Библиографический список

1. Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монография. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 166 с.
2. Bishop R.E.D. The Mechanics of Vibration. R.E.D. Bishop, D.C. Johnson. – Cambridge University Press, 1960.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
4. Федоренко И.Я., Федоренко А.С. Управление движением в системах с сухим вибропреобразованным трением // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 5 (55). – С. 68-71.
5. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов: учебное пособие. – М.: Мир, 1977. – 545 с.
6. Федоренко И.Я., Смышляев А.А. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры: учебное пособие. – М.: Форум, 2014. – 320 с.
7. Федоренко И.Я., Морозова С.В. Оптимизация и принятие решений в агроинженерных задачах: учеб. пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. – 238 с.

References

1. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. Vibriremyiy zernistyiy sloi v sel'skokhozyaistvennoy

tekhnologii: monografiya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 166 s.

2. Bishop R.E.D., Johnson D.C. The Mechanics of Vibration. – Cambridge University Press, 1960.

3. Blekhman I.I. Vibratsionnaya mekhanika. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 s.

4. Fedorenko I.Ya., Fedorenko A.S. Upravlenie dvizheniem v sistemakh s sukhim vibro-preobrazovannym treniem // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – № 5 (55). – S. 68-71.

5. Khartman K., Letskii E., Shefer V. Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie. – M.: Mir, 1977. – 545 s.

6. Fedorenko I.Ya., Smyshlyaev A.A. Proektirovanie tekhnicheskikh ustroystv i sistem: printsiipy, metody, protsedury: uchebnoe posobie. – M.: Forum, 2014. – 320 s.

7. Fedorenko I.Ya., Morozova S.V. Optimizatsiya i prinyatie reshenii v agroinzhenernykh zadachakh: ucheb. posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2012. – 238 s.



УДК 634.74;631

В.Д. Бартенов, Л.И. Поляков
V.D. Bartenev, L.I. Polyakov

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ВЕТВЕПОДЪЕМНИКОВ К ЯГОДОУБОРОЧНОМУ КОМБАЙНУ «ЙООНАС-2000» ДЛЯ УБОРКИ ОБЛЕПИХИ

SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF NEW BRANCH LIFTERS FOR BERRY-HARVESTING COMBINE JOONAS-2000 FOR SEA-BUCKTHORN HARVESTING

Ключевые слова: облепиха, кусты, комбайн, характеристики ветвей, повреждения и изломы ветвей, обоснование параметров, разработка ветвеподъемников.

Представлены экспериментальные данные, необходимые для разработки технических средств уборки плодов, содержащие размерно-массовые и упругие характеристики ветвей кустов облепихи. Дано обоснование необходимости применения ветвеподъемников с целью сохранения ветвей от повреждений, кустов, более полного сбора плодов и дальнейшей продуктивной эксплуатации плантаций облепихи. Опытные данные характеристик ветвей сведены в таблицы, представлены в виде графиков и использованы при разработке нового типа ветвеподъемников к комбайну, необходимых для подъема ветвей, особенно полеглых, касающихся почвы и несущих значительную часть урожая. При исследовании размерно-массовых и упругих характеристик ветвей использовались общепринятые методики. Разработанный на основе опытных данных динамический ветвеподъемник полностью соответствует современным условиям состояния и содержания облепиховых насаждений в хозяйствах, занимающихся производством данной культуры. Ветвеподъемник навешивается на раму комбайна «ЙООНАС-2000» впереди по ходу его движения над рядом кустов, при этом передняя часть ветвеподъемника касается почвы, копируя ее рельеф. В зависимости от состояния полеглых ветвей (масса, диаметр, длина, места крепления на стволике) они поднимаются по направляющим ветвеподъемника, давая на эти направляющие, которые содержат оси, при этом направляющие поворачиваются на осях, отклоняясь от своего первоначального положения, что снижает силу давления на них ветвей, обдиры коры и разрушение плодов. Возврат направляющих

в первоначальное положение осуществляется пружинами. Вновь спроектированный ветвеподъемник динамического типа простой по конструкции и изготовлению, в то же время несет важную функцию сохранения обрабатываемых кустов и плодов при их механизированном сборе. Он может быть рекомендован для сбора урожая комбайном не только плодов облепихи, но и жимолости, и смородины, ветви которых также располагаются близко к дневной поверхности почвы.

Keywords: sea-buckthorn, bushes, combine, branch features, injuries and breaks of branches, substantiation of parameters, design of branch-lifters.

The experimental data for the development of fruit-harvesting technical means which involve the dimensional, weight and elastic features of sea-buckthorn branches is presented. The use of branch-lifters to prevent injuries of branches, for more complete harvesting of fruits and further productive exploitation of sea-buckthorn plantations is substantiated. The experimental data of branch features are presented in tables and diagrams; the data was used to design a new type of branch-lifters to lift branches, especially laid ones, touching soil and carrying a significant part of berries. The designed dynamic branch-lifter corresponds to the modern requirements of sea-buckthorn plantations management. The branch-lifter is attached on the frame of Joonas-2000 combine in front along the run above the row of bushes; the front part of the branch-lifter touches the soil profiling the relief. Depending on the state of laid branches (weight, diameter, length, and the angle to the trunk) the branches are lifted by branch-lifter guides, then they press on these guides; the guides are turned and declined from the primary position reducing pressing force on the