

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗОТРЫВНОГО ВИБРОПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЧАСТИЦЫ

И.Я. Федоренко, А.С. Федоренко

В статье приведены результаты компьютерного моделирования процесса безотрывного виброперемещения частицы относительно плоскости, расположенной под некоторым углом к горизонту, и вибрируемой в своей плоскости. Определена зависимость средней безразмерной скорости частицы по оси y и среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x от параметра поперечной вибрации (ε) и интенсивности вибрации (z).

Ключевые слова: моделирование, вибрация, виброперемещение, частица, поверхность отклика.

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни машины вибрационного принципа действия получили большое распространение, являясь существенным фактором интенсификации различных технологических процессов. На предприятиях сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности вибрации успешно применяются при обработке различных зернистых (сыпучих, дисперсных) материалов и продуктов: зерна, муки, сахара песка, крахмала, крупы, какао бобов, мясных фаршей, сухих смесей для детского питания и т.д. В процессе их просеивания, центрифугирования, сепарирования, транспортирования, смешивания, дозирования, измельчения, обжарки, сушки, резки, уплотнения вибрационные рабочие органы взаимодействуют с некоторым слоем этих материалов - загрузкой машины [1].

Теоретические исследования вибрационных процессов были начаты еще в начале прошлого столетия, но эти процессы настолько сложны и не ординарны, 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].

Для нашего случая, при малой толщине слоя ($h \leq 20d$, где d – диаметр частицы) возможно его моделирование моделью одиночной частицы [2].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Применение компьютеров в научных исследованиях является необходимым условием изучения сложных систем. Традиционная взаимосвязь теории и эксперимента, дополняя хорошо построенной компьютерной моделью, позволяет выявить ранее незамеченные стороны изучаемых явлений или процессов. Эта новая эффективная процедура дает возможность целостного изучения поведения наиболее сложных систем как естественных, так и создаваемых для проверки теоретических гипотез [1].

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

Моделью систем с вибропреобразованным 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 ее, при появлении вибраций наклонной поверхности частица движется вниз, что объясняется уменьшением трения в направлении линии наибольшего ската плоскости [3].

Рассмотрим динамику частицы, расположенной на наклонной шероховатой поверхности.

Плоскость совершает колебания по закону (рис. 1):

$$\eta = A \sin(\omega t), \quad (1)$$

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗОТРЫВНОГО ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

где A, ω – амплитуда и угловая частота колебаний.

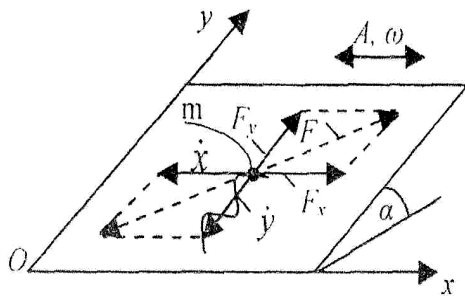


Рисунок 1 – Расчетная схема движения частицы

Дифференциальные уравнения движения частицы записываются в виде [3]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = mA\omega^2 \sin(\omega t); \\ m\ddot{y} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = mg \sin \alpha; \end{cases} \quad (2)$$

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

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0, \quad (4)$$

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:

$$\begin{cases} \frac{\ddot{x}}{A\omega^2} + \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = \sin(\omega t); \\ \frac{\ddot{y}}{A\omega^2} + \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = \frac{g \sin \alpha}{A\omega^2}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\ddot{y}}{A\omega^2} + \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = \frac{g \sin \alpha}{A\omega^2}; \quad (6)$$

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0, \quad (7)$$

Далее введем безразмерные величины:

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{A\omega}; \quad v = \frac{y}{A\omega}; \quad \dot{u} = \frac{\dot{x}}{A\omega^2}; \quad \dot{v} = \frac{\dot{y}}{A\omega^2}; \quad \tau = \omega t; \\ X &= \frac{x}{A}; \quad Y = \frac{y}{A}; \quad z = \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2}; \quad \varepsilon = \frac{g \sin \alpha}{fg \cos \alpha} = \frac{tg \alpha}{f}, \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{cases} \dot{u} + z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} = \sin(\tau); \\ \dot{v} + z \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} = z\varepsilon; \end{cases} \quad (9)$$

$$\dot{v} + z \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} = z\varepsilon; \quad (10)$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} \neq 0. \quad (11)$$

Сомножитель $z\varepsilon$ в правой части второго уравнения был получен с помощью преобразования:

$$\frac{g \sin \alpha}{A\omega^2} = \frac{g \sin \alpha}{A\omega^2} \cdot \frac{f \cos \alpha}{f \cos \alpha} = \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} \cdot \frac{tg \alpha}{f} = z\varepsilon$$

В конечном итоге безразмерная система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{u} + z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} = \sin(\tau); \\ \dot{v} + z \left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} - \varepsilon \right) = 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{v} + z \left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} - \varepsilon \right) = 0; \quad (13)$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} \neq 0. \quad (14)$$

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 рис. 2, 3 и 4.

Как видно из рис. 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 .

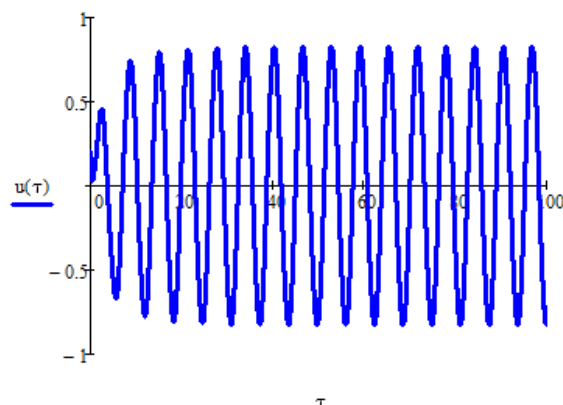


Рисунок 2 – Безразмерная скорость частицы по оси x

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

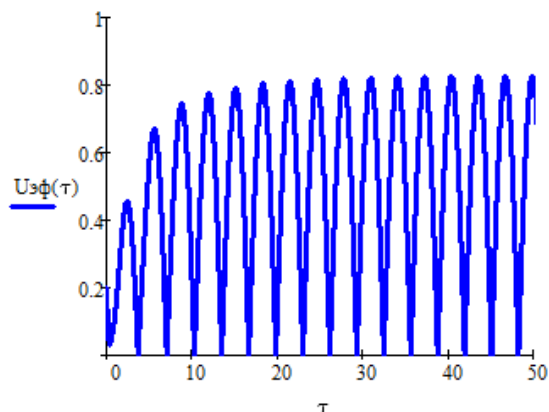


Рисунок 3 – Эффективное (действующее) значение скорости по оси x

На рис. 4 представлен график зависимости безразмерной скорости (v) от безразмерного времени (τ). Анализ рис. 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.

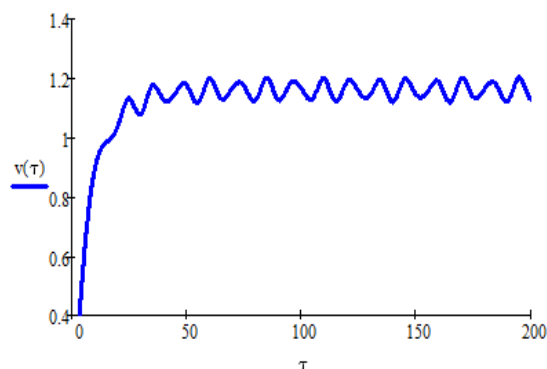


Рисунок 4 – Безразмерная скорость частицы по оси y

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:

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

Если нужно вернуться к размерным переменным, то можно использовать формулы:

$$V_x = \bar{u} \cdot A \cdot \omega, \text{ м/с.} \quad (18)$$

$$V_y = \bar{v} \cdot A \cdot \omega, \text{ м/с} \quad (19)$$

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. [4]. Интервалы варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование факторов в эксперименте

Факторы и их обозначения		Интервалы и уровни варьирования		
		-1	0	1
z	x_1	0,1	0,5	0,9
ε	x_2	0,1	0,5	0,9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗОТРЫВНОГО ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

Применяем ортогональный центральный композиционный план для двух факторов (ОЦКП), для которого плечо $\alpha=1$ [4].

Таблица 2 – План и результаты эксперимента для двух факторов

№ опыта	x1	x2	$\bar{v}$	$\bar{u}$
1	+1	+1	1,1605694	0,581574
2	-1	+1	1,3997076	0,7021017
3	+1	-1	0,0071001	0,02515
4	-1	-1	0,0527119	0,6952389
5	+1	0	0,099124	0,15002
6	-1	0	0,2799418	0,6175588
7	0	+1	1,3322749	0,6683468
8	0	-1	0,0519504	0,4232479
9	0	0	0,2114912	0,4265804

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). Численное решение (12, 13) выполнялось с применением компьютера при помощи программы MathCAD и функции Odesolve, которая использует для решения дифференциальных уравнений алгоритм Adams/BDF.

По результатам эксперимента при помощи компьютерной программы STATISTICA, получены уравнения регрессии, в которых отражены значимые факторы и их сочетания [5]. Уравнение регрессии по критериям оптимизации: 1) средняя безразмерная скорость частицы по оси y, 2) среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси x, при кодированном значении факторов имеет вид:

$$Y_1 = 0,2161 - 0,07826x_1 + 0,63229x_2 - 0,04763x_1x_2 - 0,02938x_1^2 + 0,46870x_2^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 0,41764 - 0,21297x_1 + 0,13201x_2 - 0,13330x_1x_2 - 0,04739x_1^2 + 0,13262x_2^2 \quad (21)$$

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 .

Анализ полученных уравнений регрессии позволяет увидеть, что наиболее значимым фактором, увеличивающим среднюю безразмерную скорость частицы по оси y и среднее эффективное значение скорости по оси x, является параметр поперечной вибрации ε . Уменьшающий выходные параметры, фактор интенсивности вибрации z.

Расчет полученных уравнений регрессии проводили при помощи компьютера в программе Microsoft Excel, результаты полученных значений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета по уравнениям регрессии и погрешности вычислений параметров Y_1 и Y_2

№ опыта	Y_1	Y_2	Δ_1	Δ_2
1	1,16183	0,55521	0,11	4,53
2	1,41362	0,71454	0,99	1,77
3	-0,0075	0,02459	5,66	2,23
4	0,05376	0,71714	1,98	3,15
5	0,10846	0,15728	9,42	4,84
6	0,26499	0,58322	5,34	5,56
7	1,3171	0,68227	1,14	2,08
8	0,05251	0,41826	1,07	1,18
9	0,21611	0,41764	2,18	2,09

Для определения погрешностей уравнений регрессии используем формулы:

$$\Delta_1 = \frac{|E - Y_1|}{Y_1} \cdot 100 \% \quad (22)$$

$$\Delta_2 = \frac{|E - Y_2|}{Y_2} \cdot 100 \% \quad (23)$$

По уравнениям (20, 21) были построены сечения поверхности отклика для сочетаний факторов x_1 и x_2 (рис. 5, 6).

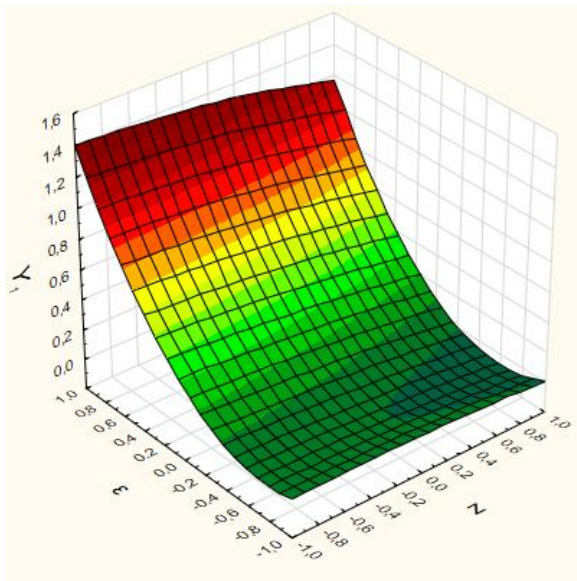


Рисунок 5 – Поверхность отклика средней безразмерной скорости частицы от факторов z и ε

Проанализируем поведение функции отклика $Y_1 = f(X_1, X_2)$ средняя безразмерная скорость частицы по оси y от параметров z и ε .

Как показывает графическая зависимость (рис. 5), при максимальном значении параметра ε и минимальном значении фактора z достигается максимальная средняя безразмерная скорость частицы. Это объясняется тем, что увеличивается виброперемещение частицы.

Анализ сечения показывает, что целесообразно использовать сочетание факторов максимального значения параметра ε и минимальном значении фактора z .

Поведение функции отклика (рис. 6) $Y_2 = f(X_1, X_2)$ среднее эффективное значения скорости по оси x от параметров z и ε показывает, что при максимальном значении параметра ε и минимальном значении фактора z достигается максимальное среднее эффективное значение скорости по оси x . Это объясняется увеличением виброперемещения частицы.

Анализ сечения показывает, что целесообразно использовать сочетание факторов максимального значения параметра ε и минимальном значении 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.

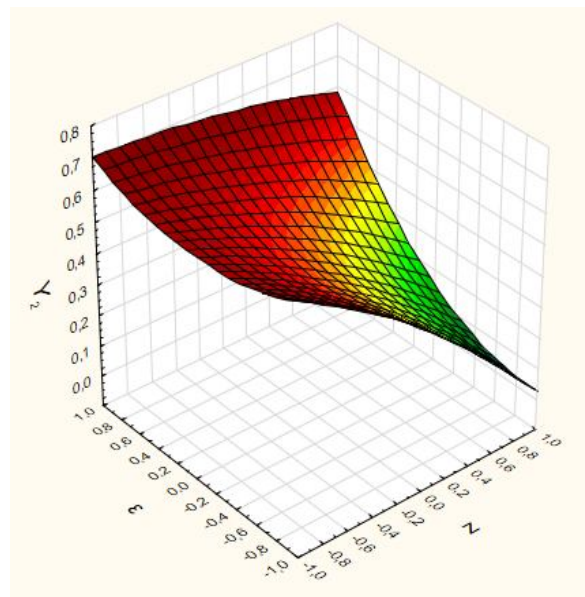


Рисунок 6 – Поверхность отклика среднего эффективного значения скорости по оси x от факторов z и ε

Для ее решения используем метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов [6]. Его сущность заключается в том, что целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев, входящих в целевую функцию J с некоторым весом α_i , определяющим важность каждого критерия. Иначе говоря, комплексный критерий принимает вид:

$$J = \sum_{i=1}^n \alpha_i \psi_i \rightarrow \max; \alpha_i \geq 0; \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1. \quad (24)$$

где $\alpha_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$ – весовой коэффициент i -го част-

ного критерия (или коэффициент веса);

ψ_i – нормированное значение этого критерия.

Следует также обратить внимание на то, что в целевой функции (24) частные критерии, которые нужно максимизировать, входят со знаком «+», а те, которые нужно минимизировать – со знаком «-» (вспомним, что если $W_i \rightarrow \min$, то $W_i \rightarrow \max$) [6].

Для отбора лучшего варианта нужно назначить коэффициент веса α_i для каждого критерия. Распространенный метод – определение коэффициентов веса с помощью экспертов, который представляет собой, по

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕЗОТРЫВНОГО ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

существу, обычное обсуждение с той лишь разницей, что свое мнение эксперты выражают не словами, а цифрами. Результаты экспертов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Базовая таблица

Эксперт	Критерий оптимальности		Сумма
	$\bar{v}$	$\bar{u}$	
1	0,70	0,30	1
2	0,85	0,15	1
3	0,80	0,20	1
4	0,75	0,25	1
5	0,75	0,25	1
6	0,80	0,20	1
7	0,75	0,25	1
8	0,80	0,20	1
9	0,80	0,20	1
Среднее значение коэф-фициента веса, α	0,78	0,22	
Среднее квадратичное отклонение, s	0,044	0,044	
Коэффициент вариации, v	0,057	0,198	

При непосредственном назначении коэффициентов веса эксперт оценивает сравнительную важность рассматриваемых критериев, которые будут входить в целевую функцию. В этом методе каждый эксперт i -го критерия должен назначить коэффициент веса α_i таким образом, чтобы сумма всех коэффициентов веса, назначенных одним экспертом для различных критериев, равнялась единице. Экспертами выступили сотрудники кафедры «Механизация животноводства» и «Сельскохозяйственные машины» АГАУ.

Среднее арифметическое значение коэффициента веса для каждого критерия оптимальности рассчитывается по формуле:

$$\alpha_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \alpha_{ij}, \quad (25)$$

где k – число экспертов.

Среднее квадратичное отклонение для каждого коэффициента веса посчитаем по формуле:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (\alpha_{ij} - \alpha_i)^2}{k-1}}. \quad (26)$$

Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$v = \frac{s_i}{\alpha_{i,sp}}. \quad (27)$$

Значение коэффициентов вариации показывает величину разброса экспертных оценок. При $v < 0,2$ оценки экспертов можно считать согласованными. В случае $v > 0,2$ целесообразнее провести с экспертами содержательное обсуждение важности оцениваемых параметров, после чего повторить экспертизу [6].

Среднее значение коэффициента веса α_i получилось равной для критерия оптимизации средней безразмерной скорости частицы по оси y $\bar{v} = 0,78$, для среднего эффективного значения скорости по оси x $\bar{u} = 0,22$.

На основании полученного значения коэффициента веса α_i целевая функция имеет вид:

$$W = \alpha_1 \bar{v}(x1, x2) - \alpha_2 \bar{u}(x1, x2) \rightarrow \max \quad (28)$$

Тогда уравнение целевой функции, для нашего случая, примет вид:

$$W = 0,78(0,2161 - 0,07826x1 + 0,63229x2 - 0,04763x1x2 - 0,02938x1^2 + 0,46870x2^2) - 0,22(0,41764 - 0,21297x1 + 0,13201x2 - 0,13330x1x2 - 0,04739x1^2 + 0,13262x2^2) \quad (29)$$

Решив целевую функцию в программе MathCAD используя приложение Maximize, получили следующие варианты критериев оптимизации при наилучших сочетаниях факторов.

На основании полученных результатов условные оптимальные факторы будут следующими:

Таблица 5 – Условные оптимальные значения

Факторы	
x1	x2
-1	1

Из полученных оптимальных параметров выбранных факторов можно составить таблицу 6 значений критериев оптимизации, при которых достигается максимальное значение средней безразмерной скорости по y и

среднего эффективного значения скорости по оси x.

Таблица 6 – Условные оптимальные значения критериев оптимальности

Критерий оптимизации	
$\bar{x}$	$\bar{u}$
1,414	0,981

Таким образом, в раскодированном виде факторы оптимизации будут следующими:

1. $z=0,1$ – интенсивность вибрации;
2. $\varepsilon=0,9$ – параметр поперечной вибрации.

Факторы оптимизации, как видно из безразмерных уравнений (8), зависят от ускорения свободного падения, которое в земных условиях составляет $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Исходя из этого, получим уравнение, при котором эти факторы применимы в земных условиях. Для этого преобразуем безразмерные уравнения:

$$x = \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} = 0,1; \quad \varepsilon = \frac{g \sin \alpha}{fg \cos \alpha} = \frac{tg \alpha}{f} = 0,9.$$

Из второго уравнения выражаем коэффициент трения и подставляем в первое, получаем:

$$f = \frac{tg \alpha}{\varepsilon} = \frac{tg \alpha}{0,9},$$

$$tg \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$x = 9,81 \cdot \frac{\sin \alpha}{0,9 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{\cos \alpha}{A\omega^2} = 0,1 \quad (30)$$

Преобразуем уравнение (30):

$$\frac{\sin \alpha}{\omega^2} = 0,0092 \quad (31)$$

Полученное уравнение (31) применимо в земных условиях.

ВЫВОДЫ

1. Проведено компьютерное моделирование процесса безотрывного виброперемещения частицы относительно плоскости, расположенной под некоторым углом к горизонту, и вибрируемой в своей плоскости. Получены графики, характеризующие это движение.

2. Выявлены выходные величины процесса безотрывного виброперемещения частицы.

3. При помощи полученных уравнений регрессии нами были построены поверхности отклика, это позволило визуально проанализировать процесс безотрывного перемещения частицы.

4. При решении многокритериальной задачи, по оптимизации средней безразмерной скорости частицы по оси y и среднего эффективного значения скорости по оси x, получены рациональные параметры, при которых достигается максимальное значение средней безразмерной скорости по y и среднего эффективного значения скорости по оси x.

5. Полученное уравнение (31) позволяет использовать факторы оптимизации в земных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Федоренко Иван Ярославович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Механизация животноводства", т. 628-387, e-mail: IJFedorenko@mail.ru
Федоренко Антон Сергеевич, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», e-mail: Fedoreanton@yandex.ru