

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 534.111:63  
DOI: 10.53083/1996-4277-2021-203-09-81-87

Ф.А. Киприянов, Ю.А. Плотникова  
F.A. Kipriyanov, Yu.A. Plotnikova

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА ПО ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

### DETERMINATION OF GRAIN MOTION MODE ON A VIBRATORY SURFACE

**Ключевые слова:** *вибрация, вибрационный транспорт, характер движения, вращение эллипса, эллипсоид, метод Рунге-Кутты.*

Применение вибрационного транспорта в сельскохозяйственном производстве играет довольно значительную роль. Вибрационные конвейеры имеют ряд преимуществ перед традиционными транспортирующими машинами, применяемыми на сельскохозяйственных предприятиях для транспортировки преимущественно сыпучих и зернистых грузов, таких как шнековые и ленточные транспортеры. К преимуществам можно отнести довольно низкий коэффициент износа непосредственно самого транспортирующего органа – желоба вибрационно-транспортирующей машины, кроме этого в некоторых конструкциях вибрационных транспортирующих машин количество пар трения сведено к минимуму. При проектировании конструкций вибрационно-транспортирующих машин возникает вопрос об определении характера движения частицы транспортируемого груза. Так, выявление преимущественной составляющей движения позволит спрогнозировать интенсивность износа транспортирующей поверхности и возможность расширения области технологического применения вибрационных транспортирующих машин. При проведении исследований для определения характера движения зернового материала,

форма которого приближается к сфероиду и эллипсоиду, был применен метод математического моделирования. Составлена и решена система дифференциальных уравнений второго порядка, в которых учитывается влияние вибрации транспортирующей поверхности на движение тела эллиптической формы. Для решения системы применен классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Разработанная на языке программирования Python программа позволила определить характер движения тела сферической и эллиптической формы по вибрирующей поверхности. В результате было установлено, что движение тела сферической формы по вибрирующей поверхности возможно за счет качения, а движение тела эллиптической формы осуществляется за счет его скольжения по поверхности, что следует из затухающих вращательных движений. Предложенный метод по определению характера движения тела по вибрирующей поверхности является довольно универсальным и может быть применен при расчетах для тел, обладающих большими, по сравнению с семенами зерновых, размерами.

**Keywords:** *vibration, vibration transport, motion mode, ellipse rotation, ellipsoid, Runge-Kutta method.*

The use of vibration transport in agricultural production plays a very significant part. Vibratory conveyors have the

variety of advantages over traditional transporting machines such as auger and belt type conveyors used at agricultural enterprises for transporting mainly loose and granular materials. A rather low wear coefficient of transporting body itself - a conveying trough of a vibration-transporting machine may be referred to the advantages, besides, in some constructions of vibration-transporting machines the amount of friction couples is reduced to a minimum. In the design of constructions of vibration-transporting machines a question arises about the determination of motion mode of particles of the transporting material. Thus, the detection of a predominant component of motion will allow forecasting the wear rate of a transporting surface and the possibility of enlarging the field of technological use of vibration-transporting machines. During the research process for the determination of motion mode of grain material the shape of which was close to spheroid and ellipsoid, the method of mathematical modeling was

applied. The system of differential equations of second order was compiled and solved. In the equations the influence of vibration of a transporting surface on the motion of an elliptically shaped body was taken into account. To solve the system the classical method - Runge-Kutta method of the fourth order was used. The program developed in programming language Python allowed identifying the motion mode of the bodies of spheroidal and ellipsoidal shapes on a vibrating surface. As the result, it was determined that the motion of a body of a spheroidal shape on a vibrating surface was possible due to rolling, and the motion of a body of an ellipsoidal shape was achieved because of its sliding on the surface, what follows from waning rotating movements. The suggested method for the determination of motion mode of a body on a vibrating surface is rather flexible and may be applied in calculation for larger bodies in comparison with grain seeds.

**Киприянов Федор Александрович**, к.т.н., доцент, Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина, г. Вологда, Российская Федерация, e-mail: kipriyanovfa@bk.ru.

**Плотникова Юлия Александровна**, к.ф.-м.н., доцент, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: jplotnikova@yandex.ru.

**Kipriyanov Fedor Aleksandrovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russian Federation, e-mail: kipriyanovfa@bk.ru.

**Plotnikova Yuliya Aleksandrovna**, Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof., Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, e-mail: jplotnikova@yandex.ru.

### Введение

Движение зернового материала под воздействием вибраций имеет практический интерес при проектировании новых конструкций вибрационных транспортирующих машин, смесителей, сортировальных и других видов машин, принцип действия которых основан на использовании вибрации [1, 2]. Довольно обширный объем научных исследований, проведенный рядом отечественных и зарубежных ученых в области исследования вибрации, подтверждает актуальность проблематики использования вибраций в различных технологиях [3-5].

Наибольший интерес с научно-практической точки зрения для сельскохозяйственного производства имеют исследования, затрагивающие применение вибрации в роли движущей силы как при транспортировании и дозировании зернового материала, так и для смешивания сыпучих компонентов [2]. Кроме этого выполненные учеными исследования по обоснованию теоретических основ применения вибрации [6, 7] могут послужить фундаментом для дальнейших изысканий в этой области.

В ряде частных случаев при транспортировании зернового материала имеет значение характер движения частиц по вибрирующей поверх-

ности транспортирующей машины. Несмотря на то, что в исследованиях [1] указывается на отсутствие перекачивания зерновых частиц в вибрирующем слое, целесообразным представляется дать дополнительную математическую оценку происходящим процессам.

При движении зерна по вибрирующей наклонной поверхности, расположенной под углом  $\alpha$  к горизонту, под воздействием некоторых колебаний с амплитудой  $A$  и частотой  $n$  возможны два основных типа движения качение и скольжение, причем сила трения скольжения многократно превышает силу трения качения. Однако при движении тела по поверхности важнейшее значение имеет его форма, следовательно, момент инерции, определяемый геометрическими параметрами тела. Таким образом, **целью** исследования является определение характера движения зерна по вибрирующей поверхности транспортера.

### Объекты и методы

Для выявления основной движущей силы продольного перемещения примем ряд допущений, необходимых для математического решения поставленной задачи. Форму тела зерен, например, таких как горох, которая в природе

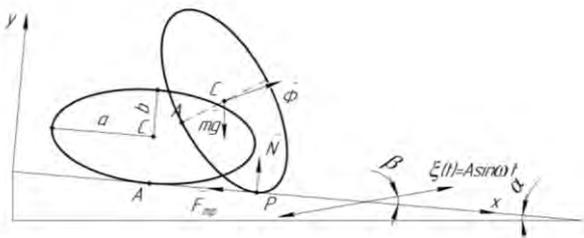
близка к шару, будем считать сфероидом с полуосями  $a$  и  $b$ , а форму основных зерновых культур, таких как ячмень, пшеница, рожь, будем считать формой трехосного эллипсоида с различной длиной полуосей –  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

Для определения характера движения зернового материала, форма которого приближается к сфероиду и эллипсоиду, был применен метод математического моделирования. Составлена и решена система дифференциальных уравнений второго порядка, в которых учитывается влияние вибрации транспортирующей поверхности на движение тела эллиптической формы. Для решения системы применен классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

**Расчетно-теоретическая часть**

Учитывая сложность характера движения частицы по вибрирующей поверхности, для упрощения расчетов примем следующее допущение: будем рассматривать не качение эллипсоида, а качение его сечения (эллипса) в плоскости полуосей  $a$  и  $b$ .

Исходная схема для расчетов качения (рис. 1) учитывает следующие значения:  $C$  – центр масс эллипса,  $mg$  – сила тяжести,  $F_{тр}$  – сила трения скольжения,  $P$  – точка касания эллипса и наклонной плоскости,  $\alpha$  – угол наклонной плоскости,  $\beta$  – угол направления колебаний,  $\xi(t) = A \sin \omega t$  – прямолинейные гармонические колебания под углом  $\beta$  к горизонту,  $N$  – сила реакции опоры,  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – частота колебаний,  $\angle ACP = \varphi$  – угол поворота,  $m$  – масса тела,  $\Phi$  – переносная сила инерции,  $\Phi = m \cdot A \cdot \omega^2 \sin(\omega \cdot t)$ .



**Рис. 1. Исходная схема для расчетов качения эллипса**

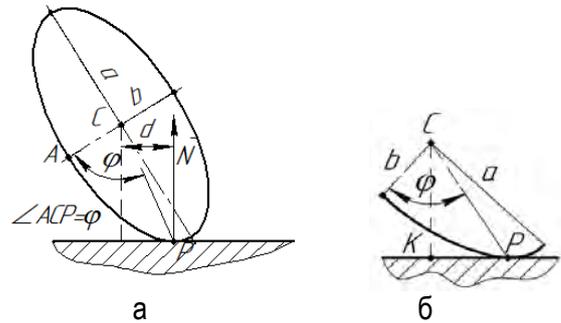
Из теоремы о движении центра масс и теоремы об изменении кинетического момента получим:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x}_c = m \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{тр} + \Phi \cdot \cos \beta \\ m \cdot \ddot{y}_c = N - m \cdot g \cdot \cos \alpha + \Phi \cdot \sin \beta \\ J_c \cdot \ddot{\varphi} = F_{тр} \cdot y_c - N \cdot \frac{(a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра масс  $C$  в системе  $XOY$ ;

$J_c$  – момент инерции относительно центра масс;

$\varphi$  – угол поворота.

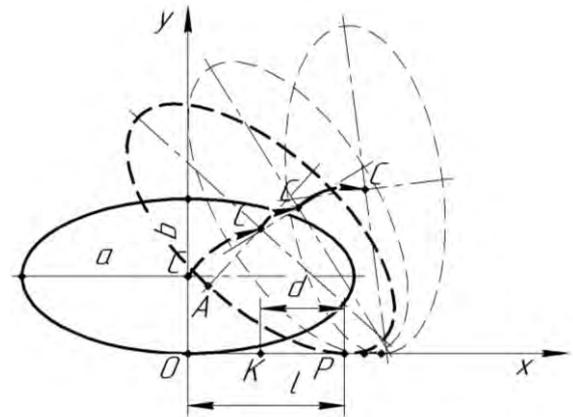


**Рис. 2. Схема к расчету расстояния  $d$  и угла  $\varphi$ :  
а – определение  $d$ , б – схема угла  $\varphi$ ;  
 $a, b$  – полуоси эллипса,  
 $P$  – точка проведения нормали при угле  $\varphi$**

Расстояние от центра масс эллипса до нормали, проведенной к эллипсу в точке, соответствующей углу  $\varphi$  (рис. 2):

$$d = \frac{(a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

При качении эллипса координаты центра масс в системе  $XOY$  меняются следующим образом.



**Рис. 3. Схема изменения координат центра масс**

Координата  $x_c$  меняется от 0 (в начале отсчета) до:

$$a \cdot \int_0^\varphi \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 t} \cdot dt - d, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол поворота;

$e$  – эксцентриситет эллипса;

$d$  – расстояние от центра масс  $C$  до нормали к эллипсу, проведенной к нему в точке касания  $P$  (определяется по формуле (2)).

В формуле (3)

$$e = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a},$$

где  $c$  – фокусное расстояние.

Длина дуги эллипса от точки  $A$  до точки касания  $P$  будет определяться эллиптическим интегралом второго рода:

$$l = a \cdot \int_0^\varphi \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 t} \cdot dt.$$

Координату  $y_c$  находим из треугольника  $\Delta СКР$  (рис. 26). При этом  $СК = y_c$ ,  $КР = d$ . Из параметрических уравнений эллипса находим

$$CP = \sqrt{a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} CK &= y_c = \sqrt{CP^2 - KP^2} = \\ &= \sqrt{a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi - d^2} = \\ &= \sqrt{\frac{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выразим  $F_{тр}$  из первого уравнения системы (1)

$$\begin{aligned} \ddot{x}_c &= \left( \left( a \cdot \int_0^\varphi \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 t} \cdot dt - \frac{(a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \right)' \right)'_t = \\ &= \frac{-a \cdot e^2 \cdot \sin 2\varphi}{2 \cdot \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \cdot (\dot{\varphi})^2 + a \cdot \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot \ddot{\varphi} + \frac{(a^2 - b^2)}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_c &= \left( \left( \sqrt{\frac{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2}} \right)' \right)'_t = \\ &= \frac{(a^2 - b^2)}{\sqrt{a^2 + b^2}} \left[ \ddot{\varphi} \cdot \frac{\sin 2\varphi \cdot (a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)}{\sqrt{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}} \right. \\ &- \dot{\varphi} \frac{\sin 2\varphi \cdot (a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 \cdot (2a^2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - 2 \cdot b^2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi)}{((a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2)^{3/2}} \\ &+ \frac{2(\dot{\varphi}) \cdot \cos 2\varphi \cdot (a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)}{\sqrt{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}} \\ &\left. + \frac{\dot{\varphi} \cdot \sin 2\varphi \cdot (2a^2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - 2 \cdot b^2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi)}{\sqrt{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в равенство (7), с учетом (8) и (9) получаем нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка вида:

$$\ddot{\varphi} = f(t, \varphi, \dot{\varphi}). \quad (10)$$

$$F_{тр} = m \cdot g \cdot \sin \alpha + \Phi \cdot \cos \beta - m \cdot \ddot{x}_c. \quad (5)$$

Выразим  $N$  из второго уравнения системы (1)

$$N = m \cdot \ddot{y}_c + m \cdot g \cdot \cos \alpha - \Phi \cdot \sin \beta. \quad (6)$$

Для выражений (5) и (6) вторые производные  $\ddot{x}_c$  и  $\ddot{y}_c$  находим, дважды дифференцируя выражения (3) и (4) по переменной  $\varphi$ .

Подставляя выражения (5) и (6) в третье уравнение системы (1), получим дифференциальное уравнение с  $\ddot{\varphi}$ ,  $\dot{\varphi}$  и  $\varphi$ , решение которого будет осуществляться численными методами.

Рассмотрим третье уравнение системы (1):

$$\ddot{\varphi} = \frac{F_{тр} \cdot y_c}{J_c} - \frac{N}{J_c} \cdot \frac{(a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi}{2\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (7)$$

где  $y_c$  определяется по формуле (4)

$$y_c = \sqrt{\frac{(a^2 \cdot \sin^2 \varphi + b^2 \cdot \cos^2 \varphi)^2 + a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2}}.$$

Множители  $F_{тр}$  и  $N$  в уравнении (7) определяются формулами (5), (6), где

В уравнении (10) функция  $f(t, \varphi, \dot{\varphi})$  определяется формулой (11):

$$f(t, \varphi, \dot{\varphi}) = \frac{f_1 \cdot f_2 + f_3 \cdot (f_4 - f_5 - f_6) + f_7 - f_8 + f_9}{f_{10} - f_{11} + f_{12}}, \quad (11)$$

$$f_1 = (\dot{\varphi})^2 \frac{m \cdot \sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2}}{J_c \sqrt{a^2 + b^2}} \sin 2 \varphi;$$

где

$$f_2 = \frac{a \cdot e^2}{2\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} - \frac{2(a^2 - b^2)}{\sqrt{a^2 + b^2}};$$

$$f_3 = \frac{m \cdot (a^2 - b^2) \sin 2 \varphi \cdot (\dot{\varphi})^2}{2J_c(a^2 + b^2)\sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2}};$$

$$f_4 = \frac{\sin^2 2 \varphi (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 (a^2 - b^2)}{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2};$$

$$f_5 = 2 \cos 2 \varphi (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi);$$

$$f_6 = \sin^2 2 \varphi (a^2 - b^2);$$

$$f_7 = \frac{(mg \sin \alpha + \Phi \cos \beta) \sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2}}{J_c \sqrt{a^2 + b^2}};$$

$$f_8 = \frac{mg \cos \alpha (a^2 - b^2) \sin 2 \varphi}{2J_c \sqrt{a^2 + b^2}}; f_9 = \frac{\Phi \sin \beta (a^2 - b^2) \sin 2 \varphi}{2J_c \sqrt{a^2 + b^2}};$$

$$f_{10} = 1 + \frac{m \sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2} \cdot a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}{J_c \sqrt{a^2 + b^2}};$$

$$f_{11} = \frac{m \sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2} \cdot (a^2 - b^2) \cos 2 \varphi}{J_c (a^2 + b^2)};$$

$$f_{12} = \frac{m \cdot (a^2 - b^2)^2 \sin^2 2 \varphi (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)}{2J_c (a^2 + b^2) \sqrt{(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^2 + a^2 b^2}}.$$

Чтобы решить задачу Коши для уравнения (10) с начальными данными  $\varphi|_{t=0} = 0, \dot{\varphi} = 0$ , запишем систему уравнений (12),

$$\begin{cases} z = \dot{\varphi} \\ \dot{z} = f(t, \varphi, z) \end{cases} \quad (12)$$

равносильную (10) и решим второе уравнение системы (12) методом Рунге-Кутты.

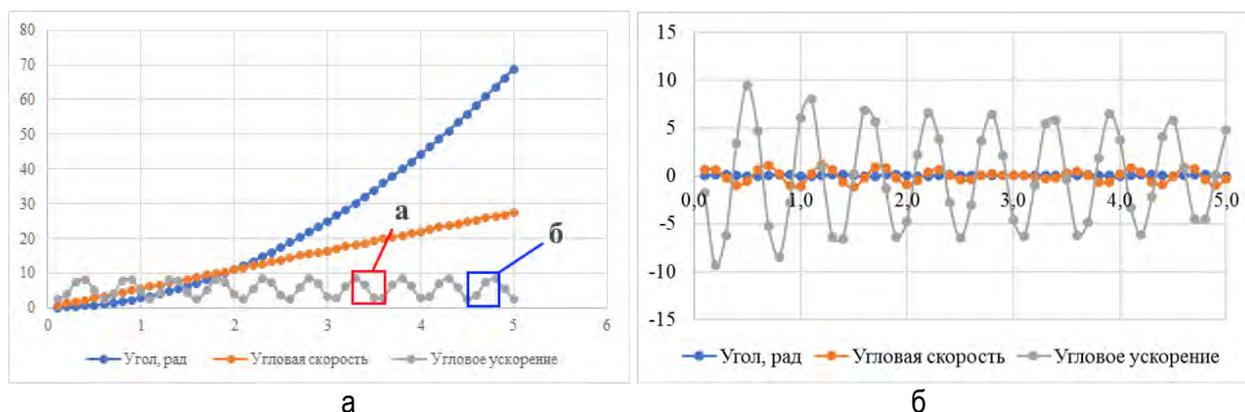
### Результаты исследований и их обсуждение

Для автоматизации расчетов составлена программа на языке Python, позволяющая определять величины угловой скорости и угла поворота с задаваемым временным интервалом. На первоначальном этапе обработки данных оценивался режим движения сфероида диаметром 3 мм по поверхности вибротранспортера, предустановленные параметры работы которого выражались в следующих значениях: амплитуда колебаний  $A=0,0001$  м, частота колебаний  $n=50$  с<sup>-1</sup>, угол направления колебаний  $\beta=20^\circ$ , угол наклона поверхности транспортера  $\alpha=2,5^\circ$ .

Временной шаг для расчета характеристик движения составлял  $h=0,1$ с при интервале шагов  $N=50$ . В результате графического представления движения сфероида получены следующие зависимости (рис. 4).

Полученные результаты, такие как устойчивое изменение угла поворота и угловой скорости, говорят о сформированности устойчивого вращательного и поступательного движения тела сферической формы по поверхности вибротранспортера (рис. 4а).

Однако стоит отметить, что даже при устойчивом движении угловое ускорение не стабильно. Так, на графике углового ускорения имеются участки снижения ускорения (поз. а, рис. 4а) и увеличения (поз. б, рис. 4а), данный факт обусловлен наличием паразитных колебаний пружинной подвески вибротранспортера. На участках замедления (поз. а, рис. 4а) колебания подвески препятствуют основному направлению колебаний и снижают ускорение, на участках (поз. б, рис. 4а) они совпадают, что приводит к росту углового ускорения.



**Рис. 4. Изменение угловых характеристик движения частиц по вибрирующей поверхности в зависимости от времени: а – модель движения сфероида; б – модель движения эллипсоида**

Смоделировав качение эллипса с размерами осей 2 и 3 мм при тех же параметрах транспортера, получили графическое представление (рис. 4б). Согласно полученным данным, устойчивое качение эллипса с заданными параметрами работы вибротранспортера не формируется. Вибрационного усилия транспортера недостаточно для поворота эллипса вокруг оси.

### Заключение

Полученные в результате математического моделирования по определению характера движения зерна, частично подтверждают результаты, полученные другими учеными [1], об отсутствии перекачивания зернистых частиц и говорят о том, что движение зерна, форма которого приближается к эллипсоиду, осуществляется за счет его направленного скольжения по вибрирующей поверхности транспортера при отсутствии поворотных движений. Однако зерно, форма тела которого приближается к сфере, способно осуществлять перекачивание при движении по поверхности вибро-транспортирующей установки, что необходимо учитывать при проектировании установок с применением вибрации.

### Библиографический список

1. Федоренко, И. Я. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монография / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 166 с. – Текст: непосредственный.
2. Пирожков, Д. Н. Обоснование конструктивно-технологических параметров шнекового смесителя непрерывного действия для сухих сыпучих ингредиентов комбикормов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пирожков Дмитрий Николаевич. – Барнаул, 1999. – 161 с. – Текст: непосредственный.

3. Ишутко, А. С. Многокомпонентные вибродозаторы / А. С. Ишутко, Д. Е. Кузьмин, У. К. Сабиев. – Текст: непосредственный // Новая наука: Стратегия и векторы развития. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 157-160.

4. Vaicis, I., Spade, K., Janushevskis, A., Boiko, A. (2020). Experimental analysis of bulk material flow through hopper. Doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF429.

5. Soleimani, B., Ahmadi, E. (2015). Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 8: 26-32. DOI: 10.1016/J.EAEF.2014.08.002.

6. Федоренко, И. Я. Критерии подобию гидродинамических моделей виброкипящего слоя сыпучего материала / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2005. – № 1. – С. 105-108

7. Федоренко, И. Я. Движение частицы сыпучего материала под воздействием вибраций / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков. – Текст: непосредственный // Труды XXXII Уральского семинара «Механика и процессы управления». – Екатеринбург, 2002. – С. 212 -214.

### References

1. Fedorenko I.Ia., Pirozhkov D.N. *Vibriruemyi zemistyj sloj v selskokhoziaistvennoi tekhnologii: monografiia*. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 166 s.

2. Pirozhkov D.N. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov shnekovogo smesitelia nepreryvnogo deistviia dlia sukhikh sypuchikh ingredientov kombikormov: diss. ... kand. tekhn. nauk. – Barnaul: 1999. – 161 s.

3. Ishutko A.S., Kuzmin D.E., Sabiev U.K. Mnogokomponentnye vibrodostavlyayushchye // Novaia nauka: Strategiya i vektory razvitiia. – 2017. – T. 3. No. 4. – S. 157-160.

4. Vaicis, I., Spade, K., Janushevskis, A., Boiko, A. (2020). Experimental analysis of bulk material flow through hopper. Doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF429.

5. Soleimani, B., Ahmadi, E. (2015). Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a

function of road conditions, suspension system and travel speeds. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 8: 26-32. DOI: 10.1016/J.EAEF.2014.08.002.

6. Fedorenko I.Ia. Kriterii podobii gidrodinamicheskikh modelei vibrokipiashchego sloia sypuchego materiala / I.Ia. Fedorenko, D.N. Pirozhkov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2005. – No. 1. – S. 105-108.

7. Fedorenko I.Ia., Pirozhkov D.N. Dvizhenie chastitsy sypuchego materiala pod vozdeistviem vibratsii // Tr. XXXII Uralskogo seminar "Mekhanika i protsessy upravleniia". – Ekaterinburg, 2002. – S. 212 -214.



УДК 620:519.2

DOI: 10.53083/1996-4277-2021-203-09-87-98

Я.М. Иваньо, И.В. Наумов, М.Н. Полковская  
Ya.M. Ivanyo, I.V. Naumov, M.N. Polkovskaya

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ (10 КВ) НА ПРИМЕРЕ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ОКРУГА ГОРОДА ИРКУТСКА

### FAILURE SIMULATION OF ELEMENTS OF THE CITY ELECTRIC NETWORK (10 KV) BY THE EXAMPLE OF THE PRAVOBEREZHNIY DISTRICT OF THE IRKUTSK CITY

**Ключевые слова:** отказы, моделирование аварийных отключений, вероятностная оценка, прогноз.

Приведены математические модели для вероятностной оценки и прогнозирования аварийных отключений в электрических сетях на примере Правобережного округа г. Иркутска за 2008-2017 гг. На первом этапе определена автокорреляционная функция ряда параметра для оценки его случайности. Согласно рассчитанным статистическим параметрам и критериям согласия ряд отказов оборудования может быть описан трехпараметрическим гамма-распределением. Предложена методика двухуровневого выделения экстремальных (максимальных и минимальных) значений исследуемого параметра, согласно которой получен значимый полиномиальный тренд для прогнозирования наибольшего числа аварий. Оценка наличия трендов по месячным данным показала, что для прогнозирования отказов на электрических сетях могут быть использованы полиномиальные и степенные тренды. При этом значимые тренды выявлены только для января, февраля, мая и декабря. На следующем шаге построены тренд-сезонные модели, для расчета составляющих которых использован метод наименьших квадратов. Согласно полученным индексам сезонности наибольший рост аварийных отключений имеет место в апреле и июле, а снижение – в феврале и марте. На основе

корреляционно-регрессионного анализа построены факторные модели отказов элементов электрической сети и суммы средних суточных температур по месяцам и времени. Получены линейные и нелинейные модели с учетом и без учета трендов. Для оценки точности прогнозов полученных моделей проведено сравнение результатов ретроспективного прогноза на 2017 г. с фактическими значениями. Согласно полученным результатам для прогнозирования отказов на электрических сетях в феврале, июне, июле и сентябре наилучший результат показывает тренд-сезонная модель, мае – полиномиальный тренд, ноябре – факторная с учетом времени, марте мае и октябре – нелинейное регрессионное уравнение, а в декабре – степенной тренд. Для января, апреля и августа качественные прогнозные модели отсутствуют. В связи с этим значения аварийных отключений в эти месяцы могут быть оценены по вероятностной модели.

**Keywords:** failures, emergency shutdown simulation, probabilistic estimation, forecast.

The paper presents mathematical models for probabilistic evaluation and forecasting of emergency shutdowns in electric networks by the example of the Pravoberezhniy District of the Irkutsk City from 2008 through 2017. At the first stage, the autocorrelation function of the parameter