

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 631.3:517.927.4

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_106

EDN: TONNPB

Моделирование движения семян по криволинейной траектории с постоянной скоростью в высевальном аппарате

Владимир Сергеевич Михайлов¹, Вячеслав Геннадиевич Козлов^{2✉},
Наталья Митрофановна Дерканосова³, Алексей Сергеевич Куликов⁴,
Елена Владимировна Козлова⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

²vya-kozlov@yandex.ru✉

Аннотация. При исследовании различных процессов в агроинженерии довольно часто возникают проблемы, связанные с применением математического моделирования, в частности при анализе движения частиц по криволинейным поверхностям (например рабочих органов сеялок точного посева), при обосновании параметров и режимов работы центробежных разбрасывателей, при изучении особенностей движения зернового потока по сепарационным решеткам, при исследовании процессов, происходящих во время погрузочно-разгрузочных работ механизмов и машин с применением криволинейных скатных поверхностей, а также при выборе вида этих поверхностей. Представлены результаты исследования, проведенного с целью выбора метода математического моделирования для обоснования формы криволинейной поверхности, обеспечивающей заданные кинематические характеристики движения семян в высевальном аппарате. Предложенный подход к математическому моделированию движения частиц по криволинейным поверхностям дает возможность при дальнейших исследованиях рассчитывать параметры процесса движения частиц по разнообразным траекториям. С использованием уравнений Лагранжа первого рода выведены уравнения движения частиц по шероховатым поверхностям криволинейных направляющих. Численное решение полученных уравнений с соответствующими начальными условиями позволило сделать вывод о значительных изменениях скорости движения частиц. Показано, что в случае применения криволинейных направляющих в качестве подающих устройств в сошниковую зону сеялки более предпочтительными являются кривые, по которым частицы движутся с постоянной скоростью, что исключает завалы и позволяет создавать оптимальные режимы работы машин и механизмов. Приведены уравнения для расчета кривых и представлена проверка постоянства скорости движения. Указанные криволинейные поверхности могут быть использованы при конструировании высевальных аппаратов сеялок точного посева, а также сепарационных решет для послеуборочной очистки зерна, в частности в гравитационных сепараторах.

Ключевые слова: моделирование движения, дифференциальные уравнения, выбор поверхностей, постоянная скорость движения, сеялка точного посева, сепарационные решета

Для цитирования: Михайлов В.С., Козлов В.Г., Дерканосова Н.М., Куликов А.С., Козлова Е.В. Моделирование движения семян по криволинейной траектории с постоянной скоростью в высевальном аппарате // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2(77). С. 106–115. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_106-115.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Simulation of the motion of seeds along a curved trajectory with a constant speed in a seed-feeding device

Vladimir S. Mikhailov¹, Vyacheslav G. Kozlov^{2✉}, Natalia M. Derkanosova³,
Aleksey S. Kulikov⁴, Elena V. Kozlova⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

²vya-kozlov@yandex.ru✉

Abstract. When studying various processes in agroengineering, problems often arise related to the use of mathematic simulation, in particular when analyzing the motion of particles along curved surfaces (for example, of the working bodies of precision seed planter), when justifying the parameters and operating modes of centrifugal spreaders, when outlining the features of the motion of grain flow through separation sieves, when investigating the processes occurring during loading and unloading of mechanisms and machines supplied with curved slide boards, as well as when choosing the type of these boards. The authors present the results of studies aimed at selecting mathematic simulation approach to substantiate the shape of a curved surface providing the specified kinematic characteristics of seed motion in seed-feeding devices. The proposed approach to mathematic simulation of particle motion down a curved surface makes it possible to calculate the parameters of the motion

along various trajectories during further research. Using Lagrange's equations of the first kind, the authors derived equations of particle motion down roughened surfaces of curved guides. Due to numerical solution of the obtained equations with the corresponding initial specifications, the authors made a judgement on significant changes in the particle speed. It is shown that in case of using curved guides as feeding devices into the drill coulter of the seed planter, curves along which particles move at a constant speed are more preferable, which eliminates blockages and allows creating optimal operating modes of different seeding machines. Equations for calculating curves are given and a check of the constancy of the speed of the particle motion is presented. These curved surfaces can be used at the designing seeding devices of precision seed planters, as well as separation sieves for post-harvest grain cleaning, in particular in gravity separators.

Keywords: simulation of the motion, differential equations, surfaces selection, particle motion, constant speed of motion, precision seed planter, sieves for separation

For citation: Mikhailov V.S., Kozlov V.G., Derkanosova N.M., Kulikov A.S., Kozlova E.V. Simulation of the motion of seeds along a curved trajectory with a constant speed in a seed-feeding device. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(2):106-115. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_106-115.

В агроинженерии наиболее частой задачей математического моделирования является определение кинематических характеристик [6–9, 12], в частности:

- при анализе движения частиц по некоторым криволинейным поверхностям рабочих органов сеялок [6, 7];
- при обосновании параметров и режимов работы центробежных разбрасывателей и распределителей [3, 10–13];
- при изучении особенностей движения зернового потока по сепарационным решетам [1–5, 14–17];
- при исследовании процессов, происходящих во время погрузочно-разгрузочных работ механизмов и машин с применением криволинейных скатных поверхностей, а также при выборе вида этих поверхностей.

Во всех этих случаях необходимо наличие математического обоснования оптимальных размеров и формы кривых, позволяющих частицам или элементам массы двигаться с постоянной скоростью.

Цель представленного исследования заключалась в выполнении математического обоснования формы криволинейной поверхности, обеспечивающей заданные кинематические характеристики. Для достижения поставленной цели необходимо было, используя уравнения Лагранжа первого рода, выполнить моделирование кривой, по которой движение тел или частиц происходило бы с постоянной скоростью.

Пусть частица массой m , кг движется по кривой: $y = f(x)$. На нее при движении действуют три активные силы (рис. 1):

- сила тяжести mg , где g – ускорение силы тяжести, м/с²;
- нормальная реакция N , Н;
- сила трения $F_{тр} = kN$, где k – коэффициент трения.

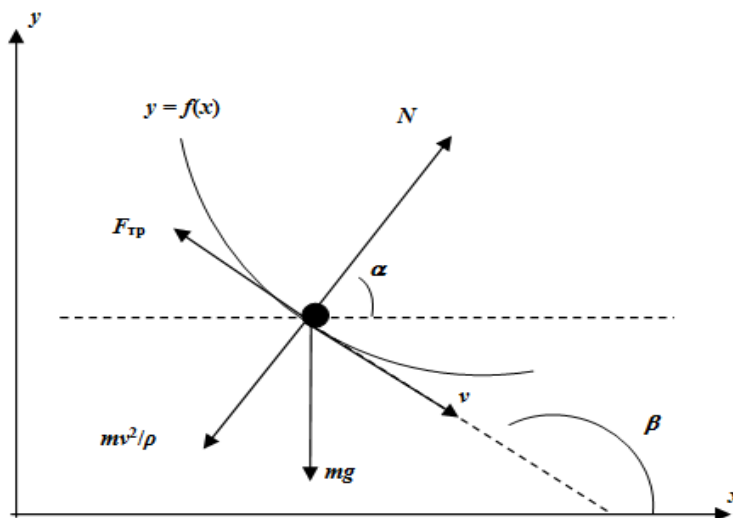


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу

Тогда уравнение движения частицы в проекции на ось x имеет вид

$$m\ddot{x} = N \cos \alpha - F_{\text{тр}} \sin \alpha, \quad (1)$$

или

$$m\ddot{x} = N(\cos \alpha - k \sin \alpha). \quad (2)$$

Здесь и далее точки вверху обозначают производные соответствующего порядка функции x по времени.

Нормальная реакция N определяется условием равновесия сил вдоль оси, направленной по нормали к кривой:

$$N = mg \sin \alpha + \frac{mv^2}{\rho}, \quad (3)$$

где ρ – радиус кривизны в данной точке, м;

$\frac{mv^2}{\rho}$ – центробежная сила инерции;

v – скорость частицы, м/с.

Радиус кривизны траектории может быть определен по формуле

$$\rho = \frac{[1 + (y'_x)^2]^{\frac{3}{2}}}{y''_x}. \quad (4)$$

В выражении (4) y'_x и y''_x – соответственно первая и вторая производные по x уравнения траектории

$$y = f(x). \quad (5)$$

Учитывая, что $\cos \alpha = \frac{ctg \alpha}{\sqrt{1 + ctg^2 \alpha}}$, $\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + ctg^2 \alpha}}$, $tg \beta = y'_x = -tg(\frac{\pi}{2} - \alpha) = -ctg \alpha$,

$ctg \alpha = -y'_x$, получаем

$$\cos \alpha = \frac{-y'_x}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}}, \quad \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}}. \quad (6)$$

Учитывая также, что

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = \dot{x}^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = \dot{x}^2 + \left(\frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}\right)^2 = \dot{x}^2 + (y'_x \cdot \dot{x})^2, \quad (7)$$

окончательно $v^2 = \dot{x}^2 [1 + (y'_x)^2]$. (8)

Тогда уравнение (2) принимает следующий вид:

$$\ddot{x} = \left(g \sin \alpha + \frac{v^2}{\rho}\right)(\cos \alpha - k \sin \alpha), \quad (9)$$

или

$$\ddot{x} = \left(g \frac{1}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} + \frac{\dot{x}^2 y''_x}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}}\right) \left(\frac{-y'_x}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}} - k \frac{1}{\sqrt{1 + (y'_x)^2}}\right). \quad (10)$$

Проведя соответствующие упрощения, получаем

$$\ddot{x} = -\frac{(g + \dot{x}^2 y''_x)(k + y'_x)}{1 + (y'_x)^2}. \quad (11)$$

Вместе с начальными условиями

$$x|_{t=0} = x_0, \dot{x}|_{t=0} = v_{x0}, \quad (12)$$

получаем задачу Коши для квазилинейного дифференциального уравнения (11) относительно функции $x(t)$.

Отметим, что в случае движения частицы по прямолинейной наклонной плоскости $y = ax + b$; $y'_x = a = \operatorname{tg}\beta$; $y''_x = 0$. Тогда уравнение (11) принимает следующий вид:

$$\ddot{x} = -\frac{g(k + \operatorname{tg}\beta)}{1 + (\operatorname{tg}\beta)^2} = -g(k \cos \beta + \sin \beta) \cos \beta. \quad (13)$$

Если через γ обозначить острый угол наклона плоскости к оси x , то $\beta = \pi - \gamma$. Приняв во внимание, что $\sin \beta = \sin \gamma$, а $\cos \beta = -\cos \gamma$, уравнение (13) движения частицы преобразуем следующим образом:

$$\ddot{x} = g(\sin \gamma - k \cos \gamma) \cos \gamma, \quad (14)$$

что соответствует уравнению движения частицы по наклонной плоскости в проекции на ось x .

Рассмотрим следующий пример.

Пусть $y(x) = 0,6(x - 1,3)^2$, $k = 0,3$, $x_0 = 0$, $v_{x0} = 0,2$ м/с.

Подставляем эти значения в уравнение (11) и выполняем расчеты:

$$\ddot{x} = -\frac{(9,81 + 1,2\dot{x}^2)(1,2\dot{x} - 1,26)}{1 + (1,2x - 1,56)^2}.$$

Численное решение полученной задачи иллюстрируется на рисунке 2.

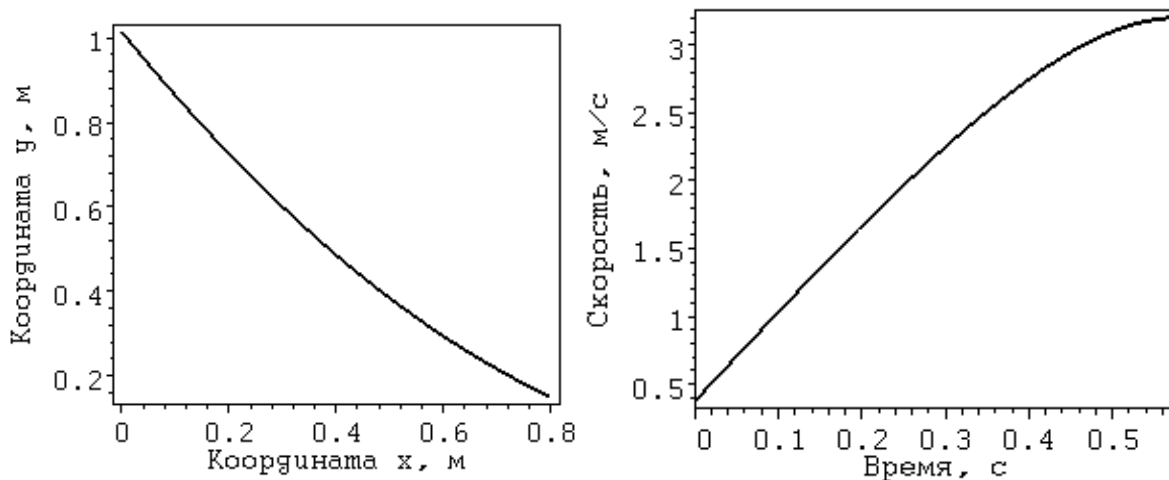


Рис. 2. Траектория движения и скорость частицы

Анализ графиков траектории движения и скорости частицы позволяет сделать вывод, что экспериментальная траектория движения практически полностью совпадает с заданной (сходимость порядка 99%), а время движения по этой кривой составляет 0,567 с, при этом скорость движения частицы возрастает до 3,2 м/с, что говорит о ее значительном изменении, вследствие чего возникают неблагоприятные последствия при движении зернового потока.

Увеличение скорости движения также может приводить к ухудшению качества сева за счет образования заторов в сеялках при движении зернового потока, а снижение скорости – даже к прекращению работы высевальных аппаратов. В связи с этим наиболее рациональной поверхностью является та, по которой частица или элемент массы зернового вороха будут двигаться с постоянной кинематической скоростью.

Выбор кривой, по которой движение происходит с постоянной скоростью

На плоскости, представленной на рисунке 1, зададимся двумя точками кривой: начальная – с координатами $(x_0; y_0)$ и конечная – с координатами $(x_k; y_k)$.

Некоторая частица должна двигаться от начальной к конечной точке по криволинейной траектории с постоянной скоростью v , равной начальной скорости попадания. Тогда уравнение движения частицы в направлении касательной к кривой будет иметь следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha - F_{\text{тр}}. \quad (15)$$

Сила трения $F_{\text{тр}} = kN$,

где k – коэффициент трения;

N – нормальная реакция.

$$N = \frac{mv^2}{\rho} + mg \cdot \cos \alpha. \quad (16)$$

С учетом выражения (16) преобразуем уравнение (15):

$$\frac{dv}{dt} = g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha, \quad (17)$$

где $v = \left(\frac{dx}{dt} \right) \cdot \sqrt{1 + y_x'^2}$.

Так как скорость на всем участке движения должна быть постоянной, должно выполняться равенство $\frac{dv}{dt} = 0$, что приводит уравнение (17) к следующему виду:

$$g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha = 0. \quad (18)$$

Используя указанные ранее представления $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ и ρ через производные искомой функции, получаем

$$y'' = -\frac{g}{v^2} \left(1 + \frac{y'}{k} \right) (1 + y'^2). \quad (19)$$

Граничные условия

$$y(x_0) = y_0, \quad y(x_k) = y_k \quad (20)$$

закрывают полученную задачу.

В силу квазилинейности уравнения (19) полученную граничную задачу мы численно решили известным методом, суть которого заключается в задании производной в начальной точке траектории $y'(x_0) = \alpha$, где $\alpha < 0$, так как функция $y(x)$ очевидно убывающая.

Полученная задача Коши решается численным методом, после чего вычисляется значение $y(x_k)$. Эта величина сравнивается с заданным значением y_k и корректируется производная в начальной точке траектории. Данный алгоритм носит название «метод пристрелки». Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока полученное значение $y(x_k)$ не приблизится к значению y_k на заданную величину.

Следует отметить, что искомая функция далеко не всегда существует. Это зависит как от положения начальной и конечной точек траектории, так и начальной скорости движения частицы.

На рисунках 3 и 4 представлены траектории кривых, определенных по формуле (19) при различных значениях a и двух значениях скоростей. Как видно из этих графиков, при уменьшении начальной скорости движения частицы возможность варьирования конечных координат $(x_k; y_k)$ значительно сужается.

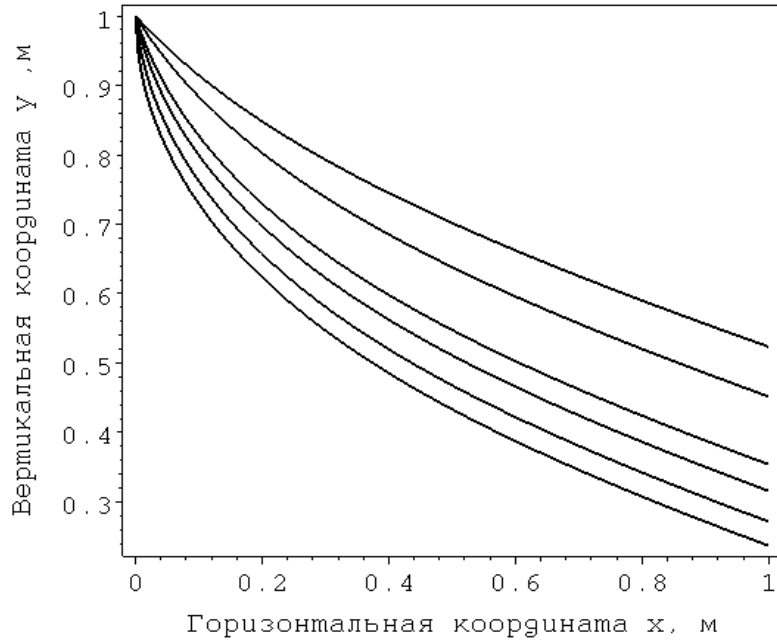


Рис. 3. Возможные траектории движения при $v = 3,5$ м/с при различных α

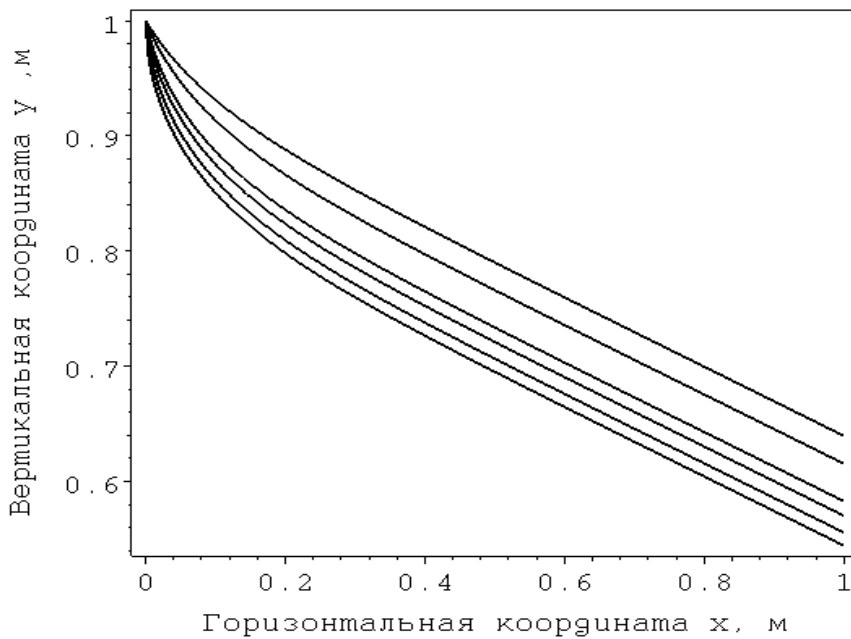


Рис. 4. Возможные траектории движения при $v = 2$ м/с при различных α

Рассмотрим следующий пример.

Пусть $x_0 = 0$, $y_0 = 0,107$ м, $x_k = 0,0748$ м, $y_k = 0$, $v = 1,7$ м/с.

Решение выражений (19) и (20) с помощью указанного выше алгоритма дает численную функцию, аналитическая аппроксимация которой имеет вид

$$y(x) = \frac{0.00081}{x + 0.0125} - 0.643x + 0.0379. \quad (21)$$

Выбор аппроксимирующей функции обусловлен сложностью вида численного решения и позволяет получить достаточную точность приближения, относительная погрешность которого не превышает 2%.

На рисунке 5 представлено наложение графиков численно полученной функции траектории движения и ее аналитической аппроксимации.

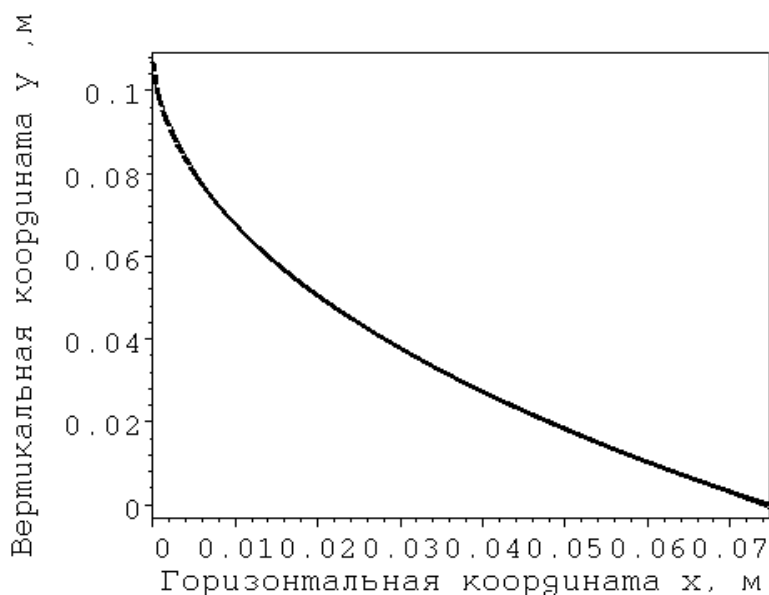


Рис. 5. Траектория движения (численная и аппроксимированная)

Как видно из данных рисунка 5, кривые практически совпадают. Необходимость получения аппроксимирующей функции вызвано тем, что для анализа адекватности полученной траектории в уравнении (11) должен быть использован аналитический вид функции $y(x)$.

С целью проверки эффективности выбранной траектории движения подставим функцию (21) в уравнение (11) с соответствующими начальными условиями. Получаем следующее уравнение:

$$\ddot{x} = \frac{\left(g + \frac{0.00162\dot{x}^2}{(0.0125 + x)^3} \right) \left(0.343 + \frac{0.000812}{(0.0125 + x)^2} \right)}{1 + \left(\frac{0.000812}{(0.0125 + x)^2} + 0.643 \right)^2}. \quad (22)$$

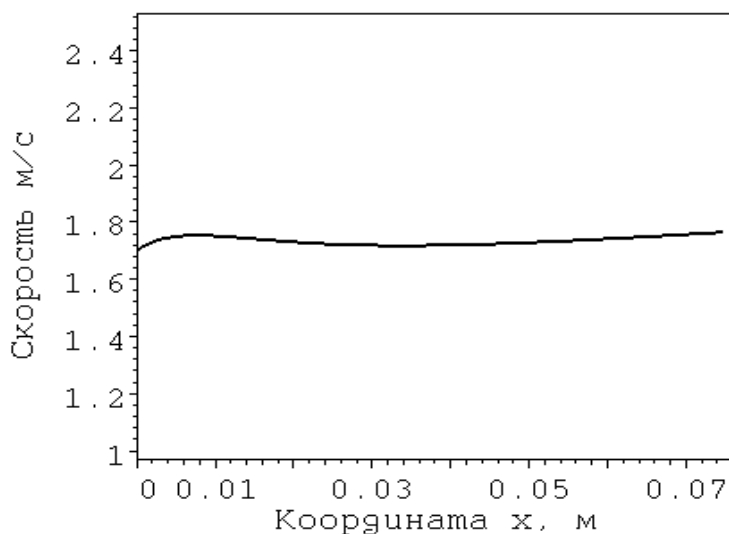


Рис. 6. Скорость частицы при движении по кривой

Анализ рисунка 6 позволяет сделать вывод о том, что представленный закон изменения скорости движения частицы по траектории, графически представленный на рисунке 5 и описываемый уравнением (22), показывает, что скорость движения частицы остается практически неизменной в зависимости от времени движения до достижения конечной точки поверхности и варьирует от 1,71 до 1,79 м/с, что и доказывает верность полученной траектории движения. Незначительный всплеск в начале вызван аппроксимирующим приближением численно полученной реальной траектории.

Выводы

Предложенный подход к математическому моделированию движения частиц по криволинейным поверхностям дает возможность при дальнейших исследованиях рассчитывать параметры процесса движения частиц по разнообразным траекториям.

С использованием уравнений Лагранжа первого рода выведены уравнения движения частиц по шероховатым поверхностям криволинейных направляющих. Численное решение полученных уравнений с соответствующими начальными условиями позволило сделать вывод о значительных изменениях скорости движения частиц.

В случае применения криволинейных направляющих в качестве подающих устройств в сошниковую зону сеялки более предпочтительными являются кривые, по которым частицы движутся с постоянной скоростью, что исключает завалы и позволяет создавать оптимальные режимы работы машин и механизмов.

Приведены уравнения для расчета кривых и представлена проверка постоянства скорости движения.

Указанные криволинейные поверхности могут быть использованы при конструировании высевяющих аппаратов сеялок точного высева, а также сепарационных решет при послеуборочной очистке зерна, в частности в гравитационных сепараторах.

Список источников

1. Бричагина А.А., Ильин С.Н., Пальвинский В.В. Моделирование технологического процесса высевающего аппарата зерновой сеялки // Вестник Красноярского ГАУ. 2016. № 11(122). С. 67–71.
2. Бунеев С.С., Никонов М.В., Клапп А.В., Никонов А.М. Выбор параметров решет машин для очистки и сепарации зерна и семян // Агропромышленные технологии Центральной России. 2019. № 3(13). С. 78–82. DOI 10.24888/2541-7835-2019-13-78-81.
3. Иванов П.А., Сафаров Р.Р., Жигайлов А.В., Курило Е.В. Теоретические исследования движения семени по криволинейному участку распределителя // АгроЭкоИнфо. 2021. № 3(45). С. 1–6. DOI: 10.51419/20213323.
4. Казаров К.Р., Астанин В.К., Черников В.А. и др. Движение вороха семян сахарной свеклы на гравитационном сепараторе с заданной криволинейной поверхностью // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2011. № 4(31). С. 51–54.
5. Кирова Ю.З., Киров В.А., Брумин А.З. Исследование законов движения семян по криволинейной поверхности скребка высевяющего аппарата // Инновационные достижения науки и техники АПК: сборник научных трудов международной научно-практической конференции (Самара, 11–12 декабря 2019 г.). Самара: ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, 2019. С. 394–397.
6. Леженкин А.Н., Серый И.А., Коломиец С.М., Рубцов Н.А. Теоретический анализ движения слоя почвы по криволинейной рабочей поверхности рыхлителя // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2019. Т. 19, № 3. С. 115–120. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-115-120.
7. Михайлов В.С., Шацкий В.П., Козлов В.Г. О движении частиц по криволинейным поверхностям // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 181. С. 105–115. DOI 10.21515/1990-4665-181-011.
8. Попов А.Е. К вопросу о моделировании движения элемента потока в гравитационном сепараторе // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2011: материалы XII международной молодежной научной конференции (Ухта, 16–18 марта 2011 г.). В 5 ч. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2011. Ч. 1. С. 266–268.
9. Спирина Н.Г., Попов А.Е., Шацкий В.П. О форме решет гравитационных сепараторов // Современные тенденции развития науки и технологий. Периодический научный сборник по материалам X международной научно-практической конференции (Белгород, 31 января 2016 г.). Белгород: Агентство перспективных научных исследований, 2016. № 1–4. С. 125–128.

10. Шацкий В.П., Орбинский В.И., Попов А.Е. Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4(47). С. 72–79.
11. Ямпиллов С.С., Балданов В.Б., Цыдендоржиев Б.Д., Сергеев Ю.А. Математическая модель процесса сепарации зернового материала гравитационным сепаратором // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (ВСГУТУ). 2013. № 5(44). С. 85–90.
12. Ямпиллов С.С., Хандакова Г.Ж. Интенсификация процесса сепарации зерна решетками: монография. Улан-Удэ: Изд-во ФГБОУ ВПО ВСГУТУ, 2014. 155 с.
13. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R. et al. Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation // INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. Vol. 60(1). Pp. 19–28. DOI: 10.35633/INMATEH-60-02.
14. Kharchenko S., Borshch Y., Piven M. et al. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11(10). Article No. 4383. DOI: 10.3390/app11104383.
15. Shatsky V.P., Orobinsky V.I., Axeonov I.I., Kornev A.S. Analysis of the beats of separation sieve pans // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series: International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production, ESCGAP 2020 (Zernograd, Rostov Oblast, August 27-28, 2020). IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 659(1). Article No. 012106. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012106.
16. Stoica D., Voicu G., Carp-Ciocordia C., Constantin G.A. Analysis of separation curves for a conical sieve with a vertical shaft and oscillation movement // Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 42nd International Symposium on Agricultural Engineering. 2014. Vol. 1. Pp. 263–272.
17. Stoica D., Voicu G., Popa L., Constantin G., Tudor P. Assessment indices for the efficiency of the separation process on a sieve with conical separation surface // INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. Vol. 60(1). Pp. 193–200.

References

1. Brichagina A.A., Ilyin S.N., Palvinsky V.V. Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa vysevyayushchego apparata zernovoy seyalki [Design of technological process seed-sowing device of grain drill]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2016;11(122):67-71. (In Russ.).
2. Buneev S.S., Nikonov M.V., Klapp A.V., Nikonov A.M. The choice of parameters of sieve machines for cleaning and separation of grains and seeds. *Agropromyshlennye tekhnologii Tsentral'noj Rossii = Agro-Industrial Technologies of Central Russia*. 2019;3(13):78-81. DOI: 10.24888/2541-7835-2019-13-78-81. (In Russ.).
3. Ivanov P.A., Safarov R.R., Zhigailov A.V., Kurilo E.V. Teoreticheskie issledovaniya dvizheniya semeni po krivolinejnomu uchastku raspredelitelya [Theoretical studies of the movement of the seed along a curved section of the distributor]. *AgroEkolInfo = AGROEKOINFO*. 2021;3(45):1-6. DOI: 10.51419/20213323. (In Russ.).
4. Kazarov K.R., Astanin V.K., Chernikov V.A. et al. Dvizhenie vorokha semyan sakharnoj svekly na gravitatsionnom separatore s zadannoj krivolinejnoy poverkhnost'yu [Movement of a sugar beet seeds heap alongside the given curvilinear surface of gravity separator]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2011;4(31):51-54. (In Russ.).
5. Kirova Yu.Z., Kirov V.A., Brumin A.Z. Issledovanie zakonov dvizheniya semyan po krivolinejnoy poverkhnosti skrebka vysevyayushchego apparata [Investigation of the laws of seed motion along the curved surface of the seeding machine scraper]. *Innovatsionnye dostizheniya nauki i tekhniki APK: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Samara, 11-12 dekabrya, 2019) [Innovative achievements of science and technology of the Agro-Industrial Complex: Collection of scientific papers of the International Research-to-Practice Conference (Samara, December 11-12, 2019)]*. Samara: Samara State Agrarian University Press; 2019:394-397. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-115-120. (In Russ.).
6. Lezhenkin A.N., Seryy I.A., Kolomiyyets S.M., Rubtsov N.A. Teoreticheskij analiz dvizheniya sloya pochvy po krivolinejnoy rabochey poverkhnosti rykhlytelya [Theoretical analysis of movement of the soil layer on the curved working surface of the cultivator]. *Praci Tavrijs'kogo Derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu = Proceedings of Tavrichesky State Technological University*. 2019;3(19):115-120.
7. Mikhailov V.S., Shatsky V.P., Kozlov V.G. O dvizhenii chastits po krivolinejnym poverkhnostyam [On the motion of particles on curved surfaces]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;181:105-115. DOI 10.21515/1990-4665-181-011. (In Russ.).
8. Popov A.E. K voprosu o modelirovanii dvizheniya elementa potoka v gravitatsionnom separatore [On the issue of modeling the motion of a flow element in a gravitational separator]. *SEVERGEOEKOTEKH-2011: materialy XII mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferentsii (Uhta, 16-18 marta 2011 g.). V 5 ch. [SEVERGEOECOTECH-2011: Proceedings of the XII International Youth Scientific Conference (Ukhta, March 16-18, 2011)]*. In 5 volumes. Ukhta: Ukhta State Technical University Press; 2011;5:266-268. (In Russ.).
9. Spirina N.G., Popov A.E., Shatsky V.P. O forme reshet gravitatsionnykh separatorov [Concerning the shape of gravitational separators]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii. Periodicheskij nauchnyj sbornik po materialam X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Belgorod, 31 yanvarya 2016 g.) [Modern trends in the development of science and technology. Periodic scientific collection of the X International Research-to-Practice Conference (Belgorod, January 31, 2016)]*. Belgorod: Agency for Advanced Scientific Research Press; 2016;1-4:125-128]. (In Russ.).

10. Shatsky V.P., Orobinsky V.I., Popov A.E. Modelirovanie dvizheniya zernovogo potoka v gravitatsionnom separatore [Simulation of grain flow motion in a gravitational separator]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;4(47):72-79. (In Russ.).
11. Yampilov S.S., Baldanov V.B., Tsydendorzhiev B.D., Sergeev Yu.A. Matematicheskaya model' protsessa separatsii zernovogo materiala gravitatsionnym separatorom [Mathematical model of grain separation with a gravity separator]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya (VSGUTU) = The Bulletin of East Siberia State University of Technology and Management (ESSUTM)*. 2013;5(44):85-90. (In Russ.).
12. Yampilov S.S., Khandakova G.J. Intensifikatsiya protsessa separatsii zerna reshetami: monografiya [Intensification of the process of grain separation by sieves: monograph]. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management Press; 2014. 155 p. (In Russ.).
13. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R. et al. Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020;60(1):19-28. DOI: 10.35633/INMATEH-60-02.
14. Kharchenko S., Borshch Y., Piven M. et al. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(10):4383. DOI: 10.3390/app11104383.
15. Shatsky V.P., Orobinsky V.I., Axonov I.I., Kornev A.S. Analysis of the beats of separation sieve pans. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series: International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production, ESCGAP 2020 (Zemograd, Rostov Oblast, August 27-28, 2020)*. IOP Publishing Ltd, 2021;659(1):012106. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012106.
16. Stoica D., Voicu G., Carp-Ciocordia C., Constantin G.A. Analysis of separation curves for a conical sieve with a vertical shaft and oscillation movement. *Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 42nd International Symposium on Agricultural Engineering*. 2014;1:263–272.
17. Stoica D., Voicu G., Popa L., Constantin G., Tudor P. Assessment indices for the efficiency of the separation process on a sieve with conical separation surface. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020;60(1):193-200.

Информация об авторах

В.С. Михайлов – соискатель кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», voh_a@mail.ru.

В.Г. Козлов – доктор технических наук, зав. кафедрой эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vya-kozlov@yandex.ru.

Н.М. Дерканосова – доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, зав. кафедрой товароведения и экспертизы товаров ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, commerce05@list.ru.

А.С. Куликов – соискатель кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», kulikov_a_s@mail.ru.

Е.В. Козлова – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», nasevl@mail.ru.

Information about the authors

V.S. Mikhailov, Candidate Degree Seeking Applicant, the Dept. of Transport and Technological Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, voh_a@mail.ru.

V.G. Kozlov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Dept. of Transport and Technological Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vya-kozlov@yandex.ru.

N.M. Derkanosova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Pro-Rector for Academic Affairs, Head of the Dept. of Merchandizing and Expert Examination of Goods, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, commerce05@list.ru.

A.S. Kulikov, Candidate Degree Seeking Applicant, the Dept. of Transport and Technological Machines Operation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, kulikov_a_s@mail.ru.

E.V. Kozlova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, nasevl@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 19.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 19.04.2023; accepted for publication 28.04.2023.

© Михайлов В.С., Козлов В.Г., Дерканосова Н.М., Куликов А.С., Козлова Е.В., 2023
