

УДК 621.81

DOI 10.17513/snt.40208

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСЕВА СЕМЯН РОТОРНО-ЛОПАСТНЫМ ДОЗАТОРОМ

<sup>1,2</sup>Исаев Ю.М., <sup>3</sup>Крючин Н.П., <sup>1,2</sup>Семашкин Н.М., <sup>3</sup>Крючин П.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», Ульяновск;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет», Усть-Кинельский, e-mail: emotion.snm@mail.ru

Исследование посвящено анализу движения семян и расчету мгновенной подачи устройства при небольших колебаниях угла поворота лопасти в стабильном режиме. Предполагается, что движение семян происходит равномерно и соответствует законам перемещения единичного объема семян. Для понимания теории перемещения частиц сыпучего материала по лопасти рабочего органа дозирующего устройства используются уравнения Лагранжа. Также проводится анализ нормальных реакций лопасти на отдельные компоненты. С учетом приведенных уравнений движения, которые включают обобщенную силу, а также результаты расчета осевой скорости лопастей и перемещения частицы в системе, была построена графическая зависимость осевой скорости семенной частицы от времени с учетом заданных характеристик ее перемещения в дозаторе. В результате исследования был сделан вывод, что участки графика неустановившегося движения частицы для заданных условий расчета в основном зависят от скорости вращения лопаток дозатора. Под воздействием первого ряда лопаток из семенного бункера частица начинает перемещаться в цилиндрическом корпусе с периодически изменяющейся осевой скоростью. Затем частица захватывается следующим рядом лопастей и продолжает перемещаться с периодически изменяющейся осевой скоростью. Затухающие колебания переходят в движение частицы с постоянной осевой скоростью, которая зависит от угловой скорости вращения ротора дозатора.

**Ключевые слова:** высевая аппарат, лопасть, сыпучий посевной материал, уравнения движения, разложение сил, действующих на частицу

## THEORETICAL STUDIES OF THE EFFECT OF LOADS ON AIRCRAFT DISC BRAKES

<sup>1,2</sup>Isaev Yu.M., <sup>3</sup>Kryuchin N.P., <sup>1,2</sup>Semashkin N.M., <sup>3</sup>Kryuchin P.V.

<sup>1</sup>Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk;

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk;

<sup>3</sup>Samara State Agrarian University, Ust-Kinelsky, e-mail: emotion.snm@mail.ru

The study is devoted to the analysis of seed motion and calculation of the instantaneous feed of the device with small fluctuations in the blade rotation angle in a stable mode. It is assumed that the seed motion is uniform and corresponds to the laws of movement of a unit volume of seeds. To understand the theory of movement of bulk material particles along the blade of the working element of the metering device, the Lagrange equations are used. An analysis of the normal reactions of the blade to individual components is also carried out. Taking into account the given equations of motion, which include the generalized force, as well as the results of calculating the axial velocity of the blades and the movement of the particle in the system, a graphical dependence of the axial velocity of the seed particle on time was constructed taking into account the specified characteristics of its movement in the dispenser. As a result of the study, it was concluded that the sections of the graph of the unsteady particle motion for the specified calculation conditions mainly depend on the rotation speed of the dispenser blades. Under the influence of the first row of blades from the seed hopper, the particle begins to move in the cylindrical body with a periodically changing axial velocity. Then the particle is captured by the next row of blades and continues to move with a periodically changing axial velocity. The damped oscillations transform into particle motion with a constant axial velocity, which depends on the angular velocity of rotation of the dosing rotor.

**Keywords:** seeding apparatus, blade, loose seed, equations of motion, decomposition of forces acting on a particle

### Введение

Одним из ключевых аспектов, определяющих успешность сельскохозяйственного производства, является равномерное распределение растений на площади питания. Этот фактор во многом зависит от качества посева, которое, в свою очередь, определяется характеристиками высеваяющего устройства.

Изучение текущих высеваяющих технологий и устройств дало возможность определить многообещающее направление – создание роторно-лопастных машин для принудительного распределения семян. Эти аппараты обладают способностью обеспечивать точный контроль за дозировкой семенного материала, учитывая его физико-механические характеристики.

**Целью исследования** является создание теоретической модели процесса посева семян, в котором используется лопастное дозирующее устройство. Основное внимание уделяется анализу движения семенного материала и определению мгновенной подачи лопастного дозирующего устройства при бесконечно малом изменении угла поворота лопасти в стабильном режиме работы.

#### Материалы и методы исследования

В Самарской государственной сельскохозяйственной академии на кафедре «Механика и инженерная графика» ведется разработка лопастного устройства, предназначенного для дозирования семенного материала. Исследуемый прототип данного устройства обеспечивает стабилизацию потока семян перед их попаданием в высевное окно, что способствует равномерному распределению семян (рис. 1). Прототип устройства состоит из следующих элементов: резервуар 1, корпус 2, оснащенный высевным окном 8, ротор 3, а также торсионные втулки 5, оснащенные плоскими лопастями 4, расположенными под опре-

деленным углом атаки  $\alpha$ . Эти лопасти являются основой предлагаемого дозатора. На передней стенке 6 корпуса 2 расположено высевное окно 8, оснащенное заслонкой 7. Между передними плоскими лопастями 4 и стенкой 6 корпуса образуется стабилизационная камера 9.

Роторно-лопастной дозатор функционирует по следующему принципу. В процессе вращения ротора 3 плоские лопасти 4 захватывают семена из семенного резервуара 1 и направляют их в стабилизационную камеру 9. В этой камере семена равномерно распределяются и образуют слой определенной толщины. Благодаря этому давление на лопасти уменьшается, и они начинают поворачиваться, уменьшая угол атаки  $\alpha$ . Это позволяет лопастям мягко перемещать семена к высевному окну 8.

Заслонка 7 на высевном окне регулирует количество подаваемых семян, обеспечивая необходимую норму посева. Таким образом, роторно-лопастной дозатор обеспечивает равномерное распределение семян с учетом их размера, формы и плотности, что способствует увеличению урожайности и снижению затрат на посевные работы [1–3].

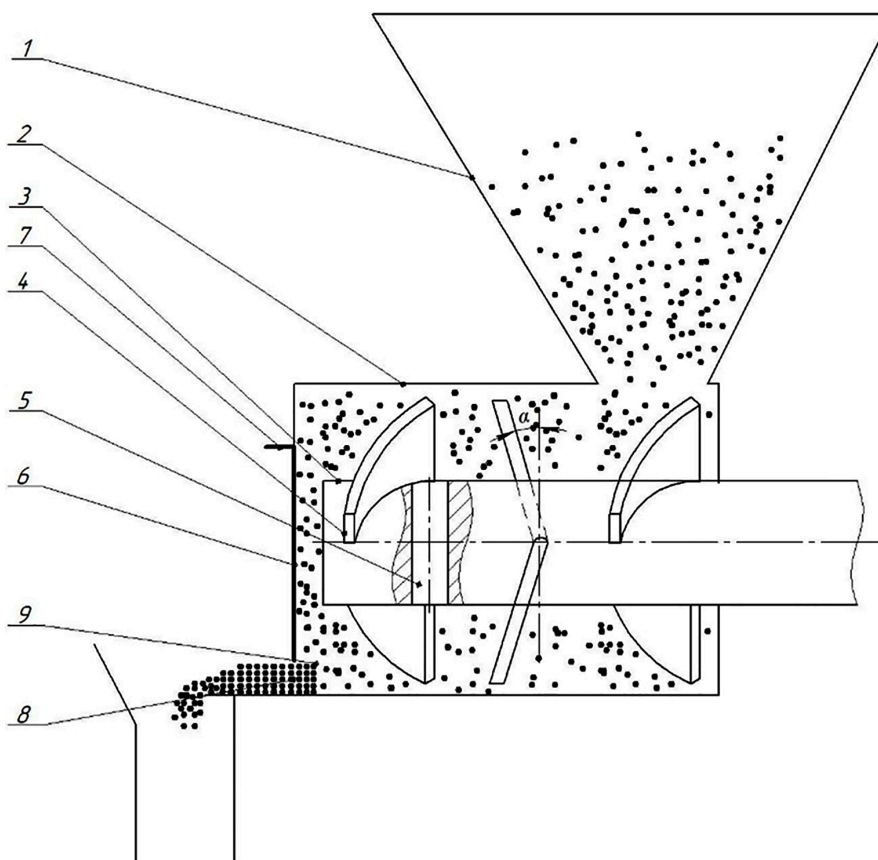


Рис. 1. Схема роторно-лопастного дозатора

### Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования движения семенного материала авторы рассчитывают мгновенную подачу роторно-лопастного дозатора при небольшом изменении угла поворота лопасти в установленном режиме работы. Предполагается, что движение слоя семян будет равномерным и соответствовать законам движения единичного объема.

Рассмотрим проекцию лопасти на плоскость, перпендикулярную оси ротора. Выделим лопасти элементарную площадку бесконечно малой величины (рис. 2), равную [4–6]:

$$dS_n = RdRd\varepsilon, \quad (1)$$

где  $R$  – внутренний радиус элементарной площадки, м;  $dR$  – ширина элементарной площадки, м;  $d\varepsilon$  – угол сегмента элементарной площадки, град.

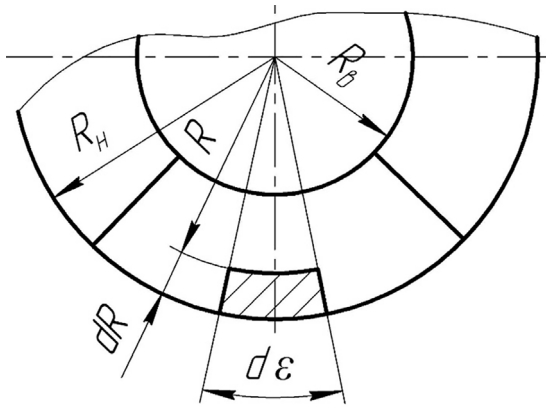


Рис. 2. Развертка лопасти

Для вычисления подачи материала плоской лопастью можно применить следующее уравнение:

$$dQ_{\text{л}} = v_1 \cdot dS_n, \quad (2)$$

где  $v_1$  – осевая скорость перемещения семенного материала, м/с.

После интегрирования уравнения (1)

$$S_n = \iint_{R\varepsilon} RdRd\varepsilon$$

получим, что площадь поверхности перемещающей материал лопасти равна (без учета технологических зазоров) [7–9]:

$$S_n = \frac{\pi}{4} (R_H^2 - R_B^2), \quad (3)$$

где  $R_H$  – наружный радиус лопасти, м;  $R_B$  – внутренний радиус лопасти, м.

Далее для решения теоретического вопроса о взаимодействии вращающейся лопасти и перемещаемой ею частицы высеваемого материала воспользуемся уравнением Лагранжа [10–12].

Из-за неидеальности связей пара сил трения выражается между стенкой корпуса  $F_1$  и поверхностью лопасти  $F_2$ .

Существует такое понятие, как обобщенная координата, в рассматриваемом случае такой является  $s$ , и относительно нее уравнение Лагранжа второго рода запишется

$$\frac{\partial T}{\partial s} \cdot \frac{d}{dt} - \frac{\partial T}{\partial s} = Q_s, \quad (4)$$

где  $T$  – кинетическая энергия частицы высеваемого материала, Дж;  $t$  – время движения частицы, с;  $Q_s$  – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате  $s$ , Н.

Определим  $Q_s$ , для чего вычислим сумму работ, выполненных активной силой и силами сопротивления при перемещении  $\delta s$  [13–15]:

$$\sum \delta A(F_k) = (\sum F_{ks}) \delta s, \quad (5)$$

где  $\sum \delta A(F_k)$  – общая сумма работ активной силы и сил трения, Дж;  $\sum F_{ks}$  – сумма сил по направлению перемещения частицы на поверхности лопасти  $S$  (рис. 3).

Для понимания направления действующих сил на частицу, находящуюся на поверхности лопасти, развернем винтовую линию движения частицы, так чтобы плоскость была касательной к образующей поверхности корпуса (рис. 3).

Реакция  $F_1$  (рис. 3) вектор, которой направлен в обратную сторону от перемещения частицы и действует в направлении  $v_0$ , отсюда

$$F_1 = N_1 \cdot f_1, \quad (6)$$

где  $N_1$  – действующая реакция силы на частицу материала, направленная с поверхности лопасти, которая образует угол  $\alpha$  с осью  $Oz$ , Н;  $f_1$  – коэффициент трения частицы о поверхность лопасти.

При этом сила трения,

$$F_2 = N_2 \cdot f_2,$$

направлена обратно вектору абсолютной скорости, где  $N_2$  – реакция на частицу перемещаемого материала с внутренней поверхности кожуха, Н;  $f_2$  – коэффициент трения частицы о внутреннюю поверхность корпуса.

Представим, что  $Q_s$ , обобщенная сила реакций, будет коэффициентом при  $\delta s$  в выражении (5):

$$Q_s = \sum F_{ks} = F_1 \cos(\alpha + \varphi) + N_2 \cos \alpha - G \sin \alpha - F_2, \quad (7)$$

где  $\varphi$  – угол между векторами скорости частицы  $v$  и ее горизонтальной составляющей  $v_x$ , град.;  $G$  – сила тяжести, Н.

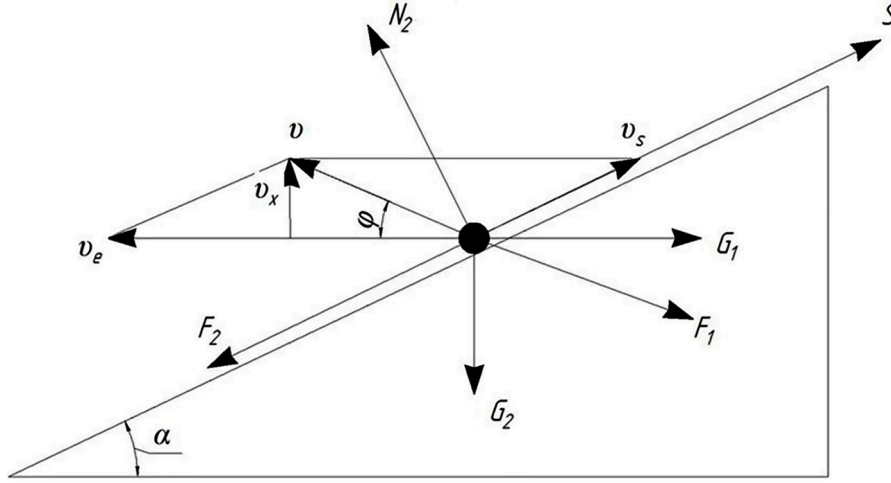


Рис. 3. Разложение векторов по винтовой линии на плоскость

С учетом выражения (7) запишем уравнения для сил трения следующим образом:

$$F_1 = G \cdot f_1 \left( \sin \beta \cos \gamma + \frac{(v \cos \varphi)^2}{rg} \right), \quad (8)$$

$$F_2 = f_2 (G_1 \cdot \sin \alpha + G_2 \cdot \cos \alpha + F_1 \sin(\alpha + \varphi)), \quad (9)$$

$$G_2 = G \cos \beta \quad N_2 = G \cdot \beta \sin \gamma \cdot \sin, \quad (10)$$

$$F_2 = f_2 \left( \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta + f_1 \left( \frac{v^2 \cos^2 \varphi}{rg} + \sin \beta \cos \gamma \right) \sin(\varphi + \alpha) \right), \quad (11)$$

$$F_2 = f_2 \cos \theta \left( \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta + f_1 \left( \sin \beta \cos \gamma + v^2 \cos^2 \varphi / (rg) \right) \sin(\alpha + \varphi) \right), \quad (12)$$

где  $r$  – переменный радиус вращения частицы указывает на то, что расстояние от центра вращения и направление движения изменяются в зависимости от времени. Это вызывает движение частицы по криволинейной траектории, м.

Определим угол поворота  $\gamma$ , то есть на сколько градусов повернется материальная точка в плоскости перпендикулярной оси вращения лопастей за определенный промежуток времени  $t$ , при этом необходимо учитывать, что частица перемещается с координатой  $s$  [16].

$$\gamma = \omega t - s \cdot \cos \alpha / r. \quad (13)$$

Значения  $\cos(\alpha + \varphi)$ ,  $\sin(\alpha + \varphi)$  выразим через переносную координату:

$$\sin(\alpha + \varphi) = \omega r \sin \alpha / v. \quad (14)$$

Применяя теорему косинусов, получим

$$v = \sqrt{\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2}, \quad (15)$$

где  $\dot{s}$  – первая производная от перемещения частицы, м/с.

Тогда, с учетом выражения (15),

$$\sin(\alpha + \varphi) = \omega r \sin \alpha / \sqrt{\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2}, \quad (16)$$

$$\cos(\alpha + \varphi) = \sqrt{1 - \sin^2(\alpha + \varphi)} = (\omega r \cos \alpha - \dot{s}) / \sqrt{\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2}. \quad (17)$$

Скорость вращения частицы получит выражение

$$v \cos \varphi = \omega r - \dot{s} \cos \alpha. \quad (18)$$

Подставив (8), (10), (12) при этом учитывая (13), (15), (17), (18) подставив в (7), получим

$$Q_s = G \cdot \left\{ f_1 \left( (\omega r - \dot{s} \cos \alpha)^2 / (rg) + \sin \beta \cos(\omega t - s \cdot \cos \alpha / r) \right) \right. \\ \left. \left( (\omega r (\cos \alpha - f_2 \cos \theta \sin \alpha) - \dot{s}) / \sqrt{\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2} \right) - \right. \\ \left. - \sin \beta (f_2 \cos \theta \sin \alpha - \cos \alpha) \sin(\omega t - s \cdot \cos \alpha / r) - \cos \beta (f_2 \cos \theta \cos \alpha - \sin \alpha) \right\}. \quad (19)$$

Поскольку частица находится в постоянном движении, определим ее кинетическую энергию:

$$T = \frac{1}{2} \frac{Gv^2}{g}. \quad (20)$$

После подстановки выражения (15) в (20), получим

$$T = \frac{1}{2} \frac{G}{g} (\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2). \quad (21)$$

Чтобы найти производные этих функций, воспользуемся формулой (1). Затем вычислим значения производных:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{s}} = \frac{G}{g} (\omega r \cos \alpha - \dot{s}), \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{s}} = \frac{G}{g} \ddot{s}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial T}{\partial s} = 0. \quad (24)$$

После замены выражения  $Q_s$  из (19) и производных (23) и (24) в уравнении Лагранжа (4) и упрощения, авторы пришли к дифференциальному уравнению движения частицы:

$$\frac{\ddot{s}}{g} - G \cdot \left\{ f_1 \left( (\omega r - \dot{s} \cos \alpha)^2 / (rg) + \sin \beta \cos(\omega t - s \cdot \cos \alpha / r) \right) \right. \\ \left. \left( (\omega r (\cos \alpha - f_2 \cos \theta \sin \alpha) - \dot{s}) / \sqrt{\omega^2 r^2 - 2\omega r \dot{s} \cos \alpha + \dot{s}^2} \right) - \right. \\ \left. - \sin \beta (f_2 \cos \theta \sin \alpha - \cos \alpha) \sin(\omega t - s \cdot \cos \alpha / r) - \cos \beta (f_2 \cos \theta \cos \alpha - \sin \alpha) \right\} = 0. \quad (25)$$

Уравнение (25) отражает движение частицы относительно высевающего устройства. В процессе анализа выявлено, что перемещение частицы высевающего материала, в кожухе цилиндрического сечения, при перемещении лопастями. При этом зная, что частица в момент переноса к окну высева перемещается внутри корпуса в раз-

личных направлениях, получим, что коэффициенты трения частицы  $f_1 = 0,5$  – о поверхность лопатки,  $f_2 = 0,5$  – о внутреннюю поверхность корпуса;  $H = 0,025$  м – шаг винтовой линии;  $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$  – угловая скорость вращения;  $r = 0,02$  м – внутренний радиус корпуса устройства. На основе полученных результатов был построен рисунок 4.

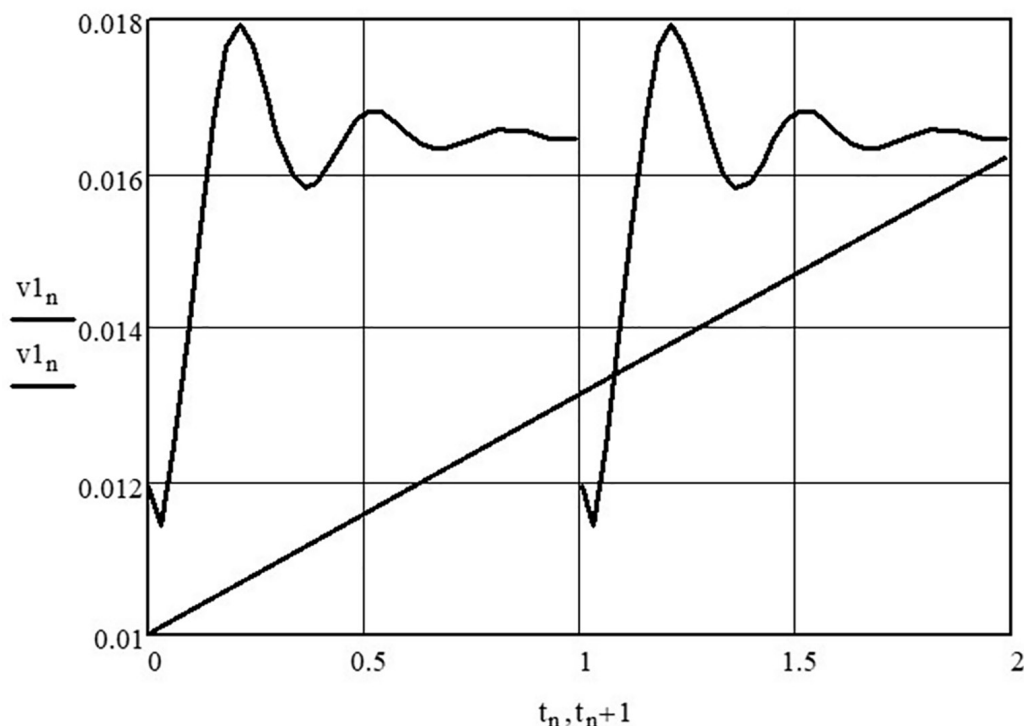


Рис. 4. Осевая скорость частицы материала определяется временем и заданными характеристиками

Участки неустановившегося движения частицы для заданных условий расчета в основном зависят от скорости вращения лопаток дозатора. Под воздействием первого ряда лопаток из семенного бункера частица начинает перемещаться в цилиндрическом корпусе с периодически изменяющейся осевой скоростью. Характер затухающих колебаний осевой скорости представлен на рис. 4. Далее частица захватывается последующим рядом лопастей лопаток и продолжает перемещаться с периодически изменяющейся осевой скоростью. Затухающие колебания переходят в движение частицы с постоянной осевой скоростью, зависящей от угловой скорости вращения ротора дозатора.

Практическая значимость разработки роторно-лопастного дозатора для высева семян заключается в возможности его применения в сельском хозяйстве для точного и равномерного распределения семян по почве. Это способствует повышению урожайности и качества посевов, снижению затрат на посевную кампанию и улучшению условий труда аграриев.

Кроме того, разработка может быть интересна производителям сельскохозяйственной техники, научных учреждений и организаций, занимающихся вопросами сельского хозяйства.

## Заключение

В процессе теоретических исследований и обработки информации было выведено дифференциальное уравнение, описывающее перемещение частицы в сеялке. Это уравнение было получено с помощью преобразования уравнения Лагранжа. Решение этого уравнения позволило определить характер и скорость осевого перемещения частицы материала в устройстве высева, которое в начальный момент времени не стабильно и изменяется в пределах от 0,011 до 0,018 м/с. При этом через полсекунды перемещение стабилизируется, и средняя скорость перемещения частиц составляет 0,013 м/с, что согласуется с экспериментальными значениями подачи материала в пределах от 2 до 5 г/с в зависимости от частоты вращения лопаток.

## Список литературы

1. Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Zlobin V.A. Motion patterns of a material particle on a helical surface // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15, Is. 5. P. 643-646.
2. Isaev Yu.M., Zlobin V.A., Semashkin N.M., Ayugin N.P. Spiral screw as the working body of a conveyor // AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021. 2022. P. 030033.
3. Isaev Yu.M., Nekrashevich V.F., Semashkin N.M., Torzhenova T.V. The theory of honey outflow from a honey-

comb // AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021. 2022. P. 030022.

4. Морозов А.В., Кнуров А.А., Хабиева Л.Л. Исследование осевого усилия при объемном электромеханическом дорновании // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 2 (62). С. 208–214.

5. Osanova Sh., Aduov M., Kapov S., Orlyansky A., Volodya K. The results of experimental research of a rotor seed-metering unit for sowing non-free-flowing seeds // Journal of Agricultural Engineering. 2024. Vol. 55, Is 1. P. 1556.

6. Артамонов Е.И., Артамонова О.А., Казарина А.В., Дик И.И., Ванюшкин В.А. Разработка селекционной сеялки с дисковым высевальным устройством для деланочного посева амаранта метельчатого // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2024. № 1 (105). С. 83–90.

7. Габаев А.Х. Исследование различных типов катушек высевальных аппаратов на равномерность подачи зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (207). С. 95–99.

8. Морозов А.В., Кнуров А.А., Хабиева Л.Л. Исследование осевого усилия при объемном электромеханическом дорновании // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 2 (62). С. 208–214.

9. Морозов А.В., Кнуров А.А., Хабиева Л.Л. Влияние режимов объемного электромеханического дорнования на увеличение наружного диаметра посадочной поверхности // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1 (61). С. 197–202.

10. Салахутдинов И.Р., Глушенко А.А., Хохлов А.Л. Теоретическое обоснование снижения интенсивности ка-

витационного изнашивания стенок гильзы цилиндров нанесением антикавитационного покрытия // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (58). С. 18–24.

11. Халиуллин Д.Т., Дмитриев А.В., Хафизов Р.Н., Яровой М.Н. Исследование движения воздушно-зерновой смеси в рабочей зоне семенорешетки аэромеханического типа // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 4 (63). С. 27–37.

12. Zhichkina L., Mirgorodskaya M., Zhichkin K., Markov A., Ergashev I., Tumanov A., Volgin A. Assessment of degradation transformations of agricultural lands // BIO Web of conferences. XVII International Scientific and Practical Conference “State and Development Prospects of Agribusiness” (Interagromash 2024). EDP Sciences, 2024. P. 04001.

13. Krivoshepko S.N. Kinematic surfaces with congruent generatrix curves // RUDN Journal of Engineering Research. 2023. Vol. 24, Is 2. P. 166–176.

14. Kolinko A.A., Kambulov S.I., Chervyakov I.V., Rudo D.V., Olshevskaya A.V. Investigation of the uniformity of seed distribution during sowing of winter wheat // E3S Web of Conferences. XVI International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – Interagromash 2023”. Rostov-on-Don, Russia, 2023. P. 01009.

15. Saqee F.S., Diakite S., Kavhiza N.J., Pakina E., Zargar M. The efficacy of micronutrient fertilizers on the yield formulation and quality of wheat grains // Agronomy. 2023. Vol. 13, Is. 2. P. 566.

16. Бычков И.Е., Бычкова Т.В. Моделирование параметров шнекового транспортера-распределителя // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 1. С. 40–44.