

УДК 631.3:517.927.4

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

**О ДВИЖЕНИИ ЧАСТИЦ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ**

Михайлов Владимир Сергеевич

аспирант

SPIN-код автора 2276-9717

РИНЦ Author ID = 1115621

e-mail: voh\_a@mail.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Шацкий Владимир Павлович

д-р. техн. наук, профессор

SPIN-код автора 8914-1073

РИНЦ Author ID = 711057

e-mail: sha.vladim@yandex.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

Козлов Вячеслав Геннадиевич

д-р. техн. наук, профессор

SPIN-код автора 8181-2771

РИНЦ Author ID = 202094

e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

В процессе исследования различных вопросов агроинженерии достаточно часто встречается задача математического моделирования движения некоторых частиц по криволинейным поверхностям. Подобные проблемы возникают при работе аппаратов сеялок точного высева, выборе параметров и режимом работы центробежных разбрасывателей, при движении зернового потока по сепарационным решетам, при погрузочно-разгрузочных работах с применением криволинейных скатных поверхностей и т.д. Все это приводит к необходимости моделирования процесса движения по разнообразным траекториям. Кроме того, с учетом специфики каждой конкретной задачи, полученные математические модели позволят производить выбор криволинейных направляющих для достижения заданных кинематических характеристик движения частиц и тел. В настоящей работе производится моделирование движение тел по криволинейным поверхностям с использованием уравнений Лагранжа первого рода. Как выяснилось в процессе реализации этой модели, скорость движения по различным известным поверхностям, образующими которых

UDC 631.3:517.927.4

05.20.01 - Technologies and means of mechanization of agriculture (technical sciences)

**ON THE MOTION OF PARTICLES ON CURVED SURFACES**

Mikhailov Vladimir Sergeevich

graduate student

RSCI SPIN-code: 2276-9717

Author ID = 1115621

e-mail: voh\_a@mail.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

Shatsky Vladimir Pavlovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

RSCI SPIN-code: 8914-1073

RSCI Author ID = 711057

e-mail: sha.vladim@yandex.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

Kozlov Vyacheslav Gennadievich

Doctor of Technical Sciences, Professor

RSCI SPIN-code: 8181-2771

RSCI Author ID = 202094

e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*

In the process of studying various issues of agroengineering, the problem of mathematical modeling of the movement of certain particles on curved surfaces is quite common. Similar problems arise when choosing the parameters and operating mode of centrifugal spreaders, when grain flow moves through separation screens, during loading and unloading operations using curved sloping surfaces. All this leads to the need to simulate the process of movement along various trajectories. In addition, taking into account the specifics of each specific task, the obtained mathematical models will allow for the selection of curved guides to achieve the specified kinematic characteristics of the motion of particles and bodies. In this work, the motion of bodies on curved surfaces is modeled. In contrast to the usual two-dimensional systems of equations, a one-dimensional model is proposed, which has a simpler solution. As it turned out during the implementation of this model, the speed of movement on various known surfaces, the generators of which are circles, parabolas, hyperbolas, etc. will change significantly. When the grain flow moves along the separating surfaces, these velocity changes have adverse consequences. On the one hand, a decrease in speed causes congestion when the grain

являются окружности, параболы, гиперболы и т.д. изменяются значительным образом. При движении семян в аппаратах сеялок точного высева, а также при движении зернового потока по сепарирующим поверхностям эти изменения скорости имеют неблагоприятные последствия. При уменьшении скорости движения могут образовываться заторы при движении частиц, а при ее увеличении могут возникнуть проблемы с точностью высева в высевающих аппаратах, а также к уменьшению эффективности работы сепарационных решет, что снижает работоспособность указанных установок. В связи с этим, наиболее рациональной поверхностью является та, по которой частица или элемент массы зернового вороха будут двигаться с постоянной скоростью. Приводится уравнение такой кривой и проверяется скорость движения по ней

Ключевые слова: ВЫСЕВАЮЩИЕ АППАРАТЫ, КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СЕПАРАЦИОННЫЕ РЕШЕТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ВЫБОР ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОСТОЯННАЯ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

flow is moving, which leads to the inability of the separation unit to work. On the other hand, an increase in the speed of movement leads to a decrease in the efficiency of separation, which reduces the operability of this installation. In this regard, the most rational surface is the one on which a particle or an element of the mass of a grain pile will move at a constant speed. The equation of the curve along which the particle will move at a constant speed is also derived

Keywords: CURVED SEPARATION SIEVES, MOTION MODELING, DIFFERENTIAL EQUATIONS, CHOICE OF SURFACES, CONSTANT SPEED OF MOTION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-181-011>

**Введение.** Достаточно часто в технических задачах возникает проблема моделирования движения частиц или тел по некоторым криволинейным поверхностям или кривым с целью определения их кинематических характеристик [6–9, 12]. Кроме того, важной задачей является выбор вида этих поверхностей для достижения заданных законов движения. Такие проблемы, в частности, возникают при моделировании движения по криволинейным поверхностям аппаратов точного высева [3], по сепарирующим поверхностям [1, 2, 4, 5, 10–16, 18], а также при выборе вида этих поверхностей [17, 19–22]. Следует отметить, что вогнутые сепарирующие поверхности за счет центробежной силы увеличивают эффективность сепарации.

### **Моделирование движения частицы криволинейной траектории.**

Рассмотрим несвободное движение частицы по некоторой кривой вида  $y=f(x)$ .

<http://ej.kubagro.ru/2022/07/pdf/11.pdf>

С учетом силы трения  $F_{тр}$ , в проекциях на оси координат  $(x, y)$  уравнения движения частицы имеют вид:

$$m\ddot{x} = F_x + N(t)\cos(N, x) - F_{тр, x}, \quad m\ddot{y} = F_y + N(t)\cos(N, y) - F_{тр, y},$$

где точки вверху переменных обозначают соответствующие производные по времени.

Здесь

$$\cos(N, x) = \frac{-y'_x}{\sqrt{y'^2_x + 1}}, \quad \cos(N, y) = \frac{1}{\sqrt{y'^2_x + 1}}$$

направляющие косинусы вектора нормали  $N(t)$  к поверхности,  $m$ —масса частицы, кг. Через  $F_x, F_y$  обозначены проекции на оси координат внешних сил, действующих на частицу, «штрих» у функции  $y$  означает производную по переменной  $x$ .

Так как сила трения направлена противоположно скорости движения частицы, то  $F_{тр, x} = kN(t)\frac{\dot{x}}{v}$ , где  $\dot{x}$ —проекция скорости на ось  $x$ ,  $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ —скорость частицы,  $k$ —коэффициент трения.

Тогда  $F_{тр, x} = kN(t)\frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$ . Аналогично  $F_{тр, y} = kN(t)\frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$ .

Вводя понятие неопределенного множителя Лагранжа

$$\lambda(t) = \frac{N(t)}{m\sqrt{y'^2_x + 1}},$$

получаем уравнения движения вместе с третьим, замыкающим систему уравнением поверхности:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= F_x - \lambda(t)y'_x - k\lambda(t)\sqrt{y'^2_x + 1} \cdot \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \\ \ddot{y} &= F_y + \lambda(t) - k\lambda(t)\sqrt{y'^2_x + 1} \cdot \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$y = f(x).$$

Вместе с начальными условиями:

$$x|_{t=0} = x_0, y|_{t=0} = y_0, \dot{x}|_{t=0} = v_{x0}, \dot{y}|_{t=0} = v_{y0},$$

получаем задачу Коши для системы двух квазилинейных дифференциальных уравнений и одного алгебраического уравнения (1).

Рассмотрим следующий пример.

Пусть  $y(x) = (x-1)^2$ ,  $k = 0.3$ ,  $x_0 = 0$ ,  $v = 0,4472$  м/с.

Тогда система уравнений (1) и уравнение кривой примут вид:

$$\ddot{x} = \lambda(2 - 2x) - 0.3\lambda\sqrt{(2 - 2x)^2 + 1} \cdot \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$$

$$\ddot{y} = -9.81 + \lambda - 0.3\lambda\sqrt{(2 - 2x)^2 + 1} \cdot \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$$

$$y = (x - 1)^2,$$

а начальные условия —  $x|_{t=0} = 0$ ,  $y|_{t=0} = 1$ ,  $\dot{x}|_{t=0} = 0,2$ ,  $\dot{y}|_{t=0} = -0,4$ .

Численное решение полученной задачи иллюстрируется на рисунке 1.

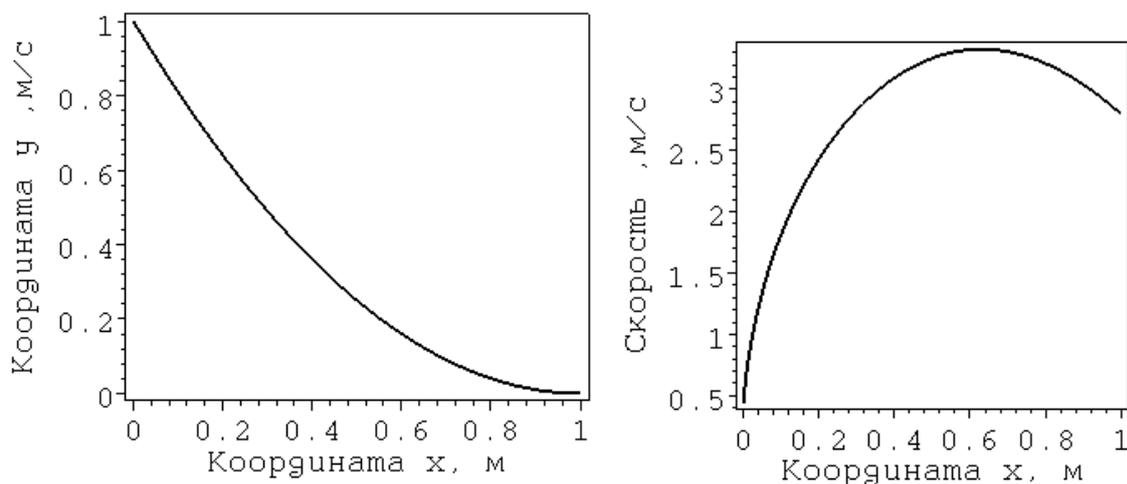


Рис.1. Траектория движения и скорость частицы

Как видно из этих графиков, траектория движения совпадает с заданной. Скорость возрастает до 3,32 м/с, а затем несколько убывает.

Как показывают расчеты, скорость движения по различным известным поверхностям, образующими которых являются окружности, парабо-

лы, гиперболы и. т. д. изменятся значительным образом. При движении зернового потока по сепарирующим поверхностям эти изменения скорости имеют неблагоприятные последствия. С одной стороны, уменьшение скорости вызывает заторы при движении зернового потока, что приводит к невозможности работы сепарационной установки. С другой стороны, увеличение скорости движения ведет к уменьшению эффективности сепарации, что снижает работоспособность указанной установки. В связи с этим, наиболее рациональной поверхностью является та, по которой частица или элемент массы зернового вороха будут двигаться с постоянной скоростью.

**Выбор кривой, по которой движение происходит с постоянной скоростью.**

Пусть на плоскости заданы две точки кривой: начальная с координатами  $(x_0; y_0)$  и конечная с координатами  $(x_k; y_k)$ . Некоторая частица, двигаясь от начальной к конечной точки по криволинейной траектории должна поддерживать постоянную скорость  $v$ , равную начальной скорости попадания частицы на кривую.

В работе одного из авторов [14] было получено уравнение такой кривой:

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

Граничные условия:

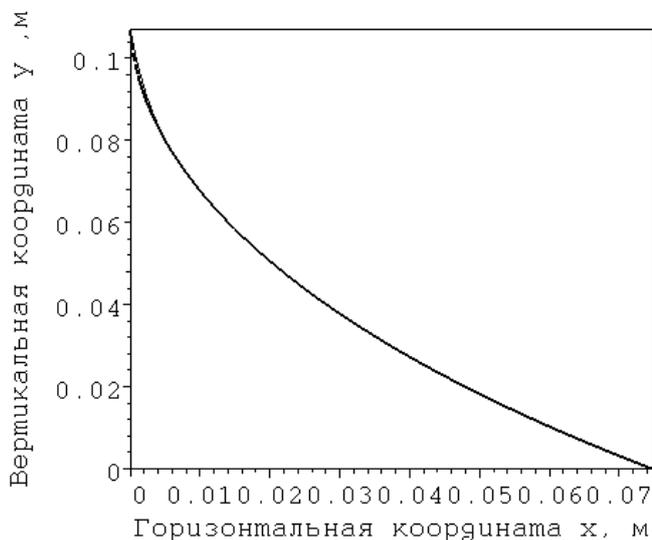
$$y(x_0) = y_0, y(x_k) = y_k, \quad (3)$$

замыкают полученную задачу.

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.

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 задачи (2), (3) дает численную функцию, аналитическая аппроксимация которой имеет вид:

$$y(x) = 5,11 \cdot 10^{15} x^{12} - 2,49 \cdot 10^{15} x^{11} + 543699659527251x^{10} - 69944955280263x^9 + 5901615613678x^8 - 343309466830x^7 + 1409066293x^6 - 410510114,6x^5 + 8428145x^4 - 119768x^3 + 1160x^2 - 9x + 0,107 \quad (4)$$



Выбор порядка аппроксимирующего полинома обусловлен сложностью вида численного решения и позволяет получить достаточную точность приближения, относительная погрешности которого не превышает 3% и то только в области около  $x = 0$ .

Рисунок 2. Траектория движения (численная и аппроксимированная)

На рисунке 2 представлено наложение графиков численно полученной функции

траектории движения (сплошная линия) и ее аналитической аппроксимации (пунктирная линия). Как видно из этого рисунка эти кривые практически совпадают. Необходимость получения аппроксимирующей функции вызвано тем, что для анализа адекватности полученной траектории в системе уравнений (1) должен быть использован аналитический вид функции  $y(x)$ .

С целью проверки эффективности выбранной траектории движения, подставим функцию (4) в систему уравнений (1). Начальными условиями являются:

$$x|_{t=0} = 0, y|_{t=0} = 0,107, \dot{x}|_{t=0} = v / \sqrt{1 + y'(0)^2} = 0,1878, \dot{y}|_{t=0} = -1,689$$

На рисунке 3 представлен закон изменения скорости движения частицы по этой траектории в зависимости от времени движения до достижения конечной точки поверхности. Как видно из этого графика, скорость движения частицы остается практически неизменной, что и доказывает верность полученной траектории движения. Некоторые незначительные

колебания скорости вызваны аппроксимирующим приближением численно полученной реальной траектории.

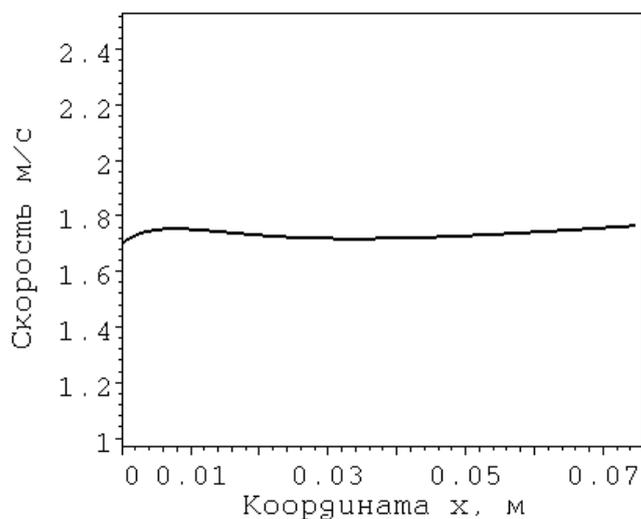


Рисунок 3. Скорость частицы при движении по кривой

### Основные результаты и выводы.

С использованием метода уравнений Лагранжа первого рода выведены уравнения движения частиц по шероховатой поверхности с криволинейной направляющей. 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 способствует более рациональным режимам работы установок. Приведено уравнение таких кривых, и представлена проверка постоянства скорости движения по ним. Указанные криволинейные поверхности могут быть использованы при конструировании высевающих аппаратов сеялок точного высева, а также сепарационных решет при послеуборочной очистке зерна, в частности, в гравитационных сепараторах.

**Список литературы:**

1. Авдеев Н.Е. Гравитационный сепаратор с конической просеивающей поверхностью / Н.Е. Авдеев, Ю.В. Чернухин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. - № 7. – С.30 – 31.
2. Авдеев Н.Е. Перспективные типы центробежных и гравитационных сепараторов / Н.Е. Авдеев, А.В. Некрасов, С.Б. Резуев, Ю.В. Чернухин//Воронеж: Воронежский государственный университет. – 2005. – 637с.
3. Бричагина, А. А. Моделирование технологического процесса высевающего аппарата зерновой сеялки / А. А. Бричагина, С. Н. Ильин, В. В. Пальвинский // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 11(122). – С. 67-71.
4. Жигжитов А.О. Обоснование основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна/ А.О. Жигжитов// автореферат дис. ... кандидата технических наук / Вост.-Сиб. гос. ун-т технологий и упр.. Улан-Удэ, 2017.
1. Зюлин А.Н. Зависимость полноты просеивания фракций зернового материала от количества решет в канале гравитационного зерноочистителя/ А.Н. Зюлин, А.А. Стрелков //Достижения науки и техники АПК, 2001, № 10.-134 с.
2. Иванов П.А. Теоретические исследования движения семени по криволинейному участку распределителя/П.А. Иванов , Р.Р. Сафаров, А.В. Жигайлов, Е.В. Курило// АгроЭкоИнфо. 2021. № 3 (45).–С 1–6.
3. Казаров К.Р. Движение вороха семян сахарной свеклы на гравитационном сепараторе с заданной криволинейной поверхностью/ К.Р. Казаров, В.К. Астанин, В.А. Черников, О.Н. Щербаков, В.П. Евсюкова, А.А. Одиноких // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2011. № 4 (31). С. 51-54.
4. Кирова Ю.З. Исследование законов движения семян по криволинейной поверхности скребка высевающего аппарата/ Ю.З. Кирова, В.А. Киров, А.З. Брумлин// В сборнике: Инновационные достижения науки и техники АПК. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. 2019. С. 394-397.
5. Леженкин А.Н. Теоретический анализ движения слоя почвы по криволинейной рабочей поверхности рыхлителя/ А.Н. Леженкин, И.А. Серый, С.М. Коломиец, Н.А. Рубцов// Праці Таврійського Державного агротехнологічного університету. 2019. т. 3. № 19. С. 115-120.
6. Попов А.Е. К вопросу о моделировании движения элемента потока в гравитационном сепараторе/ А.Е. Попов//В сборнике: СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2011. материалы XII Международной молодежной научной конференции : в 5 частях. Ухтинский государственный технический университет. 2011. С. 266-268.
7. Попов А.Е. Моделирование процесса очистки зернового вороха на рабочем органе гравитационного сепаратора / А.Е. Попов, Н.Г. Спирина // Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов «образование, наука, производство и управление» / Сборник научных и научно-методических докладов / Старооскольский технологический институт. – 2009. – Том II – С. 183 – 185.
8. Попов А.Е. О вопросе моделирования потока частиц по криволинейной сепарирующей поверхности, параболической формы, с учетом потери массы / А.Е. Попов // Международная научно-практическая конференция / Сб. н. тр. / Старооскольский технологический институт. – 2007. – Том IV – С. 43 – 45.
9. Спирина Н.Г. О форме решет гравитационных сепараторов/Н.Г. Спирина, А.Е. Попов, В.П. Шацкий// Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 1-4. С. 125-128.

10. Шацкий В.П. Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе/В.П. Шацкий, В.И. Оробинский, А.Е. Попов// Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4 (47).- С. 72-79.
11. Ямпиров С.С., Балданов В.Б. Интенсификация процесса разделения частиц зернового материала на гравитационном сепараторе: сб. науч. тр. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – Вып. 8. – С. 171-173.
12. Ямпиров С.С. Математическая модель процесса сепарации зернового материала гравитационным сепаратором/ С.С. Ямпиров, В.Б Балданов. , Б.Д. Цыдендоржиев, Ю.А. Сергеев //Вестник ВСГУТУ. 2013. № 5 (44). С. 85-90.
13. Badretdinov I. Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation/ I. Badretdinov, S. Mudarisov, R.Lukmanov , R.Ibragimov , Permyakov V. , M.Tuktarov//INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. Т. 60. № 1. С. 19-28.
14. Kharchenko S. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct/ S. Kharchenko , Y. Borshch , M. Piven , M. Abduev , S. Kovalyshyn , A. Miernik , Popardowski , P. Kiełbasa //Applied Sciences (Switzerland). 2021. Т. 11. № 10:4383.
15. Nikonov M. The choice of parameters of sieve machines for cleaning and separation of grains and seeds/ S. Buneev , M. Nikonov, A. Klapp, A. Nikonov// Агропромышленные технологии Центральной России. 2019. № 3 (13). С. 78-82.
16. Stoica D. Analysis of separation curves for a conical sieve with a vertical shaft and oscillation movement/ D. Stoica //В сборнике: Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 42. International Symposium on Agricultural Engineering. 2014. С. 263-272.
17. Stoica D. Assessment indices for the efficiency of the separation process on a sieve with conical separation surface/ D. Stoica , G. Voicu , G. Constantin, P. Tudor, L. Popa //INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. Т. 60. № 1. С. 193-200.
18. Shatsky V. P. Analysis of the beats of separation sieve pans/ V. P. Shatsky, V. I. Orobinsky, I. I. Axonov, A. S. Kornev//Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 659(1) doi:10.1088/1755-1315/659/1/012106 (2021).

## References

1. Avdeev N.E. Gravitacionny`j separator s konicheskoy proseivayushhej povrchnost`yu / N.E. Avdeev, Yu.V. Chernuxin // Mexanizaciya i e`lektrifikaciya sel`skogo xoz`yajstva. – 2000. - № 7. – S.30 – 31.
2. Avdeev N.E. Perspektivny`e tipy` centrobezhny`x i gravitacionny`x separatorov / N.E. Avdeev, A.V. Nekrasov, S.B. Rezuev, Yu.V. Chernuxin//Voronezh: Voronezhskij gosudarstvenny`j universitet. – 2005. – 637s.
3. Brichagina, A. A. Modelirovanie texnologicheskogo processa vy`seivayushhego apparata zernovoj seyalki / A. A. Brichagina, S. N. Il`in, V. V. Pal`vinskij // Vestnik KrasGAU. – 2016. – № 11(122). – S. 67-71.
4. Zhigzhitov A.O. Obosnovanie osnovny`x parametrov vozdušno-gravitacionnogo separatora dlya ochistki zerna/ A.O. Zhigzhitov// avtoreferat dis. ... kandidata texnicheskix nauk / Vost.-Sib. gos. un-t texnologij i upr.. Ulan-Ude`, 2017.
1. Zyulin A.N. Zavisimost` polnoty` proseivaniya frakcij zernovogo materiala ot kolichestva reshet v kanale gravitacionnogo zernoochistitelya/ A.N. Zyulin, A.A. Strelkov //Dostizheniya nauki i texniki APK, 2001, № 10.-134 s.
2. Ivanov P.A. Teoreticheskie issledovaniya dvizheniya semeni po krivoli-nejnomu uchastku raspredelitelya/P.A. Ivanov , R.R. Safarov, A.V. Zhigajlov, E.V. Kurilo// AgroE`koInfo. 2021. № 3 (45).–S 1–6.

3. Kazarov K.R. Dvizhenie voroxa semyan saxarnoj svekly` na gravitacionnom separatore s zadannoj krivolinejnoj poverxnost`yu/ K.R. Kazarov, V.K. Astanin, V.A. Chernikov, O.N. Shherbakov, V.P. Evsyukova, A.A. Odinkix // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. № 4 (31). S. 51-54.

4. Kirova Yu.Z. Issledovanie zakonov dvizheniya semyan po krivolinejnoj poverxnosti skrebka vy`sewayushhego apparata/ Yu.Z. Kirova, V.A. Kirov, A.Z. Brumin// V sbornike: Innovacionny`e dostizheniya nauki i texniki APK. Sbornik nauchny`x trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. S. 394-397.

5. Lezhenkin A.N. Teoreticheskij analiz dvizheniya sloya pochvy` po krivolinejnoj rabochej poverxnosti ry`xlitelya/ A.N. Lezhenkin, I.A. Sery`j, S.M. Kolomecz, N.A. Rubczov// Praczy Ttavrijs`kogo Derzhavnogo agrotexnologichnogo universitetu. 2019. t. 3. № 19. S. 115-120.

6. Popov A.E. K voprosu o modelirovanii dvizheniya e`lementa potoka v gravitacionnom separatore/ A.E. Popov//V sbornike: SEVERGEOE`KOTEX-2011. materialy` XII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii : v 5 chastyax. Uxtinskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet. 2011. S. 266-268.

7. Popov A.E. Modelirovanie processa ochistki zernovogo voroxa na rabochem organe gravitacionnogo separatora / A.E. Popov, N.G. Spirina // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya prepodavatelej, sotrudnikov i aspirantov «obra-zovanie, nauka, proizvodstvo i upravlenie» / Sbornik nauchny`x i nauchno-metodicheskix dokladov / Starooskol`skij texnologicheskij institut. – 2009. – Tom II – S. 183 – 185.

8. Popov A.E. O voprose modelirovaniya potoka chasticz po krivolinejnoj separiruyushhej poverxnosti, parabolicheskoy formy`, s uchetom poteri massy` / A.E. Popov // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya / Sb. n. tr. / Starooskol`skij texnologicheskij institut. – 2007. – Tom IV – S. 43 – 45.

9. Spirina N.G. O forme reshet gravitacionny`x separatorov/N.G. Spirina, A.E. Popov, V.P. Shaczkiy// Sovremenny`e tendencii razvitiya nauki i texnologij. 2016. № 1-4. S. 125-128.

10. Shaczkiy V.P. Modelirovanie dvizheniya zernovogo potoka v gravitacionnom separatore/V.P. Shaczkiy, V.I. Orobinskij, A.E. Popov// Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 4 (47).- S. 72-79.

11. Yampilov S.S., Baldanov V.B. Intensifikaciya processa razdeleniya chasticz zernovogo materiala na gravitacionnom separatore: sb. nauch. tr. – Ulan-Ude`: Izd-vo VSGUTU, 2012. – Vy`p. 8. – S. 171-173.

12. Yampilov S.S. Matematicheskaya model` processa separacii zernovogo materiala gravitacionny`m separatorom/ S.S. Yampilov, V.B Baldanov. , B.D. Cydendor-zhiev, Yu.A. Sergeev //Vestnik VSGUTU. 2013. № 5 (44). S. 85-90.

13. Badretdinov I. Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation/ I. Badretdinov, S. Mudarisov, R.Lukmanov , R.Ibragimov , Permyakov V. , M.Tuktarov//INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. T. 60. № 1. S. 19-28.

14. Kharchenko S. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct/ S. Kharchenko , Y. Borshch , M. Piven , M. Abduev , S. Kovalyshyn , A. Miernik , Popardowski , P. Kielbasa //Applied Sciences (Switzerland). 2021. T. 11. № 10:4383.

15. Nikonov M. The choice of parameters of sieve machines for cleaning and separation of grains and seeds/ S. Buneev , M. Nikonov, A. Klapp, A. Nikonov// Agropromy`shlenny`e texnologii Central`noj Rossii. 2019. № 3 (13). S. 78-82.

16. Stoica D. Analysis of separation curves for a conical sieve with a vertical shaft and oscillation movement/ D. Stoica //V sbornike: Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 42. International Symposium on Agricultural Engineering. 2014. S. 263-272.

17. Stoica D. Assessment indices for the efficiency of the separation process on a sieve with conical separation surface/ D. Stoica , G. Voicu , G. Constantin, P. Tudor, L. Popa //INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. Т. 60. № 1. S. 193-200.

18. Shatsky V. P. Analysis of the beats of separation sieve pans/ V. P. Shatsky, V. I. Orobinsky, I. I. Axonov, A. S. Kornev//Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 659(1) doi:10.1088/1755-1315/659/1/012106 (2021).