

УДК 631

DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-6-12

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СЕМЯН СОИ В СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ

Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и физика»

Семашкин Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

Злобин Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 8 (84231) 55-95-49, e-mail: isurmi@yandex.ru

Ключевые слова: частица, сыпучий материал, угловая скорость, критическая частота вращения.

Работа направлена на исследование процесса перемещения единичной частицы сыпучего материала в вертикальном направлении спирально-винтовым рабочим органом транспортера и обоснование его технических характеристик. Единичная частица сыпучего материала принята эквивалентом материальной точки. В качестве устройства, перемещающего сыпучий материал, принят спирально-винтовой транспортер. Процесс транспортирования осуществляется при вертикальном положении устройства. Конструкция данного устройства подразумевает нахождение привода рабочего органа в нижней части, чтобы во время работы перемещаемый материал двигался снизу вверх. При определении параметров процесса перемещения сыпучего материала при помощи транспортера со спирально-винтовым рабочим органом применено моделирование с использованием уравнений Даламбера. Эти уравнения описывают установившееся течение частиц в цилиндрической системе координат. Применяемый принцип Даламбера дает возможность использовать методы статики для решения задач динамики. Для механической системы можно записывать уравнения движения в виде уравнений равновесия. Из таких уравнений можно определить неизвестные силы, в частности, реакции связей, а также условия, действующие на перемещаемую транспортирующим устройством единичную частицу сыпучего материала. Частица, при движении непосредственно взаимодействует со сложной системой, которая включает в себя: зафиксированную внутреннюю часть образующей внешнего кожуха; зафиксированную внешнюю часть образующей внутреннего цилиндра; подвижный спирально-винтовой рабочий орган с определенными геометрическими параметрами (диаметр проволоки спирали, шаг спирали, средний диаметр витков).

Введение

При проектировании и расчете вертикальных устройств для перемещения сыпучих материалов с рабочими органами, выполненными в виде спиральных винтов, возникает потребность в использовании данных, которые осуществляют связь имеющихся параметров с кинетикой движения всего потока материала и его частиц. В качестве частного случая можно рассмотреть

перемещение частицы в установившемся постоянном потоке. Частица совершает перемещение по внутренней образующей части цилиндрического корпуса транспортирующего устройства. Следовательно, актуальной задачей становится необходимость нахождения указанной выше взаимосвязи, пригодной для практического применения конкретного спирально-винтового устройства на практике.

Для рассмотрения выберем случай, когда устройство находится в вертикальном положении. Устройство включает спирально-винтовой рабочий орган, заключенный между соосными цилиндрическими деталями (рис. 1): расположенным снаружи кожухом и установленной внутри него вставкой. Кожух и вставка жестко зафиксированы относительно друг друга и установлены неподвижно. Спиральный винт вращается между кожухом и вставкой с постоянной частотой ω_0 .

Материалы и методы исследований

Примем систему декартовых координат Охуз в качестве неподвижной, где ось у совпадает по направлению с касательной скоростью спирального винта (рис. 1). Ось Oz параллельна вертикальной оси спирального винта. В качестве материальной точки выступает частица сыпучего материала. Эта частица располагается на поверхности спирально-винтового рабочего органа. Во время вращения рабочего органа данная частица материала также совершает вращение вокруг оси с определенной угловой скоростью (рис. 1).

Во время перемещения материальной точки спиральным винтом внутри цилиндров, возникают силы трения о внутреннюю поверхность кожуха F_2 и о поверхность спирали F_1 . На рис. 1 приведены следующие обозначения: G – сила тяжести, H ; N_2 – сила, действующая на материальную точку со стороны внутренней поверхности кожуха, H ; N_1 – сила, действующая на частицу сыпучего материала со стороны витка спирали. Сила N_1 составляет угол θ с нормалью к винтовой линии, а нормаль расположена под определенным углом α к оси Oz (рис. 2).

При вертикальном перемещении материальная точка участвует в следующих движениях: 1) абсолютном, по винтовой траектории, т.е. по внутренней образующей кожуха; 2) переносном - вместе с винтовой линией спирали; 3) относительном - вдоль витка спирали [1].

Рассмотрим подробно развертку сил, действующих на материальную точку (рис. 2). На рисунке 2 u_0 – скорость, направленная по витку спирали; u_n – вектор скорости переносного движения, располагающийся на плоскости, которая является перпендикуляром к оси спирали; u – вектор абсолютной скорости [1]. Значительное влияние на подачу спирально-винтового устройства оказывает осевая скорость u_1 . Из рисунка 2 следует, что она определится как $u_1 = u \sin \beta = u_0 \sin \alpha$, где β – угол между вектором абсолютной скорости u и вектором скорости переносного

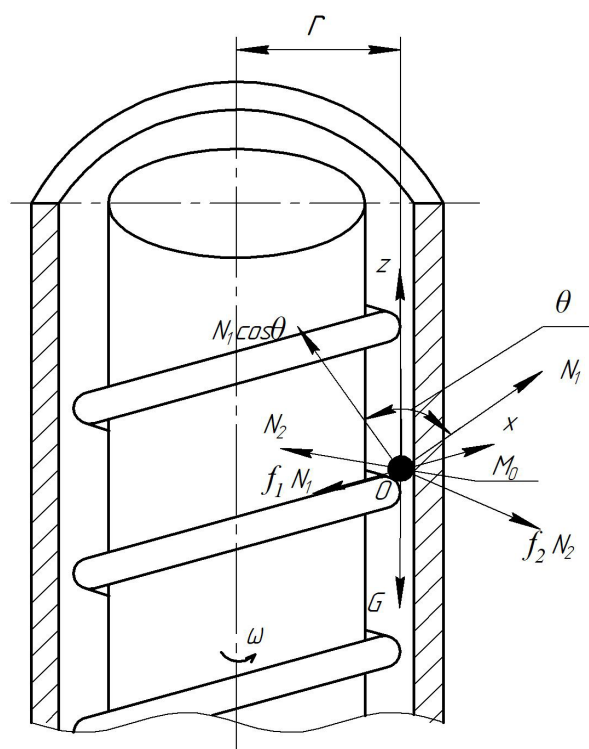


Рис. 1 - Разложение векторов сил, приложенных к материальной частице

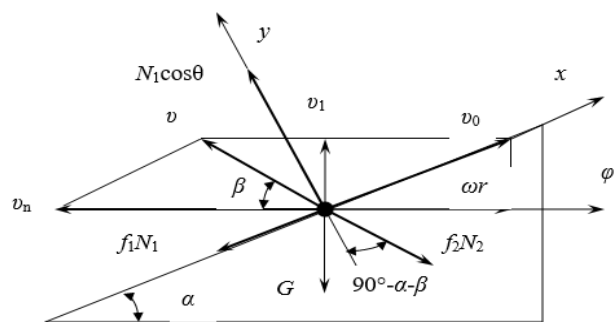


Рис. 2 - Развертка сил, действующих на материальную точку

движения u_n , град.

Если расположить вектор u_0 на плоскости, которая является перпендикуляром к оси спирали, то получим следующие векторы: ωr и u_1 , которые направлены под прямым углом друг к другу, следовательно, осевая скорость

$$u_1 = \omega r \operatorname{tg} \alpha,$$

где r – радиус внутренней поверхности кожуха, м [2, 3, 4].

Следовательно, u_1 зависит от угловой скорости ω , радиуса внутренней поверхности кожуха и угла α . При установившемся движении потока сыпучего материала должно выполняться условие равновесия

$$\sum y = 0, \quad \sum x = 0.$$

Спроецировав силы, действующие на ма-

териальную точку по осям Y и X [5, 6, 7, 8, 9], найдем:

$$N_1 \cos \theta - G \cos \alpha - f_2 (\omega - \omega')^2 r \frac{G}{g} \sin(\alpha + \beta) = 0; \quad (1)$$

$$-f_1 N_1 - G \sin \alpha - f_2 (\omega - \omega')^2 \times r \frac{G}{g} \cos(\alpha + \beta) = 0, \quad (2)$$

где f_1 – коэффициент трения, которое возникает между частицей сыпучего материала и поверхностью витка спирали; f_2 – коэффициент трения, которое возникает между частицей сыпучего материала и внутренней поверхностью кожуха; g – ускорение свободного падения, м/с².

Умножим уравнение (1) на f_2 , и суммируем его с уравнением (2), умноженным на $\cos \theta$. Полученное выражение сократим на G и умножим на минус единицу, в результате получим:

$$f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha + \frac{f_2 (\omega_0 - \omega)^2}{g} \times r [f_1 \sin(\alpha + \beta) - \cos \theta \cos(\alpha + \beta)] = 0. \quad (3)$$

Из рис. 2 найдем тригонометрические функции угла β :

$$\sin \beta = \frac{v_1}{v} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\sqrt{(v_0 \sin \alpha)^2 + (v_n - v_0 \cos \alpha)^2}}, \quad (4)$$

$$\cos \beta = \frac{v_n - v_0 \cos \alpha}{v} = \frac{v_n - v_0 \cos \alpha}{\sqrt{(v_0 \sin \alpha)^2 + (v_n - v_0 \cos \alpha)^2}}. \quad (5)$$

Преобразуем в этих равенствах выражение под знаком радикала:

$$(v_0 \sin \alpha)^2 + (v_n - v_0 \cos \alpha)^2 = v_0^2 + v_n^2 - 2v_n \cdot v_0 \cdot \cos \alpha (v_n - v_0 \cos \alpha)^2. \quad (6)$$

Подставим в (4) и (5) значения скоростей $v_0 = \omega \cdot r / \cos \alpha$ и $v_n = \omega_0 \cdot r$. Обозначив $k = \omega / \omega_0$, получим:

$$\sin \beta = \frac{k \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}}, \quad (7)$$

$$\cos \beta = \frac{(1 - k) \cdot \cos \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}}. \quad (8)$$

Подставим (7) и (8) в выражение (3). Про-

ведя тригонометрические преобразования, получим:

$$f_1 \sin(\alpha + \beta) - \cos \theta \cos(\alpha + \beta) = \frac{f_1 \cos \alpha \sin \alpha - \cos^2 \alpha \cos \theta + k \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}}. \quad (9)$$

Запишем соотношение (3) в следующем виде:

$$\frac{f_2 r \omega_0^2 (1 - k)^2 (f_1 \cos \alpha \sin \alpha - \cos^2 \alpha \cos \theta + k \cos \theta)}{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}} = -f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha. \quad (10)$$

Рассмотрим критерий $\lambda = r \omega_0^2 / g$, который характеризует кинематический режим спирального винта. Решив уравнение (10) относительно коэффициента λ , получим выражение для определения скорости перемещения частицы в зависимости от параметров спирально-винтового устройства:

$$\lambda = \frac{r \omega_0^2}{g} = \frac{(f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha)(1 - k)^2}{f_2 (1 - k)^2} \times \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}}{(\cos^2 \alpha \cos \theta - f_1 \cos \alpha \sin \alpha - k \cos \theta)}. \quad (11)$$

Искомый корень k уравнения (11) не может быть ни мнимым, ни отрицательным и должен иметь вещественное и положительное значение [10, 11, 12, 13, 14]. Возможность подъема частицы является следствием существования центробежной силы $N = (\omega_0 - \omega)^2 \cdot r \cdot G / g$ и силы трения $F = f_2 \cdot N$. Отношение $k = \omega / \omega_0$ есть правильная дробь, так как при $k = \omega / \omega_0 = 0$ следует, что $\omega = 0$. Это означает, что частица не перемещается вдоль спирали, а если $\omega = \omega_0$, то $k = 1$ и $\sin \beta = \frac{k \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 - 2k \cdot \cos^2 \alpha}} = 1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}} = 1$, откуда $\beta = 90^\circ$, то есть вектор v расположен вертикально. Однако это невозможно, так как отсутствуют силы, осуществляющие подъем частицы материала:

$$N = (\omega_0 - \omega)^2 \cdot r \cdot G / g = 0.$$

Результаты исследований

Решая уравнение (11) для каждого конкретного случая при определенных значениях f_1 и f_2 , можно выбрать спирально-винтовое устройство с наибольшей производительностью, когда имеет максимальное значение величина:

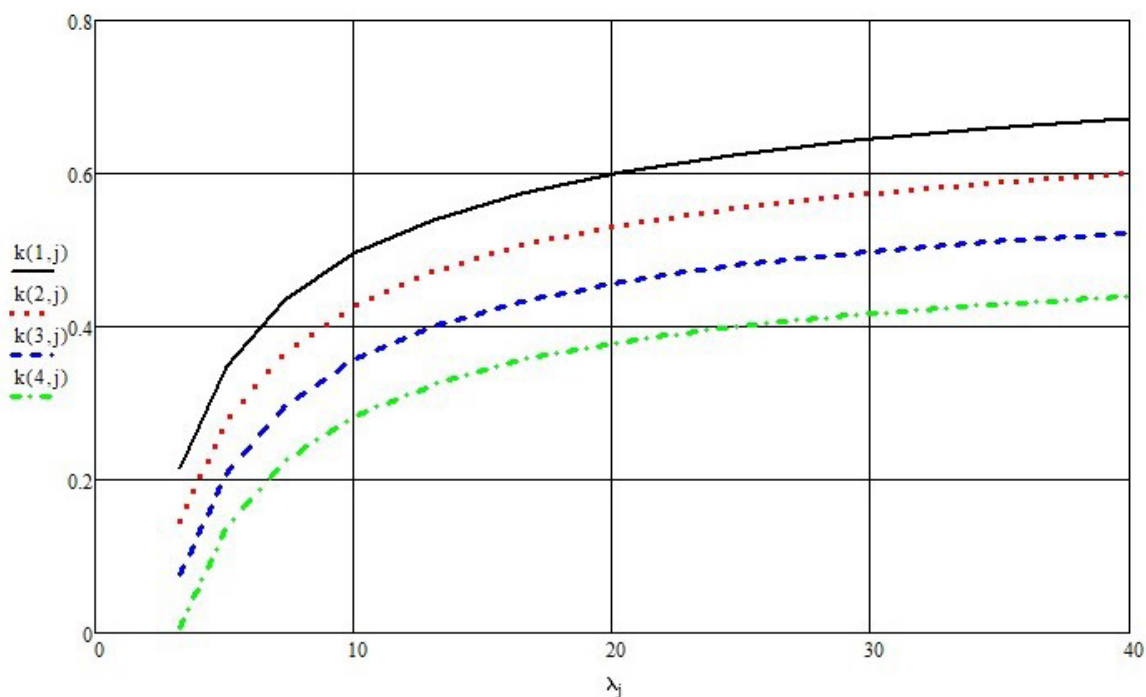


Рис. 3 - Изменения $k = \omega/\omega_0$ в зависимости от $\lambda = r\omega_0^2/g$ для выбранных характеристик рабочего органа устройства при различных значениях угла, образованного наклоном винтовой линии спирали

Обозначения: $k(1,j) - \alpha = 15^\circ$; $k(2,j) - \alpha = 20^\circ$; $k(3,j) - \alpha = 25^\circ$; $k(4,j) - \alpha = 30^\circ$

$$\frac{v_1}{v_n} = \frac{\omega \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\omega_0 \cdot r} = k \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Если принять коэффициент трения частицы материала по стали $f_1 = f_2 = 0,5$, то можно построить графические зависимости k от функции $\lambda = r\omega_0^2/g$ по уравнению (11) для $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$, которые представлены на рисунке 3.

Определим критические условия, при которых рабочий орган не поднимает частицу материала. Подставив в уравнение (3) $\beta = 0^\circ$, $\cos \beta = 1$, $\sin \beta = 0$, имеем:

$$f_1 \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha + \frac{f_2(\omega_0 - \omega)^2}{g} \times \\ \times r [f_1 \sin \alpha - \cos \theta \cos \alpha] = 0.$$

Далее получим

$$\omega_0 - \omega = \sqrt{\frac{(f_1 \cos \alpha + \sin \alpha \cos \theta) \cdot g}{rf_2 (\cos \alpha \cos \theta - f_1 \sin \alpha)}}$$

или

$$\omega_0 = \omega + \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \cdot g}{rf_2}}$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{f_1}{\cos \theta} \right)$$

где

Соответственно, для перемещения материала вертикально вверх вдоль оси рабочего органа необходимо соблюсти условие:

$$\omega_0 \geq \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \cdot g}{rf_2}} \quad (12)$$

Решим задачу, связанную с осевой скоростью материала при его подъеме в вертикальном транспортирующем устройстве. Полученное уравнение (12) описывает относительное перемещение частицы материала в направлении снизу вверх.

На рис. 3 изображены полученные после расчетов результаты определения линейной скорости спирали и смещения частицы при ее взаимодействии со спирально-винтовым рабочим органом транспортера. Устройство имеет следующие характеристики: $r = 0,02$ м – радиус внутренней образующей кожуха; $d = 0,004$ м – диаметр проволоки спирали; $r_1 = 0,004$ м – среднее значение радиуса перемещаемой частицы; $r_2 = 0,018$ м – средний радиус спирали.

Обсуждение

Полученные зависимости дают возможность выбора оптимальных параметров верти-

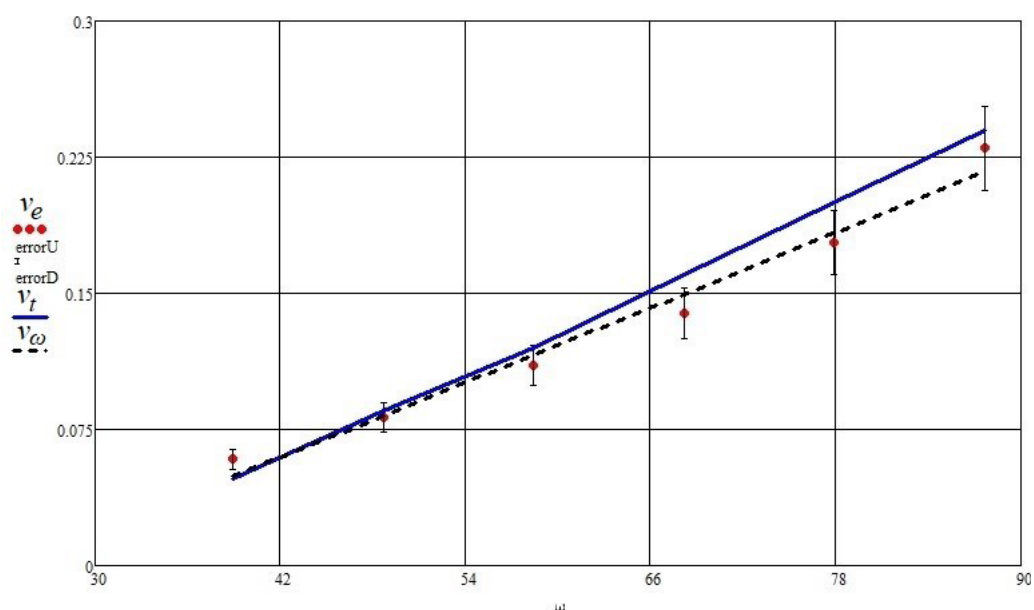


Рис. 4 - Зависимость осевой скорости v , м/с, частицы материала от угловой скорости спирального винта ω , с⁻¹: v_e – экспериментальные данные; v_t – теоретические данные; v_ω – регрессионные данные

кально устанавливаемых спирально-винтовых транспортирующих устройств на стадии проектирования.

Экспериментальные исследования были проведены на устройстве для перемещения бобов сои со спирально-винтовым рабочим органом, который имел возможность вращения между неподвижно зафиксированными и вертикально расположенными соосными цилиндрами.

На рисунке 4 можно увидеть результаты экспериментальных исследований по транспортированию семян сои. Геометрические параметры транспортирующего устройства с рабочим органом в виде спирального винта: среднее значение наружного диаметра спирали $d = 0,033$ м; средний шаг между соседними витками спирали $S = 0,025$ м; диаметр проволоки спирали – $0,004$ м, длины цилиндров одинаковы и равны 1 м; внутренний диаметр внешнего цилиндра $D_1 = 0,365$ м; наружный диаметр цилиндрической вставки внутреннего $D_2 = 0,021$ м; частота вращения спирали ω изменялась в диапазоне от 40 с⁻¹ до 88 с⁻¹. Насыпная плотность семян сои $\rho = 750$ кг/м³.

Если проанализировать рисунок 4, то можно увидеть, что экспериментальные значения линейных скоростей отдельных частиц материала в зависимости от частоты вращения оборотов спирали согласуются с полученными теоретическими результатами. Конечный ре-

зультат, полученный после обработки экспериментальных данных, – это зависимость скорости v_ω , м/с, транспортировании бобов сои от угловой скорости рабочего органа ω , с⁻¹:

$$v_\omega = 3,4 \cdot 10^{-3} \omega - 0,085. \quad (13)$$

Заключение

Полученная формула (13) позволяет достаточно точно определить критическое значение угловой скорости вращения спирального винта, при достижении которого наступает начальная фаза перемещения частицы в вертикальном направлении между соосно установленными цилиндрами. При всех выдержанных условиях проведения экспериментальных исследований критическое значение $\omega_{кр}$ составило 25 с⁻¹.

Библиографический список

1. К вопросу о вертикальном перемещении сыпучего материала / Ю. М. Исаев, Х. Х. Губейдуллин, Н. М. Семашкин, О. П. Гришин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2012. - № 4(20). - С. 122-126.
2. Isaev, Y. Regularities of motion of a particle in the spiral-screwed device / Y. Isaev, N. Semashkin, V. Zlobin // E3S Web of Conferences. - 2019. - С. 00041.
3. Результаты исследования работы спирально-винтового устройства для обеззараживания зерна / Ю. М. Исаев, Н. М. Семашкин, В. А. Злобин, Н. Н. Аксенова // Материалы Междуна-

родной научно-практической конференции, посвященной памяти Почетного работника высшего профессионального образования, Академика РАЕ, доктора технических наук, профессора Владимира Григорьевича Артемьева. - 2018. - С. 86-94.

4. Васильев, В. Ф. Водометные движители / В. Ф. Васильев. – Москва : МАДИ (ГТУ), 2006. - 45 с.

5. Optimization of research and methodology work at university in terms of the process approach / I. D. Ibragimov, R. R. Iskhakova, M. A. Galeeva, M. M. Kalashnikova, Yu. V. Ryseva, I. I. Galimzyanova, I. A. Sharonov // Journal of Sustainable Development. - 2015. - Т. 8, № 3. - P. 234-241.

6. Крючин, А. Н. Повышение качества посева семян трав самоходной пневматической мини-сеялкой применением дисково-штифтового высевающего аппарата 05.20.01 – технология и средства механизации сельского хозяйства: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крючин Александр Николаевич; Пензенский государственный аграрный университет. – Пенза, 2016. - 20 с.

7. Крючин, Н. П. Оптимизация параметров высевающего устройства для трудносыпучих семян / Н. П. Крючин, С. В. Вдовкин, А. Н. Крючин // Материалы национальной научно-практической конференции Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I / под общей редакцией О. М. Костикова, А. В. Божко. - 2019. - С. 239-244.

8. Крючин, Н. П. Дозирование трудносыпучих семян высевающим аппаратом / Н. П. Крю-

чин, А. Н. Крючин // Инноватика и экспертиза: научные труды. - 2019. - № 1(26). - С. 203-214.

9. Коновалов, В. В. Спирально-шнековый питатель сухого корма с прутковыми лопастями / В. В. Коновалов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, проводимой по программе Всероссийского фестиваля науки и посвященной 60-летию ФГОУ ВПО Пензенская ГСХА. – Пенза : ПГСХА, 2011. - С. 303-304.

10. Груздев, И. Э. Теории шнековых устройств / И. Э. Груздев, Р. Г. Мирзоев, В. И. Яков. – Ленинград : Издательство Ленинградского университета, 1978. - 144 с.

11. Гутьяр, Е. Я. Элементарная теория вертикального винтового транспортёра / Е. Я. Гутьяр // Труды МИМЭСХ им. В.М. Молотова. – Москва : Машгиз, 1956. - Т. 2. - С. 8-12.

12. Желтов, В. П. Расчёт спиральных винтовых конвейеров / В. П. Желтов // Вестник машиностроения. - 1975. - № 5. - С. 18-21.

13. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.

14. Крючин, Н. П. Разработка и исследование дозирующих устройств для трудносыпучих посевных материалов / Н. П. Крючин, С. В. Вдовкин, А. Н. Крючин // Инновационное развитие науки и образования : монография / под общей редакцией Г. Ю. Гуляева. - Пенза, 2018. - С. 207-225.

THEORETICAL DESCRIPTION OF THE MOTION OF SOYBEAN SEEDS IN COAXIALLY POSITIONED CYLINDERS

Isaev Yu. M., Semashkin N. M., Zlobin V. A.

FSBEI HE Ulyanovsk SAU

432017, Ulyanovsk, Novy Venetz boulevard, 1; tel.: 8 (84231) 55-95-49, e-mail: isurmi@yandex.ru

Key words: particle, bulk material, the angular velocity, torsional critical speed.

The work is aimed at studying the process of moving a single particle of bulk material in the vertical direction by a spiral-screw working tool of the conveyor and substantiating its technical characteristics. A single particle of granular material is considered the equivalent of a material point. A spiral-screw conveyor is used as a device for moving bulk material. The transportation process is carried out when the device is in a vertical position. The construction of this device implies that the drive of the working tool is located in the lower part, so that during operation the material is moved from the bottom to the top. When determining the parameters of the process of moving bulk material using a conveyor with a spiral-screw working tool, modeling using the d'Alembert equations is applied. These equations describe the steady flow of particles in a cylindrical coordinate system. The applied d'Alembert principle makes it possible to use static methods to solve problems of dynamics. For a mechanical system, you can write the equations of motion in the form of equilibrium equations. Such equations can be used to determine unknown forces, in particular, constraint reactions, as well as conditions acting on a single particle of bulk material being moved by a transport device. The particle, when moving, directly interacts with a complex system that includes: a fixed inner part of the outer casing generatrix; a fixed outer part of the inner cylinder generatrix; a movable spiral-screw working tool with certain geometric parameters (the wire diameter of the spiral, the spiral pitch, the average diameter of waps).

Bibliography

1. On the question of vertical movement of bulk material / Yu. M. Isaev, Kh. Kh. Gubeydullin, N. M. Semashkin, O. P. Grisin // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. - 2012. - № 4(20). - P. 122-126.

2. Isaev, Y. Regularities of motion of a particle in the spiral-screw device / Y. Isaev, N. Semashkin, V. Zlobin // E3S Web of Conferences. - 2019. - P. 00041.

3. Research results on the operation of a spiral-screw device for grain disinfection / Yu. M. Isaev, N. M. Semashkin, V. A. Zlobin, N. N. Aksenova // Materials of International research to practice conference dedicated to the memory of Honorary worker of higher professional education, academician of the Russian Academy of sciences, doctor of technical Sciences, Professor Vladimir Grigoryevich Artemyev. - 2018. - P. 86-94.

4. Vasilyev, V. F. Water-jet propellers / V. F. Vasilyev. – Moscow : MAI (STU), 2006. - 45 p.

5. Optimization of research and methodology work at university in terms of the process approach / I. D. Ibragimov, R. R. Iskhakova, M. A. Galeeva, M. M. Kalashnikova, Yu. V. Ryseva, I. I. Galimzyanova, I. A. Sharonov // *Journal of Sustainable Development*. - 2015. - T. 8, № 3. - P. 234-241.
6. Kryuchin, A. N. Improving the quality of sowing grass seeds with a self-propelled pneumatic mini-seeder using a disk-pin seeding device 05.20.01-technology and means of agricultural mechanization: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kryuchin Alexandr Nikolaevich; Penza state agrarian university. – Penza, 2016. - 20 p.
7. Kryuchin, N. P. Parameter optimization of the seeding device for hard running seeds / N. P. Kryuchin, S. V. Vdovkin, A. N. Kryuchin // *Materials of the national scientific and practical conference of Voronezh state agrarian university named after Peter the Great* / edited by O. M. Kostikov, A.V. Bozhko. - 2019. - P. 239-244.
8. Kryuchin, N. P. Dosing of hard running seeds with a seeding machine / N. P. Kryuchin, A. N. Kryuchin // *Innovation and expertise: scientific papers*. - 2019. - № 1(26). - P. 203-214.
9. Konovalov, V. V. Spiral-screw feeder of dry food with bar blades / V. V. Konovalov // *Materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists held under the program of All-Russian science festival and dedicated to the 60th anniversary of Penza state agricultural academy*. – Penza : PSAA, 2011. - P. 303-304.
10. Gruzdev, I. E. Theories of screw devices / I. E. Gruzdev, R. G. Mirzoev, V. I. Yaikov. – Leningrad : Publishing house of Leningrad university, 1978. - 144 p.
11. Gutyar, E. Ya. Elementary theory of vertical screw conveyor / E. Ya. Gutyar // *Proceedings of MIMESA named after V.M. Molotov*. – Moscow : Mashgiz, 1956. - V. 2. - P. 8-12.
12. Zheltov, V. P. Calculation of spiral screw conveyors / V. P. Zheltov // *Vestnik of mechanical engineering*. - 1975. - № 5. - P. 18-21.
13. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice / A. A. Alamovsky, A. A. Sobachkin, E. V. Odintsov, A. I. Kharitonovich, N. B. Pomarev. – Saint-Petersburg : BHV-Petersburg, 2008. - 1040 p.
14. Kryuchin, N. P. Development and investigation of a measuring device for seeding hard running materials / N. P. Kryuchin, S. V. Vdovkin, A. N. Kryuchin // *Innovative development of science and education: monograph* / edited by G. Yu. Gulyaev. - Penza, 2018. - P. 207-225.