ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.22.013
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-27-32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО ДРАЖИРАТОРА

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ ✉, *канд. техн. наук, доцент*
energo-andreev@rgau-msha.ru✉
ДУБОВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ, *преподаватель*
volodya.dubov.00@mail.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Традиционно дражирование семян осуществляется дражираторами с барабанным рабочим органом в циклическом режиме, что усложняет включение дражираторов в технологическую линию комплексной предпосевной обработки семян. Приведено обоснование эффективности ленточных дражираторов, обеспечивающих непрерывность дражирования и существенно повышающих производительность процесса. Сформулированы основные требования к процессу дражирования семян в непрерывном режиме. Определены условия скатывания драже по наклонной поверхности движущейся ленты транспортера и выявлена аналитическая взаимосвязь угла наклона транспортерной ленты дражиратора с коэффициентом трения, диаметром драже и скоростью их поступательного движения по ленте транспортера. Определены основные рабочие параметры ленточного дражиратора: длина, скорость движения и угол наклона ленты транспортера. Полученные математические выражения универсальны и позволяют произвести расчет рабочих параметров дражираторов при обработке семян сельскохозяйственных растений с различными исходными размерами, массой и триботехническими свойствами. При исследовании перемещения дражируемых семян по движущейся ленте наклонного транспортера приняты во внимание действующие на них сила трения, сила реакции опоры, скатывающая сила и сила тяжести. Исходя из аналогии поступательного движения семян по наклонной плоскости их движению по внутренней поверхности барабана бесконечно большого радиуса установлены численные значения рабочих параметров процесса дражирования в непрерывном режиме. Сделано заключение о возможности уменьшения габаритов ленточного дражиратора посредством реализации расчетной длины рабочей зоны ленты транспортера суммой длины нескольких лент, расположенных наклонно по отношению к земле в разных плоскостях.

Ключевые слова: дражиратор, параметры ленточного дражиратора, семена, непрерывный режим, скатывающая сила, угол наклона транспортера, скорость движения ленты.

Формат цитирования: Андреев С.А., Дубов В.В. Определение рабочих параметров ленточного дражиратора // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 27-32. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-27-32.

© Андреев С.А., Дубов В.В., 2022

ORIGINAL PAPER

DETERMINING THE OPERATING PARAMETERS OF THE BELT-TYPE SEED PELLETIZER

SERGEY A. ANDREEV ✉, *PhD* (*Eng*), *Associate Professor*
energo-andreev@rgau-msha.ru✉
VLADIMIR V. DUBOV, *lecturer*
volodya.dubov.00@mail.ru
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Conventional methods of seed pelleting involve using pelletizers with a drum-type working unit. In these devices, pelleting is carried out in a cyclic mode, which makes operational restrictions and complicates the use of pelletizers in the technological line of complex pre-sowing seed treatment. The authors evaluate the effectiveness of belt-type pelleting machines ensuring the continuity of pelleting and significantly increasing the performance. The paper provides some basic requirements to continuous seed pelletizing. The conditions are determined to describe the pellets rolling down the inclined surface of the moving conveyor belt. Consequently, the analytical relationship is established between the inclination angle of the pelletizer belt and the friction coefficient, the pellet diameter and speed of their forward movement along the conveyor belt. The main operating parameters of the belt pelletizer are determined – length, speed, and the inclination angle of the conveyor belt. The obtained mathematical expressions are universal, since they allow analyzing the working parameters of the pelletizers when processing crop seeds with different initial size, weight, and tribotechnical properties. When studying the movement of the coated seeds along the moving belt of the inclined conveyor, the friction force acting on them, the reaction force of the support, the authors took into account the rolling force and the gravity force. Based on the analogy of the translational movement of seeds along an inclined plane to their movement along the inner surface of the drum of an infinitely large radius, the authors established the numerical values of the parameters of continuous pelleting. The paper

finishes with a conclusion about possible reducing the dimensions of the belt-type pelletizer. The estimated length of the working area of the conveyor belt is suggested to be the sum of the lengths of several belts inclined to the ground in different planes.

Key words: pelletizer, belt-type pelletizer parameters, seeds, continuous mode, rolling force, conveyor inclination angle, belt speed.

For citation: Andreev S.A., Dubov V.V. Determining the operating parameters of the belt-type seed pelletizer. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 27-32. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-27-32.

Введение. Прогрессивным приемом подготовки семян к посеву является дражирование – нанесение на поверхность семян инертной оболочки, которая существенно укрупняет исходные семена и позволяет прибегнуть к механизированному высеву [1]. Традиционно дражирование осуществляется в циклическом режиме с использованием барабанных дражираторов. К сожалению, циклический режим является низкопроизводительным, требует активного участия опытного оператора и слабо автоматизирован [2]. Указанных недостатков лишена конструкция дражиратора с ленточным рабочим органом [3]. В этой конструкции дражируемые семена подаются из накопительного бункера на ленту в верхней части траспортера (рабочего органа), расположенного под некоторым углом к поверхности земли. По мере скатывания семян в нижнюю часть транспортера они обволакиваются смесями и превращаются в драже. При этом лента транспортера приводится в движение, направление которого противоположно направлению скатывания. Поскольку размеры драже при их перемещении в нижнюю часть транспортера увеличиваются, влияние шероховатости поверхности ленты на формирование силы трения уменьшается, и скорость скатывания возрастает.

Для успешного дражирования необходимо с достаточной точностью соблюсти основные рабочие параметры процесса, и в первую очередь – скорость вращательного движения драже и продолжительность их скатывания по ленте транспортера. При этом необходимо установить значения угла наклона транспортера и его длину.

Цель исследований: определение основных рабочих параметров ленточного дражиратора (угла наклона, длины и скорости движения ленты транспортера), обеспечивающих заданную частоту вращения, скорость и продолжительность поступательного движения дражируемых семян.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использованы известные параметры процесса дражирования, обеспечивающие получение качественных драже на барабанных дражираторах. Эти параметры рассматривались как целевые функции нескольких переменных, определяющих процесс обволакивания семян компонентами оболочки на ленточных дражираторах. В работе использовался метод абстрагирования, позволивший рассматривать дражируемые семена как твердые материальные тела шарообразной формы, скатывающиеся по движущейся наклонной плоскости.

Механизм образования оболочки драже и его количественные характеристики при замене барабанного рабочего органа на ленточный должны быть сохранены. Дражирование семян в непрерывном режиме предлагается рассматривать как аналогичный процесс в барабанном дражираторе с рабочим органом бесконечно большого радиуса. В таком случае образующая окружность рабочего органа вырождается в прямую линию, а его поверхность – в плоскость. Наиболее удобное исполнение рабочего органа может быть реализовано в виде ленточного транспортера с соответствующим электроприводом (рис. 1).

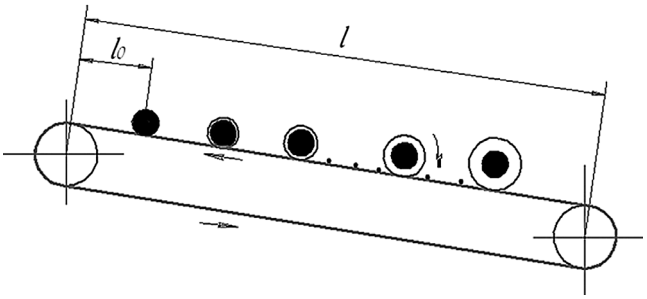

Рис. 1. Расположение семян на ленточном рабочем органе дражиратора

Fig. 1. Location of the seeds on the belt-type working unit of the pelletizer

Результаты и их обсуждение. Основными преимуществами дражиратора семян с ленточным рабочим органом являются непрерывность процесса (определяющая возможность существенного повышения производительности), возможность автоматизации и роботизации, возможность встраивания в линию по комплексной предпосевной обработке семян, включающей в себя сепарацию и электрофизическую стимуляцию.

Известно, что при дражировании семян на барабанном дражираторе наилучший результат достигается при таком сочетании радиуса рабочего органа, частоты его вращения и угла расположения относительно земли, при котором семена находятся в режиме интенсивного вращения относительно своих осей. Этот режим сопровождается перекатыванием семян (а на заключительном этапе – драже) друг по другу и по внутренней поверхности рабочего органа при их расположении под углом 30…45° к поверхности земли [4]. Принимая во внимание известные рабочие параметры барабанных дражираторов [5], в качестве исходных данных будем считать: D – диаметр барабана в рабочей зоне исходного дражиратора, $D = 40$ см; n – средняя частота вращения барабана исходного дражиратора, $n = 35$ м$^{-1}$, m – масса одного семени, для семян сахарной свеклы $m = 0,05$ г [1]; t – средняя продолжительность дражирования, в исходном барабанном дражираторе $t = 20$ м.

Циклическая скорость вращения барабана и связанная с ней линейная скорость могут быть вычислены по формулам: $\omega = \frac{\pi n}{30}$; $v = \omega R$, где R – радиус барабана, $R = \frac{D}{2}$, см. Подставив численные значения, получим $v = 73,27$ см/с. Если лента транспортера будет двигаться со скоростью v, то при отсутствии проскальзывания между ней и исходными семенами последние будут оставаться на одном месте. Однако в таком случае дражирование не происходит. Необходимым условием реализации процесса является некоторое превышение поступательной скорости семян относительно скорости ленты,

[1] ГОСТ 22617.4-91. Группа С19. Межгосударственный стандарт. Семена свеклы. Методы определения массы 1000 семян и массы одной посевной единицы. Дата введения: 1992-01-01.

причем с увеличением диаметра драже и уменьшением силы трения движение семян становится ускоренным.

Рассмотрим векторную диаграмму сил, действующих на дражируемое семя, находящееся на ленте транспортера, представляемое наклонной плоскостью (рис. 2).

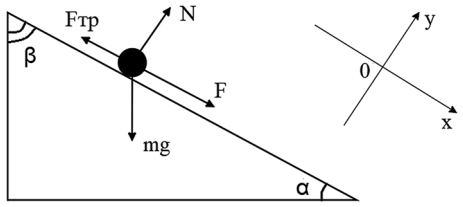

Рис. 2. Векторная диаграмма сил, действующих на семя:
F – сила скатывания; $F_{тр}$ – сила трения;
N – сила реакции опоры; α – угол наклона ленты транспортера

Fig. 2. Vector diagram of the forces acting on the seed:
F – rolling force; F_{fr} – friction force;
N – reaction force of the support;
α – inclination angle of the conveyor belt

В соответствии со вторым законом Ньютона сформируем систему уравнений:

$$\begin{cases} F + F_{тр} = ma_c; \\ N - mg = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где a_c – ускорение движения семени, см/с^2; m – масса семени, кг; g – ускорение свободного падения, см/м^2.

Введем систему прямоугольных координат, в которой ось Ox параллельна направлению силы скатывания, а ось Oy параллельна направлению силы реакции опоры. Переходя к скалярной форме посредством нахождения проекций на оси этой системы и добавляя в систему (1) соотношение силы реакции опоры и силы трения, запишем:

$$\begin{cases} F - F_{тр} + mg \cdot \sin\alpha = ma_c; \\ N - mg \cdot \cos\alpha = 0; \\ F_{тр} = \mu N, \end{cases} \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения.

Представим $F_{тр} = mg \cdot \cos\alpha$ и заменим $F_{тр}$ в первом уравнении системы на произведение $\mu mg \cdot \cos\alpha$ из ее третьего уравнения:

$$\begin{cases} F - \mu mg \cdot \cos\alpha = ma_c - mg \cdot \sin\alpha; \\ N = mg \cdot \cos\alpha; \\ F_{тр} = \mu mg \cdot \cos\alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Дополним систему (3) уравнением, связывающим длину наклонной ленты транспортера с ускорением и продолжительностью скатывания драже:

$$\begin{cases} F = ma_c - mg \cdot \sin\alpha + \mu mg \cdot \cos\alpha; \\ N = mg \cdot \cos\alpha; \\ F_{тр} = \mu N = \mu mg \cdot \cos\alpha; \end{cases} \quad (4)$$

$$l = l_0 + v_0 t + \frac{a_c t^2}{2},$$

где l – длина ленты транспортёра (гипотенуза прямоугольного треугольника), см; l_0 – расстояние от семени до верхней точки ленты, см (при подаче исходных семян в крайнюю верхнюю точку ленты $l_0 = 0$); v_0 – начальная скорость семени (на практике $v_0 = 0$ см/с); a_c – ускорение, см/с^2; t – продолжительность скатывания, c.

При $l_0 = 0$ и $v_0 = 0$ см/с $l = \frac{a_c t^2}{2}$. Подставим полученное из последнего выражения a_c в первое уравнение системы (4) и разделим все его члены на mg:

$$\begin{cases} \frac{F}{mg} = \frac{2l}{gt^2} - \sin\alpha + \mu \cdot \cos\alpha; \\ N = mg \cdot \cos\alpha; \\ F_{тр} = \mu N = \mu mg \cdot \cos\alpha. \end{cases} \quad (5)$$

При коэффициенте трения, равном единице [6],

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\sin\alpha + \cos\alpha. \quad (6)$$

Принимая во внимание то, что треугольник, образуемый лентой транспортера, является прямоугольным, можно записать:

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\sin\alpha + \cos\alpha. \quad (7)$$

Обозначим правую часть последнего равенства и на основании равенства sinα = cosβ сформируем выражение: $f(\alpha) = -\sin\alpha + \cos\alpha = -\cos\beta + \cos\alpha$. Тогда

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\cos\beta + \cos\alpha$$

$$\text{или } -\frac{F}{mg} + \frac{2l}{gt^2} = \cos\beta - \cos\alpha.$$

Запишем правую часть последнего равенства, используя формулу разности функций:

$$cos\beta - cos\alpha = -2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\beta-\alpha}{2},$$

где β = 90° – α. Поэтому

$$f(\alpha) = -2\sin\frac{\alpha+90°-\alpha}{2}\sin\frac{90°-\alpha-\alpha}{2} =$$

$$= -2\sin\frac{90°}{2}\sin\frac{90°-2\alpha}{2} = -2\sin 45°\sin(45°-\alpha).$$

С другой стороны, в соответствии с формулой разности аргументов[2] можно записать:

$$f(\alpha) = -2\sin 45°(\sin 45°\cdot\cos\alpha - \cos 45° - \sin\alpha).$$

Подставив значения тригонометрических функций угла 45°, получим $f(\alpha) = \sin\alpha - \cos\alpha$.

Произведем преобразование $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$, используя универсальную подстановку:

$$f(\alpha) = \sin\alpha - \cos\alpha = \frac{2tg\frac{\alpha}{2}}{1+tg^2\frac{\alpha}{2}} - \frac{1-tg^2\frac{\alpha}{2}}{1+tg^2\frac{\alpha}{2}} = \frac{2tg\frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2\frac{\alpha}{2}}{1+tg^2\frac{\alpha}{2}}.$$

Для нахождения нулей функции $f(\alpha)$ исследуем ее числитель:

$$2tg\frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2\frac{\alpha}{2} = 0. \quad (8)$$

[2] Панчишкин А.А., Шавгулидзе Е.Т. Тригонометрические функции в задачах: Учебное пособие. М.: Наука, 1986. 160 с.

С учетом обозначения $t = tg\frac{\alpha}{2}$ выражение (8) запишется в виде $t^2 + 2t - 1 = 0$, корнями которого будут $t_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{8}}{-2} = -1 \pm \sqrt{2}$ или $tg\frac{\alpha_{1,2}}{2} = -1 \pm \sqrt{2}$;

$$\alpha_{1,2} = 2 \cdot arctg\left(-1 \pm \sqrt{2}\right) + 2\pi n,\ n \in Z. \quad (9)$$

Для нахождения экстремумов функции $f(\alpha)$ продифференцируем выражение (8) по $\frac{\alpha}{2}$ и приравняем полученную производную к нулю:

$$\left(2tg\frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2\frac{\alpha}{2}\right)' = -(1)' + \left(tg^2\frac{\alpha}{2}\right)' + 2\left(tg\frac{\alpha}{2}\right)' = 0.$$

Вернемся к непрерывным функциям:

$$-\left(\frac{\sin^2\frac{\alpha}{2}}{\cos^2\frac{\alpha}{2}}\right)' - 2 \cdot \left(\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{\cos\frac{\alpha}{2}}\right)' = 0. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что выражение (10) является сложной функцией, запишем:

$$\frac{\left(\sin^2\frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \cos^2\frac{\alpha}{2} - \left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \sin^2\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)^2} +$$

$$+ 2 \cdot \frac{\left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \cos\frac{\alpha}{2} - \left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \sin\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0$$

$$\text{или } \frac{\left(\frac{1-\cos\alpha}{2}\right)' \cdot \cos^2\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{1+\cos\alpha}{2}\right)' \cdot \sin^2\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)^2} +$$

$$+2 \cdot \frac{\left(\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{2}}\right)' \cdot \cos\frac{\alpha}{2} - \left(\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}\right)' \cdot \sin\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0;$$

$$\frac{\left(\frac{2 \cdot (1-\cos\alpha)'}{4}\right) \cdot \cos^2\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{2 \cdot (1+\cos\alpha)'}{4}\right)' \cdot \sin^2\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)^2} +$$

$$+ 2 \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot \left(\sqrt{1-\cos\alpha}\right)'}{2}\right) \cdot \cos\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \left(\sqrt{1+\cos\alpha}\right)'}{2}\right)' \cdot \sin\frac{\alpha}{2}}{\left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0.$$

Окончательный результат дифференцирования будет иметь вид:

$$\frac{2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos^2\frac{\alpha}{2} + 2\sin\alpha \cdot \sin^2\frac{\alpha}{2}}{4\left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)^2} +$$

$$+ 2 \cdot \frac{\frac{\sin\alpha \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \sqrt{1-\cos\alpha}} \cdot \frac{\cos\frac{\alpha}{2}}{2} + \frac{\sin\alpha \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \sqrt{1+\cos\alpha}} \cdot \frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{2}}{\left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0.$$

В результате почленного деления получим:

$$\frac{\sin\alpha \cdot \left(\cos^2\frac{\alpha}{2} + \sin^2\frac{\alpha}{2}\right)}{2\left(\cos^2\frac{\alpha}{2}\right)^2} + 2\frac{\sin\alpha \cdot \sqrt{1+\cos\alpha}}{4 \cdot \sqrt{1-\cos\alpha} \cdot \left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} -$$

$$- \frac{\sin\alpha \cdot \sqrt{1-\cos\alpha}}{4 \cdot \sqrt{1+\cos\alpha} \cdot \left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0. \quad (11)$$

Упростим выражение (11), вынесем за скобки общий множитель. Одновременно преобразуем числитель первого члена этого выражения в соответствии с основным тригонометрическим тождеством и изменим форму записи знаменателя, воспользовавшись формулой косинуса половинного аргумента:

$$\frac{4\sin\alpha}{2(1+\cos\alpha)^2} +$$

$$+ 2\frac{\sin\alpha}{4} \cdot \left(\frac{\sin\alpha \cdot \left(\sqrt{1+\cos^2\alpha}\right)}{\sqrt{1-\cos\alpha} \cdot \left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} - \frac{\sin\alpha \cdot \left(\sqrt{1-\cos^2\alpha}\right)}{\sqrt{1+\cos\alpha} \cdot \left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2}\right) = 0.$$

Приведя к общему знаменателю, получим:

$$\frac{4\sin\alpha}{2(1+\cos\alpha)^2} + 2\frac{\sin\alpha}{4} \cdot \frac{\left(\frac{1+\cos\alpha+1-\cos\alpha}{1-\cos^2\alpha}\right)}{\left(\cos\frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0.$$

Раскроем квадрат косинуса половинного угла во второй дроби:

$$\frac{4\sin\alpha}{2(1+\cos\alpha)^2} + 2\frac{\sin\alpha}{4} \cdot \frac{2}{\sin^2\alpha} \cdot \frac{2}{1+\cos\alpha} = 0 \text{ или}$$

$$\frac{4\sin\alpha}{2(1+\cos\alpha)^2} + \frac{2}{\sin\alpha \cdot (1+\cos\alpha)} = 0.$$

Последнюю сумму можно представить в виде:

$$2\left(\frac{\sin^2\alpha + 1 + \cos\alpha}{\sin\alpha \cdot (1+\cos\alpha)^2}\right) = 0.$$

Раскрывая скобки, получим:

$$\frac{2\sin^2\alpha + 2 + 2\cos\alpha}{\sin\alpha \cdot (1+\cos\alpha)^2} = 0. \quad (12)$$

Для определения значений углов α, при которых выражение (12) обращается в нуль, приравняем к нулю его числитель:

$$2\sin^2\alpha + 2 + 2\cos\alpha = 0.$$

Заменим функцию $\sin^2\alpha$ на $1 - \cos^2\alpha$,

$$2 - 2\cos^2\alpha + 2 + 2\cos\alpha = 0. \quad (13)$$

Разделим все члены уравнения (13) на –2:

$$\cos^2\alpha - \cos\alpha 2 = 0. \quad (14)$$

В результате решения квадратного уравнения получаем два корня, из которых $\cos\alpha = 2$ не подходит ввиду несоответствия области значения функции косинуса, а $\cos\alpha = 1$ не может рассматриваться как имеющее физический смысл решение, поскольку не входит

в ограничения, предъявляемые знаменателем выражения (12).

Таким образом, $\sin\alpha\cdot(1+\cos\alpha)^2 \neq 0$, а корнями его будут $\alpha_{01} \neq \pi n$, $n \in Z$ и $\alpha_{02} \neq \pi + 2\pi n$, $n \in Z$ при общем решении $\alpha_o \neq \pi n$, $n \in Z$. Исходя из этого, делаем вывод о том, что рассматриваемая функция не имеет точек максимума и минимума или эти точки определены во множестве вещественных чисел.

Решениями сформулированного условия в соответствии с выражением (9) будут $\alpha_1 = 135° + 2\pi n$, $n \in Z$ и $\alpha_2 = 47{,}4° + 2\pi n$, $n \in Z$.

Решение α_1, определяющее выполнение неравенства $\alpha_1 + 90° > 180°$, также подлежит исключению.

Таким образом, во внимание следует принять только $\alpha_2 = 47{,}4°$.

Длина ленты транспортера при отсутствии поступательного движения драже может быть определена из условий аналогии с барабанным дражиратором. Фактически процесс дражирования семян в барабанном рабочем органе происходит на незначительной части его внутренней поверхности. Длина дуги L_0, приходящейся на рабочую зону сферического сегмента, обычно не превышает 1/6 L, где L – длина окружности барабана в рабочей зоне. Исходя из данных по процессу в исходном дражирато, $L_0 = \frac{1}{6}L = \frac{1}{6}\pi D = 21$ см. Такую же длину может иметь лента транспортера, однако технологический выигрыш при этом будет отсутствовать. Во-первых, конструкция транспортерного рабочего органа всегда сложнее барабанного; во-вторых, в процессе дражирования придется увеличивать скорость движения ленты транспортера; в-третьих, даже при незначительном нарушении режима некачественные или не участвующие в процессе драже будут самостоятельно исключаться из рабочей зоны (падать с ленты), что потребует их ручной подборки.

В связи с вышесказанным процесс дражирования должен быть организован таким образом, чтобы при его протекании семена либо равномерно, а лучше ускоренно, но достаточно медленно, перемещались по ленте вниз. При этом продолжительность нахождения драже в рабочей зоне должна составлять исходные 20 мин.

Определив ускорение движения драже выражением $a_c = m\frac{2L_0}{t^2}$ и подставив численные значения ($L_0 = 21$ см; $t = 1200$ с; $m = 0{,}05$ г, $\alpha = 47{,}4°$; $\mu = 1$; $g = 1000$ см/с^2) в первое уравнение системы (4), получим силу скатывания, действующую на драже: $F = 2{,}96$ Н. Если принять, что при попадании на ленту транспортера семя начинает двигаться со скоростью $v_н = 73{,}3$ см/с, а конечная масса драже составит $m_к = 0{,}35$ г, то к концу движения по ленте скатывающая сила достигнет значения $F_к = 21{,}3$ Н. При этом поступательная скорость драже будет определяться в соответствии с выражением

$$v_к = \sqrt{\left(\frac{F_к}{m_к g} + \cos\alpha - \sin\alpha\right)\cdot\frac{L_0 g}{2}} \qquad (15)$$

и составит величину $v_к = 4{,}4$ см/с.

На основе полученных результатов определим ускорение, приобретаемое драже по мере их скатывания по ленте, движущейся вверх:

$$a_c = \frac{v_к - v_н}{t}.\ a_c = 0{,}164 \text{ см/с}^2.$$

При этом длина ленты транспортера составит $l_a = \frac{a_c t^2}{2} = 14473$ см.

Интересно, что изменение угла наклона транспортера в диапазоне от 30° до 75° весьма слабо влияет на величину скорости $v_к$ и длины ленты l_a. Некоторые колебания значения l_a в пределах от 14112 до 15435 см объясняются взаимодействием двух периодических функций в выражении (15). Не вызывает сомнения то, что полученное значение длины ленты для практической реализации в условиях подсобного или мелкого фермерского хозяйства является неудобным. Однако результаты расчета могут быть использованы при проектировании высокопроизводительных установок для дражирования больших количеств семян на специализированных предприятиях. Кроме того, существенный резерв уменьшения габаритов ленточного дражиратора заключается в разработке устройства с несколькими укороченными наклонными транспортерами. Эти транспортеры должны располагаться последовательно в разных направлениях внутри дражиратора, образуя общую технологическую линию. В то же время суммарная длина укороченных транспортеров должна соответствовать рассчитанному значению – 14473 см.

Предложенный алгоритм расчета, а также полученные результаты могут послужить основанием для дальнейших исследований процесса, в которых целесообразно принять во внимание изменение соотношения сил, действующих на драже, за счет изменения коэффициента трения по мере увеличения их диаметра.

Выводы

1. Рабочие параметры ленточного дражиратора могут быть определены из характеристик барабанной конструкции, обеспечивающих условия эффективного наращивания качественной оболочки драже. При определении рабочих параметров ленточного дражиратора вращательное движение внутренней поверхности барабана в рабочей зоне должно быть представлено поступательным движением ленты, а скатывающая сила, определяющая движение драже, рассмотрена как векторная сумма силы тяжести, силы реакции опоры и подъемной силы, обусловленной движением ленты.

2. Реализация эксплуатационных характеристик барабанной конструкции с диаметром рабочего органа в зоне дражирования 40 см, частотой его вращения 35 м$^{-1}$, массой исходных семян и готовых драже 0,05 и 0,35 г соответственно достигается на ленточном дражираторе при установке транспортера под углом 47,4° к поверхности земли.

3. При смещении дражируемых семян в нижнюю часть рабочего органа барабанной конструкции на расстояние 21 см в течение 7 мин конечная поступательная скорость драже на ленточном дражираторе составляет 4,4 см/с при ускорении 0,16 см/см^2 и протяженности поступательного движения 144 м.

Библиографический список

1. Чирков М.В., Чирков А.М. Агроэкологическая и экологическая эффективность применения технологии дражирования семян свеклы в сельскохозяйственном производстве Поволжского региона // Доклады ТСХА. 2004. Вып. 276. С. 326-330.

2. Михеев Д.А. Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем: Монография. Горки: БГСХА, 2017. 180 с.

3. Устройство для дражирования семян: Патент № 171156 РФ МПК A01C1/06 (2006.01) / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Д.В. Анашин, А.В. Балан. 2016136861, заявл.14.09.2016; опубл. 23.05.2017. Бюл. № 15.

4. Андреев С.А., Балан А.В. Дражирование семян в непрерывном режиме // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 2. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2017. С. 35-40.

5. Шарков Г.А., Андреев С.А., Сабетов А.Н. Советуем: дражируйте семена // Приусадебное хозяйство. 1986. № 5. С. 33-34.

6. Попов В.Л., Пеахье С.Г., Шилько Е.В. и др. Исследование зависимости коэффициента трения в системе «рельс-колесо» как функции параметров материала и нагружения // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 3. С. 17-25.

Критерии авторства

Андреев С.А., Дубов В.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Андреев С.А., Дубов В.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021

Одобрена после рецензирования 21.04.2022

Принята к публикации 22.04.2022

References

1. Chirkov M.V., Chirkov A.M. Agroekologicheskaya i ekologicheskaya effektivnost' primeneniya tekhnologii drazhirovaniya semyan svekly v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve Povolzhskogo regiona [Agroecological and ecological efficiency of applying the technology of pelleting beet seeds in agricultural production of the Volga region]. *Doklady TSKHA*, 2004; 276: 326-330. (In Rus.)

2. Mikheev D.A. Drazhirovanie semyan sakharnoy svekly tsentrobezhnym drazhiratorom s lopastnym otrazhatelem: Monografiya [Pelleting of sugar beet seeds with a centrifugal pelletizer with a blade reflector. Monograph]. Gorki, BGSKhA. 2017. 180 p. (In Rus.)

3. Andreev S.A., Sudnik Yu.A., Anashin D.V., Balan A.V. Ustroystvo dlya drazhirovaniya semyan [Seed pelletizer]. Patent No. 171156 Russian Federation IPC A01C1/06 (2006.01), 2017. Applied on September 14, 2016; issued on May 23, 2017. Bul. No. 15. (In Rus.)

4. Andreev S.A., Balan A.V. Drazhirovanie semyan v nepreryvnom rezhime [Continuous seed pelleting]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya*: *teoriya, metodologiya, praktika*: *Sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*: *In 2 Vol.*, Vol. 2. Penza, MTsNS " Nauka i Prosveshcheniye ", 2017: 35-40. (In Rus.)

5. Sharkov G.A., Andreev S.A., Sabetov A.N. Sovetuem: drazhiruyte semena [Our advice is to pellet the seeds]. *Priusadebnoe khozyaystvo*, 1986; 5: 33-34. (In Rus.)

6. Popov V.L., Peakhie S.G., Shilko E.V. et al. Issledovanie zavisimosti koeffitsiyenta treniya v sisteme "rel's-koleso" kak funktsii parametrov materiala i nagruzheniya [Study of the relationship between the friction coefficient in rail-wheel systems as a function of material and load parameters]. *Fizicheskaya mezomekhanika,* 2002; 5(3): 17-25. (In Rus.)

Contribution

S.A. Andreev, V.V. Dubov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. S.A. Andreev, V.V. Dubov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 22.11.2021

Approved after reviewing 21.04.2022

Accepted for publication 22.04.2022