

Математическая модель ориентированной посадки луковиц донцем вниз **Mathematical model of oriented planting of bulbs with bulb stem pointing downwards**

А. Г. АКСЕНОВ¹, канд. техн. наук
А. В. СИБИРЕВ¹, канд. техн. наук
П. А. ЕМЕЛЬЯНОВ², д-р техн. наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Москва, Россия, sibirev2011@yandex.ru

² Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, Пенза, Россия, emelianov@mail.ru

A. G. AKSENOV¹, PhD in Engineering
A. V. SIBIREV¹, PhD in Engineering
P. A. EMEL'YANOV², DSc in Engineering

¹ All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russia, sibirev2011@yandex.ru

² Penza State Agricultural Academy, Penza, Russia, emelianov@mail.ru

Проведены теоретические исследования по обоснованию конструктивно-технологических параметров вибрационно-пневматического высаживающего аппарата лукопосадочной машины и дискового заделывающего органа с почвоулучшителями. Объект исследования — процесс ориентированной посадки и заделки почвой луковиц лука-севка. На основе законов классической механики и уравнений Лагранжа второго рода рассматриваются процесс ориентирования луковиц при посадке и сохранение их ориентации при

взаимодействию с почвой с учетом закономерностей перемещения луковиц вибрационным желобом и пневматическим барабаном, а также работы заделывающих органов при укрытии луковиц почвой. Проведены теоретические исследования рабочего процесса вибрационно-пневматического высаживающего аппарата лукопосадочной машины. В результате получены аналитические зависимости для определения его конструктивных и режимных параметров: радиуса канавки, расстояния между желобом и дном канавки, диаметра присасывающего отверстия, частоты вращения пневматического барабана, высоты установки высаживающего аппарата над уровнем почвы. Исследования позволили определить условие ориентированной подачи луковицы в борозду донцем вниз, аналитические зависимости для определения траектории движения частиц почвы по рабочей поверхности почвонаправителя дискового заделывающего органа, уравнения движения частиц почвы после отрыва от поверхности почвонаправителя при укрытии почвой луковицы, ориентированной в борозде донцем вниз, и уравнения относительной, переносной и абсолютной скоростей частицы почвы. Также получены выражения, позволяющие определить технологические параметры дискового заделывающего органа с почвонаправителями: поступательную скорость дискового заделывающего органа, его угол атаки, межосевое расстояние между дисками.

Ключевые слова: ориентация; траектория движения; устойчивое положение; уравнения Лагранжа.

Theoretical studies are carried out on the substantiation of design and technological parameters of vibration and pneumatic planting unit of a bulb-planting machine, and of a disc coverer with soil deflectors. The subject of research is the process of oriented planting and embedding of seed onion bulbs into soil. The article considers the process of bulbs orienting during planting and their orientation maintaining during interaction with the soil, taking into account the regularities of bulbs motion by means of vibrating chute and pneumatic drum, as well as the work of coverers during covering of bulbs with soil. The research is done on the basis of laws of classical mechanics and Lagrange's equations of the second kind. Theoretical studies of the working process of vibration and pneumatic planting unit of a bulb-planting machine are carried out. As a result, analytical dependences are obtained for determination of its design and operational parameters: the groove radius, the distance between chute and groove bottom, the diameter of suction opening, the rotation speed of pneumatic drum, the height of planting unit installation above the soil level. The studies allowed to determine: the condition of oriented embedding of bulbs into furrow with bulb stem pointing downwards; the analytical dependences for determining the trajectory of soil particles motion on the working surface of deflector of a disc coverer; the equation of soil particles motion after detachment from deflector's surface, during covering with soil of bulbs oriented in furrow with bulb stem pointing downwards; the equations of relative, transfer and absolute velocities of soil particles. The expressions are obtained that allow to determine the technological parameters of disc coverer with soil deflectors: the forward velocity of disc coverer, the angle of attack, the center distance between discs.

Keywords: orienting; motion trajectory; steady position; Lagrange's equations.

Введение

Перед сельским хозяйством нашей страны стоит задача полного удовлетворения потребности населения в продуктах питания, в т.ч. и овощах. Между тем, овощеводство агропромышленного комплекса России находится в неудовлетворительном состоянии. Для обеспечения потребности населения в качественных продуктах питания необходимо решить задачи разработки и освоения инновационных технологий возделывания овощей, а также технических средств для производства овощных культур.

Особое место среди овощных культур занимает лук. Его высокая ценность обусловлена химическим составом, вкусовыми и лечебными свойствами [1]. На сегодняшний день ни в России, ни в зарубежных странах нет промышленного выпуска машин, обеспечивающих ориентированную посадку лука-севка донцем вниз [2, 3]. В связи с вышеизложенным исследование и разработка технических средств для качественной посадки луковиц лука-севка — актуальная и практически значимая задача.

Цель исследования

Цель исследования — создание математической модели технологического процесса ориентированной подачи тела округлой формы (на примере луковиц лука-севка) при транспортировании к месту сброса и последующего сохранения исходного положения.

Материалы и методы

При проведении теоретических исследований ориентации луковицы приняты следующие основные допущения:

1) центр тяжести луковицы расположен на оси симметрии, и при на-

хождении луковицы в канавке пневматического барабана расстояние от центра тяжести до центра барабана равно радиусу барабана;

2) пневматический барабан вращается с постоянной угловой скоростью;

3) сопротивлением воздуха пренебрегаем;

4) движение пласта почвы рассматриваем как движение материальной точки (частицы почвы).

Результаты и их обсуждение

Попадая на желоб, луковицы занимают одно из двух устойчивых положений (рис. 1, а). Положение I и III — на боку с опорой на точки *A* и *B* — требуемое; положение II — донцем вниз с опорой на точку *A*, из него луковицу нужно перевести в положение III. Для перевода луковицы из положения II в положение III необходимо наклонить опорную плоскость на некоторый угол α , при котором линия действия силы тяжести *G* выйдет за пределы точки опоры *A* и создаст момент вращения луковицы, пока она не займет устойчивое положение III с опорой на две точки *A* и *B*. Если опорная поверхность

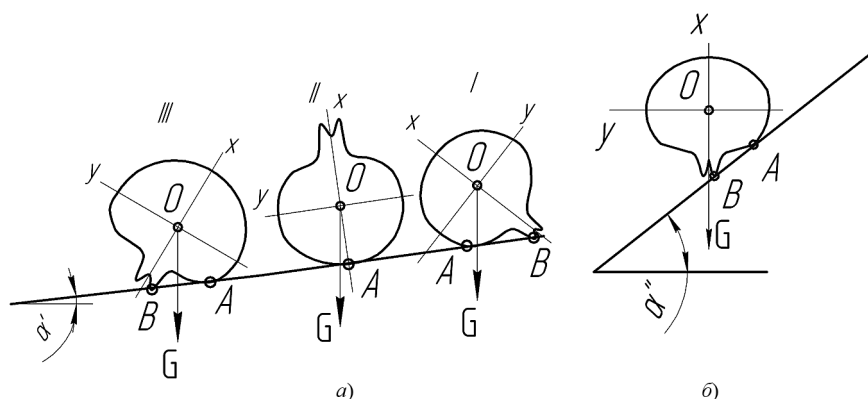


Рис. 1, а, б. Схема положений луковиц на наклонной плоскости

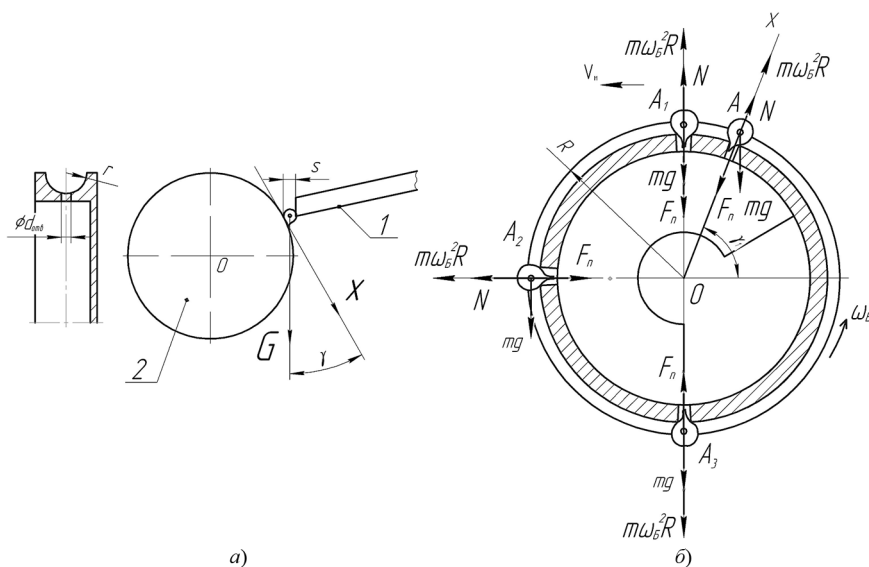


Рис. 2. Схема к определению конструктивных параметров пневматического барабана (а) и силы, действующие на луковичу при транспортировании к месту сброса (б):

1 — вибрационный желоб; 2 — пневматический барабан

наклонена на угол α'' (рис. 1, б), при котором линия действия силы тяжести выходит за пределы опорных точек A и B , то луковича будет катиться по наклонной плоскости, т.е. угол α'' равен углу трения качения φ .

Таким образом, условие устойчивого положения луковичи на вибрационном желобе с опорой на две точки:

$$0 < \alpha < \varphi. \quad (1)$$

Условие (1) показывает влияние коэффициентов трения лукович на их устойчивость и транспортирование на вибрационном желобе.

Рассмотрим луковичу в момент ее нахождения между присасывающими отверстиями 1 и 2 (рис. 2), где на нее действуют сила тяжести G , сила трения о поверхность барабана $F_{тр}$ и реакция опоры N . Спроецировав обе силы на ось X , параллельную направлению силы трения $F_{тр}$, получим:

$$F_{тр} - G \cos \gamma = 0, \quad (2)$$

где γ — угол между направлением оси X и линией действия силы тяжести луковичи G , град.

После преобразования условия (2) запишем его как:

$$\gamma = \arccos(f), \quad (3)$$

где f — коэффициент трения луковичи о поверхность барабана, равный тангенсу угла трения φ .

Выражение (3) определяет необходимое место подачи луковичи вибрационным желобом на пневматический барабан.

После того как присасывающее отверстие приходит к месту подачи луковичи, она попадает под действие присасывающей силы $F_{п}$, создаваемой вентилятором внутри камеры разрежения. В этот момент происходит присасывание луковичи и ее транспортирование к месту сброса. В общем случае этот процесс описывается условием отрыва [4]. Для его составления рассмотрим силы, действующие на луковичу во время транспортирования.

Барабан вращается вокруг горизонтальной оси. На луковичу действуют сила присасывания $F_{п}$, направлен-

ная по радиусу к центру барабана, сила тяжести $G = mg$, направленная вниз, сила инерции $J = m\omega_b^2 R$, направленная по радиусу барабана от центра, и реакция опоры N .

Все силы приложены в центре тяжести луковичи. Направим ось X по оси присасывающего отверстия и спроецируем на нее все силы. Луковичи при транспортировании должны удерживаться на барабане, т.е. присасывающая сила должна быть больше суммы всех остальных сил. Тогда условие безотрывного транспортирования запишем как [5]:

$$F_{п} > mg \sin \gamma_1 + m\omega_b^2 R + N, \quad (4)$$

где m — масса луковичи, кг; ω_b — угловая скорость вращения пневматического барабана, рад/с; R — радиус барабана, м; γ_1 — угол поворота барабана, рад.

В крайней нижней точке реакция опоры равна нулю, и присасывающей силе противодействует сумма сил тяжести и инерции. С учетом этого из условия (4) угловая скорость вращения пневматического барабана равна:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{kPS - mg}{mR}}, \quad (5)$$

где k — экспериментальный коэффициент, который учитывает различные факторы, определяющие силу присасывания лукович ($k = 1, 1.1 \dots 1.3$); P — давление вакуума, Па; S — площадь присасывающих отверстий, расположенных в зоне камеры разрежения, м².

Подставив в выражение (5) известные формулы для определения частоты вращения барабана, площади присасывающих отверстий и кинематические показатели работы высаживающего аппарата, а также необходимое давление вакуума, получим предельное значение частоты вращения барабана:

$$n_b = \sqrt{k k_{отв} \frac{\rho v_{вп}^2 \pi^2 d_{отв}^2}{4 k_a l_{п} \lambda m} - \frac{g}{R}} / 2\pi, \quad (6)$$

где $k_{отв}$ — отношение количества присасывающих отверстий, расположенных в зоне камеры разрежения, к общему количеству отверстий ($k_{отв} = 0,6$); ρ — плотность воздуха, кг/м³; $v_{вп}$ — скорость воздушного потока в присасывающем отверстии, м/с; $d_{отв}$ — диаметр отверстий, м; k_a — аэродинамический коэффициент сопротивления отверстия, определяемый экспериментально ($k_a = 0,61 \dots 0,67$); $l_{п}$ — заданный шаг посадки, м; λ — кинематический показатель работы высаживающего аппарата.

Таким образом, с учетом выражений (1) и (6) условие устойчивого транспортирования луковичи в заданном положении запишем в виде:

$$\begin{cases} 0 < \alpha < \varphi; \\ n_b = \sqrt{k k_{отв} \frac{\rho v_{вп}^2 \pi^2 d_{отв}^2}{4 k_a l_{п} \lambda m} - \frac{g}{R}}. \end{cases}$$

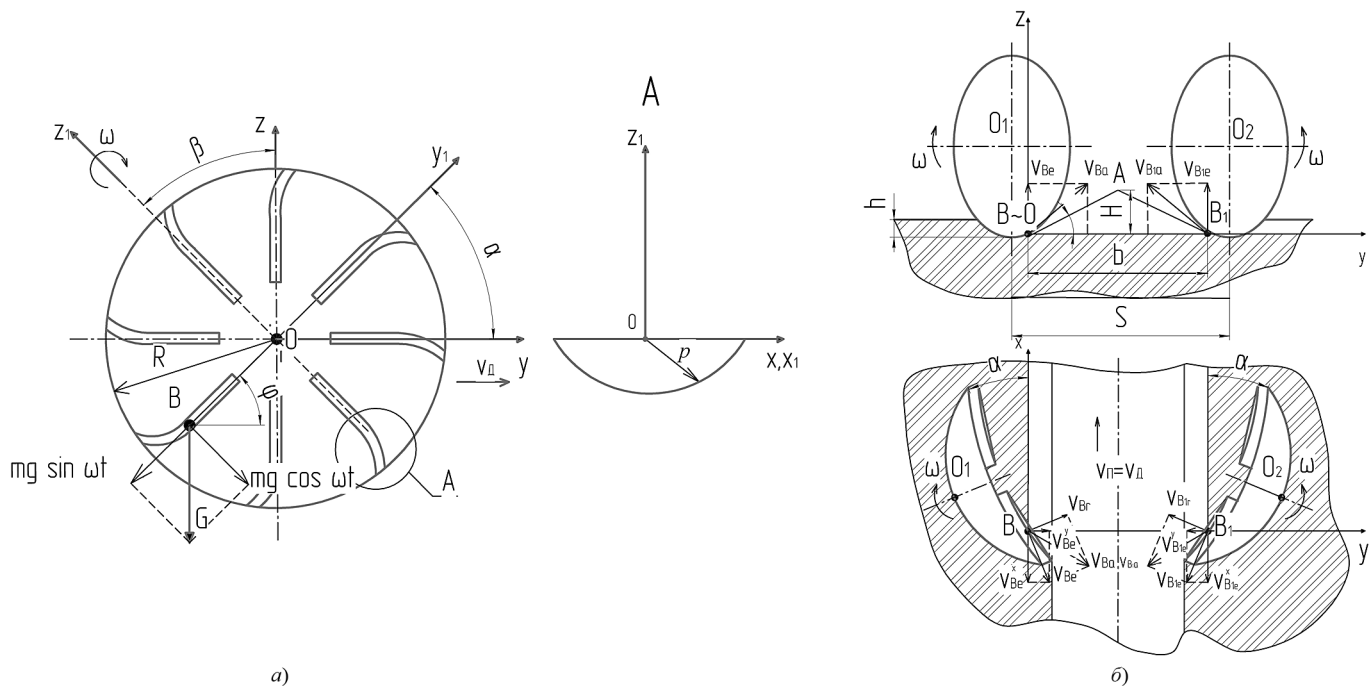


Рис. 3, а, б. Расчетная схема к выводу уравнения движения частицы почвы по рабочей поверхности почвонаправителя

Для сохранения исходного положения луковицы в борозде после укладки необходимо, чтобы подача почвы на луковицу производилась в момент ее контакта с дном борозды. Это позволит увеличить количество луковиц, расположенных донцем вниз, и равномерность посадки за счет фиксации луковиц почвой.

Для заделки луковиц почвой разработан дисковый заделывающий орган с почвонаправителями, который воздействует почвой на луковицу вертикально сверху, не нарушая ее ориентированного положения [6]. Каждая пара дисков, установленных вразвал, образует гребень.

Во время работы дискового заделывающего органа частица почвы *B* (рис. 3, а), расположенная на почвонаправителе, под действием приложенных к ней сил совершает сложное движение: вращательное вместе с дисковым заделывающим органом — переносное движение частицы почвы, и одновременно она движется вдоль поверхности почвонаправителя — относительное движение [7].

Для определения движения частиц почвы по поверхности почвонаправителя дискового заделывающего органа воспользуемся дифференциальными уравнениями Лагранжа второго рода [8], решение которых позволит получить искомые уравнения движения частиц почвы.

Для механической системы, находящейся в потенциальном силовом поле, активная обобщенная сила Q_i , соответствующая *i*-й обобщенной координате, равна [9–11]:

$$Q_i = \frac{\partial U}{\partial q_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_i},$$

где $U = U(q_1, q_2, \dots, q_N)$ — силовая функция, характеризующая свойства силового поля, Π ; $\Pi = \Pi(q_1, q_2, \dots, q_N)$ — потенциальная энергия, Дж; ∂q_i — частная производная по обобщенной координате q_i .

Поскольку в рассматриваемом случае механическая система находится в потенциальном силовом поле, то на частицу почвы действуют только потенциальные силы [12]. Следовательно, уравнения Лагранжа второго рода запишем в виде [9–11]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = -Q_i,$$

где *i* — число степеней свободы механической системы, $i = 1, 2, 3, \dots, S$; $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$ — частные производные кинетической энергии по обобщенным скоростям \dot{q}_i ; $\frac{\partial T}{\partial q_i}$ — част-

ные производные кинетической энергии по обобщенным координатам q_i .

В качестве обобщенных координат выберем:

— перемещение вдоль оси x_1 (см. рис. 3, а), определяющее положение частицы почвы в зависимости от радиуса кривизны почвонаправителя ρ ;

— перемещение вдоль оси y_1 , определяющее положение частицы почвы в зависимости от изменения угла α между плоскостью вращения диска и направлением его поступательного движения (угол атаки);

— перемещение вдоль оси z_1 , фиксирующее положение частицы почвы в зависимости от изменения угла β наклона дискового заделывающего органа к вертикали.

Обобщенные координаты x_1, y_1, z_1 связаны с системой координат $OXYZ$ соотношением [9]:

$$\begin{cases} x = x_1; \\ y = y_1 \cos \varphi + z_1 \sin \varphi; \\ z = z_1 \sin \varphi - x_1 \cos \varphi, \end{cases} \quad (7)$$

где φ — угол поворота точки почвонаправителя, рад.

$$\varphi = \omega t,$$

где ω — угловая скорость дискового заделывающего органа, рад/с; t — время поворота точки, с.

Для определения обобщенных сил системы рассмотрим активные силы (см. рис. 3, а), действующие на частицу почвы в точке B в промежуточном положении. Единственная активная сила — это сила тяжести G частицы почвы. Силовая функция представляет собой потенциальную энергию системы и определяется выражением:

$$U = mgz = -mg(y_1 \sin \omega t - z_1 \cos \omega t),$$

где m — масса частицы почвы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с².

Абсолютная скорость точки B [7]:

$$v_{Ba} = \sqrt{v_{Br}^2 + v_{Be}^2 + 2v_{Br}v_{Be} \cos \alpha_1},$$

где v_{Br} — относительная скорость частицы почвы B , м/с; v_{Be} — переносная скорость частицы почвы B , м/с; α_1 — угол между векторами \bar{v}_{Br} и \bar{v}_{Be} , град.

Скорость относительного движения:

$$v_{Br} = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2,$$

где $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ — обобщенные скорости по координатам x_1, y_1, z_1 , м/с.

Переносная скорость частицы почвы:

$$v_{Be} = \omega(y_1^2 + z_1^2).$$

Абсолютная скорость частицы почвы [5]:

$$v_{Ba} = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2 + \omega^2 y_1^2 + \omega^2 z_1^2 + 2\omega y_1 \dot{z}_1 - 2\omega z_1 \dot{y}_1}.$$

Уравнение кинетической энергии системы запишем в виде [5]:

$$T = \frac{m(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2 + \omega^2 y_1^2 + \omega^2 z_1^2 + 2\omega y_1 \dot{z}_1 - 2\omega z_1 \dot{y}_1)}{2}.$$

После вычисления кинетической энергии T частицы почвы по обобщенным скоростям \dot{y}_1 и \dot{z}_1 , обобщенным координатам y_1 и z_1 , подставив результаты вычислений в выражение (7), получим искомые уравнения движения частицы почвы по поверхности почвонаправителя дискового заделывающего органа в плоскости $Ox_1 Y_1 Z_1$ в проекции на координатные оси:

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{\rho^2 - z_1^2}; \\ y_1 = -z_0 \sin \omega t + \frac{gt^2}{2} \cos \omega t - z_0 \omega t \cos \omega t; \\ z_1 = z_0 \cos \omega t + \frac{gt^2}{2} \sin \omega t - z_0 \omega t \sin \omega t, \end{cases}$$

где z_0 — координата, определяющая положение частицы почвы на оси z_1 в момент времени $t = 0$, м; ρ — радиус кривизны поверхности почвонаправителя, м; α — угол между плоскостью вращения диска и направлением его поступательного движения, град.

Координата z_0 , определяющая положение частицы почвы на оси z_1 в момент времени $t = 0$:

$$z_0 = -\rho \sin \alpha.$$

Для изучения движения частицы почвы B после схода с поверхности почвонаправителя воспользуемся теорией полета тела, брошенного под углом γ к горизонту (см. рис. 3, б). Пренебрегая силой сопротивления воздуха, запишем уравнение движения частицы почвы в виде [9–11]:

$$\begin{cases} x = v_{B0} \cos \gamma t; \\ z = v_{B0} \sin \gamma t - \frac{gt^2}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

где v_{B0} — начальная скорость полета частицы почвы B в момент времени $t = 0$, м/с; γ — угол наклона скорости v_{B0} к горизонту, град.

Начальную скорость v_{B0} полета частицы почвы в момент времени $t = 0$ определим из выражения [7]:

$$v_{B0} = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2 + \left(\frac{\pi n R}{30 \cos \alpha}\right)^2 + 2\left(\frac{\pi n R}{30 \cos \alpha}\right) \dot{x}_1}.$$

Для определения уравнения траектории движения частицы почвы B исключим из первого выражения системы уравнений (8) время t и подставим его во второе выражение этой системы, в результате имеем [9–11]:

$$\begin{aligned} t &= \frac{x}{v_{B0} \cos \gamma}; \\ z &= -\frac{g}{2v_{B0}^2 \cos^2 \gamma} x^2 + \text{tg} \gamma x. \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное выражение (9) — уравнение второго порядка, которое представляет собой параболу.

Максимальную величину подъема частицы почвы найдем из условия $z = \max$ [7]:

$$\frac{dz}{dt} = v_{B0} \sin \gamma - gt_1 = 0. \quad (10)$$

Из уравнения (10) определим время t_1 полета частицы почвы B до точки A [8–10]:

$$t_1 = \frac{v_{B0} \sin \gamma}{g}.$$

Ширину гребня b определим как сторону треугольника BAB_1 при известной медиане H и угле ξ [7]:

$$b = \frac{2H}{\text{tg} \xi}.$$

Подставив значение t_1 во второе выражение системы уравнений (8) и преобразовав его, получим наибольшую величину подъема частицы почвы B , которая представляет собой высоту гребня H [7]:

$$H = z = v_{B0}^2 \frac{\sin^2 \gamma}{2g}.$$

Дальность полета частицы почвы в горизонтальной плоскости (см. рис. 3, б) определим из уравнения траектории ее движения (9) при $z = 0$:

$$0 = -\frac{g}{2v_{B0}^2 \cos^2 \gamma} x^2 + \text{tg} \gamma x. \quad (11)$$

Из выражения (11) определим максимальное L_{\max} и минимальное L_{\min} значения дальности полета частицы почвы:

$$x_{11} = L_{\min} = 0;$$

$$x_{12} = L_{\max} = v_{B0}^2 \frac{\sin 2\gamma}{g}.$$

Величина $x_{11} = L_{\min}$ соответствует начальному моменту полета частицы почвы, а величина $x_{12} = L_{\max}$ определяет дальность полета частицы по горизонтали [13–15].

Заключение

Построенная математическая модель ориентации тел округлой формы позволила получить условие их ориентированной подачи в борозду, а также аналитические зависимости, определяющие траекторию движения частицы почвы по рабочей поверхности почвообрабатывающего органа, уравнения движения частиц почвы после отрыва от поверхности почвообрабатывающего органа при заделке ориентированного тела почвой.

Дальнейшее исследование полученных уравнений позволит определить оптимальные конструкционные и технологические параметры устройств (вибрационно-пневматического высаживающего аппарата и дискового заделывающего органа) для ориентированной подачи тел округлой формы в борозду с последующим сохранением полученного положения, а также экспериментально определить указанные оптимальные параметры этих устройств.

Литература и источники

1. Гануш Г. И., Давидович Н. Н. Формирование конкурентных преимуществ продукции овощеводства // Вестник АГАУ. 2007, № 1. С. 83.
2. Емельянов П. А., Аксенов А. Г. Вибрационно-пневматический высаживающий аппарат для ориентированной посадки лука-севка. Патент РФ № 2407271, 2010.
3. Емельянов П. А., Сибирев А. В., Аксенов А. Г. Устройство дискового типа для заделки луковиц в борозде. Патент РФ № 2490851, 2013.
4. Колчин Н. Н., Алакин В. М., Плахов С. А. Взаимодействие клубней с рабочей поверхностью виброротиционной сортировки // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014, № 2. С. 29–34.
5. Емельянов П. А., Аксенов А. Г. Теоретические исследования рабочего процесса вибрационно-пневматического высаживающего аппарата при ориентированной посадке лука-севка // Нива Поволжья. 2011, № 2. С. 60–64.
6. Емельянов П. А., Сибирев А. В. Теоретические исследования конструкционных параметров дискового заделывающего органа машины для посадки лука-севка // Тракторы и сельхозмашины. 2014, № 5. С. 29–32.
7. Емельянов П. А., Сибирев А. В. Теоретические исследования технологического процесса заделки луковиц лука-севка в борозде дисковым заделывающим органом с почвообрабатывателями // Нива Поволжья. 2014, № 2. С. 51–58.
8. Анферов С. Д., Скулский О. И., Славнов Е. В. Математическое моделирование процесса прямого отжима масличной культуры // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014, № 1. С. 31–55.
9. Бать М. И., Джанелидзе Г. Ю., Кельзон А. С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 2. Динамика. М.: Наука, 1985. 560 с.
10. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. 2. Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.
11. Мерзон В. И. Теоретическая механика. М.: Высшая школа, 1972. 273 с.

12. Albets-Chico X., Kassinos S. A consistent velocity approximation for variable-density flow and transport in porous media // Journal of Hydrology. 2013, no. 12, pp. 33–51. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.009.

13. Емельянов П. А., Аксенов А. Г. Экспериментальные исследования вибрационно-пневматического высаживающего аппарата на посадке луковиц лука-севка // Нива Поволжья. 2011, № 3. С. 56–63.

14. Пухликов А. Ю., Сибирев А. В. Элементы теории заделки луковиц луковичных культур в борозде при их посадке // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России: Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2013. С. 96–98.

15. Джашеев А. С., Джашеева З. М. Определение параметров рабочих органов овощной сеялки // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2004, № 10. С. 8–9.

References

1. Ganush G. I., Davidovich N. N. Formation of competitive advantages of horticulture products. *Vestnik AGAU*, 2007, no. 1, p. 83 (in Russ.).
2. Emel'yanov P. A., Aksenov A. G. *Vibratsionno-pnevmaticheskiy vysazhivayushchiy apparat dlya orientirovannoy posadki luka-sevka* [Vibration-pneumatic planting mechanism for oriented planting of seed onion]. RF patent no. 2407271, 2010.
3. Emel'yanov P. A., Sibirev A. V., Aksenov A. G. *Ustroystvo diskovogo tipa dlya zadelki lukovits v borozde* [Disc-type device for bulbs embedding in the furrow]. RF patent no. 2490851, 2013.
4. Kolchin N. N., Alakin V. M., Plakhov S. A. Interaction between tubers and working surface of a vibrating-rotary sorter. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 29–34 (in Russ.).
5. Emel'yanov P. A., Aksenov A. G. Theoretical studies of working process of vibration-pneumatic planting mechanism during the oriented planting of seed onion. *Niva Povolzh'ya*, 2011, no. 2, pp. 60–64 (in Russ.).
6. Emel'yanov P. A., Sibirev A. V. Theoretical studies of design parameters of disk coverer of a seed onion planting machine. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2014, no. 5, pp. 29–32 (in Russ.).
7. Emel'yanov P. A., Sibirev A. V. Theoretical studies of technological process of embedding seed onion bulbs in the furrow by a disc coverer with soil deflectors. *Niva Povolzh'ya*, 2014, no. 2, pp. 51–58 (in Russ.).
8. Anferov S. D., Skul'skiy O. I., Slavnov E. V. Mathematical modeling of oilseed direct extraction process. *Vestnik PNIPIU. Mekhanika*, 2014, no. 1, pp. 31–55 (in Russ.).
9. Bat' M. I., Dzhanelidze G. Yu., Kel'zon A. S. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh. T. 2. Dinamika* [Theoretical mechanics in examples and problems. Vol. 2. Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 560 p.
10. Loitsyanskiy L. G., Lur'e A. I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. 2. Dinamika* [Course of theoretical mechanics. Vol. 2. Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 640 p.
11. Merzon V. I. *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972, 273 p.
12. Albets-Chico X., Kassinos S. A consistent velocity approximation for variable-density flow and transport in porous media. *Journal of Hydrology*, 2013, no. 12, pp. 33–51. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.009.
13. Emel'yanov P. A., Aksenov A. G. Experimental studies of vibration-pneumatic planting mechanism during the planting of seed onion bulbs. *Niva Povolzh'ya*, 2011, no. 3, pp. 56–63 (in Russ.).
14. Pukhlikov A. Yu., Sibirev A. V. Elements of the theory of embedding onion bulbs in the furrow when planting. *Innovatsionnye idei molodykh issledovateley dlya APK Rossii. Mat-ly Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative ideas of young researchers for the agroindustrial complex of Russia. Proc. of all-Russian sci. and pract. conf.]. Penza, 2013, pp. 96–98 (in Russ.).
15. Dzhashееv A. S., Dzhashееva Z. M. Determining the parameters of working bodies of a vegetable seed drill. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 2004, no. 10, pp. 8–9 (in Russ.).