

УДК 631.33.024.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СЕМЯН ПО РАДИАЛЬНОМУ СЕМЯПРОВОДУ

Владимир СЕРБИН

Аграрный Университет Республики Молдова

Abstract. The paper presents a theoretical analysis of the logical character of seed movement through the radial delivery tube. We have deduced and solved differential equations describing seed movement in combination with the airflow through rotating drill seed tubes, as well as we have determined the regularities of seed movement through the delivery tube as a function of rotation angle depending on the airflow velocity and the angular speed of the wheel. It has been shown that in order to ensure timely delivery of the seed to the furrow opener in the rotation angle interval prescribed by technological requirements, the velocity of the air flow in the delivery tube must exceed 3 to 4 times the critical speed of the seeds.

Key words: Radial delivery tube; Rotation angle; Angular velocity; Air stream velocity; Critical seed speed; Buoyancy coefficient.

Реферат. В статье представлен теоретический анализ закономерности движения семян по радиальному семяпроводу. Составлены и решены дифференциальные уравнения, описывающие движение семян совместно с потоком воздуха во вращающихся радиальных семяпроводах. Установлена закономерность перемещения семени по семяпроводу в функции угла поворота в зависимости от скорости воздушного потока и угловой скорости колеса. При этом показано, что скорость воздушной струи в семяпроводе, обеспечивающей своевременную подачу семян к заделывающему органу в заданном технологическими требованиями интервале угла поворота, должна в 3...4 раза превышать критическую скорость семян.

Ключевые слова: Радиальный семяпровод; Угол поворота; Угловая скорость; Скорость воздушной струи; Критическая скорость семян; Коэффициент парусности.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин, ведущих к нарушению нормального функционирования технологического процесса ротационно-лунковой сеялки, является значительная продолжительность движения семян по семяпроводам. Исследователями и практиками в области разработки и эксплуатации машин для прямого посева сельскохозяйственных культур отмечается, что с возрастанием скорости движения сеялки происходит выброс семян на поверхность почвы, обусловленный запаздыванием подачи семян в лункообразователи. На наш взгляд для правильного управления процессом доставки семян необходим теоретический анализ закономерности движения семян по семяпроводу с целью обоснования рабочих режимов сеялки и управления ими. Семяпроводы ротационно-лунковой сеялки в плоскости вращения ротора можно в принципе устанавливать с различной осевой ориентацией. Теоретически нельзя исключать варианты с любыми значениями углов установки семяпроводов, однако наибольший практический интерес представляют, естественно, сеялки с установкой семяпроводов под углами $0... \pi/2$ радиан. В дальнейшем семяпроводы с нулевым углом установки будем называть радиальными. Ведущим параметром направленности семяпроводов может служить угол, образованный продольной осью семяпровода и радиусом ротора, которые проходят через ячейку высевяющего аппарата.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Семя, отделившееся от присоски и попавшее в канал вращающегося семяпровода, начинает перемещаться по нему в струе воздуха (рис.1). Таким образом, приложенная сила к семени включает и силу струи воздуха, которая определяется известной формулой (Летошнев, М.Н. 1955; Турбин, Б.Г. 1967):

$$R_x = k\rho F(u - \dot{x})^2 \quad (1)$$

где: F - миделево сечение семени;

u - скорость воздуха в семяпроводе;

\dot{x} - скорость семени относительно семяпровода.

В проекциях сил на координатные оси уравнение движения семени по семяпроводу будет следующим:

$$m\ddot{x} = R_x + j + mg\sin\varphi - F_T \quad (2)$$

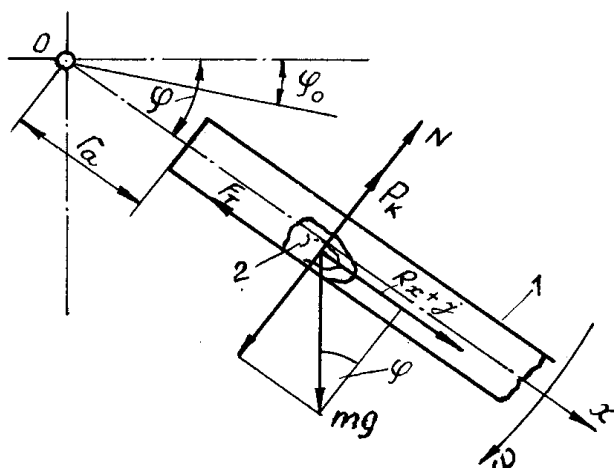


Рисунок 1. Схема движения семени по семяпроводу: 1- семяпровод; 2- семя; r_a - радиус высеивающего аппарата; φ - угол поворота семяпровода; φ_0 - угол сбрасывания семени в семяпровод; R_x - сила струи воздуха, действующая на семя; P_x - сила кориолисова ускорения.

$$N + P_k - mg \cos \varphi = 0 \tag{3}$$

Имея в виду, что

$$F_T = fN = f(mg \cos \varphi - P_k) \tag{4}$$

получим:

$$m\ddot{x} = k\rho F(u - \dot{x})^2 + m\omega^2 x + mg \sin \varphi - f(mg \cos \varphi - 2m\omega\dot{x}) \tag{5}$$

Произведя деление всех членов этого уравнения на массу семени, будет иметь:

$$\ddot{x} = k_n(u - \dot{x})^2 + \omega^2 x + g \sin \varphi - f(g \cos \varphi - 2\omega\dot{x}) \tag{6}$$

В отношении полученного уравнения требуется следующее замечание. Как видно из уравнения равновесия, реакция связи семени, вызванная силами тяжести и Кориолиса, может меняться по направлению в зависимости от того, какой знак будет у суммы этих сил. Ясно одно, что с увеличением угла поворота семяпровода и с возрастанием скорости перемещения семени влияние кориолисовой силы на реакцию связи станет преимущественным. Тогда согласно (4) при условии, что $2m\omega\dot{x} > mg \cos \varphi$ -сила трения в указанном выражении меняет свое направление. Фактически этого не происходит. Поэтому при решении уравнения реакцию связи семени с семяпроводом следует принимать по ее абсолютной величине т.е.:

$$\ddot{x} = k_n(u - \dot{x})^2 + \omega^2 x + g \sin \varphi - f|g \cos \varphi - 2\omega\dot{x}| \tag{7}$$

Таким образом, движение семени по семяпроводу описывается дифференциальным уравнением второго порядка, являющимся нелинейным относительно первой производной функции. Как известно, такого типа уравнения в квадратурах не решаются (Камке, Э. 1976). Для решения таких уравнений обычно пользуются приближенными методами. Будем искать решения этого уравнения в виде ряда Тейлора путем последовательного его дифференцирования (Бермант, А.Ф., Араманович, И.Г. 1971; Пискунов, Н.С. 1996; Корн, Г., Корн, Т. 1984; Бронштейн, И.Н., Семендяев, К.А. 1986).

Функция типа $x = f(t)$ разложенная в ряд Тейлора, имеет вид:

$$x = f(t) = f(t_0) + \frac{f'(t_0)}{1!}(t - t_0) + \frac{f''(t_0)}{2!}(t - t_0)^2 + \frac{f'''(t_0)}{3!}(t - t_0)^3 + \dots + \frac{f^n(t_0)}{n!}(t - t_0)^n + \frac{f^n(t_0)}{n!}(t - t_0)^n \tag{8}$$

Применительно к решаемому уравнению время выразим через угол поворота семяпровода. Ввиду того, что $\omega t_0 = \varphi_0$, ωt будем иметь:

$$t_0 = \frac{\varphi_0}{\omega}; t = \frac{\varphi}{\omega}$$

где: φ - угол поворота семяпровода,
 ω - угловая скорость семяпровода.

Поэтому искомое решение уравнения, выраженное в формуле ряда Тейлора, будет таким:

$$x = f\left(\frac{\varphi}{\omega}\right) = f\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right) + \frac{f'\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right)}{1!}\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\omega}\right) + \frac{f''\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right)}{2!}\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\omega}\right)^2 + \frac{f'''(\varphi_0)}{3!}\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\omega}\right)^3 + \dots + \frac{f^n(\varphi_0)}{n!}\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\omega}\right)^n \tag{9}$$

Покажем правомерность разложения данного уравнения в ряд. Прежде всего отметим, что рассматриваемая функция обладает достаточными признаками сходимости: она, во-первых, бесконечное число раз дифференцируема, во-вторых, все члены ряда положительны, причем общий член ряда при неограниченном возрастании его номера стремится к нулю. Это видно из того, что, когда степенной ряд, согласно признаку Даламбера, сходится.

$$\frac{\varphi - \varphi_0}{\omega} < 1 \quad (10)$$

Интервал или числовая ось, на которой исследуется сходимость этого ряда, определяется из условий функционирования высевальной системы сеялки. Как видно из рис.1, семя из ячейки попадает в семяпровод при повороте его на угол φ_0 . Последующее перемещение семени по семяпроводу продолжается вплоть до поворота его на угол, который по условиям задачи не должен превышать $\pi/2$ радиан:

$$\varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

Таким образом, перемещение семени, выражаемое разложенной в ряд Тейлора функцией, интересует нас лишь в интервале числовой оси, ограниченной углами поворота φ_0 и $\pi/2$. Однако признаку сходимости удовлетворяет не всякая угловая скорость семяпроводов. Из (10) находим, что:

$$\varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

Так что в интервале углов поворота семяпровода с граничными значениями ($\varphi_0 = 0$; $\varphi_0 = \pi/2$) имеем:

$$\omega = \frac{\pi}{2} = 1,52 \text{ рад / с} \quad (12)$$

Практические значения угловой скорости ротора сеялки составляют 4...10 рад/с. Поэтому очевидно, что это условие сходимости ряда выполняется с большим запасом. Следовательно, для угловых скоростей семяпроводов, превышающих скорость в 1,52 рад/с, полученный ряд обладает признаками сходимости, а его сумма в интервале углов поворота ($\varphi_0, \pi/2$) стремится к значению искомой функции. Точность решения задачи ограничим членом ряда, содержащим четвертую производную функции. Коэффициенты членов ряда находим последовательным дифференцированием уравнения (7).

$$x''' = 2k_n(x'x'' - ux''') + \omega^2 x' + g\omega \cos \varphi - f | - g\omega \sin \varphi - 2\omega x'' | \dots \quad (13)$$

$$x'''' = 2k_n((x'')^2 + x'x''' - ux'''') + \omega^2 x'' - g\omega^2 \sin \varphi - f | - g\omega^2 \cos \varphi - 2\omega x''' | \dots \quad (14)$$

Начальные условия движения семени:

$$\varphi = \varphi_0; x_0 = r_a \Rightarrow f\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right); x'_0 = f\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right) = 0 \quad (15)$$

где: r_a - радиус ячеистого аппарата, или расстояние от семяпровода до оси вращения.

Коэффициенты других членов ряда определяются из выражений:

$$x'' = f''\left(\frac{\varphi_0}{\omega}\right) = k_n u^2 + \omega^2 x_0 + g \sin \varphi_0 - fg \cos \varphi_0 \quad (16)$$

$$x_0''' = f''' \left(\frac{\varphi_0}{\omega} \right) = -2k_n u x_0'' + g\omega \cos \varphi_0 - f | - g\omega \sin \varphi_0 - 2\omega x_0'' | \quad (17)$$

$$x_0'''' = f'''' \left(\frac{\varphi_0}{\omega} \right) = 2k_n ((x_0'')^2 - ux_0''') + \omega^2 x_0'' - g\omega^2 \sin \varphi_0 - f | - g\omega^2 \cos \varphi_0 - 2\omega x_0''' | \quad (18)$$

Для определения числовых значений коэффициентов ряда и функции в целом, зададимся конкретными условиями и приближенными к реальности физическими характеристиками исследуемого объекта. Для этого воспользуемся обыкновенными семенами сахарной свеклы, показавшими при исследовании с этиленовыми семяпроводами коэффициент трения $f = 0,54 \dots 0,67$ ($\varphi = 30 \dots 34^\circ$) и имевшими коэффициент парусности $K_p = 0,1$, m^{-1} .

Зададимся также следующими техническими данными:

$$r_a = 0,085 \text{ м.}; \varphi = 30^\circ$$

Расчеты коэффициентов искомой функции производились на персональном компьютере. Числовые значения, полученные при угловых скоростях семяпроводов 5 и 8 рад/с изменяющейся в пределах от 0 до 40 м/с скорости воздушной струи, приведены в таблице 1.

При подстановке этих коэффициентов в разложенную в ряд Тейлора функцию (9) получим формулы для расчетов пути движения семян. Например, для угловой скорости ротора 8 рад/с и нулевой скорости воздуха в семяпроводе расчетная формула будет такой:

$$x_0 = 0,085 + \frac{4,6}{2!} \left(\frac{\varphi - 30}{8} \right)^2 - \frac{8}{3!} \left(\frac{\varphi - 30}{8} \right)^3 + \frac{340}{4!} \left(\frac{\varphi - 30}{8} \right)^4 \quad (19)$$

Таблица 1. Коэффициенты членов ряда функции

ω , рад/с	u , м/с	0	10	15	20	25	30	40
5	x_0 "	2,2	12,2	24,7	42,2	64,7	92,2	-
	x_0 "'	16,0	-65,4	-18,6	-380	-664	-1050	-
	x_0 ""	-35	684	1728	3414	5915	9438	-
8	x_0 "	4,6	14,6	27,2	44,6	67,2	94,6	164,94
	x_0 "'	-8,2	-145	-331	-616	-1014	-1541	-3041
	x_0 ""	340	2453	5300	9627	15684	23750	47188

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Данные расчетов функции в обобщенном виде представлены на графиках (рис.2). При анализе результатов полученных расчетов, прежде всего, отмечается крайне незначительное перемещение семян при отсутствии в семяпроводах воздушного потока. Так, при повороте семяпровода на конечный угол, равный 90° , это перемещение относительно ячеистого диска в зависимости от угловой скорости составляет всего 69 и 41 мм. Скорость воздушного потока 10 м/с не влияет заметно на перемещение семени, хотя оно ускоряется в 2 раза по сравнению с перемещением при нулевой скорости воздуха. Это, однако, указывает на то, что воздушная струя весьма эффективное средство для интенсификации движения семян в семяпроводах. С увеличением скорости воздушной струи темп приращения пути семени возрастает. При этом для разных угловых скоростей это приращение различно.

Так, например, для угловой скорости семяпровода 5 рад/с, при скорости воздушной струи 20 м/с и при повороте семяпровода на угол 80° , абсолютное перемещение семени составляет 0,524 м, тогда как при угловой скорости, равной 8 рад/с, и тех же других условиях семя пройдет путь равный всего 0,275 м. Этим подтверждаются ранее установленные закономерности, согласно которым путь перемещения семени уменьшается с увеличением угловой скорости колеса сеялки. В условиях интенсификации движения семени воздушным потоком это закономерность, как мы видим, проявляется еще в большей степени. Исследуемое перемещение существенно зависит от коэффициентов парусности семян.

Логично предположить, что семена с малыми коэффициентами парусности в одинаковых условиях будут проходить меньший путь. Расчеты движения семян кукурузы, имеющих коэффициент парусности $0,05 \text{ м}^{-1}$, выполненные для тех же условий, что и для семян сахарной свеклы, подтверждают это. Из графиков перемещения семян кукурузы видно (рис. 3), что при скорости

воздуха в семяпроводе равном 20 м/с. в фазе поворота семяпровода на 80° , семя проходит путь 0,2 м, тогда как путь семени сахарной свеклы в той же фазе достигает 0,28 м. С увеличением скорости потока воздуха эта разница возрастает.

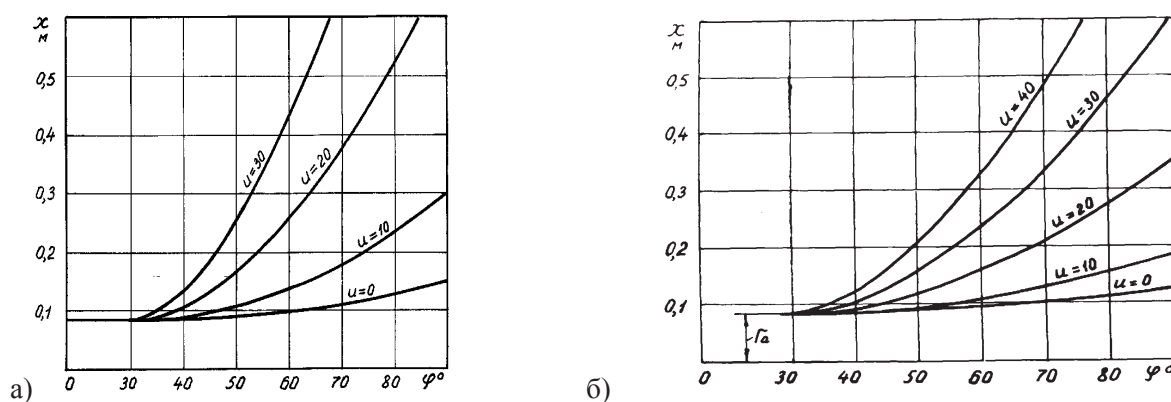


Рисунок 2. Графики пути движения семян по семяпроводам

а) - при угловой скорости $\omega = 5 \text{ рад с}^{-1}$; б) - при угловой скорости $\omega = 8 \text{ рад с}^{-1}$.

Анализ полученных расчетных данных позволяет определить значение скорости воздушной струи в семяпроводах, обеспечивающей своевременную транспортировку семян к заделывающим органам. Если считать 0,25...0,40 м оптимальным радиусом лунковых колес сеялки, то скорость струи воздуха в семяпроводе 30...40 м/с может считаться вполне приемлемой для практического обеспечения нормальной работы сеялки. Так как критические скорости семян различных пропашных культур варьируют в пределах 9...14 м/с (Зубенко, В.Ф. 1979; Кленин, Н.И. и др. 2005; Ижик, Н.К. 1976), то это в сущности, означает, что транспортирующая скорость воздушной струи должна быть соизмерима с трех- или четырехкратной критической скоростью семян:

$$u = (3...4) V_{\text{кр}} \quad (20)$$

$$u = (3...4) \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (21)$$

Это же соотношение, выраженное через коэффициент парусности семян, дает возможность численно прогнозировать скорость струи воздуха в семяпроводах, в частности, для семян сахарной свеклы:

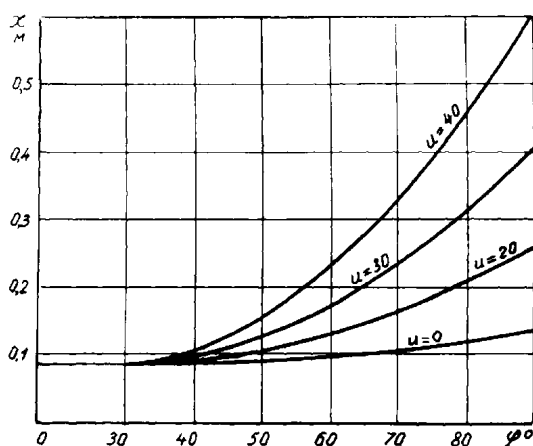


Рисунок 3. Графики перемещения семян с коэффициентом парусности $K_n = 0.05 \text{ м}^{-1}$ при угловой скорости $\omega = 8 \text{ рад с}^{-1}$

$$u = (3...4) \sqrt{\frac{9,8}{0,1}} \approx 30...40 \text{ мс}^{-1}$$

и семян кукурузы:

$$u = (3...4) \sqrt{\frac{9,8}{0,05}} \approx 42...56 \text{ мс}^{-1}$$

ВЫВОДЫ

1. Составлены и решены дифференциальные уравнения, описывающие движение семян совместно с потоком воздуха во вращающихся радиальных семяпроводах.

2. Установлена закономерность перемещения семени по семяпроводу в функции угла поворота в зависимости от скорости воздушного потока

и угловой скорости колеса. При этом показано, что скорость воздушной струи в семяпроводе, обеспечивающей своевременную подачу семян к заделывающему органу в заданном технологическими требованиями интервале угла поворота, должна в 3...4 раза превышать критическую скорость семян.

3. Для семян сахарной свеклы и кукурузы, в зависимости от скорости движения сеялки, оптимальная скорость воздуха может варьировать в пределах от 25 до 45 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ЛЕТОШНЕВ, М.Н. (1955). Сельскохозяйственные машины. Москва-Ленинград. 764 с.
2. ТУРБИН, Б.Г. и др. (1967). Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет. Ленинград: Машиностроение. 584 с.
3. КАМКЕ, Э. (1971). Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Наука. 576 с.
4. БЕРМАНТ, А.Ф., АРАМАНОВИЧ, И.Г. (1971). Краткий курс математического анализа. Москва: Наука. 736 с.
5. ПИСКУНОВ, Н.С. (2010). Дифференциальное и интегральное исчисления. Т.2. Москва: Наука. 544 с. ISBN 978-5-89602-013-4.
6. КОРН, Г., КОРН, Т. (1984). Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука. 832 с.
7. БРОНШТЕЙН, И.Н., СЕМЕНДЯЕВ, К.А. (1986). Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Москва: Наука. 540 с.
8. ЗУБЕНКО, В.Ф., ред. (1979). Сахарная свекла. Основы агротехники. Киев: Урожай. 416 с.
9. КЛЕНИН, Н.И. и др. (2005). Сельскохозяйственные машины и мелиоративные машины. Москва: Колос. 464 с. ISBN 5-9532-0035-8.
10. ИЖИК, Н.К. (1976). Полевая всхожесть семян. Киев: Урожай. 200 с.

Data prezentării articolului: 10.01.2018

Data acceptării articolului: 11.02.2018