УДК 631.331

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОШНИКА С НАПРАВИТЕЛЕМ-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ СЕМЯН ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СЕЯЛКИ-КУЛЬТИВАТОРА

Н. П. Ларюшин, доктор техн. наук, профессор; В. А. Мачнев, доктор техн. наук, профессор; А. В. Мачнев, доктор техн. наук, доцент; В. В. Шумаев, канд. техн. наук, доцент; М. А. Ларин, аспирант

ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА», г. Пенза, Россия,
т. (841-2) 628-517, e-mail: max354gr@rambler.ru

Предложен сошник пневматической сеялки-культиватора для подпочвенно-разбросного посева с направителем-распределителем семян и теоретически обоснован технологический процесс его работы. Для этого установлены законы движения семени по семяпроводу от высевающего аппарата до дна борозды и получены выражения для определения скорости движения и перемещения семени, а в конечном счете – дальности полета семян и ширины засеваемой полосы, оказывающих существенное влияние на равномерность распределения семян по площади рассева на заданной глубине.

***Ключевые слова**: семя, посев, направитель-распределитель семян, сошник, сеялка-культиватор, уравнение движения семени.*

На современном этапе развития посевной техники все большее распространение получают сеялки, способные выполнять подпочвенно-разбросной посев, которые создают более благоприятные условия для роста и развития растений, что ведет к повышению урожайности сельскохозяйственных культур и рентабельности производства продукции растениеводства [1]. Следует отметить, что любая посевная машина должна обеспечивать равномерное распределение семян по площади рассева на заданной глубине, что не всегда удается достичь на современных машинах. Так, к основным недостаткам сошников для подпочвенно-разбросного посева относятся: недостаточная равномерность распределения семян по площади рассева и ширине захвата рабочего органа, пульсация семенного потока, неконтролируемое перераспределение семян в распределительных устройствах, низкая эффективность использования камеры рассева. Поэтому исследования, направленные на разработку новых рабочих органов сеялок-культиваторов для подпочвенно-разбросного посева зерновых культур, обеспечивающих повышение равномерности распределения семян по площади рассева и качественное выполнение посева, отвечающего агротехническим требованиям, является перспективным направлением [2, 3, 4, 5].

Для устранения отмеченных недостатков нами разработан сошник пневматической сеялки-культиватора для подпочвенно-разбросного посева с направителем-распределителем семян (рис. 1), который состоит из стрельчатой лапы *1*, пружинной стойки *2*, наконечника *3* и направителя-распределителя семян *6*, выполненного в виде короба, расширяющегося в поперечно-горизонтальной и сужающегося в продольно-вертикальной плоскостях. Направитель-распределитель семян *6* включает в себя свод *7* с приемником *5*, днище *9* и направляющие *8*. Приемник *5* имеет отверстие, поперечное сечение которого переходит от окружности на входе к эллипсу на выходе. Свод *7* выполнен в виде пластины, передний конец которой вынесен за пределы выходного окна направителя-распределителя семян, что позволяет повысить эффективность использования объема камеры рассева. Днище *9* изготовлено в виде U-образного лотка и расположено под углом α=5…10 град., а направляющие *8* выполнены в виде вертикальных пластин, установленных между сводом *7* и днищем *9* с приращением угла δ=18 град.

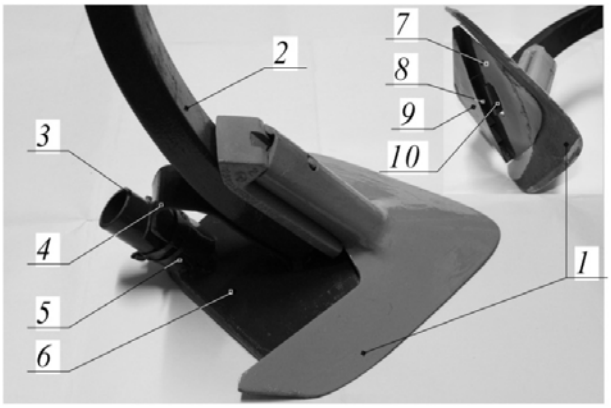


Рис. 1. Сошник пневматической сеялки-культиватора для подпочвенно-разбросного посева с направителем-распределителем семян: 1 – стрельчатая лапа; 2 – стойка; 3 – наконечник; 4 – держатель; 5 – приемник; 6 – направитель-распределитель семян; 7 – свод; 8 – направляющие; 9 – днище; 10 – крепежное отверстие

Во время движения сошника на заданной глубине посева стрельчатая лапа *1* подрезает слой почвы, который перемещается по ней, образуя при этом несколько уплотненное дно борозды и камеру рассева. Семена под действием воздушного потока поступают из высевающего аппарата по пневмосемяпроводу, проходят через наконечник *3*, стабилизирующий часть воздушного потока в зависимости от физико-механических свойств семян, и направляются в приемник *5*, формирующий равномерно направленный поток семян. Далее поток семян равномерно распределяется в пространстве между U-образным днищем *9* и сводом *7*, направляющими *8* по ширине выходного окна направителя-распределителя семян и укладывается на несколько уплотненное дно борозды. Затем семена накрываются почвенным пластом, сходящим со свода *7* стрельчатой лапы *1*.

При теоретическом обосновании технологического процесса сошника для подпочвенно-разбросного посева зерновых культур с направителем-распределителем семян необходимо установить законы движения семени по семяпроводу от высевающего аппарата до дна борозды, с помощью которых можно определить скорость движения и перемещение семени, а в конечном счете – дальность полета семян и ширину засеваемой полосы, оказывающих существенное влияние на равномерность распределения семян по площади рассева на заданной глубине. Поэтому нами рассматривалось движение семени (рис. 2) по наклонному участку семяпровода AB пневматической сеялки-культиватора, по наклонному участку семяпровода BC сошника, по криволинейному участку семяпровода CD сошника, по направителю-распределителю DE сошника и при сходе с направителя-распределителя сошника.

Рассматривая движение семени вверх по наклонному участку семяпровода AB

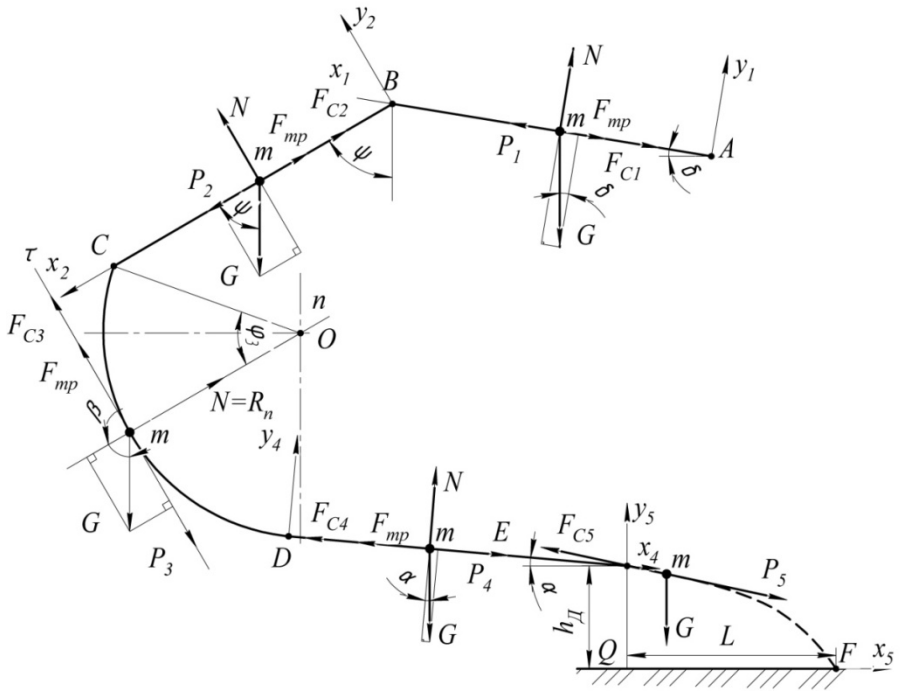


Рис. 2. Схема движения семени в семяпроводе сеялки-культиватора, оснащенной сошниками с направителями-распределителями семян

(рис. 2) пневматической сеялки-культиватора, расположенному под углом δ=10 *град.*, систему отсчета x_1Ay_1 помещаем в начале наклонного участка. В этом случае на семя будут действовать следующие силы: сила воздушного потока P_1; сила тяжести семени G; нормальная реакция поверхности семяпровода N; сила трения семени по семяпроводу F_{mp}; сила сопротивления воздуха F_{C1} [6]. Начальными условиями движения семени по наклонному участку семяпровода являются $t_1=0$, $x_1=0$ и $\dot{x}_1=\upsilon_{10}$.

Поэтому дифференциальные уравнения движения семени в проекциях на оси Ax_1 и Ay_1 запишутся в виде

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1=P_1-F_{mp}-F_{C1}-G\sin\delta=P_1-mgf\cos\delta-k^2m\dot{x}_1^{\,2}-mg\sin\delta; \\ m\ddot{y}_1=N-G\cos\delta, \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса семени, кг; x_1 и y_1 – текущие координаты движущегося семени по осям Ax_1 и Ay_1 соответственно, м; P_1 – сила воздушного потока, Н; F_{mp} – сила трения семени по семяпроводу, Н; F_{C1} – сила сопротивления воздуха, Н; G – сила тяжести семени, Н; δ – угол наклона семяпровода на участке AB, град.; N – нормальная реакция поверхности семяпровода, Н.

В этом выражении

$$F_{C1}=-k^2\cdot m\cdot\upsilon_1^2,\ N=mg\cos\delta,\ F_{mp}=mgf\cos\delta, \quad (2)$$

где k – постоянный коэффициент; υ_1 – скорость движения семени по наклонному участку семяпровода сеялки-культиватора, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; f – коэффициент трения.

Поделив левую и правую части первого выражения системы (1) на массу семени m, после некоторых преобразований получили дифференциальное уравнение движения семени по оси Ax_1

$$\ddot{x}_1=-\left[k^2\dot{x}_1^2-g\left(\frac{P_1}{G}-f\cos\delta-\sin\delta\right)\right]. \quad (3)$$

Учитывая, что $\ddot{x}_1=\frac{d\dot{x}_1}{dt_1}$, отделив переменные в уравнении (3) и проинтегрировав его с учетом начальных условий, будем иметь:

$$-\frac{1}{2kk_1}\ln\left|\frac{k\dot{x}_1-k_1}{k\dot{x}_1+k_1}\right|=t_1, \quad (4)$$

где t_1 – время движения семени по участку AB в зависимости от перемещения по нему, с; k_1 – коэффициент, равный $\sqrt{g\left(\frac{P_1}{G}-f\cos\delta-\sin\delta\right)}$.

Решая это уравнение относительно $\dot{x}_1$, получим

$$\dot{x}_1=\upsilon_1=-\frac{k_1}{k}\cdot\frac{1+e^{2kk_1t_1}}{1-e^{2kk_1t_1}}, \quad (5)$$

где e – основание натурального логарифма, e=2,718.

Уравнение (5) определяет скорость движения семени υ_1 по наклонному участку семяпровода сеялки-культиватора в зависимости от его положения.

Заменяя $\dot{x}_1$ на $\frac{dx_1}{dt_1}$ в выражении (5), после интегрирования будем иметь

$$x_1=\frac{k_1}{k}\cdot\left(\frac{1}{2kk_1}\cdot\ln\left|1-e^{2kk_1t_1}\right|+arctg\sqrt{1-e^{2kk_1t_1}}\right)+C_3. \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (6) начальные условия (при $t_1=0$ $x_1=0$), определяем постоянную интегрирования C_3, она будет равна нулю. После подстановки постоянной интегрирования C_3 в уравнение (6) получим закон движения семени по наклонному участку AB семяпровода сеялки-культиватора:

$$x_1=\frac{k_1}{k}\cdot\left(\frac{1}{2kk_1}\cdot\ln\left|1-e^{2kk_1t_1}\right|+arctg\sqrt{1-e^{2kk_1t_1}}\right). \quad (7)$$

При движении семени по наклонному участку семяпровода BC (рис. 2) к нему будут приложены такие силы как сила воздушного потока P_2, сила тяжести семени G, нормальная реакция поверхности семяпровода N, сила трения семени по семяпроводу F_{mp} и сила сопротивления воздуха F_{C2}. Тогда дифференциальные уравнения движения семени на данном участке запишутся в следующем виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_2=P_2-F_{mp}-F_{C2}+G\cos\psi=P_2-mgtg\varphi_{cm}\sin\psi-mk^2\dot{x}_2^2+mg\cos\psi; \\ m\ddot{y}_2=N-G\sin\psi=N-mg\sin\psi, \end{cases} \quad (8)$$

где x_2 и y_2 – текущие координаты движущегося семени на участке BC по осям Bx_2 и By_2 соответственно, м; P_2 – сила воздушного потока, Н, $P_2=\frac{P_1}{8}$; F_{C2} – сила сопротивления воздуха, Н, $F_{C2}=-k^2\cdot m\cdot\dot{x}_2^2$; ψ – угол наклона семяпровода на участке BC, град., ψ=20 *град.*; φ_{cm} – статический угол трения семени по поверхности семяпровода, град.

Воспользовавшись первым дифференциальным уравнением (8), левую и правую части которого разделим на массу семени m, будем иметь:

$$\ddot{x}_2=-\left[k^2\dot{x}_2^2-g\left(\frac{P_2}{G}-tg\varphi_{cm}\sin\psi+\cos\psi\right)\right]. \qquad (9)$$

Записав $\ddot{x}_2=d\dot{x}_2/dt_2$ и отделив в уравнении (9) переменные, после интегрирования получим:

$$-\frac{1}{2kk_2}\cdot\ln\left|\frac{k\dot{x}_2-k_2}{k\dot{x}_2+k_2}\right|+C_5=t_2. \qquad (10)$$

где t_2 – время движения семени по участку BC, с; k_2 – коэффициент, равный $\sqrt{g\left(\frac{P_2}{G}-tg\varphi_{cm}\sin\psi+\cos\psi\right)}$.

Подставив в уравнение (10) начальные условия движения семени на участке BC (при $t_{20}=0$ $x_2=0$ и $\dot{x}_2=\upsilon_{20}$), найдем величину постоянной интегрирования $C_5=\frac{1}{2kk_2}\cdot\ln\left|\frac{k\upsilon_{20}-k_2}{k\upsilon_{20}+k_2}\right|$. Тогда уравнение (10), решенное относительно $\dot{x}_2$, примет вид

$$\dot{x}_2=\upsilon_2=-\frac{k_2}{k}\cdot\frac{k\upsilon_{20}\left(1+e^{2kk_2t_2}\right)-k_2\left(1-e^{2kk_2t_2}\right)}{k\upsilon_{20}\left(1-e^{2kk_2t_2}\right)-k_2\left(1+e^{2kk_2t_2}\right)}, \qquad (11)$$

где υ_2 – скорость движения семени по наклонному участку BC сошника с направителем-распределителем семян, м/с.

Для определения перемещения семени по наклонному участку BC семяпровода сошника уравнение (11) представим в гиперболических функциях, учитывая, что $1+e^{2kk_2t_2}=2e^{kk_2t_2}ch\left(kk_2t_2\right)$ и $1-e^{2kk_2t_2}=-2e^{kk_2t_2}sh\left(kk_2t_2\right)$,

$$\dot{x}_2=\upsilon_2=-\frac{k_2}{k}\cdot\frac{k\upsilon_{20}\cdot ch\left(kk_2t_2\right)+k_2sh\left(kk_2t_2\right)}{-k\upsilon_{20}\cdot sh\left(kk_2t_2\right)-k_2\cdot ch\left(kk_2t_2\right)}. \qquad (12)$$

Проинтегрировав данное выражение, будем иметь закон движения семени по участку BC:

$$x_2=\frac{1}{k_2}\cdot\ln\left|k\upsilon_{20}\cdot sh\left(kk_2t_2\right)+k_2\cdot ch\left(kk_2t_2\right)\right|+C_7. \qquad (13)$$

Задаваясь начальными условиями ($t_2=0$ $x_2=0$), постоянная интегрирования будет равна $C_7=-\frac{1}{k^2}\cdot\ln\left|k_2\right|$. С учетом последнего выражения закон движения по второму участку (13) после преобразований можно представить как

$$x_2=\frac{1}{k_2}\cdot\ln\left|\frac{k}{k_2}\upsilon_{20}\cdot sh\left(kk_2t_2\right)+ch\left(kk_2t_2\right)\right|. \qquad (14)$$

Для изучения движения семени по криволинейному участку семяпровода сошника с направителем-распределителем (рис. 2) семя помещаем на криволинейную поверхность радиусом r. В этом случае на семя будут действовать следующие силы: сила воздушного потока P_3; сила тяжести семени G; нормальная реакция поверхности семяпровода сошника N; сила трения семени по семяпроводу F_{mp}; сила сопротивления воздуха $F_{C3}=-k^2\cdot m\cdot\upsilon_3^2$.

При движении семени по криволинейному участку CD семяпровода сошника основное уравнение динамики с учетом действующих сил запишется в виде

$$\begin{cases} m\dfrac{d\upsilon_3}{dt_3}=F_\tau+R_\tau=-F_{C3}-F_{mp}+P_3+G\sin\beta; \\ \dfrac{m\upsilon_3^2}{r}=F_n+R_n=N-G\cos\beta, \end{cases} \qquad (15)$$

где m – масса семени, кг; υ_3 – скорость семени на криволинейном участке CD, м/с; R_n и R_τ – проекция равнодействующей всех реакций связи на ось n и τ соответственно, Н; F_n и F_τ – проекция равнодействующей всех активных сил, приложенных к семени, на ось n и τ соответственно, Н.

Для исключения реакции умножим второе уравнение системы (15) на коэффициент f и сложим с первым уравнением, учитывая при этом, что $\upsilon_3=r\dot{\varphi}_3$. После некоторых преобразований будем иметь:

$$\frac{d\dot{\varphi}_3}{dt_3}+\left(f+\frac{k^2}{r}\right)\dot{\varphi}_3^2=\frac{g}{r}\left(\frac{P_3}{G}+\sin\beta-f\cos\beta\right). \qquad (16)$$

Так как $\frac{d\dot{\varphi}_3}{dt_3}=\frac{d\dot{\varphi}_3}{d\varphi_3}\cdot\frac{d\varphi_3}{dt_3}=\frac{d\left(\dot{\varphi}_3^2\right)}{2d\varphi_3}$, то

$$\frac{d\left(\dot{\varphi}_3^2\right)}{d\varphi_3}+2\left(f+\frac{k^2}{r}\right)\dot{\varphi}_3^2=\frac{2g}{r}\left(\frac{P_3}{G}+\sin\beta-f\cos\beta\right). \qquad (17)$$

Уравнение (17) представляет собой неоднородное линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно $\dot{\varphi}_3^2$. Общее решение неоднородного дифференциального уравнения состоит из суммы двух решений: общего решения соответствующего однородного уравнения (когда правая часть равна нулю) и какого-нибудь частного решения уравнения.

Общее решение однородного уравнения $\frac{d\left(\dot{\varphi}_3^2\right)}{d\varphi_3}+2\left(f+\frac{k^2}{r}\right)\dot{\varphi}_3^2=0$ имеет вид

$$\dot{\varphi}_{31}^2=C_9\cdot e^{-2\left(f+\frac{k^2}{r}\right)\varphi_3}, \qquad (18)$$

где C_9 – постоянная интегрирования.

Частное решение уравнения (17) будем искать из выражения

$$\dot{\varphi}_{32}^2 = A\cos\varphi_3 + B\sin\varphi_3, \qquad (19)$$

где A и B – неопределенные коэффициенты. Для их определения подставим выражение (19) в дифференциальное уравнение (17) и получим [7, 8]

$$\left[2\left(f+\frac{k^2}{r}\right)A+B\right]\cos\varphi_3+\left[2\left(f+\frac{k^2}{r}\right)B-A\right]\sin\varphi_3=$$

$$=\frac{2g}{r}\left(\frac{P_3}{G}+\sin\beta-f\cos\beta\right). \qquad (20)$$

Для тождественного удовлетворения этого равенства необходимо, чтобы коэффициенты при $\cos\varphi_3$ и $\sin\varphi_3$ в обеих частях равенства были соответственно равны друг другу. Это позволяет получить уравнения относительно неизвестных A и B:

$$A=-\frac{2g}{r}\cdot\frac{2f\left(f+\frac{k^2}{r}\right)+1}{4\left(f+\frac{k^2}{r}\right)^2+1}=-\frac{2g}{r}\cdot\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}, \qquad (21)$$

где k_3 –коэффициент, $k_3=f+\frac{k^2}{r}$;

$$B=\frac{2g}{r}\left(\frac{2k_3(2f\cdot k_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right). \qquad (22)$$

Таким образом, искомое частное решение (19) имеет вид

$$\dot{\varphi}_{32}^2=\frac{2g}{r}\cdot\left[\left(\frac{2k_3(2f\cdot k_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right)\sin\varphi_3-\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\cos\varphi_3\right]. \qquad (23)$$

Складывая решения (18) и (23), получим общее решение дифференциального уравнения в следующем виде:

$$\dot{\varphi}_3^2=C_9\cdot e^{-2k_3\varphi_3}+\frac{2g}{r}\times$$

$$\times\left[\left(\frac{2k_3(2f\cdot k_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right)\sin\varphi_3-\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\cos\varphi_3\right]. \qquad (24)$$

В этом выражении постоянную интегрирования C_9 найдем из условия нахождения семени на криволинейном участке CD семяпровода сошника в начальном положении (при $t_3=0$ $\varphi_{30}=0$), учитывая, что $\dot{\varphi}_{30}=\omega_{30}=\upsilon_{30}r$. Здесь ω_{30} – угловая скорость семени в начале криволинейного участка CD, с$^{-1}$; υ_{30} – скорость семени в начале криволинейного участка CD, м/с. Тогда

$$C_9=\upsilon_{30}^2\cdot r^2-\frac{2g}{r}\cdot\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}. \qquad (25)$$

Следовательно, выражение (24) запишется в виде

$$\dot{\varphi}_3^2=\left(\upsilon_{30}^2\cdot r^2-\frac{2g}{r}\cdot\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\right)\cdot e^{-2k_3\varphi_3}+$$

$$+\frac{2g}{r}\cdot\left[\left(\frac{2k_3(2f\cdot k_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right)\sin\varphi_3-\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\cos\varphi_3\right]. \qquad (26)$$

Скорость семени υ_3 на выходе из криволинейного участка CD семяпровода сошника в зависимости от угла φ можно найти из выражения (26), учитывая при этом, что $\dot{\varphi}_3^2=\upsilon_3^2/r^2$ [9,10,11]:

$$\upsilon_3=\sqrt{\left(\upsilon_{30}^2r^4-2gr\cdot\frac{2fk_3+1}{4k_3^2+1}\right)e^{-2k_3\varphi_3}+}$$

$$\sqrt{+2gr\cdot\left[\left(\frac{2k_3(2fk_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right)\sin\varphi_3-\frac{2fk_3+1}{4k_3^2+1}\cos\varphi_3\right]}. \qquad (27)$$

Для получения закона движения семени на криволинейном участке CD, заменим $\dot{\varphi}_3^2$ на $\left(\frac{d\varphi_3}{dt_3}\right)^2$ и, разделив переменные, проинтегрируем ее. В результате будем иметь:

$$\varphi_3=\int\sqrt{\left(\upsilon_{30}^2\cdot r^2-\frac{2g}{r}\cdot\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\right)\cdot e^{-2k_3\omega_3t_3}+\frac{2g}{r}\times}$$

$$\sqrt{\times\left[\left(\frac{2k_3(2f\cdot k_3+1)}{4k_3^2+1}-f\right)\sin\omega_3t_3-\frac{2f\cdot k_3+1}{4k_3^2+1}\cos\omega_3t_3\right]}\cdot dt_3. \qquad (28)$$

Рассмотрим движение семени по направителю-распределителю, для чего изобразим днище DE с движущимся по нему семенем (рис. 2), которое будет перемещаться под действием силы воздушного потока P_4, силы тяжести семени G, нормальной реакции поверхности днища N, силы трения семени по днищу F_{mp4} и силы сопротивления воздуха F_{C4} на четвертом участке [12, 13].

Составим дифференциальное уравнение движения семени по днищу направителя-распределителя семян сошника для подпочвенно-разбросного посева с учетом действующих сил:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_4=P_4-F_{mp}-F_{C4}+G\sin\alpha=P_4-mgf\cos\alpha-k^2\cdot m\cdot\dot{x}_4^2+mg\sin\alpha; \\ m\ddot{y}_4=N-G\cos\alpha, \end{cases} \qquad (29)$$

где m – масса семени, кг; x_4 и y_4 – текущие координаты движущегося семени на участке DE по осям Dx_4 и Dy_4 соответственно, м; P_4 – сила воздушного потока на входе направителя распределителя, Н,

$P_4=P_3$; F_{C4} – сила сопротивления воздуха, Н; α – угол наклона днища направителя-распределителя семян, град., $\alpha=5 град.$; $\dot{x}_4$ – скорость движения семени по днищу DE направителя-распределителя семян, м/с.

Следует отметить, что в этом выражении величины действующих сил равны: $N=mg\cos\alpha$; $F_{mp4}=mgf\cos\alpha$; $F_{C4}=-k^2\cdot m\cdot\dot{x}_4^2$.

Учитывая, что $d\dot{x}_4=\frac{d\dot{x}_4}{dt_4}$, $d\dot{y}_4=\frac{d\dot{y}_4}{dt_4}$ и разделив левую и правую части уравнений на m, получим

$$\begin{cases}\frac{d\dot{x}_4}{-\left[k^2\dot{x}_4^2-k_4^2\right]}=dt_4;\\ d\dot{y}_4=0.\end{cases} \quad (30)$$

В этом выражении коэффициент $k_4^2=g\left(P_4/G-f\cos\alpha+\sin\alpha\right)$.

Проинтегрировав каждое из уравнений системы (30) и определив значения постоянных интегрирования путем подстановки начальных условий (при $t_4=0$, $x_4=0$, $\dot{x}_4=\upsilon_{40}$, $\dot{y}_{40}=0$), получим зависимость для нахождения скорости семени при его движении по направителю-распределителю (участок DE) в следующем виде:

$$\begin{cases}\dot{x}_4=\upsilon_{4x}=\frac{k_4}{k}\cdot\frac{k_4\left(1-e^{2kk_4t_4}\right)-k\upsilon_{40}\left(1+e^{2kk_4t_4}\right)}{k\upsilon_{40}\left(1-e^{2kk_4t_4}\right)-k_4\left(1+e^{2kk_4t_4}\right)};\\ \dot{y}_4=\upsilon_{4y}=0.\end{cases} \quad (31)$$

Для установления закона движения семени и нахождения его перемещения по направителю-распределителю DE сошника уравнение (31) представим в гиперболических функциях, воспользовавшись формулами

$$1+e^{2kk_4t_4}=2e^{kk_4t_4}\cdot ch(kk_4t_4),$$
$$1-e^{2kk_4t_4}=-2e^{kk_4t_4}\cdot sh(kk_4t_4). \quad (32)$$

С учетом формул (32) и замены $d\dot{x}_4=\frac{dx_4}{dt_4}$, $d\dot{y}_4=\frac{dy_4}{dt_4}$ система (31) после отделения переменных примет вид

$$\begin{cases}dx_4=\frac{k_4}{k}\cdot\frac{k\upsilon_{40}\cdot ch(kk_4t_4)+k_4\cdot sh(kk_4t_4)}{k\upsilon_{40}\cdot sh(kk_4t_4)+k_4\cdot ch(kk_4t_4)}dt_4;\\ dy_4=0.\end{cases} \quad (33)$$

Проинтегрировав уравнения системы (33), будем иметь

$$\begin{cases}x_4=\frac{1}{k^2}\cdot\ln\left|k\upsilon_{40}\cdot sh(kk_4t_4)+k_4\cdot ch(kk_4t_4)\right|+C_{13},\\ y_4=C_{14}.\end{cases} \quad (34)$$

Постоянные интегрирования C_{13} и C_{14} найдем из начальных условий, подставляя $t_4=0$, $x_{40}=0$, $y_{40}=0$. Тогда

$$\begin{cases}C_{13}=-\frac{1}{k^2}\cdot\ln|k_4|,\\ C_{14}=0.\end{cases} \quad (35)$$

Подставляя постоянные интегрирования C_{13} и C_{14} в систему (34), получим закон движения семени в направителе-распределителе сошника для подпочвенно-разбросного посева:

$$\begin{cases}x_4=\frac{1}{k^2}\cdot\ln\left|\frac{k}{k_4}\upsilon_{40}\cdot sh(kk_4t_4)+ch(kk_4t_4)\right|,\\ y_4=0.\end{cases} \quad (36)$$

Дальнейшее движение семени при сходе с направителя-распределителя сошника для подпочвенно-разбросного посева рассмотрим как движение в вертикальной плоскости x_5Qy_5 под углом θ к горизонту (рис. 2) [14, 15].

В этом случае семя будет совершать движение под действием силы воздушного потока P_5, силы тяжести семени G и силы сопротивления воздуха F_{C5}, величины которых соответственно равны: $P_5=P_4$, $G=mg$, $F_{C5}=-k^2\cdot m\cdot\dot{x}_5^2$, где $\dot{x}_5=\upsilon_5$ – скорость движения семени при полете в подсошниковом пространстве сошника на участке EF, м/с.

Составим дифференциальные уравнения движения семени при сходе с направителя-распределителя в подсошниковом пространстве сошника в проекциях на оси Qx_5 и Qy_5, которые имеют следующий вид:

$$\begin{cases}m\ddot{x}_5=P_5\cos\theta-F_{C1}\cos\theta+G\sin\theta=P_5\cos\theta-mk^2\cdot\dot{x}_5^2\cos\theta+mg\sin\theta;\\ m\ddot{y}_5=-G\cos\theta=-mg\cos\theta,\end{cases} \quad (37)$$

где x_5 и y_5 – текущие координаты движущегося семени по осям Qx_5 и Qy_5 соответственно, м; θ – угол между направлением действующих сил P_5, F_{C5} и горизонталью, град.

Скорость семени определим через ее проекции на оси Qx_5 и Qy_5, для чего проинтегрируем уравнения выражения (37), представив $d\dot{x}_5=\frac{d\dot{x}_5}{dt_5}$, $d\dot{y}_5=\frac{d\dot{y}_5}{dt_5}$ и разделив обе части его на массу семени m. В результате будем иметь

$$\begin{cases}\upsilon_{x5}=\dot{x}_5=\frac{k_5}{k\sqrt{\cos\theta}}\cdot\frac{k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)+k_5\cdot sh\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)}{k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot sh\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)+k_5\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)};\\ \upsilon_{y5}=\dot{y}_5=\upsilon_{y50}-gt_5\cdot\cos\theta,\end{cases} \quad (38)$$

где υ_{x5} и υ_{y5} – соответственно проекции скорости семени при сходе с направителя-распределителя сошника для подпочвен-

но-разбросного посева на оси Qx_5 и Qy_5, м/с; k_5 – коэффициент, $k_5=\sqrt{\frac{P_5}{m}\cos\theta+g\sin\theta}$.

Следовательно, выражение для нахождения скорости υ_5 семени в любой момент времени примет вид

$$\upsilon_5=\sqrt{\left(\frac{k_5}{k\sqrt{\cos\theta}}\cdot\frac{k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch(pt_5)+k_5\cdot sh(pt_5)}{k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot sh(pt_5)+k_5\cdot ch(pt_5)}\right)^2+\left(\upsilon_{y50}-gt_5\cdot\cos\theta\right)^2}, \quad (39)$$

где величина $p=kk_5\sqrt{\cos\theta}$.

На заключительном этапе движения семени следует найти дальность и время его полета при сходе с направителя-распределителя сошника. Для этого проинтегрируем выражение (38), учитывая, что $d\dot{x}_5=\frac{dx_5}{dt_5}$, а $d\dot{y}_5=\frac{dy_5}{dt_5}$, и получим

$$\begin{cases} x_5=\dfrac{ln\left|k\sqrt{cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{cos\theta}\right)+k_5\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{cos\theta}\right)\right|}{k^2t_5cos\theta}+C_{17}; \\ y_5=\upsilon_{y50}t_5-\dfrac{gt_5^2}{2}\cdot cos\theta+C_{18}, \end{cases} \quad (40)$$

где C_{17} и C_{18} – постоянные интегрирования, которые находим подстановкой начальных усл*о*вий (при $t_{50}=0$ $x_{50}=0$ и $y_{50}=h_Д$) в выражение (40).

$$\begin{cases} C_{17}=x_{50}-\dfrac{\ln\left|k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)+k_5\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)\right|}{k^2t_5\cos\theta}=0; \\ C_{18}=y_{50}-\upsilon_{y50}t_5+\dfrac{gt_5^2}{2}\cos\theta=h_Д. \end{cases} \quad (41)$$

Тогда уравнения движения семени на участке EF сошника для подпочвенно-разбросного посева на оси Qx_5 и Qy_5 составят:

$$\begin{cases} x_5=\dfrac{\ln\left|k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)+k_5\cdot ch\left(kk_5t_5\sqrt{\cos\theta}\right)\right|}{k^2t_5\cos\theta}, \\ y_5=\upsilon_{y50}t_5-\dfrac{gt_5^2}{2}\cos\theta+h_Д. \end{cases} \quad (42)$$

Второе уравнение системы (42) определяет высоту положения семени над поверхностью почвы, из него найдем время t_5 падения семени на данном участке из условия, что координата y_5 в момент его падения на дно борозды равняется нулю:

$$t_5=\frac{2\left(h_Д+\upsilon_{y50}\right)}{g\cdot\cos\theta}. \quad (43)$$

Подставляя зависимость (43) в первое уравнение системы (42), получим выражение для определения дальности L полета семени в подсошниковом пространстве сошника для подпочвенно-разбросного посева с направителем-распределителем семян:

$$L=g\cdot\ln\left|k\sqrt{\cos\theta}\cdot\upsilon_{x50}\cdot ch\left(\frac{2kk_5\left(h_Д+\upsilon_{y50}\right)}{g\sqrt{\cos\theta}}\right)+k_5\cdot ch\left(\frac{2kk_5\left(h_Д+\upsilon_{y50}\right)}{g\sqrt{\cos\theta}}\right)\right|/2k^2\left(h_Д+\upsilon_{y50}\right). \quad (44)$$

Ширина засеваемой полосы $B_П$ сошником для подпочвенно-разбросного посева, оснащенного направителем-распределителем семян, находится по следующей зависимости:

$$B_П=b_{HP}+2L\sin\gamma_{HP}=b_{HP}+2L\sin\gamma_{HP}=$$
$$=d_c+Sin\gamma_{HP}\left(l_{HP}+L\right), \quad (45)$$

где b_{HP} – ширина направителя-распределителя, м; L – дальность полета семян при выходе из направителя-распределителя, м; $2\gamma_{HP}$ – угол раствора направителя-распределителя, град.; d_c – диаметр семяпровода, м; l_{HP} – длина направителя распределителя, м.

Таким образом, в результате теоретического обоснования технологического процесса сошника с направителем-распределителем семян для подпочвенно-разбросного посева получены выражения для определения скорости семени и законы его движения по наклонному участку семяпровода сеялки-культиватора (5, 7), по наклонному участку семяпровода сошника (11, 13), на криволинейном участке (27, 28), при движении по направителю-распределителю (31, 36) и при выходе из направителя-распределителя (39, 42), по которым установили зависимости для нахождения дальности полета семян в подсошниковом пространстве (44) и ширины засеваемой полосы (45). Расчетами установлено, что применение сошника для подпочвенно-разбросного посева зерновых культур позволяет обеспечить дальность полета семени L=31мм и ширину засеваемой полосы $B_П$= 298 мм. Результаты теоретических исследований сошника с направителем-распределителем были подтверждены в ходе проведения лабораторных и лабораторно-полевых исследовании.

Литература

1. Ларин, М. А. Современные технологии возделывания зерновых культур / М. А. Ларин, А. А. Болоболин // Инновационные

идеи молодых исследователей для АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010. – С. 148-149.

2. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные машины / Н. И. Кленин, С. Н. Киселев, А. Г. Левшин. – М.: КолосС, 2008. – 816 с.

3. Ларин, М. А. Современные посевные машины для посева по ресурсосберегающим технологиям / М. А. Ларин, А. В. Мачнев, В. В. Шумаев // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010. – С. 146-148.

4. Ларин, М. А. Обоснование конструктивных схем сошников зерновых сеялок / М. А. Ларин, А. В. Мачнев, В. В. Шумаев // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010. – С. 157-158.

5. Ларюшин, Н. П. Структурная оценка энергосберегающей технологии возделывания зерновых культур и рабочих органов посевных машин / Н. П. Ларюшин, А. В. Мачнев, М. А. Ларин, А. Н. Хорев // Нива Поволжья. – 2011. – № 2 (19). – С. 72-80.

6. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учеб. для втузов / И. И. Артоболевский – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.

7. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – 8-е изд. – М.: Наука 1966. – 870 с.

8. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев; Г. Гроше, В. Циглера. – М.: Наука, 1980. – 816с.

9. Козюков, С. В. Теоретическое обоснование геометрических размеров направителя-распределителя семян лапового сошника пневматической сеялки / С. В. Козюков, // Вклад молодых учёных в инновационное развитие АПК России: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010. – С. 175-177.

10. Шумаев, В. В. Повышение качества посева зерновых культур сеялкой-культиватором с разработкой комбинированного сошника: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / В. В. Шумаев. – Пенза, 2009. – 139 с.

11. Почивалов, Д. А. Разработка и обоснование конструктивно-режимных параметров лапового сошника с кулисно-рычажным механизмом распределителя семян зерновых культур: дис. … канд. техн. наук: 05.20.01 / Д. А. Почивалов. – Пенза, 2006. – 130 с.

12. Перетятько, А. В. Совершенствование технологии распределения семян при подпочвенно-разбросном способе посеве и обоснование конструкции лапового сошника: дис. … канд. техн. наук: 05.20.01 / А. В. Перетятько. – Саратов, 2007. – 187 с.

13. Посевные машины: Теория, конструкция, расчёт / Н. П. Ларюшин, А. В. Мачнев, В. В. Шумаев и др. – М.: Росинформагротех, 2010. – 292 с.

14. Гужин, И. Н. Совершенствование технологического процесса распределения семян зерновых культур с обоснованием параметров сошника для подпочвенного разбросного посева: дис. … канд. техн. наук: 05.20.01 / И. Н. Гужин. – Кинель, 2003. – 151 с.

14. Писарев, О. Н. Обоснование параметров и разработка комбинированного сошника сеялок для прямого посева зерновых культур: дис. … канд. техн. наук: 05.20.01 / О. Н. Писарев. – Москва, 2006. – 138 с.

16. Ларин, М. А. Результаты лабораторных исследований сошника с направителем-распределителем / М. А. Ларин // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России: сборник материалов Всерос. науч.-практ. конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С. 93-95.