

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛАСТИЧНОЙ ТРУБКИ-РАССЕВАТЕЛЯ**

**Алексеев Е.П., Максимов И.И., Мишин П.В., Терентьев А.Г., Кириллов Н.К.,  
Юнусов Г.С., Овчукова С.А.**

**Реферат.** Применение подпочвенно-разбросного посева семян зерновых культур позволяет достичь распределения семян на уплотненное ложе по всей ширине захвата посевной машины. При таком способе посева обеспечивается равномерное распределение семян относительно друг друга, что создает одинаковые условия для питания и роста растений. Для получения более качественного распределения семян в подлаповом пространстве предлагается применение воздушного потока при транспортировании семян от высевающего аппарата к сошнику и колебательного процесса распределителя. Истечение воздушно-зернового потока из консольно подвешанной эластичной трубки-рассевателя вызывает действие продольных сжимающих сил, направления которых совпадают с касательной к оси на конце трубки, то есть возникает так называемая «следящая» сила. В работе рассмотрены отклонения эластичной трубки-рассевателя в условиях относительно малых, так и больших отклонений от оси трубки. Такой подход теоретических исследований позволяет судить о правильности выбранных моделей путем согласования полученных результатов. По результатам исследования были получены аналитические выражения, позволяющие для качественного распределения семян в подлаповом пространстве, определить координаты расположения отклонившейся трубки в зависимости от скорости воздушно-зернового потока, критическое значение угла отклонения трубки, равное  $\theta = 1,173$  рад, что соответствует коэффициенту трения среды  $f_m = 0,2$ .

**Ключевые слова:** сошник, эластичная трубка-рассеватель, подпочвенно-разбросной посев.

**Введение.** Применение сошников с активным распределителем позволяет повысить равномерность распределения семян по площади поля и менее чувствительны к различным возмущающим действиям (колебания стойки в продольно-вертикальной, продольно-поперечной плоскостях, работа сеялки на склонах и т.д.) [2]. Существующие технические решения сошников с активным распределителем, к сожалению, имеют малую ширину захвата, что приводит к увеличению числа рабочих органов на сеялке, тем самым снижая качество их работы на влажных почвах и повышая их забиваемость [5]. Применение вращающихся элементов в подсошниковом пространстве приводит их к наматыванию растительными остатками, а при заглублении сошника в почву механические активаторы становятся неработоспособными. Применение воздушного потока при транспортировании семян от высевающего аппарата к сошнику и колебательного процесса распределителя представляется перспективным для сокращения времени движения семян в семяпроводе и получения более качественного распределения в подлаповом пространстве [1,4].

**Анализ и обсуждения результатов.** Для исследования колебаний эластичной трубки-рассевателя необходимо воспользоваться динамическим методом, так как в данном случае метод Эйлера не применим. [3] Такой метод включает уравнение возмущенного движения и условия колебательного движения с возрастающими амплитудами. Представим, что мас-

са трубки  $m_{mp}$  и воздушно-зерновой смеси  $m_{в.з.}$  равномерно распределена вдоль всей длины эластичной трубки-рассевателя  $L_{mp}$ . Сила воздушно-зернового потока  $F$  истекающего из трубки действует в точке  $C$ . Обозначим прогиб конца трубки через  $u_{max}$ .

Для определения параметров отклонения эластичной трубки-рассевателя рассмотрим ее в условиях как относительно малых (когда  $\sin \theta \approx \theta$ ), так и больших отклонений от оси  $Oz$  (рисунок 1).

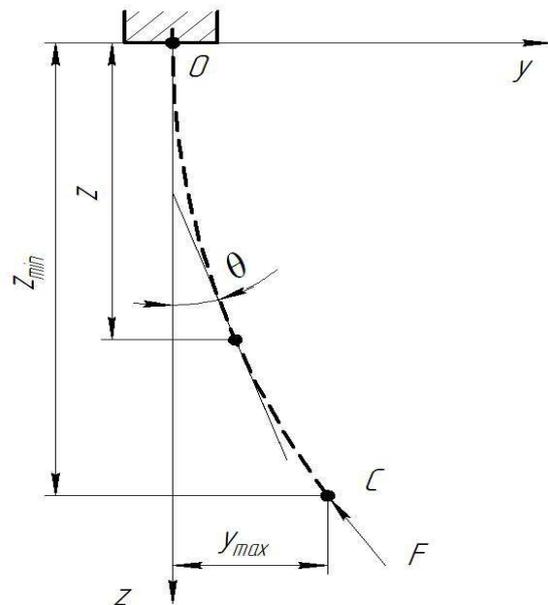


Рисунок 1 – Схема изгиба эластичной трубки-рассевателя под действием «следящей» силы

Дифференциальное уравнение изгиба трубки запишется в виде [6]:

$$M = EI \frac{d^2 y}{dz^2}; \quad (1)$$

где  $M$  – изгибающий момент внешних сил в поперечном сечении, Н·м;  $EI$  – жесткость трубки при изгибе, Н·м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль Юнга, Па;  $I$  – момент инерции сечения трубки для главной центральной оси, расположенной перпендикулярно к плоскости изгибающего момента. Для тонкостенной трубки осевой момент инерции равен  $I = \pi D^3 s / 8$ , м<sup>4</sup>; где  $D$  – внешний диаметр трубки, м;  $s$  – толщина стенки трубки, м.

Для некоторого слабого поперечного изгиба запишем изгибающий момент в произвольном сечении (2):

$$M = F(y_{\max} - y) + F\varphi f_m(L_{mp} - z); \quad (2)$$

где  $y, z$  – координаты сечения трубки, м;  $\varphi = \varphi(t)$  – угол поворота концевой сечения трубки, град,  $f_m$  – коэффициент трения (определяется экспериментальным методом);  $F$  – сила воздушно-зернового потока, Н.

Подставив данное выражение в (1), получим (3):

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{F(y_{\max} - y) - F\varphi f_m(L_{mp} - z)}{EI} \quad (3)$$

или можно записать в следующей форме (4):

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{F}{EI} y = \frac{Fy_{\max}}{EI} + \frac{F\varphi f_m(L_{mp} - z)}{EI}. \quad (4)$$

Введем параметр  $\omega^2 = F/EI$ , [м<sup>-2</sup>], тогда линейное неоднородное дифференциальное уравнение (4) второго порядка запишется в виде:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + \omega^2 y = \omega^2 y_{\max} + \omega^2 \varphi f_m(L_{mp} - z). \quad (5)$$

Решение данного уравнения представим в виде:

$$y = C_1 \cos \omega z + C_2 \sin \omega z + y_{\max} + \varphi f_m L_{mp} - \varphi f_m z. \quad (6)$$

Подставив граничные условия  $y(0)=0$  и  $dy/dz(0)=0$  для защемленного верхнего конца эластичной трубки, найдем произвольные постоянные  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\begin{cases} C_1 + y_{\max} + \varphi f_m L_{mp} = 0 \\ \omega C_2 - \varphi f_m = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Подставив  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (6), запишем (8):

$$y = -(\varphi f_m L_{mp} + y_{\max}) \cos \omega z + \frac{\varphi f_m}{\omega} \sin \omega z + \delta_{\max} + \varphi f_m L_{mp} - \varphi f_m z. \quad (8)$$

На свободном нижнем конце трубки граничное условие  $y(L_{mp})=y_{\max}$ , что приводит к следующему уравнению:

$$y_{\max} = -(\varphi f_m L_{mp} + y_{\max}) \cos \omega L_{mp} + \frac{\varphi f_m}{\omega} \sin \omega L_{mp} + y_{\max} + \varphi f_m L_{mp} - \varphi f_m L_{mp}. \quad (9)$$

Известно, что для стержня кругового сечения изгиб не сопровождается кручением, а значит угол поворота  $\varphi = const$ . Тогда после преобразования уравнения (9) запишем:

$$\omega L_{mp} \left( 1 + \frac{y_{\max}}{f_m L_{mp}} \right) = tg \omega L_{mp}. \quad (10)$$

Если возникают достаточно большие отклонения от вертикали  $Oz$  (рисунок 1) конца эластичной трубки-рассевателя, то ее кривизна образована моментом внешних сил, действующая в сечении координаты  $z$ :

$$EI \frac{d\theta}{dl_{mp}} = M \quad (11)$$

где  $l_{mp}$  – длина осевой линии трубки в сечении  $z, m$ ;  $\theta$  – угол, образованный касательной в текущей точке  $(z, y)$  к осевой линии трубки и осью  $Oz$ , рад.

Согласно рисунку, момент внешних сил равен:

$$M = Fy + Ff_m z; \quad (12)$$

тогда с учетом (12) уравнение (11) запишется в виде:

$$EI \frac{d\theta}{dl} = Fy + Ff_m z; \quad (13)$$

Продифференцировав данное уравнение по длине трубки  $l_{mp}$ , получим:

$$EI \frac{d^2 \theta}{dl_{mp}^2} = F \frac{dy}{dl_{mp}} + Ff_m \frac{dz}{dl_{mp}}; \quad (14)$$

где

$$\frac{dz}{dl_{mp}} = \cos \theta; \quad \frac{dy}{dl_{mp}} = \sin \theta, \quad (15)$$

тогда получим:

$$EI \frac{d^2 \theta}{dl_{mp}^2} = F \sin \theta + Ff_m \cos \theta; \quad (16)$$

Принимаем, что

$$\frac{1}{2} d \left( \frac{d\theta}{dl_{mp}} \right)^2 = \frac{d\theta}{dl_{mp}} \cdot \frac{d^2 \theta}{dl_{mp}^2} dl_{mp} = \frac{d^2 \theta}{dl_{mp}^2} d\theta. \quad (17)$$

Тогда перепишем уравнение (15), умножив уравнение на  $d\theta$ :

$$\frac{EI}{2} d \left( \frac{d\theta}{dl_{mp}} \right)^2 = (F \sin \theta + Ff_m \cos \theta) d\theta; \quad (18)$$

Проинтегрировав, получим:

$$\frac{EI}{2} \left( \frac{d\theta}{dl_{mp}} \right)^2 = F \cos \theta - F f_m \sin \theta + C_1; \quad (19)$$

или

$$dl_{mp} = \pm \sqrt{\frac{EI}{2F}} \frac{d\theta}{\sqrt{C_1 + \cos \theta - f_m \sin \theta}}; \quad (20)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования.

При конечных условиях на защемленной стороне трубки имеем  $l_{mp}=0$ ;  $\theta = 0$ , а на нижней свободной стороне ( $l_{тр} = L_{тр}$ )  $M = 0$ , тогда из уравнения (20) получим:

$$C_1 = F f_m \cos \theta_0 - F \sin \theta_0$$

Подставив в уравнение (21) запишем

$$dl_{mp} = \pm \sqrt{\frac{EI}{2F}} \frac{d\theta}{\sqrt{f_m(\sin \theta_0 - \sin \theta) - (\cos \theta_0 - \cos \theta)}}; \quad (21)$$

где  $\theta_0 = \theta(L_{mp})$  - угол образованный между касательной к нейтральной линии трубки в точке нижнего конца ( $z=z_{min}$ ), и осью  $Oz$ , град.

$$L_{mp} = \sqrt{\frac{EI}{2F}} \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{d\theta}{\sqrt{f_m(\sin \theta_0 - \sin \theta) - (\cos \theta_0 - \cos \theta)}} \quad (22)$$

Учитывая уравнения (15) и (21) после интегрирования, получим координаты расположения отклонившегося конца трубки:

$$z_{min} = \sqrt{\frac{EI}{2F}} \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{\cos \theta d\theta}{\sqrt{f_m(\sin \theta_0 - \sin \theta) - (\cos \theta_0 - \cos \theta)}}; \quad (23)$$

$$y_{max} = \sqrt{\frac{EI}{2F}} \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{\sin \theta d\theta}{\sqrt{f_m(\sin \theta_0 - \sin \theta) - (\cos \theta_0 - \cos \theta)}}; \quad (24)$$

$$F = \frac{EI}{2L_{mp}^2} \left( \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{d\theta}{\sqrt{f_m(\sin \theta_0 - \sin \theta) - (\cos \theta_0 - \cos \theta)}} \right)^2; \quad (25)$$

Критическое значение следящей сжимающей силы, необходимое для перехода в неустойчивое состояние трубки, равно:

$$F_{кр} = \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{EI}{L_{mp}^2} \quad (26)$$

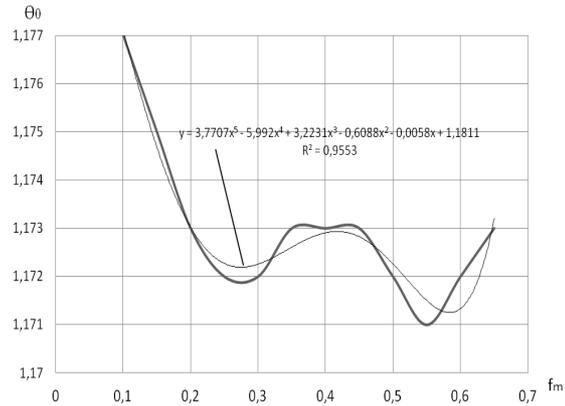


Рисунок 2 – Зависимость критического угла отклонения эластичной трубки-рассевателя от коэффициента трения  $f_m$

Подставляя критическое значение силы уравнения  $f_{кр}$  (26) в уравнение (25) при  $f_m=0,1-0,65$ , получим график зависимости угла отклонения конца трубки-рассевателя  $\theta_0 = f(f_m)$ .

После аппроксимации графика функции (рисунок 2) получена адекватная с 95% вероятностью математическая модель зависимости критического угла отклонения эластичной трубки-рассевателя:

$$y = 3,7707 x^5 - 5,992 x^4 + 3,2231 x^3 - 0,6088 x^2 - 0,0058 x + 1,1811$$

Из графика видно, что с увеличением коэффициента трения  $f_m$  значение угла отклонения  $\theta_0$  конца трубки-рассевателя уменьшается, что на первый взгляд приводит к более раннему переходу в неустойчивое состояние, но в действительности колебания могут не наблюдаться, что на наш взгляд, требует более точного исследования колебания при определенных условиях. Однако, как показали эксперименты и решение с помощью математических программ критическое значение угла отклонения возникает при угле  $\theta_0=1,173$  рад, что соответствует коэффициенту трения  $f_m=0,2$ .

**Выводы.** Полученные результаты теоретических исследований по определению поперечного изгиба эластичной трубки-рассевателя при малых и больших отклонениях от оси  $Oz$  позволяют приближенно определить ее параметры, а также дальность рассева семян в подлаповом пространстве. Для уточнения полученных данных необходимо совместно проводить экспериментальные исследования в лабораторных условиях.

#### Литература

1. Алексеев, Е.П. Колебание эластичной трубки при взаимодействии с внутренним потоком воздуха / Е.П. Алексеев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. – 2012. №4 (76), – С. 7-10.
2. Алексеев, Е.П. Повышение качества подпочвенного разбросного посева / Алексеев Е.П., Васильев С.А., Максимов В.И. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. –2011, №12. – С. 8-9.
3. Валиев А.Р. Техническое обеспечение /А.Р. Валиев, Т.Г. Тагирзянов, Б.Г. Зиганшин //Система земледелия Республики Татарстан: в 3 ч. -Казань, 2013. -С. 153-162.

4. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1987. – 357 с.

5. Пат. 2423037. Российская Федерация, А01С 7/20. Сошник для разбросного посева / Е.П. Алексеев, И.И. Максимов, С.А. Васильев и др., - № 2010104260/21; заявл. 08.02.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. №19.

6. Пат. 2466524. Российская Федерация, А01С 7/20. Сошник для подпочвенно-разбросного посева / И.И. Максимов, А.А. Петров, С.А. Васильев и др., - 2011121535/13, заявл. 27.05.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. №32

7. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер / пер. с англ. Л.Г. Корнейчука. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

**Сведения об авторах:**

Алексеев Евгений Петрович – кандидат технических наук, старший преподаватель, e-mail: zhenia\_alex@mail.ru

Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: maksimov48@inbox.ru

Мишин Петр Владимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: mail@chst.edu.ru

Терентьев Алексей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор e-mail: agterent@rambler.ru

Кириллов Николай Кириллович – доктор ветеринарных наук, профессор, e-mail: belovdtn2@gmail.com

ФГБОУ ВО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», г. Чебоксары, Россия

Юнусов Губейдулла Сибятуллоевич – доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», г.Йошкар-Ола, Россия.

Овчук Светлана Александровна – доктор технических наук, профессор, e-mail: ovchukova1941@mail.ru

ФГБОУ ВО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», г. Чебоксары, Россия.

**THEORETICAL STUDY OF THE STABILITY OF THE ELASTIC TUBING BOX**

**Alekseev E.P., Maksimov I.I., Mishin P.V., Terentev A.G., Kirillov N.K., Yunusov G.S., Ovchukova S.A.**

**Abstract.** The use of subsoil-scattered seeding of cereal crops allows to achieve seed distribution on the packed bed along the entire width of the seeding machine. With this seeding method, the seeds are evenly distributed relative to each other, which creates the same conditions for nutrition and plant growth. In order to obtain a better distribution of seeds in the podlag space, the use of air flow is suggested when transporting seeds from the seeder to the opener and the oscillatory process of the distributor. The flow of the air-grain flow from the cantilevered suspension elastic tube causes the action of longitudinal compressive forces, the directions of which coincide with the tangent to the axis at the end of the tube, that is, the so-called "tracking" force arises. The deviations of an elastic scattering pipe under conditions of relatively small and large deviations from the axis of the pipe are considered. This approach of theoretical research allows us to judge the correctness of the selected models by agreeing on the results obtained. Based on the results of the study, analytical expressions were obtained that allow us to determine the coordinates of the location of the deflected tube as a function of the speed of the air-grain flow for a qualitative distribution of seeds in the sublobe space, the critical value of the tube deflection angle equal to  $\theta = 1.173$  rad, which corresponds to the coefficient of friction of the medium  $f_m = 0, 2$ .

**Key words:** share, elastic tube-spreader, subsoil-scattered sowing.

**References**

1. Alekseev E.P. Oscillation of the elastic tube when interacting with the internal air flow. [Kolebanie elastichnoy trubki pri vzaimodeystvii s vnutrennim potokom vozdukh]. / E.P. Alekseev // *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ya. Yakovleva*. – *The Herald of Chuvash State Pedagogical University named after I.Ya. Yakovlev*, - №4 (76), 2012. – P. 7-10.

2. Alekseev E.P. Improvement of the quality of subsoil scattered sowing. [Povyshenie kachestva podpochvennogo razbrosnogo poseva]. / E.P. Alekseev, S.A. Vasilev, V. I. Maksimov // *Teoreticheskiy i nauchno-prakticheskiy zhurnal "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva"*. – *Theoretical-scientific and practical journal "Mechanization and electrification of agriculture"*. – 2011. – №12. – P. 8–9.

3. Valiyev A.R. Technical providing. [Tehnicheskoe obespechenie ]. / A.R. Valiyev, T.G. Tagirzyanov, B.G. Ziganshin//[Sistema zemledeliya Respubliki Tatarstan]System of agriculture of the Republic of Tatarstan: in 3 h - Kazan, 2013. – P. 153-162.

4. Panovko Ya.G. *Ustoychivost i kolebaniya uprugikh sistem: Sovremennye kontseptsii, paradoksy i oshibki / Ya.G. Panovko, I.I. Gubanov. – 4-e izd., pererab.* [Stability and vibrations of elastic systems: Modern concepts, paradoxes and errors]. / Ya.G. Panovko, I.I. Gubanov. – 4<sup>th</sup> edition, revised. – М.: Nauka. Gl. red. fiz.- mat. lit., 1987. – P. 357.

5. Pat. 2423037. Rossiyskaya Federatsiya, A01S 7/20. *Soshnik dlya razbrosnogo poseva*. (Pat. 2423037. Russian Federation, A01C 7/20. Plowshare for spreading). / E.P. Alekseev, I.I. Maksimov, S.A. Vasilev and others, - №2010104260/21; applied 08.02.2010; published 10.07.2011, Bulletin №19.

6. Pat. 2466524. Rossiyskaya Federatsiya, A01S 7/20. *Soshnik dlya podpochvenno-razbrosnogo poseva* (Pat. 2466524. Russian Federation, A01C 7/20. Plowshare for sub-soil spreading). / I.I. Maksimov, A.A. Petrov, S.A. Vasilev and others, - №2011121535/13, applied 27.05.2011; published 20.11.2012, Bulletin №32.

7. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. / per. s angl. L.G. Korneychuka. [Fluctuations in engineering. / S.P. Tymoshenko, D.Kh. Yaang, U. Uiver / translated from English]. – М.: Mashinostroenie, 1985. – P. 472.

**Authors:**

Alekseev Evgeniy Petrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Senior Lecturer, Transport and Technological Machines and Complexes Department, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary Russia, e-mail: zhenia\_alex@mail.ru

Maksimov Ivan Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Transport and Technological Machines and Complexes Department, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary Russia, e-mail: maksimov48@inbox.ru

Mishin Petr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mail@chst.edu.ru

Terentev Aleksey Grigorevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Transport and Technological Machines and Complexes Department, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia, e-mail: agterent@rambler.ru

Kirillov Nikolay Kirillovich – Doctor of Veterinary sciences, Professor, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary Russia, e-mail: belovdtn2@gmail.com,

Yunusov Gubeydulla Sibatulloevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Mari State University

Ovchukova Svetlana Aleksandrovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia, e-mail: ovchukova1941@mail.ru