

ции профиля шин, деформации шин, изменяющейся в зависимости от нагрузки и свойств опорного основания. Модель построена на основе объемного представления поверхности контакта шины с почвой. Расчет базируется на данных о параметрах почвы, шин и о нагрузочных характеристиках шин на жестком основании.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орда, А.Н. Сопротивление почв/ А.Н. Орда. – Мн.: БГАТУ, 2002. – 94 с.
2. Горин, Г.С. Исследование колееобразования при качении ведомого колеса / Г.С. Горин, Г.И. Гедроить, И.Е. Юреть // Воздействие ходовых систем сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов на почву: сб. науч. трудов. – Горки, 1991. – С. 11-18.

3. Гедроить, Г.И. Сопротивление качению ведомых пневматических колес / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010, № 1. – С. 26-30.
4. Гуськов, В.В. Теория трактора/ В.В. Гуськов. – Мн.: Машиностроение, 1977. – 384 с.
5. Зариньш, Я.А. Уменьшение уплотнения почв путем рыхления колеи трактора при культивации и посеве: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Я.А. Зариньш. – Елгава, 1985. – 18 с.
6. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009, № 4. – С. 23-27.
7. Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н.В. Бочаров [и др.]; под общ. ред. Н.В. Бочарова. – М.: Машиностроение, 1974. – 208 с.

УДК 631.8; 631.171

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.02.2012

## ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМОПРОВОДЕ

С.О. Нукешев, докт. техн. наук, профессор, академик АСХН Респ. Казахстан (Агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Казахстан)

#### Аннотация

*В работе рассмотрены пути повышения эффективности центрального распределения сыпучих материалов путем применения нового технического решения. Получены зависимости, позволяющие определить параметры центрального распределителя в зависимости от скорости частицы и воздуха.*

*Efficiency improving ways of mineral fertilizers of central distribution by new technical solution are considered in this work. Dependences allowing determine the parameters of the central distribution depending on the speed of particles and air are obtained.*

#### Введение

Решение вопроса равномерного разделения сыпучего материала на части требует стабилизации закона распределения частиц в поперечном сечении материалопровода. Для этого после участка поворота устанавливается дополнительный конструктивный элемент – завихритель, выполненный в виде винтовой спирали, навитой на стержень. Завихритель занимает все поперечное сечение материалопровода [1].

#### Основная часть

Предложенное техническое решение содержит материалопровод 1, корпус распределителя 2 Г-образной формы, многозаходный винт 3, выполненный в виде спиральных витков. Поступивший на винтовую спираль поток закручивается и вследствие вращательного движения под действием центробежных сил инерции прижимается к внутренней стенке материалопровода, распределяется по ней ровным слоем, обретая при этом в поперечном сечении В-В форму полого цилиндра, (рис. 1). Устройство работает следующим образом. Транспортируемый по трубопроводу 1 потоком воздуха материал, попав на уча-

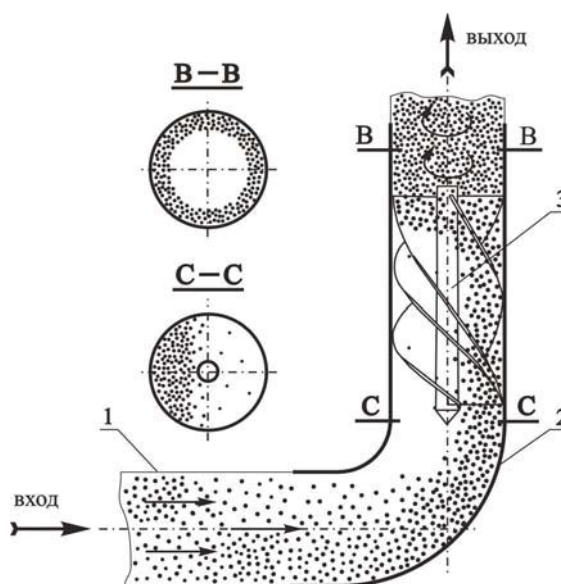


Рисунок 1. Устройство для распределения сыпучего материала

сток поворота корпуса распределителя 2, под действием центробежных сил инерции концентрируется на внешней части корпуса распределителя 2.

Этим достигается стабилизация закона распределения сыпучего материала в поперечном сечении распределителя, поступающего в устройство.

Имея стабильно концентрированный слой в поперечном сечении корпуса распределителя 2 Г-образной формы, материал, механически разделяется витками 3 на одинаковые части и получает вращательное движение, создавая поток в виде вращающегося кольца, что способствует равномерному распределению сыпучего материала.

Такое конструктивное исполнение корпуса распределителя и расположение винта позволяет резко снизить влияние колебаний, отклонений распределителя от вертикали, качений и других случайных воздействий на качество работы.

В зависимости от установленной скорости потока воздуха, определенное влияние на сохранение вращающегося потока и их равномерного распределения по отводам, очевидно, будет иметь высота вертикального участка. Для его обоснования рассмотрим движение удобрения по участкам материалопровода. Материалопровод можно условно разделить на четыре участка – I, II, III, IV (рис. 2).

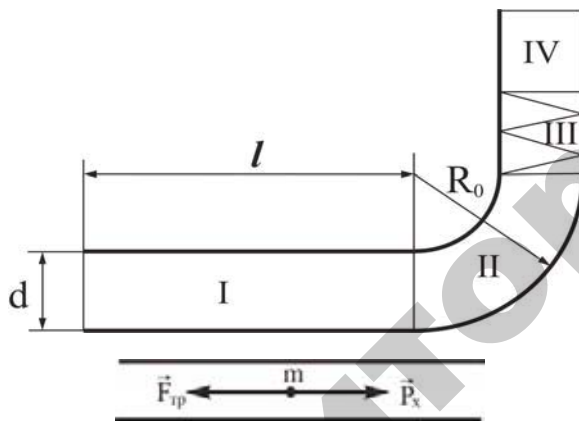


Рисунок 2. Участки материалопровода

Известно, что для поддержания равномерного движения жидкости (газа) в горизонтальном трубопроводе (рис. 2, участок I) необходимо поддержать перепад давления, который определяется по известному уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (газа);  
 $\lambda$  – коэффициент сопротивления;  
 $p_1$  и  $p_2$  – давления в сечениях 1 и 2;  
 $d$  и  $l$  – диаметр и длина материалопровода;  
 $v$  – средняя скорость жидкости;

$\frac{\rho v^2}{2}$  – динамическое давление.

В выражении (1)  $\lambda$  можно заменить на коэффициент аэродинамического сопротивления  $k_x$  и отношение  $l/d$  – на площадь миделева сечения  $A_r$ . Для двухкомпонентного потока динамическое давление вычисляется с помощью разницы скоростей каждого из компонентов. При этом сила аэродинамического сопротивления в прямолинейном трубопроводе из (1) имеет вид:

$$P_x = \frac{1}{2} k_x A_r \rho (v - u)^2, \quad (2)$$

где  $v$  и  $u$  – средние скорости двух компонентов потока.

В горизонтальном трубопроводе на твердую составляющую двухкомпонентного потока действует также сила трения, пропорциональная нормальному давлению на нижней стенке.

Поэтому дифференциальное уравнение такого потока на участке I имеет вид:

$$m \frac{du}{dt} = P_x - fN. \quad (3)$$

С учетом выражения (2) и приравняв  $N$  к  $mg$ , получим:

$$m \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} k_x A_r \rho (v - u)^2 - fmg. \quad (4)$$

В начале движения скорость твердого компонента  $u_n = 0$ , следовательно  $\frac{du}{dt} = 0$ . Тогда из уравнения (4) получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} k_x A_r \rho v^2 - fmg &= 0; \\ k_x A_r \rho v^2 &= 2fmg. \\ v_n &= \sqrt{\frac{2fmg}{k_x A_r \rho}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $v_n$  – начальная скорость воздушного потока, при которой частица находится во взвешенном состоянии.

Определим из выражения (5)  $k_x$ :

$$k_x = \frac{2fmg}{A_r \rho v_n^2}$$

и подставим его в выражение (4):

$$\begin{aligned} m \frac{du}{dt} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{2fmg}{A_r \rho v_n^2} A_r \rho (v - u)^2 - fmg; \\ \frac{du}{dt} &= fg \left[ \left( \frac{v - u}{v_n} \right)^2 - 1 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение уравнения (6) при начальных условиях  $u_n = 0$  и  $t_n = 0$  дает

$$u_1 = \frac{v \left( e^{\frac{2qt}{v_n}} - \frac{v-v_n}{v+v_n} \right) - v_n \left( e^{\frac{2qt}{v_n}} + \frac{v-v_n}{v+v_n} \right)}{e^{\frac{2qt}{v_n}} - \frac{v-v_n}{v+v_n}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) дает зависимость скорости частицы в трубопроводе от его аэродинамических свойств и времени прохождения по трубопроводу. Зная ее, можно рассчитать длину трубопровода.

Для удобства вычислений по выражению (7) введем коэффициент перепада скорости воздушного потока:

$$\frac{v_n}{v} = \zeta. \quad (8)$$

При этом выражение (7) принимает вид:

$$u_1 = \frac{v \left( e^{\frac{2qt}{v_n}} - \frac{1-\zeta}{1+\zeta} \right) - v_n \left( e^{\frac{2qt}{v_n}} + \frac{1-\zeta}{1+\zeta} \right)}{e^{\frac{2qt}{v_n}} - \frac{1-\zeta}{1+\zeta}}. \quad (9)$$

Рассмотрим II участок. На частицу удобрения действуют сила тяжести  $mg$ , аэродинамическая движущая сила  $P_x = m \frac{du}{dt}$ , нормальное давление стенки трубопровода  $N$  и сила трения о нее  $F_{mp}$  (рис. 3).

Уравнение движения частицы в системе естественных осей  $n$  и  $\tau$  имеет вид:

$$\sum \tau = P_x - F_{mp} - mg \sin \varphi = 0;$$

$$\sum n = N - mg \cos \varphi - m \frac{u^2}{R_0} = 0. \quad (10)$$

Из второго уравнения (10) находим:

$$N = mg \cos \varphi + m \frac{u^2}{R_0}. \quad (11)$$

При этом сила трения равна:

$$F_{mp} = fm \left( \frac{u^2}{R_0} + g \cos \varphi \right). \quad (12)$$

С учетом выражения (12) из первого уравнения (10) находим:

$$P_x = F_{mp} + mg \sin \varphi;$$

$$m \frac{du}{dt} = fm \left( \frac{u^2}{R_0} + g \cos \varphi \right) + mg \sin \varphi;$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{fu^2}{R_0} + fg \cos \varphi + g \sin \varphi. \quad (13)$$

Приведем уравнения (13) к угловой координате  $\varphi$ :

$$\frac{du}{dt} = \frac{u}{R_0} \cdot \frac{du}{d\varphi}. \quad (14)$$

В этом случае уравнение (13) примет вид:

$$u \frac{du}{d\varphi} = fu^2 + R_0 fg \cos \varphi + R_0 g \sin \varphi. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (15) при начальных условиях  $u = u_1$  и  $\varphi = 0$ , получим выражение для определения скорости частицы:

$$\frac{\left\{ \left[ (e^{2f\varphi} - 1) + (1 - e^{2f\varphi}) 2f^2 \right] \cos \varphi - 3fe^{2f\varphi} \cdot \sin \varphi \right\} 2gR_0 + (1 + 4f^2)u_1^2}{(1 + 4f^2)e^{2f\varphi}} = u^2, \quad (16)$$

где  $u_1$  вычисляется по выражению (9).

Очевидно, нас интересует скорость частицы  $u_2$  – на выходе из поворота на вертикальный участок, где  $\varphi = \pi/2$ . При этом выражение (16) имеет вид:

$$u_2^2 = \frac{(1 + 4f^2)u_1^2 - 6fgR_0 e^{\pi f}}{(1 + 4f^2)e^{\pi f}}. \quad (17)$$

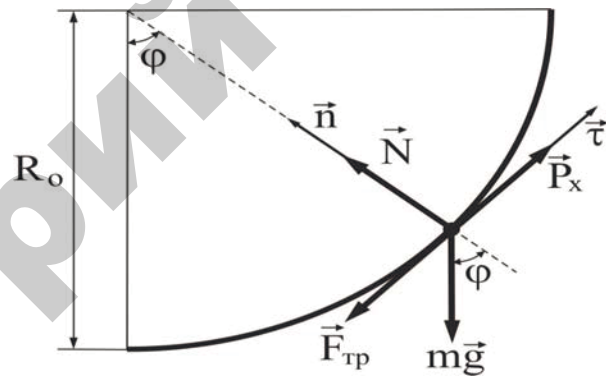


Рисунок 3. Схема сил, действующих на участке II

На III-м участке установлена винтовая поверхность, которая служит для закручивания двухкомпонентного потока. Действия сил на частицу  $M$  минерального удобрения представим схематически (рис. 4). Здесь нормальная реакция  $N_1$  уравновешивается центробежной силой  $\frac{mu^2}{R}$ , нормальная реакция опорной поверхности  $N$  направлена по бинормали и уравновешивается проекцией силы тяжести  $mg$ . Аэродинамическая движущая сила  $P_x$  уравновешена силой трения  $F$ .

Система уравнений, характеризующая движение частицы на естественных осях  $x, y, z$ , запишется следующим образом:

$$m\ddot{x} = P_x - F - mg \cos \alpha = 0;$$

$$m\ddot{y} = \frac{mu^2}{R} - N_1 = 0;$$

$$m\ddot{z} = N - mg \sin \alpha = 0. \quad (18)$$

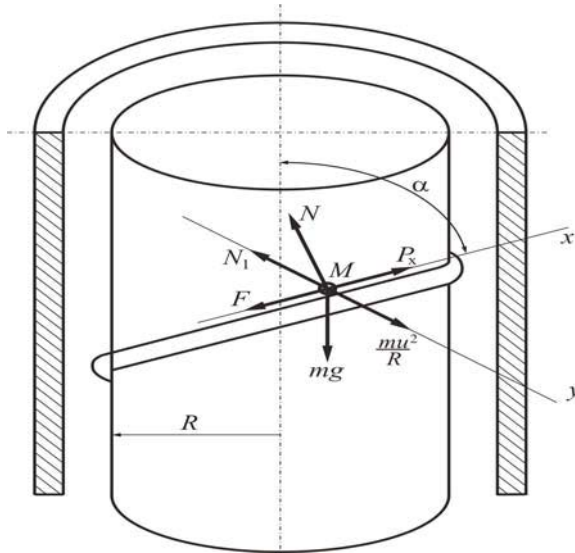


Рисунок 4. Схема сил, действующих на участке III

Из системы уравнений (18) определим:

$$N_1 = \frac{mu^2}{R};$$

$$N = mg \sin \alpha.$$

Очевидно, аэродинамическая движущая сила  $P_x$  равна:

$$P_x = m \frac{du}{dt}. \quad (19)$$

Сила трения определится как

$$F = f(N + N_1);$$

$$F = fm \left( g \sin \alpha + \frac{u^2}{R} \right). \quad (20)$$

С учетом уравнений (19) и (20) перепишем первое уравнение в (18):

$$\frac{du}{dt} = f \left( g \sin \alpha + \frac{u^2}{R} \right) + g \cos \alpha. \quad (21)$$

Это и есть дифференциальное уравнение движения частицы удобрения по закручивающейся винтовой поверхности под действием аэродинамической движущей силы.

Преобразуем уравнение (21):

$$\frac{du}{fg \sin \alpha + g \cos \alpha + \frac{f}{R} u^2} = dt.$$

Принимаем обозначения:

$$g(f \sin \alpha + \cos \alpha) = A;$$

$$\frac{f}{R} = B. \quad (22)$$

При этом последнее уравнение принимает вид:

$$\frac{du}{A + Bu^2} = dt.$$

Получили дифференциальное уравнение с разделяющейся переменной, решение которого имеет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctgu} \sqrt{\frac{B}{A}} + C = t. \quad (23)$$

При  $t = 0$ ,  $u = u_2$

$$\frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctgu}_2 \sqrt{\frac{B}{A}} + C = 0;$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctgu}_2 \sqrt{\frac{B}{A}}.$$

Значение  $C$  подставим в уравнение (23):

$$\frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctgu}_3 \sqrt{\frac{B}{A}} + \frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctgu}_2 \sqrt{\frac{B}{A}} = t;$$

$$\operatorname{Arctgu}_3 \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{AB} \cdot t - \operatorname{arctgu}_2 \sqrt{\frac{B}{A}}. \quad (24)$$

Уравнение (24) связывает такие параметры закручивающейся винтовой поверхности как ее радиус и угол подъема винтовой линии, с помощью которых можно рассчитать и ее шаг и длину.

Для расчетной проверки полученных результатов вычислим скорости частицы на каждом этапе прохождения ею пневмотрубопровода. Для этого необходимы параметры, часть которых можно принять из литературных источников, и часть которых установлена предварительными лабораторными экспериментами:

$v_n = 5$  м/с – начальная скорость движения частицы в пневмопотоке;

$v = 20$  м/с – рабочая скорость воздушного потока;

$f = 0,5$  – коэффициент внешнего трения;

$d = 0,1$  м – диаметр трубопровода;

$R_0 = 0,5$  м – радиус вертикального отвода;

$\alpha = 60^\circ$  – угол подъема винтовой линии.

Скорости на участках:

I участок – 14,87 м/с;

II участок – 6,22 м/с;

III участок – 5,82 м/с;

IV участок – 2,55 м/с;

Следовательно, скорость частицы в вертикальном трубопроводе снизится до скорости 2,55 м/с.

### Заключение

Зная необходимую скорость частиц на выходе, удовлетворяющую транспортированию и равномерному распределению их по отводам, с помощью скорости и времени в пути можно рассчитать возможную высоту вертикального трубопровода.

### ЛИТЕРАТУРА

Устройство для распределения сыпучего материала: пат. 19007 Респ. Казахстан / С.О. Нукешев, Т.К. Нургалиев и др.; опубли. 15.01.2008// Бюл. № 1. – С. 4.