

5. Janssen, H.A. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen / H.A. Janssen // Z.d. VDI. – 1895. – № 35. – P. 1045–1049.
6. Рудицын, М.Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов / М.Н. Рудицын, П.Я. Артемов, М.И. Любошиц. – Минск: Вышэйшая школа, 1970. – 630 с.
7. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1952. – 216 с.
8. Обертышев, А.И. Длина загрузочного окна винтового транспортера / А.И. Обертышев // Механизация и электрификация соц. сельского хозяйства. – 1964. – № 1. – С. 56–57.
9. Wright, H. An Evaluation of the Jenike Bunker Design Method / H. Wright // Engineering for Industry. Transactions of the ASME, Series B. – 1969. – № 2. – P. 301–308.

УДК 631.3:631.174

**П.П. Бегун**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси*

*по механизации сельского*

*хозяйства),*

*г. Минск, Республика Беларусь)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ПО ЛОПАСТИ БАРАБАНА ВЫРАВНИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

### **Введение**

Центробежные разбрасыватели в парке машин по внесению минеральных удобрений составляют почти 100 %. Однако они не обеспечивают требуемого качества внесения. Одной из причин тому является пульсирующая подача удобрений на распределяющий рабочий орган. Устранить этот недостаток возможно с использованием на прицепных разбрасывателях выравнивающего устройства [1].

Известно, что снижение неравномерности внесения удобрений на 1 % ведет к увеличению прибавки урожая за их счет также на 1 %, и наоборот [2]. То есть существует прямая зависимость между неравномерностью внесения и эффективностью применения удобрений. Поэтому снижение неравномерности внесения удобрений является важной народнохозяйственной задачей.

Лопастной барабан является основным рабочим органом двухступенчатого выравнителя потока минеральных удобрений центробежного рассеивателя РУ-7000, влияющим на равномерность подачи удобрений в туконаправитель и далее на распределяющие рабочие органы. Технологический процесс его работы описан в [1].

Целью данной работы является исследование движения частицы удобрений по лопасти вращающегося барабана, выявление характера этого движения, определение сил, действующих на частицу, что в ко-

в конечном итоге позволит определить абсолютную скорость схода частиц с лопасти и угол их схода, необходимый для обоснования рациональных параметров выравнивающего устройства.

### Основная часть

Для решения данной задачи примем некоторые допущения:

- частицы удобрений являются абсолютно твердыми телами, совершающими движение обособленно, независимо друг от друга;
- сопротивление воздуха при движении частицы отсутствует ввиду малой скорости движения;
- частица удобрений является материальной точкой, поскольку ее размеры в сравнении с размерами барабана малы.

Приняв указанные допущения, теоретически исследуем движение частицы минеральных удобрений по лопасти барабана.

На частицу  $b$  (рисунок 107) при движении по поверхности лопасти барабана, вращающегося вокруг оси  $O$  с некоторой угловой скоростью  $\omega$ , действуют следующие силы:

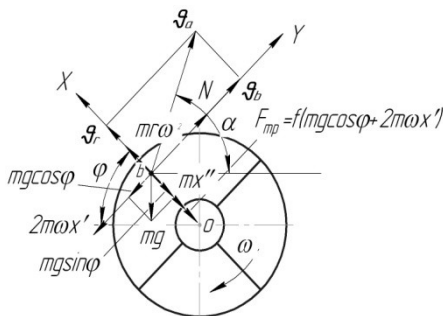


Рисунок 107 – К определению абсолютной скорости полета частиц удобрений

- Кориолисова (поворотная) сила инерции, которая прижимает частицу к лопасти,

$$F_k = 2 \cdot m \cdot \omega g;$$

- тангенциальная сила инерции

$$F_t = m \cdot a;$$

- сила трения, возникающая от действия сумм нормальных сил на поверхности лопасти,

$$F_{mp} = f \cdot N,$$

где  $f$  – коэффициент трения частицы по поверхности лопатки (для стали  $f = 0,31 \dots 0,76$  [3, с. 354]);

$N$  – нормальная реакция,  $H$ ;

$m$  – масса частицы,  $кг$ ;

$a$  – ускорение,  $м/с^2$ .

- составляющая силы веса частицы в плоскости лопасти

$$G_x = m \cdot g \cdot \sin \varphi;$$

- составляющая силы веса частицы в направлении, перпендикулярном поверхности лопасти,

$$G_y = m \cdot g \cdot \cos \varphi;$$

- центробежная сила инерции

$$P = m \cdot \omega^2 \cdot r;$$

Положение частицы на лопасти определяется расстоянием до оси барабана и углом  $\varphi$ .

Выберем систему прямоугольных координат, у которой ось абсцисс  $bх$  лежит в плоскости скольжения частицы удобрений.

Составим уравнение равновесия, взяв сумму проекций всех сил на оси координат:

$$\begin{cases} mr\omega^2 - mg \sin \varphi - fN - mx'' = 0; \\ mg \cos \varphi + 2m\alpha x' - N = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Исключив из этих уравнений силы  $N$  и произведя ряд преобразований, получим дифференциальное уравнение относительного движения частицы по лопасти:

$$x'' + 2f\alpha x' - r\omega^2 = -g(f \cos \varphi + \sin \varphi). \quad (2)$$

Это неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Решение такого уравнения может быть найдено как сумма общего решения соответствующего ему однородного уравнения  $\bar{x}$  и частных решений неоднородной части  $x^*$  [4, с. 97], то есть:

$$x = \bar{x} + x^*. \quad (3)$$

Однородное дифференциальное уравнение второго порядка, соответствующее неоднородному уравнению (2), будет равно:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - 2 \cdot f \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} - \omega^2 \cdot r = 0. \quad (4)$$

Его характеристическое уравнение представим в виде:

$$k^2 + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot k - \omega^2 = 0. \quad (5)$$

Определим значения корней  $k_1$  и  $k_2$  характеристического уравнения (5):

$$k_{1,2} = \frac{-2f\omega \pm \sqrt{4f^2\omega^2 + 4\omega^2}}{2} = -f\omega \pm \omega\sqrt{f^2 + 1},$$

или

$$\begin{aligned} k_1 &= \omega(-f + \sqrt{f^2 + 1}); \\ k_2 &= -\omega(f + \sqrt{f^2 + 1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Корни характеристического уравнения (5) при всех значениях  $\omega$  и  $f$  будут действительными числами. Поэтому сама дополнительная функция представится выражением:

$$\bar{x} = e^{t \cdot k_1} \cdot C_1 + e^{t \cdot k_2} \cdot C_2, \quad (7)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные.

Частное решение неоднородного уравнения (3) ищем в виде:

$$x^* = A \cdot \cos(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (8)$$

где  $A$  и  $B$  – неопределенные коэффициенты.

Дифференцируя уравнения (8), получим:

$$x^{*'} = B \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) - A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t);$$

$$x^{**} = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) - B \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Отсюда, подставляя эти выражения в уравнение движения частицы (2), получим:

$$-A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) - B \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot (B \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) - A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)) - \\ - \omega^2 \cdot (A \cdot \cos(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\omega \cdot t)) = -g \cdot f \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Упростив и преобразовав последнее выражение, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} -2 \cdot A \cdot \omega^2 + 2 \cdot B \cdot f \cdot \omega^2 = -g \cdot f; \\ -2 \cdot B \cdot \omega^2 - 2 \cdot A \cdot f \cdot \omega^2 = -g. \end{cases} \quad (9)$$

Из системы уравнений (9) определяем коэффициенты:

$$A = \frac{f \cdot g}{(1 + f^2) \cdot \omega^2}; \quad (10)$$

$$B = \frac{(f^2 - 1) \cdot g}{-2 \cdot \omega^2 \cdot (1 + f^2)}. \quad (11)$$

Таким образом, решение уравнения (2), как неоднородного линейного дифференциального уравнения второго порядка, будет следующим:

$$x = e^{t \cdot k_1} \cdot C_1 + e^{t \cdot k_2} \cdot C_2 + A \cdot \cos(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (12)$$

Продифференцировав данное уравнение, получим уравнение изменения скорости частицы по поверхности лопатки в зависимости от времени  $t$ :

$$\mathcal{G}_r = k_1 \cdot e^{t \cdot k_1} \cdot C_1 + k_2 \cdot e^{t \cdot k_2} \cdot C_2 - A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) + B \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (13)$$

Заменяя в уравнениях (12), (13)  $t = \varphi / \omega$ , получим систему уравнений, описывающих движение частицы по лопасти барабана в зависимости от угла поворота:

$$\begin{cases} x = e^{\frac{\varphi \cdot k_1}{\omega}} \cdot C_1 + e^{\frac{\varphi \cdot k_2}{\omega}} \cdot C_2 + A \cdot \cos \varphi + B \cdot \sin \varphi; \\ \mathcal{G}_r = k_1 \cdot e^{\frac{\varphi \cdot k_1}{\omega}} \cdot C_1 + k_2 \cdot e^{\frac{\varphi \cdot k_2}{\omega}} \cdot C_2 - A \cdot \omega \cdot \sin \varphi + B \cdot \omega \cdot \cos \varphi. \end{cases} \quad (14)$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  найдем из начального условия движения частицы. Обозначим  $\varphi_0$  и  $x_0$  те значения угла  $\varphi$  и координаты  $x$ , при которых частица удобрения начнет свое относительное перемещение вдоль лопасти барабана. Тогда систему уравнений (14) запишем следующим образом:

$$\begin{cases} x_0 = C_1 + C_2 + A; \\ 0 = k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2 + B \cdot \omega. \end{cases} \quad (15)$$

Из первого уравнения системы (15) находим  $C_1 = x_0 - C_2 - A$ , подставляя во второе, получим:

$$0 = k_1 \cdot x_0 - k_1 \cdot C_2 - k_1 \cdot A + k_2 \cdot C_2 + B \cdot \omega,$$

или

$$k_1 \cdot C_2 - k_2 \cdot C_2 = k_1 \cdot x_0 - k_1 \cdot A + B \cdot \omega.$$

Отсюда

$$C_2 = \frac{k_1 \cdot x_0 - k_1 \cdot A + B \cdot \omega}{k_1 - k_2}. \quad (16)$$

Тогда

$$C_1 = x_0 - \frac{k_1 \cdot x_0 - k_1 \cdot A + B \cdot \omega}{k_1 - k_2} - A.$$

Помножив  $x_0$  и  $A$  на отношение  $(k_1 - k_2)/(k_1 - k_2)$ , подводим правую часть уравнения под общий знаменатель. Сократив, получим:

$$C_1 = \frac{k_2 \cdot A - k_2 \cdot x_0 - B \cdot \omega}{k_1 - k_2}. \quad (17)$$

Уравнения (14) позволяют определить относительную скорость движения частицы по лопасти и положение частицы на ней в любой момент времени, однако их решение возможно только графическим путем. Для решения этих уравнений строим номограммы в соответствии с заданными параметрами лопастного барабана ( $r$ ;  $n$ ;  $r_l$ ). В частности, по верхнему уравнению системы (14) строим номограмму для определения угла схода частицы с лопасти (рисунок 108). На рисунке 109 приведена номограмма для определения относительной скорости движения материала по лопасти.

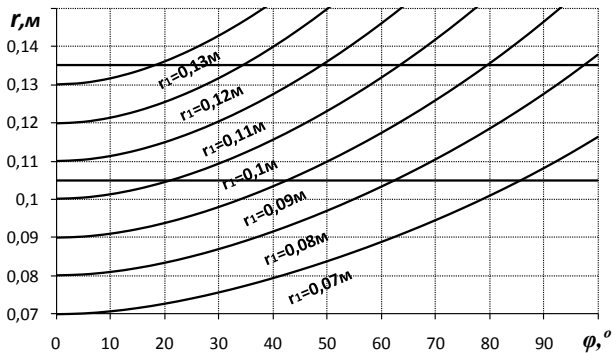
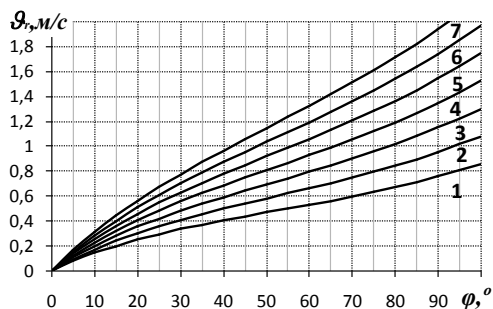


Рисунок 108 – Изменение положения частицы на лопасти в зависимости от угла поворота лопастного барабана



- 1)  $r_1 = 0,07$  м; 2)  $r_1 = 0,08$  м; 3)  $r_1 = 0,09$  м; 4)  $r_1 = 0,10$  м; 5)  $r_1 = 0,11$  м;  
6)  $r_1 = 0,12$  м; 7)  $r_1 = 0,13$  м

**Рисунок 109 – Изменение скорости движения частиц по лопасти в зависимости от угла поворота барабана при различном первоначальном положении частицы на лопасти при  $\omega = 17,3$  с<sup>-1</sup>**

Таким образом, используя номограмму (рисунок 108), можно определить время нахождения частицы на лопасти в зависимости от места расположения частицы на лопасти и угол, при котором сойдет эта частица с последней. Далее по номограмме (рисунок 109) определяем относительную скорость движения частицы по лопасти при соответствующем месте расположения частицы на лопасти.

### Выводы

1. В результате проведенных теоретических исследований получены уравнения, описывающие движение частицы по лопасти барабана в зависимости от угла поворота, по которым построены номограммы для определения относительной скорости движения частицы по лопасти и угла их схода с последней.

2. Приведенные уравнения (14) позволили определить рациональные параметры двухступенчатого выравнивателя потока удобрений [5], что в конечном итоге дает возможность снизить неравномерность внесения минеральных удобрений в 2–3 раза.

18.01.12

### Литература

- Бегун, П.П. О снижении продольной неравномерности внесения минеральных удобрений центробежными разбрасывателями / П.П. Бегун, Л.Я. Степук // Перспективная техника и технологии–2009: материалы V-й междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых / МДАУ. – Николаев, 2009. – С. 54–57.
- Лях, С.И. Повышение качества внесения минеральных удобрений совершенствованием процесса их дозирования: дис. ... канд. технич. наук: 05.20.01 / С.И. Лях. – Минск, 2003. – С. 16.

3. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений / Всесоюзный науч.-ислед. ин-т с/х машин-я им. В.П. Горячкина; под ред. Л.А. Трепцова [и др.]. – Москва, Колос, 1970. – 424 с.
4. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление / Н.С. Пискунов. – Т. 2. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
5. Бегун, П.П. Обоснование параметров выравнителя потока удобрений / П.П. Бегун // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2007. – Вып. 41. – С. 81–88.

УДК 631.333.6

**Л.Я. Степук, А.А. Лях,**

**П.П. Бегун**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)*

**РЕЗУЛЬТАТЫ  
ИСПЫТАНИЙ  
И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
АЭРАТОРА-СМЕСИТЕЛЯ  
КОМПОСТОВ АСК-4,5**

Анализ внесения органических удобрений и изменения содержания гумуса в пахотных почвах показывает, что существенное снижение объемов применения органических удобрений в 2001–2006 гг. явилось причиной снижения содержания гумуса в почвах ряда районов республики. Поэтому в качестве органических удобрений должны максимально использоваться все виды навоза, солома, торф, органические отходы промышленных предприятий. Особенно следует обратить внимание на использование в качестве удобрения полужидкого навоза (влажностью 88–92 %). Образуется он при содержании скота с применением подстилки не более 1 кг на одну голову в сутки и при ежедневной уборке навоза из животноводческих помещений транспортерами типа ТСН, шнеками, дельта-скреперами. Ежегодно получают около 10 млн т полужидкого навоза, но внесение его в таком виде не представляется возможным по причине отсутствия специальной техники [1]. Поэтому его целесообразно компостировать. Однако существующая технология компостирования имеет ряд недостатков, что сдерживает ее широкое применение. Мало того, что она требует больших затрат времени (более 2 месяцев), так еще и не всегда обеспечивает на должном уровне обеззараживание компостной массы и очищение от всхожих семян сорняков. К тому же в самой массе удобрения элементы питания растений распределены неравномерно. Для повышения эффективности применения компостов необходимо тщательное перемешивание компостной смеси в период закладки и компостирования, что обеспечивается разработанной технологией ускоренного приготовления органических компостов с использованием аэратора-смесителя органических компостов АСК-4,5.