

КОНТАКТ ЧАСТИЦЫ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С КОНУСНЫМ ДЕЛИТЕЛЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА

Игорь Сивак

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15*

Igor Syvak

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroiv Oborony Str. 15, Kiev, Ukraine*

Аннотация. Исследование влияния коэффициента парусности частиц минеральных удобрений на их скорость и траекторию перемещения по поверхности конусного делителя пневматического высевающего аппарата распределителя, который работает в технологиях точного земледелия.

Ключевые слова: делитель, частица, воздушноминеральная смесь, высевающий канал, транспортирование, воздушный поток, скольжение.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современных пневматических распределителях для равномерного распределения воздушно - минеральной смеси в делительной головке высевающего аппарата используются различные типы делителей. Наиболее распространенные среди них: плоские, конусные, сферические и др. Логично, что все они являются симметричными фигурами.

Поскольку поток минеральных удобрений в пневматических высевающих аппаратах движется по закрытым трубопроводам и не зависит от действия факторов среды - такие распределители являются более точными реализаторами внесения технологического материала, по сравнению с другими аналогами и имеют достаточно широкий спектр применения. Поэтому существует актуальность исследования равномерности распределения частиц минеральных удобрений между высевающими каналами делительной головки пневматического высевающего аппарата с использованием, например, делителя конусного типа.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ конструкторских решений делителей сыпучих материалов, проведенный в направлении выявления их технологического соответствия для получения равномерности распределения сыпучих материалов, показал целесообразность применения делителей симметричных форм, которые в отличие от других технических решений позволяют в процессе контакта с воздушно-материальной смесью равномерно распределять ее между высевающими каналами [10,13,17]. Рядом авторов также проводились исследования [4, 8, 18] по исследованию разных форм делителей для внесения минеральных удобрений с использованием пневматических аппаратов. Однако результаты сравнительной оценки равномерности внесения материалов показали [2], что конусные делители пневматических высевающих аппаратов способствуют повышению точности реализации эпюры распределения материала в направлении перемещения агрегата.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование взаимодействия частицы минеральных гранулированных удобрений с делителем конусного типа пневматического высевающего аппарата на предмет скорости перемещения частицы по телу делителя и получения возможных траекторий ее полета.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сначала важно определить начальные условия взаимодействия частицы минеральных удобрений с делителем конусного типа.

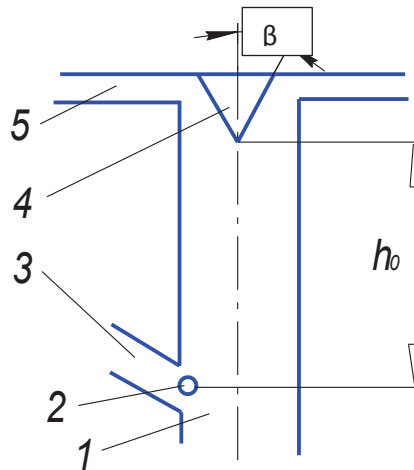


Рис. 1. Схема положения частицы минеральных удобрений и делителя в пневматическом высевном аппарате:

Fig. 1. Scheme of particle position of fertilizers and a divider in pneumatic sowing unit:

1 - транспортирующий трубопровод, 2 - частица минеральных удобрений, 3 - дозирующее устройство, 4 - делитель, 5 - высевные каналы.

Для этого рассмотрим конусный делитель, вершина которого находится на расстоянии h_0 от точки вхождения в транспортирующий трубопровод частицы минеральных удобрений (рис. 1).

Боковая поверхность конусного делителя описывается уравнением:

$$\text{при: } x \geq h_0 \quad y = (x - h_0) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right), \quad (1)$$

где: β - угол при вершине конусной делителя.

Определим точку удара частицы минеральных удобрений по телу делителя, т.е. точку начала взаимодействия частицы с поверхностью делителя конусного типа (рис. 2).

Точка удара c_1 частицы минеральных удобрений по телу делителя, находится на

расстоянии y_{c_1} от оси транспортирующего трубопровода, а следовательно и от оси делителя. Расстояние от точки удара c_1 частицы минеральных удобрений по телу делителя к точке O_1 вершины конуса по его образующей, определяется:

$$O_1 c_1 = \frac{y_{c_1}}{\sin \frac{\beta}{2}}. \quad (2)$$

Скорость воздушного потока, который будет действовать в точке c_1 , равна [1]:

$$V_{nc_1} = V_{n \max} \left[1 - \left(\frac{y_{c_1}}{r} \right)^{k_1} \right]^2, \quad (3)$$

где: k_1 - коэффициент интенсивности изменения скорости потока; r - радиус транспортирующего трубопровода.

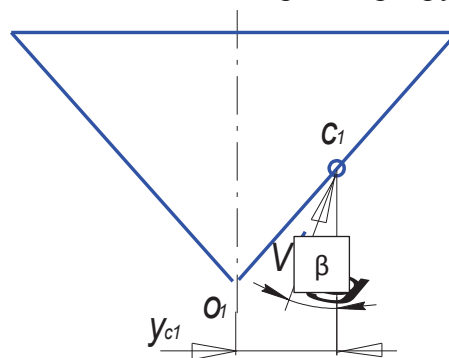


Рис. 2. Точка удара частицы минеральных удобрений по телу делителя.

Fig. 2. Point of impact particles of mineral fertilizers on body divider.

КОНТАКТ ЧАСТИЦЫ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С КОНУСНЫМ ДЕЛИТЕЛЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА

Учитывая, что скорость частицы минеральных удобрений состоит из проекций V_x и V_y , то результирующая скорость V' частицы до удара, будет равна [2]:

$$V' = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4)$$

Результирующая скорость V' частицы до удара, направлена под некоторым углом γ к оси x :

$$\gamma = \arccos \frac{V_x}{V'} = \arccos \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \quad (5)$$

1. После этого возможны два случая удара частицы минеральных удобрений по телу конусного делителя [3]:

1) удар упругий, с последующим движением по высевным каналам;

2) удар не упругий, со скольжением по поверхности делителя.

Рассмотрим упругий удар частицы минеральных удобрений по конусному делителю (рис. 3).

Скорость центра тяжести частицы минеральных удобрений перед ударом, равна, по теореме косинусов:

$$V = \sqrt{V_{nc_1}^2 + V_x^2 + V_y^2 - 2V_{nc_1} \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \cos \gamma} \quad (6)$$

Угол ζ , под которым направлена скорость в начале удара, равен:

$$\zeta = \frac{\beta}{2} - \arccos \left(\frac{V_{nc_1} + \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \cos \gamma}{V} \right) \quad (7)$$

Определим проекции скорости V центра тяжести частицы минеральных удобрений в начале удара на оси n и τ (ось τ направлена вдоль образующей конусного делителя, а ось n - перпендикулярна оси τ в точке контакта частицы с делителем):

$$V_\tau = V \cos \zeta; V_n = V \sin \zeta, \quad (8)$$

После отражения частица движется под углом ξ к направлению образующей

$$k_g = \frac{tg(90^\circ - \zeta)}{tg(90^\circ - \xi)} \quad (9)$$

где: k_g - коэффициент восстановления частицы при ударе.

$$k_g = \frac{tg \xi}{tg \zeta}, \quad (10)$$

откуда $tg \xi = k_g tg \zeta$.

Проекция общей скорости тел на ось n в конце удара:

$$u_n = \frac{m_q V_n}{m_q + m_n} = \frac{m_q V \sin \zeta}{m_q + m_n} \quad (11)$$

где: m_q - масса частицы минеральных удобрений; m_n - масса делителя.

Тогда проекция скорости тел в конце удара, равна:

$$u_n = u_n + k_g(u_n - V_n) = \frac{m_q V \sin \zeta}{m_q + m_n} + k_g \left(\frac{m_q V \sin \zeta}{m_q + m_n} - V \sin \zeta \right) = \frac{m_q V \sin \zeta}{m_q + m_n} - \frac{k_g m_n V \sin \zeta}{m_q + m_n} = \frac{V \sin \zeta}{m_q + m_n} (m_q - k_g m_n) \quad (12)$$

Касательная составляющая:

$$u_{\tau_q} = V_{\tau_q} = V \cos \zeta. \quad (13)$$

Модуль скорости центра тяжести частицы минеральных удобрений в конце удара определяется:

$$u = \sqrt{u_n^2 + u_{\tau_q}^2} = V \cos \zeta \sqrt{tg^2 \zeta \left(\frac{m_q - k_g m_n}{m_q + m_n} \right)^2 + 1} \quad (14)$$

Тогда:

$$ctg \xi = \left| \frac{u_n}{u_{\tau_q}} \right| = \frac{tg \zeta}{m_q + m_n} (m_q - k_g m_n) \quad (15)$$

Из анализа зависимости (15) можно сделать вывод, что угол отражения зависит от массы частицы минеральных удобрений (рис. 4).

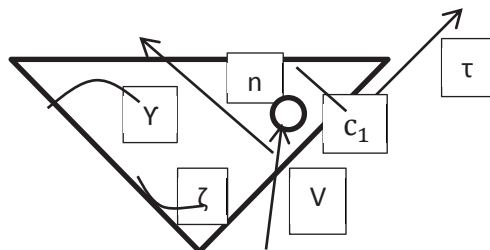


Рис. 3. Исследование упругого удара частицы минеральных удобрений по конусному делителю.

Fig. 3. Study of elastic collision particles of mineral fertilizers on tapered divider.

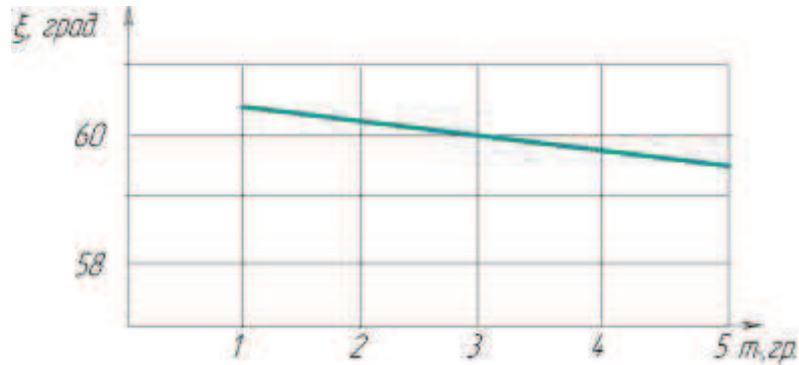


Рис. 4. Зависимость угла отражения частицы минеральных удобрений от ее массы.
Fig. 4. Dependence of the reflection angle of the particle fertilizer on its mass

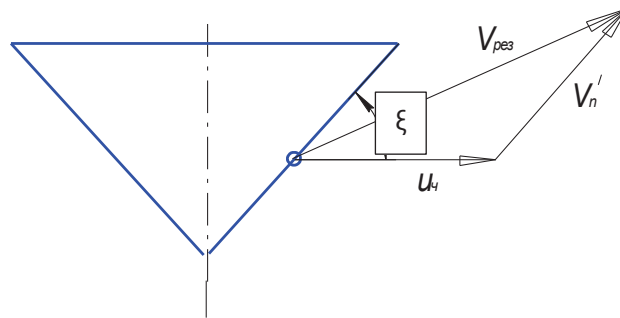


Рис. 5. Определение результирующей скорости отраженной частицы минудобрений.
Fig. 5. Determination of the resultant velocity of the reflected particle fertilizer.

Предположим, что отраженная частица минеральных удобрений, после удара, встретится с воздушным потоком, который будет действовать параллельно образующей конусного делителя со скоростью V'_n (рис. 5). Тогда результирующая скорость частицы равна: $\vec{V}_{рез} = \vec{V}'_n + \vec{u}_к$, или:

$$V_{рез} = \sqrt{u_к^2 + V_n'^2 - 2V'_n u_к \cos(180^\circ - \xi)} = \sqrt{u_к^2 + V_n'^2 + 2V'_n u_к \cos \xi} \quad (16)$$

При анализе выражений (15) и (16), которые подтверждают, что траектории движения частицы минеральных удобрений зависят от ее массы, можно сделать вывод, о неравномерности распределения материала конусным делителем, при условии удара частицы по неподвижной поверхности конуса.

При условии не упругого удара (т.е. $\xi = 0$), частица скользит по неподвижной поверхности конуса (рис. 6). При этом движение частицы по поверхности конуса описывается векторным уравнением:

$$m_ч \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{R} + \vec{F}_{mp} \quad (17)$$

где: G - сила тяжести, $G = m_ч g$, g - ускорение свободного падения; N - нормальная реакция поверхности; R - сила давления воздуха,

$$R = m_ч k_n (V_n - V)^2,$$

где: k_n - коэффициент парусности;

F_{mp} - Сила трения скольжения,

$$F_{mp} = fN,$$

где: f - коэффициент трения скольжения частицы по поверхности конуса.

$$\left. \begin{aligned} m_ч \frac{dV}{dt} &= R + F_{mp} - G \cos \frac{\beta}{2} \\ 0 &= -N + G \sin \frac{\beta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Из второго уравнения системы (18) определим нормальную реакцию поверхности:

$$N = G \sin \frac{\beta}{2} \quad (19)$$

Тогда:

$$F_{mp} = fN = fG \sin \frac{\beta}{2} = f m_ч g \sin \frac{\beta}{2}. \quad (20)$$

КОНТАКТ ЧАСТИЦЫ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С КОНУСНЫМ ДЕЛИТЕЛЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА

После подстановки в первое уравнение системы (18):

$$m_u \frac{dV_u}{dt} = m_u k_n (V_n - V_u)^2 + f m_u g \sin \frac{\beta}{2} - m_u g \cos \frac{\beta}{2} \quad (21)$$

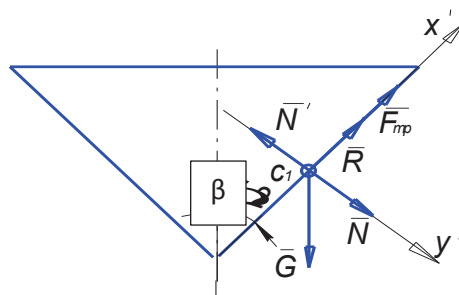


Рис. 6. Схема сил, при скольжении частицы по поверхности конусного делителя.
Fig. 6. Diagram of forces at sliding particles on surface of cone splitter.

Поскольку движение возможно лишь вдоль образующей конусного делителя (вдоль оси x'), уравнения движения частицы (17) в проекциях на оси x' и y' имеет вид. После алгебраических преобразований, уравнение (21) примет вид:

$$\frac{dV_u}{(V_n - V_u)^2 + \frac{fg}{k_n} \sin \frac{\beta}{2} - \frac{g}{k_n} \cos \frac{\beta}{2}} = k_n dt \quad (22)$$

Для упрощения выражения (22) проведем замену:

$$-\frac{fg}{k_n} \sin \frac{\beta}{2} + \frac{g}{k_n} \cos \frac{\beta}{2} = B,$$

тогда, выражение (20) примет вид

$$\frac{d(V_n - V_u)}{(V_n - V_u)^2 - B} = -k_n dt \quad (23)$$

После интегрирования уравнения (23), получим выражение:

$$\frac{1}{\sqrt{B}} \operatorname{arth} \left(\frac{V_n - V_u}{\sqrt{B}} \right) = k_n t + C_3 \quad (24)$$

где: C_3 - постоянная интегрирования.

При начальных условиях $t = 0$: $V_u = V \cos \frac{\beta}{2}$, постоянная интегрирования равна:

$$C_3 = \frac{1}{\sqrt{B}} \operatorname{arth} \left(\frac{V_n - V \cos \frac{\beta}{2}}{\sqrt{B}} \right).$$

После подстановки постоянной интегрирования в выражение (24), получим:

$$\operatorname{arth} \left(\frac{V_n - V_u}{\sqrt{B}} \right) = \sqrt{B} k_n t + \operatorname{arth} \left(\frac{V_n - V \cos \frac{\beta}{2}}{\sqrt{B}} \right). \quad (25)$$

С уравнения (25) определяется можно определить скорость скольжения частицы минеральных удобрений V_u по поверхности конусного делителя:

$$V_u = V_n - \sqrt{-\frac{fg}{k_n} \sin \frac{\beta}{2} + \frac{g}{k_n} \cos \frac{\beta}{2}} * \left\{ \sqrt{-\frac{fg}{k_n} \sin \frac{\beta}{2} + \frac{g}{k_n} \cos \frac{\beta}{2}} k_n t + \operatorname{arth} \left(\frac{V_n - V \cos \frac{\beta}{2}}{\sqrt{-\frac{fg}{k_n} \sin \frac{\beta}{2} + \frac{g}{k_n} \cos \frac{\beta}{2}}} \right) \right\}. \quad (26)$$

Следовательно, при скольжении частиц минеральных удобрений по телу конусного делителя, происходят определенные потери скорости перемещения частиц, а также при различных их массовых характеристиках, скорость скольжения V_u будет разной (рис. 7).

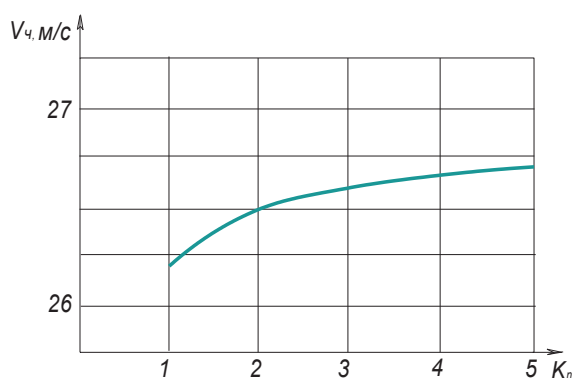


Рис. 7. Зависимость скорости скольжения частицы минеральных удобрений по конусному делителю от ее коэффициента парусности.

Fig. 7. Relationship between the slip velocity of particle of mineral fertilizers from its tapered divider ratio Sail

ВЫВОДЫ

Разная скорость скольжения частиц минеральных удобрений является причиной различных траекторий движения частиц минеральных удобрений по телу делителя, и как следствие, нарушением равномерности распределения воздушно-минудобенной смеси между высевающих каналами делительной головки пневматического высевающего аппарата. Это дает возможность сделать вывод, что для повышения точности распределения минеральных удобрений в делительной головке пневматического высевающего аппарата - нужно минимизировать тело делителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. De Carli, 2009: Ed., In Preprints, IFAC Workshop on Motion Control, In tell. Automat., Perugia, Oct.19.
2. F. Pfeiffer and G. Brandenburg 1995: Ed., in Proc. 3rd IFAC Workshop on Motion Control, Munich, Oct. 15.
3. H. Kazerooni and Y. Hori 1994: Eds., in Proc. 3rd Int. Workshop on advanced Motion Control, Berkeley, Mar. 14.
4. I. Luh, M. Walker, and R. Paul 1980: Resolved-acceleration control vol. 28. - no3 -. 468-474.
5. K. Ohishi et al.1993: Eds., I Robot Sor. Jpn., Special Issue on advanced motion control.- Vol.11-No.4.
6. K. Ohnishi 1990: Ed., in Proc. Int. Workshop on advanced Motion Control, Yokohama, Apr. 90.
7. O. Khatib 1987: A unified approach for motion and force control of robotic manipulators //IEEEI. Robot., Automat.-vol. RA-3-no. 1.- 43-53.
8. S. Okuma 1992: Ed., In Proc. 2nd Int. Workshop on Advanced Motion Control, Nagoya, Mar. 92.
9. Yaskawa Electronic Co. 1971: Registered Trade Mark no.46-32713, 71.
10. Spong M. 1987: Modeling and control of elastic joint robots/M. Spong//I. Dynamic Syst., Measurement, Control. - V.109, No. 4. - 310-319.
11. Ferretti G. 2004: Impedance control for elastic joint in industrial manipulators/G.Ferretti, G. Magnani, P. Rocco//IEEE Trans. Robot. Automat. - V.20, No.3. - 488-498.
12. Ott C. 2008: On the passivity - based impedance control of flexible joint robots/ C. Ott, A. Albu - Schaeffer, A. Kugi, G. Hirzinger//IEEE Trans. Robot. -V.24, No.2. - 416 - 429.
13. Thummel M. 2005: Vibration control of elastic joint robots by inverse dynamics models/M. Thummel, M. Otter, I. Bals//Solid Mechan. Appl. -No. 130. -343-354.
14. Zollo L. 2005: Compliance control for an anthropomorphic robot with elastic joints: Theory and experiments/ L. Zollo, B. Siciliano, A.D. Suca, E. Guglielmelli et al.//I. Llynam. Syst., measurement, Control. - V.127, No3. -321-328.
15. Dhaonadi R. 2003: A new Dynamic model of hysteresis in Harmonic Drivers/R. Dhaouadi, F.H. Ghorbel, P.S. Gandhi//IEEE Trans. Industrial Electron. -V.50, No. 6. - 1165 - 1171.
16. Taghirad H. 2005: A nonlinear model for harmonic drive friction and compliance//H. Taghizad, P. Delanger//Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA 97). -248 - 253.
17. Tjalijowidodo T. 2005: Modeling and identification of nonlinear torsional stiffness in Harmonic Drive/T. Tjabjowidodo, F. Al - Bender. H.V. Brussel// Proc. 5 Eur. nonlinear Dynam. Conf. - 1809 - 1816.
18. Al-Bender F. 2008: characterization of friction force dynamics/F. Al-Bender, I. Swevers//IEEE Control Syst. magazine. - V.28, No. 6. - 64-81.
19. Worden K. 2007: Identification of pre-sliding and sliding friction dynamics: Grey box and black-box models/K. Worden, C.X. Wond, U. Parlitz, A. Hornstein, et al // Mechan. Syst. Signal Proc. -V.21. - №1. - 514-534.
20. Rizos D. 2009: Friction identification based upon the Sugre and Maxwell Slip models/D. Rizos, S. Fassois//IEEE Trans. Control syst. technology. - V.17.-No. 1- 153-160.
21. Ruderman M. 2009: Robust identification of nonlinear frictional dynamics for advanced controller design/M. Ruderman, F. Hoffmann, I.Kretter, I.Brang, et al. //Proc. IFAC 15 Sympos. Syst. Identificat. (SYSID2009). - Saint - Malo, France, -474-479.

22. Seyffertl W. 1995: Nonlinear modeling and parameter identification of harmonic Drive robotic transmissions/ W. Seyfferth, A.I. Maghzal, I. Angeles//Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat – 3027-3032.

**CONTACT MATTER OF FERTILIZERS
WITH CONICAL DIVISOR
OF PNEUMATIC SOWING UNIT**

Summary. The influence of the coefficient of lateral particle of mineral fertilizers on their speed and trajectory of movement on the surface of cone splitter pneumatic sowing machine distributor who works in technology for precision farming.

Key words: divider, particle mixture seeding channel, transportation, air flow, slipping.