

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УГЛА НАКЛОНА КАНАЛОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ

*Николай Бакум, Николай Крекот, Василий Ольшанский, Николай Винокуров,
Александр Козий, Александр Вотченко*

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко*

Ул. Артема 44, Харьков, Украина. E-mail: khstua@lin.com.ua

*Nickolay Bakum, Nickolay Krekot, Vasily Olshansky, Nickolay Vinokurov,
Aleksandr Koziy, Aleksandr Votchenko*

*Kharkov national technical university of agriculture of the named after Petra Vasilenko
St. Artem 44, Kharkiv, Ukraine. E-mail: khstua@lin.com.ua*

Аннотация. На кафедре сельскохозяйственных машин ХНТУСГ им. Петра Василенко разработан модернизированный пневматический сепаратор с наклонным пневматическим каналом и регулируемой его шириной в котором разделение компонентов происходит в сопутствующем воздушном потоке неравномерном по высоте канала.

Для обоснования параметров процесса сепарации мелкосемянных смесей в разработанном сепараторе получено аналитическое решение упрощенных дифференциальных уравнений движения материальной точки в восходящем воздушном потоке.

На основе аналитического решения задачи баллистики частиц, полученного в результате частичной линеаризации нелинейных уравнений их движения, полученные уравнения, которые позволили определить закономерности перемещения частиц в восходящем воздушном потоке, которые совпадают с результатами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений (погрешность не превышает 4,3%) и экспериментальных данных (средняя погрешность не превышает 5% в пределах длины экспериментального сепарирующего канала). При изменении угла наклона в пределах $10 \dots 40^\circ$ для частиц с коэффициентами парусности от 0,2 до $1,2 \text{ м}^{-1}$ разделяющая способность канала изменяется в среднем на 5,5% на каждые десять градусов при $V=2 \text{ м/с}$, на $6,9\%/10^\circ$ – при $V=6 \text{ м/с}$, и на $5,8\%/10^\circ$ - при $V=10 \text{ м/с}$. Длина рабочей части канала, для реализации разделяющей способности, для частиц с исследуемыми коэффициентами парусности, изменяется в пределах 0,2 м при $V=2 \text{ м/с}$, и 2,5 м – при $V=10 \text{ м/с}$. Учитывая диапазон изменения коэффициентов парусности семян овощных культур (без учета коэффициентов парусности легких примесей, имеющих в этих семенных смесях), при изменении угла наклона рабочего канала в пределах от 40° до 50° его необходимая длина не превышает 2 м.

Ключевые слова: частица, дифференциальные уравнения, пневматический сепаратор, семенная смесь, сортировка.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из основных факторов получения сельскохозяйственной продукции низкой себестоимости является использование высококачественного посевного материала. При механизированном обмолоте семенников в основную фракцию выделяется как полноценное так и незрелое семян, а также значительное количество коробочек соцветий, долек стеблей, минеральных примесей различного фракционного состава и семена сорняков. Такой материал имеет низкую сыпучесть, повышенную влажность, что ухудшает процесс разделения на сепараторах с решетными, триерными или специальными (вибрационные шероховатые плоскости) рабочими поверхностями. Кроме того повышенная влажность приводит к потерям посевных свойств семян при хранении, что требует предварительной очистки или сушки семенного вороха. Поэтому разработка конструкций сепараторов способных эффективно разделять такие смеси является актуальной задачей для овощеводства [1, 7, 11, 15].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Широко используются в машинах для послеуборочной обработки семенного материала воздушные очистки с вертикальным сепарирующим каналом [6, 16]. Основные задачи, которые решают такие очистители является отделение легких примесей. Широкое использование их в производстве подтверждает эффективность на предварительной очистке семенных смесей зерновых культур [1]. Мелкосеменные смеси имеют незначительные различия аэродинамических свойств их компонентов поэтому разделение таких смесей в вертикальных воздушных каналах малоэффективно. На кафедре сельскохозяйственных машин ХНТУСХ им. Петра Василенко разработан пневматический сепаратор с наклонным каналом регулируемой ширины в котором разделение компонентов происходит в сопутствующем воздушном потоке [2, 3]. Результатами

лабораторных и производственных исследований подтверждено его эффективность [4, 5, 8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследовать влияние основных параметров на движение частиц в сопутствующем воздушном потоке пневматического сепаратора с наклоненным рабочим каналом регулируемой ширины.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим наклоненный к горизонту, под углом α , воздушный канал прямоугольного сечения у которого расстояние между верхней и нижней стенками равно h . Скорость восходящего воздушного потока направлена параллельно стенкам канала и является постоянной величиной.

Для удобства движение частицы, как материальной точки, в канале рассматриваем в прямоугольной системе координат повернутой на угол α . Это движение описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\ddot{x} - k(V - \dot{x})\sqrt{(V - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} = -g_1 = -g \sin \alpha; \quad (1)$$

$$\ddot{y} + k\dot{y}\sqrt{(V - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} = g_2 = g \cos \alpha,$$

где: g – ускорение свободного падения,

$V = \frac{V_0 \cdot S_0}{\sigma \cdot h} \cdot \eta_n$ – скорость воздушного потока в канале, V_0 – скорость воздушного потока в выходном патрубке вентилятора, S_0 – площадь поперечного сечения выходного патрубка, σ – рабочая ширина сепарирующего канала, η_n – коэффициент полезного действия проставки, k – коэффициент парусности частицы, связанный со скоростью его витания \mathcal{G}_n соотношением:

$$k = g \mathcal{G}_n^{-2}. \quad (2)$$

Исходными условиями для уравнений (1) принимаем:

$$x(0) = y(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = \mathcal{G}_1; \quad \dot{y}(0) = \mathcal{G}_2, \quad (3)$$

где: \mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_2 – проекции начальной скорости частицы, с которой она попадает в канал.

Для решения системы (1) упростим её уравнения. Причем, выполним не полную, а их частичную линеаризацию. В работах [13, 17] принимали $\sqrt{(V - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \approx 1,06 \cdot V = const$. В нашей работе используем другие соображения. Обычно, наклон пневматический канал конструктивно выполняется так, что его длина значительно превышает высоту. Поэтому в конце полета частицы выполняются неравенства: $x(t) \gg y(t)$; $\dot{y} \ll (V - \dot{x})^2$. Учитывая эти неравенства систему уравнений (1) запишем в упрощенном виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - k(V - \dot{x})^2 &= -g \sin \alpha; \\ \ddot{y} + k \cdot V \cdot \dot{y} &= g \cos \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Первое уравнение в этой системе нелинейное, а второе линейное. Такое упрощение привело к полulinейной модели, в которой движение частицы на большее расстояние вдоль оси ox , описывается не-

линейным уравнением, а на меньшую, вдоль оси oy , – линейным.

Решив первое уравнение системы получим:

$$x(t) = (V + \mathcal{G}^*) \cdot t - \frac{1}{k} \ln \frac{\exp(2k\mathcal{G}^*t) - c}{1 - c}, \quad (5)$$

$$\text{где: } \mathcal{G}^* = \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{k}}; \quad c = \frac{V - \mathcal{G}_1 - \mathcal{G}^*}{V - \mathcal{G}_1 + \mathcal{G}^*}.$$

Решение второго уравнения системы (4), с учетом исходных условий (3), имеет вид:

$$y = \frac{1}{\beta} \left(\left(\mathcal{G}_2 - \frac{g_2}{\beta} \right) \cdot (1 - \exp(-\beta t)) + g_2 \cdot t \right), \quad (7)$$

где: $\beta = k \cdot V$.

Подставив в эти уравнения известные величины V , k , g , и α определяем скорости и величину перемещения частицы вдоль соответствующих осей ox и oy в определенный момент времени.

По полученным упрощенными уравнениями выполняем исследования результаты которых приведены на рис. 1–3.

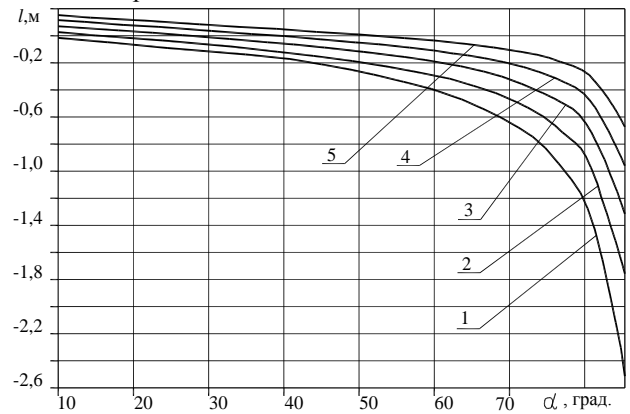


Рис. 1. Зависимость дальности полета частиц в наклонном канале от величины угла наклона, при $V = 2$ м/с: 1 – $k = 0,20$ м⁻¹; 2 – $k = 0,45$ м⁻¹; 3 – $k = 0,70$ м⁻¹; 4 – $k = 0,95$ м⁻¹; 5 – $k = 1,20$ м⁻¹

Fig. 1. The dependence of the flying range of the particles in a downward channel from the angle of inclination at $V = 2$ м/с: 1 – $k = 0,20$ м⁻¹; 2 – $k = 0,45$ м⁻¹; 3 – $k = 0,70$ м⁻¹; 4 – $k = 0,95$ м⁻¹; 5 – $k = 1,20$ м⁻¹

При увеличении угла α это различие увеличивается. Так, при $V = 2$ м/с и $\alpha = 85^\circ$ дальность полета частиц с k от 0,2 до 1,2 м⁻¹ меняется, соответственно, от 2,510 до 0,666 м, при $V = 6$ м/с – от 0,316 до 5,539 м, а при $V = 10$ м/с – от 2,757 до 14,169 м. То есть при $\alpha = 85^\circ$ по сравнению с предыдущими исследованиями, l в среднем увеличилась на 0,7 м, что составляет 23,89%. При этом следует отметить, что отличие увеличивается как при увеличении угла наклона канала, так и при увеличении скорости воздушного потока. Интенсивность изменения дальности полета частиц в зависимости от изменения угла наклона канала в пределах 40° для частиц с коэффициентами парусности $k = 0,20 \dots 1,20$ м⁻¹ меняется от 0,026 до 0,044 метров на десять градусов изменения угла.

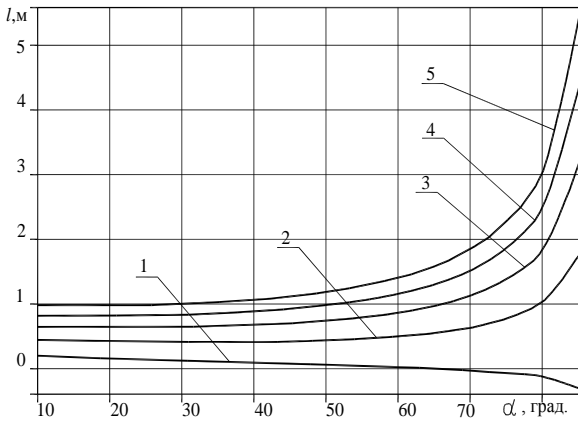


Рис. 2. Зависимость дальности полета частиц в наклонном канале от величины угла наклона, при $V = 6$ м/с:

1 – $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$; 2 – $k = 0,45 \text{ м}^{-1}$; 3 – $k = 0,70 \text{ м}^{-1}$; 4 – $k = 0,95 \text{ м}^{-1}$; 5 – $k = 1,20 \text{ м}^{-1}$

Fig. 2. The dependence of the flying range l of the particles in a downward channel from the angle α of inclination at $V = 6$ м/с:

1 – $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$; 2 – $k = 0,45 \text{ м}^{-1}$; 3 – $k = 0,70 \text{ м}^{-1}$; 4 – $k = 0,95 \text{ м}^{-1}$; 5 – $k = 1,20 \text{ м}^{-1}$

Из графиков видно, что по полученным уравнениями определена закономерность изменения параметров движения частиц аналогичная закономерностям полученным в предыдущих исследованиях [20]. При этом величина перемещения частиц вдоль канала несколько отличается. Так, при $V = 2$ м/с и $\alpha = 10^\circ$ частицы с коэффициентом парусности k от 0,20 до $1,20 \text{ м}^{-1}$ перемещаются, соответственно, на расстояние от 0,006 до 0,164 м.

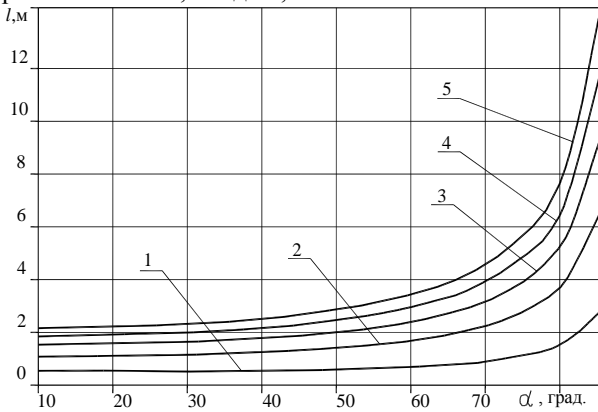


Рис. 3. Зависимость дальности полета частиц в наклонном канале от величины угла наклона, при $V = 10$ м/с:

1 – $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$; 2 – $k = 0,45 \text{ м}^{-1}$; 3 – $k = 0,70 \text{ м}^{-1}$; 4 – $k = 0,95 \text{ м}^{-1}$; 5 – $k = 1,20 \text{ м}^{-1}$

Fig. 3. The dependence of the flying range of the particles in a downward channel from the angle of inclination at $V = 10$ м/с:

1 – $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$; 2 – $k = 0,45 \text{ м}^{-1}$; 3 – $k = 0,70 \text{ м}^{-1}$; 4 – $k = 0,95 \text{ м}^{-1}$; 5 – $k = 1,20 \text{ м}^{-1}$

При скоростях $V = 6$ м/с и $V = 10$ м/с дальность перемещения частиц меняется от 0,197 до 0,973 м и, соответственно, от 0,554 до 2,129 м. Эти значения отличались от значений полученных в предыдущих исследованиях [20] в среднем на 0,04 м, что состав-

ляет 6,84% наклона при $V = 2$ м/с, от 0,025 до $0,029 \text{ м}/10^\circ$ при $V = 6$ м/с, и от 0,003 до $0,091 \text{ м}/10^\circ$ при $V = 10$ м/с. в пределах 0,2 м при $V = 2$ м/с, 1,07 м при $V = 6$ м/с, и 2,49 м при $V = 10$ м/с. Изменение величины перемещения частиц вдоль канала при углах больших 40° происходит более интенсивно особенно для частиц с большим коэффициентом парусности. Это повышает разделяющую способность канала но необходимая рабочая длина канала для её реализации превышает 10 м что нецелесообразно для конструкций пневматических сепараторов.

ВЫВОДЫ

1. Полученные формулы можно использовать для расчетов параметров полета частиц в каналах пневмосепараторов, а также для определения разделяющей способности каналов по определенным значениям коэффициентов парусности компонентов сепарирующихся семенных смесей.

2. На основе аналитического решения задачи баллистики частиц, полученного в результате частичной линеаризации нелинейных уравнений их движения, получены уравнения, которые позволили определить закономерности перемещения частиц в восходящем воздушном потоке, которые совпадают с результатами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений (погрешность до 4,3%) и экспериментальных данных (средняя погрешность до 5% в пределах длины экспериментального сепарирующего канала).

3. При изменении угла наклона в пределах $10-40^\circ$ для частиц с коэффициентами парусности $k = 0,20 \dots 1,20 \text{ м}^{-1}$ разделяющая способность канала изменяется в среднем на 5,5% на каждые десять градусов при $V = 2$ м/с, на $6,9\%/10^\circ$ – при $V = 6$ м/с, и на $5,8\%$ на 10° – при $V = 10$ м/с. Длина рабочей части канала, для реализации разделяющей способности, для частиц с исследуемыми коэффициентами парусности, не превышает 0,2 м при $V = 2$ м/с, и 2,5 м – при $V = 10$ м/с. Учитывая диапазон изменения коэффициентов парусности (без учета коэффициентов парусности легких примесей), при изменении угла наклона рабочего канала в пределах от $40^\circ-50^\circ$ его необходимая длина не превышает 2 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кожуховский И.Е.** 1974. Зерноочистительные машины. – М: Машиностроение, – 200.
2. **Бакум Н.В., Крехот Н.Н.** 2010. Патент №51675 Украина, МПК (2009) В07В4/00. Пневматический сепаратор – № 201001264; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14. – 4. (Украина)
3. **Бакум Н.В., Манчинский Ю.А., Абдуев М.М., Крехот Н.Н.** 2003. Декларационный патент на изобретение №70667А Украины, МКІ В07В4 / 00. Способ разделения семенных смесей в наклоненном воздушном потоке и устройство для его осуществления – № 20031212049; Заявл. 22.12.2003; Опубл. 15.10.2004. Бюл. № 10. – 4. (Украина).

4. **Бакум Н.В., Кречот Н.Н., Абдуев М.М., Вотченко А.С., Шенгур А.А., Могильный Н.В. 2011.** К обоснованию эффективности использования пневматического сепаратора с наклонным воздушным каналом в качестве машины предварительной сепарации семенных смесей моркови / Механизация сельскохозяйственного производства: Вестник ХНТУСХ им. П. Василенко. – Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенко. – Вып. 107, т.1.– 214–220. (Украина)
5. **Бакум Н.В., Кречот Н.Н., Абдуев М.М., Вотченко А.С., Леонов В.П., Шевченко Н.И. 2008.** Результаты производственных испытаний модернизированного пневматического сепаратора с наклонным воздушным каналом / Механизация сельскохозяйственного производства: Вестник ХНТУСХ им. П. Василенко. – Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенко. – Вып. 75, т.2. – 72–78. (Украина)
6. **Васильковский Н.И., Гончарова С.Я., Лещенко С.М., Нестеренко А.В. 2006.** Анализ современного состояния воздушной сепарации зерна / Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин: Общегосударственный межведомственный научно-технический сборник. – Вып. 36. – Кировоград: КНТУ. – 111–114. (Украина)
7. **Ермак В.П. 2003.** Обоснование способа сепарирования подсолнечника в воздушных потоках: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Луганск. – 21. (Украина)
8. **Абдуев М.М. 2007.** Обоснование параметров сепаратора с наклонным воздушным каналом для разделения зерновых смесей: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков. – 21. (Украина)
9. **Степаненко С.П. 2008.** Исследование процесса пневматической сепарации семян в кольцевом зигзагообразном сепараторе // Механизация сельскохозяйственного производства: Вестник ХНТУСХ. – Харьков: ХНТУСХ. – 59–65. (Украина)
10. **Бакум Н.В., Кречот Н.Н. 2009.** Исследование влияния основных параметров пневматического сепаратора на качество очистки семян редиса // Сельскохозяйственные машины: Сб. науч. ст. – Вып. 18. Луцк: ЛНТУ. – 14–19. (Украина)
11. **Лещенко С.Н., Васильковский А.Н., Васильковский Н.И., Гончаров В.В. 2009.** Повышение эффективности предварительной очистки зерновых смесей // Сельскохозяйственные машины: Сб. науч. ст. – Вып. 18. Луцк: ЛНТУ. – 230–235. (Украина)
12. **Бакум Н.В., Манчинский Ю.А., Кречот Н.Н., Абдуев М.М. 2005.** Пневматический сепаратор с наклонным воздушным каналом / Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения : Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Белгород, 12–14 мая 2005 г. – Белгород: БГСХА. – 173.
13. **Зайка П.М. 2004.** Теория сельскохозяйственных машин (Т.2, ч. 2, кн. 2.). Зерноуборочные машины. – Х.: ОКО. – 404. (Украина)
14. **Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jeffrey D.J. and Knuth D.E. 1996.** On The Lambert W Function // Advances in Computational Math., V. 5, p. 329–359.
15. **Fariel Shafee 2007.** Lambert function and new non-extensive form of entropy // IMA Journal of Applied Mathematics, V. 72, 785–800.
16. **Кучеренко С.И., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В., Тищенко Л.Н. 2007.** Баллистика капель, которые испаряются при полете / Харьков: ХНТУСХ. – 304. (Украина)
17. **Горгинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. 1980.** Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях – М.: Колос. – 304.
18. **Panasiewicz M., Zawiyak K., Kusicka E., Sobczak P. 2006.** Purification and separation of loose materials in a pneumatic system with vertical air stream / Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – Lublin, 2006 – Tom 6.. – 171–176.
19. **Пастушенко С., Огиенко Н. 2012.** Теоретические аспекты исследования процесса сепарации технологической семенной массы овощебахчевых культур / Motrol., – Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Tom 14, – №2. – 13–20.
20. **Бакум Н.В., Кречот Н.Н., Ольшанский В.П., Винокуров Н.А. 2013.** Пневматический сепаратор для очистки и сортирования семян овощных культур / Commission of motorization and energetics in agriculture (MOTROL): – Lublin, Poland. – Vol. 15, № 7. – 177–185.

RATIONALE FOR SELECTION ANGLE CHANNEL PNEUMATIC SEPARATORS

Summary. The department of agricultural machinery HNTUSG them. Peter Vasilenko developed modernized pneumatic separator with a tilted air duct and adjustable width of which separation of the components takes place in the accompanying non-uniform air flow channel height.

To justify the parameters of the process of separation of mixtures in small seeded separator developed an analytical solution of the simplified differential equations of motion of a material point in the upward air flow.

On the basis of the analytical solution of the problem of ballistics particles resulting from partial linearization nonlinear equations of motion derived equations that allowed to determine patterns of movement of particles in an upward air flow, consistent with the results of numerical integration of nonlinear differential equations (error does not exceed 4.3%) and experimental data (the average margin of error of 5% within the length of the pilot channel separovalnih). When changing the angle in the range 10 ... 40° for particles with sail coefficients 0.2 to 1.2 m⁻¹ separates the channel is changed on average by 5.5% for every ten degrees in V=2 m/s, 6.9% of 10° – at V=6 m/s, and 5.8%/10° – at V=10 m/s. The length of the portion of the channel, for implementing the separating capacity for particles with test coefficients sail varies within 0.2 m with V=2 m/s, and 2.5 m – V=10 m/s. Given the range of variation coefficients sail vegetable seeds (excluding factors sail light impurities present in these seed mixtures), while changing the tilt of the working channel in the range of 40° to 50° it must be not longer than 2 m.

Key words: particle differential equations, pneumatic separator, seed mixture, sorting.