

Таблица 1. – Техническая характеристика грядоделателя навесного ГН-1

Наименование показателя	Значение
Тип	навесной
Марка	ГН-1
Рабочая скорость, км/ч	6,1–4,1
Производительность за час основного времени, га	0,60–0,90
Производительность за час сменного времени, га	0,45–0,67
Производительность за час эксплуатационного времени, га	0,43–0,64
Масса, кг, не более	1450
Габаритные размеры грядоделателя, мм, не более:	
– в транспортном положении	
– длина	2910
– ширина	3350
– высота	2730
– в рабочем положении	
– длина	2980
– ширина	4980
– высота	2060
Количество обслуживающего персонала, тракторист-машинист	1
Дорожный просвет, мм, не менее	300
Эксплуатационно-технологические коэффициенты, не менее:	
– технологического обслуживания;	0,99
– коэффициент использования сменного времени;	0,99
– коэффициент использования эксплуатационного времени;	0,72
– коэффициент надежности технологического процесса	0,75

### Заключение

Грядоделатель навесной ГН-1 успешно прошел государственные приемочные испытания в ГУ ИЦ «Белорусская МИС», протокол приемочных испытаний № 062Б 1/8-2016ИЦ от 15 ноября 2016 г., и готов к постановке на серийное производство.

Грядоделатель навесной ГН-1 нарезает качественную гряду с заданными параметрами согласно агротехническим требованиям, что в дальнейшем позволит повысить урожайность возделываемой продукции на грядах на 30–40 %.

В конечном итоге срок окупаемости грядоделателя навесного ГН-1 составит 4,8 года. Годовой приведенный экономический эффект от его использования составит 6175 белорусских рублей.

УДК 631.365

Поступила в редакцию 30.06.2017  
Received 30.06.2017

**В. П. Чеботарев**

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*e-mail: v.p.chebotarev@tut.by*

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРИРУЮЩЕГО КАНАЛА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕРНА

В статье приводятся результаты выполненных исследований по расчету параметров пневматического сепарирующего канала для очистки зерна. Для расчета параметров пневматического сепарирующего канала необходимо теоретически рассмотреть пневматическое сепарирование как физический процесс разделения небольшого числа частиц тяжелого и легкого компонентов смеси вертикальным воздушным потоком. Исходя из заданной производительности зерноочистительной машины, по теоретическим зависи-

мостям установлены скорость воздушного потока, длина и глубина пневматического сепарирующего канала.

*Ключевые слова:* сепарирование, воздушные сепараторы, зерновая смесь, сепарирующий канал, скорость воздушного потока, аэродинамическое сопротивление, удельная зерновая нагрузка.

V. P. Chebotarev

*Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university»*

*Minsk, Republic of Belarus*

*e-mail: v.p.chebotarev@tut.by*

## CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE PNEUMATIC SEPARATING CHANNEL FOR GRAIN CLEANING

The article presents the results of studies on the calculation of the parameters of the pneumatic separation channel for grain cleaning. To calculate the parameters of the pneumatic separation channel, it is necessary to theoretically consider the pneumatic separation as a physical process of separating a small number of particles of the heavy and light components of the mixture by a vertical air flow. Based on the specified productivity of the grain cleaning machine, the theoretical dependencies are established: airflow velocity, length and depth of the pneumatic separation duct.

*Keywords:* separation, air separators, grain mixture, separation channel, air speed, aerodynamic resistance, specific grain load.

### Введение

Пневматическое сепарирование – это процесс разделения зерносоломистых смесей воздушным потоком в воздушном сепараторе. Воздушные сепараторы предназначены для разделения сыпучих продуктов с помощью воздушного потока на основе различия аэродинамических свойств частиц разделяемых компонентов смеси [1, 2]. Наибольшее распространение, благодаря простой и компактной конструкции, получили устройства, сепарирующие зерновую смесь в вертикальном воздушном потоке. Основным рабочим органом, обеспечивающим пневматическое сепарирование, является пневматический сепарирующий канал.

### Основная часть

Для расчета параметров пневматического сепарирующего канала необходимо теоретически рассмотреть пневматическое сепарирование как физический процесс разделения небольшого числа частиц тяжелого и легкого компонентов смеси вертикальным воздушным потоком. Сепарируемая частица  $M$  массой  $m$  поступает в пневматический сепарирующий канал (рисунок 1) под углом к горизонтали с некоторой начальной скоростью  $v_0$ . После попадания в воздушный поток канала частица совершает сложное движение, состоящее из переносного вместе с воздушным потоком и относительного относительно потока. Воздушный поток действует на частицу со скоростью  $v_A$ .

К частице приложены следующие силы: сила тяжести  $G$  и сила сопротивления воздушного потока  $R_A$ , направленная по касательной к траектории в сторону, противоположную движению. Сила сопротивления воздушному потоку (реакция воздуха)

$$R_A = \xi_A \rho_A S_M v_A^2 / 2,$$

а с учетом  $k_A = \xi_A \rho_A S_M / 2m$  (коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления):

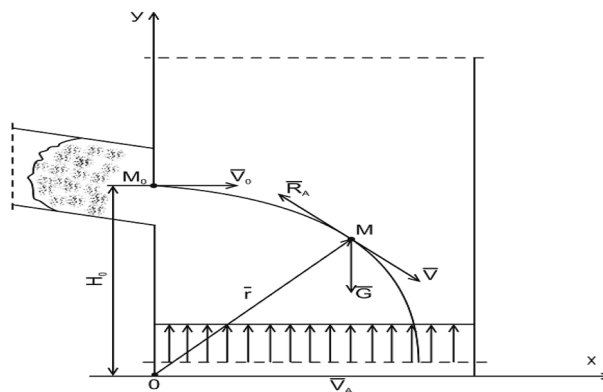


Рисунок 1. – Схема сил, действующих на частицу  $M$  в вертикальном пневмосепарирующем канале

$$R_A = m\kappa_A v_A^2,$$

где  $\xi_A$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$S_M$  – миделево сечение зерновки,  $m^2$ ;

$\rho_A$  – плотность воздуха,  $kg/m^3$ .

Уравнение движения частицы в векторной форме будет иметь следующий вид:

$$mr'' = G + R_A,$$

или

$$mr'' = mg + m\kappa_A. \quad (1)$$

Из выражения (1) определяется уравнение движения:

$$r'' = g + \kappa_A v_A^2. \quad (2)$$

Проецирование составляющих уравнения движения (2), в соответствии с рисунком 1, на оси  $Ox$  и  $Oy$  позволяет получить систему линейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$dx^2/d^2\tau - \kappa_A v_{Ax}^2 = 0; \quad (3)$$

$$dy^2/d^2\tau + g - \kappa_A v_{Ay}^2 = 0. \quad (4)$$

Решение уравнений (3) и (4) осуществляется путем разделения переменных. Предварительно, для упрощения решения, в уравнениях осуществлена соответствующая замена переменных  $p = dx/d\tau$  и  $q = dy/d\tau$ . После соответствующей замены уравнение (3) примет следующий вид:

$$dp/d\tau = \kappa_A v_{Ax}^2. \quad (5)$$

Разделение переменных, интегрирование выражения (5) позволяет получить общее решение уравнения (3):

$$p = \kappa_A v_{Ax}^2 \tau + C_1. \quad (6)$$

Нахождение постоянной интегрирования  $C_1$  осуществляется на основе начальных условий:  $\tau = 0$ ,  $p = dx/d\tau = v_{0x}$ . Тогда  $C_1 = v_{0x}$ . Подстановка полученного значения  $C_1$  и обратная замена переменных в выражении (6) позволяет получить уравнение движения частицы вдоль оси  $Ox$  следующим образом:

$$dx/d\tau = \kappa_A v_{Ax}^2 \tau + v_{0x}. \quad (7)$$

После разделения переменных и интегрирования выражения (7) будет получено в общем виде уравнение движения частицы по оси  $Ox$ :

$$x = \kappa_A v_{Ax}^2 \tau^2 + v_{0x} \tau + C_2. \quad (8)$$

Постоянная интегрирования в уравнении (8) определится исходя из начальных условий при  $\tau = 0$ ,  $x = 0$  и будет равна  $C_2 = 0$ . Тогда уравнение движения частицы  $M$  вдоль оси  $Ox$ :

$$x = \kappa_A v_{Ax}^2 \tau^2 + v_{0x} \tau.$$

Аналогично проводится решение уравнения (4) после соответствующей замены переменной  $dy/d\tau = q$  и необходимых преобразований:

$$dq/d\tau = \kappa_A v_{Ay}^2 - g;$$

$$dq = (\kappa_A v_{Ay}^2 - g) d\tau \quad (9)$$

и интегрирования выражения (9).

Постоянная интегрирования  $C_3$  определяется исходя из начальных условий при  $\tau = 0$ ,  $q = dy/d\tau = v_{0y}$ . Тогда  $C_3 = v_{0y}$ . Обратная замена переменных в выражении (9), разделение переменных и последующее интегрирование позволяют получить уравнение перемещения частицы  $M$  по оси  $Oy$ .

$$\begin{aligned} dy/d\tau &= (\kappa_A v_{Ay}^2 - g) \tau + v_{0y} \\ dy &= (\kappa_A v_{Ay}^2 - g) \tau d\tau + v_{0y} d\tau \\ y &= (\kappa_A v_{Ay}^2 - g) \tau^2/2 + v_{0y} \tau + C_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Постоянная интегрирования в выражении (10)  $C_4$  определится исходя из того условия, что при  $\tau = 0$   $y = H_0$ . Тогда уравнение перемещения частицы  $M$  вдоль оси  $Oy$ :

$$y = (\kappa_A v_{Ay}^2 - g) \tau^2/2 + v_{0y} \tau + H_0. \quad (11)$$

Для теоретического исследования влияния вертикального воздушного потока на разделение смеси были решены полученные исходные уравнения (6) и (11) с целью построения траекторий движения частиц (зерновок и примесей) в широких пределах варьируемых параметров:  $v_A = 8-12$  м/с;  $v_0 = 0,4-0,8$  м/с;  $\kappa_A = 0,01-10,0$  м<sup>-1</sup> при ширине канала  $y = 0,2$  м, соответствующей наибольшим значениям, устанавливаемым у зерноочистительных машин [3].

На рисунке 2 изображены траектории частиц, полученные согласно частному решению системы дифференциальных уравнений (3) и (4) при различных скоростях воздушного потока  $v_A$ , начальных скоростях частиц  $v_0$  и коэффициентах пропорциональности силы аэродинамического сопротивления  $\kappa_A$ .

Анализ траекторий позволяет сделать выводы о возможности разделения частиц в вертикальном воздушном канале в соответствии с их аэродинамическими характеристиками и установить влияние этого параметра на процесс разделения. При увеличении скорости воздушного потока замедляется движение частиц, выделяющихся в нижней части канала, их траектория делается более полой, а при больших скоростях (10–12 м/с) для частиц с высоким значением  $\kappa_A$  меняется не только характер траектории, но и направление их перемещения.

Анализ траекторий движения частиц показывает, что полное разделение смеси в канале не будет обеспечено в связи с перекрывающимися значениями признаков разделения частиц смеси.

При реальных значениях  $v_0 = 6$  м/с все частицы с  $\kappa_A < 1,0$  м<sup>-1</sup> выделяются в нижней части канала, а при  $v_0 = 9$  м/с с воздушным потоком практически уносятся все частицы с  $\kappa_A > 1,0$  м<sup>-1</sup>. Поэтому предельное значение разделения смесей следует устанавливать по величинам  $\kappa_A$  или  $v_A$ , характерным для наиболее легких частиц основного материала. Исследование траекторий позволяет уточнить влияние начальной скорости  $v_0$  на процесс делимости смеси. Аналитические зависимости (8) и (11) позволяют с достаточно высокой степенью точности определить перемещения и скорости всех частиц в пневматическом сепарирующем канале. Воздушный поток замедляет движение более тяжелых частиц. Это особенно проявляется на режимах с высокими скоростями воздушного потока  $v_A = 9$  м/с, в которых характер их движения приближается к равномерному, а на режиме  $v_A = 12$  м/с оно становится равнозамедленным.

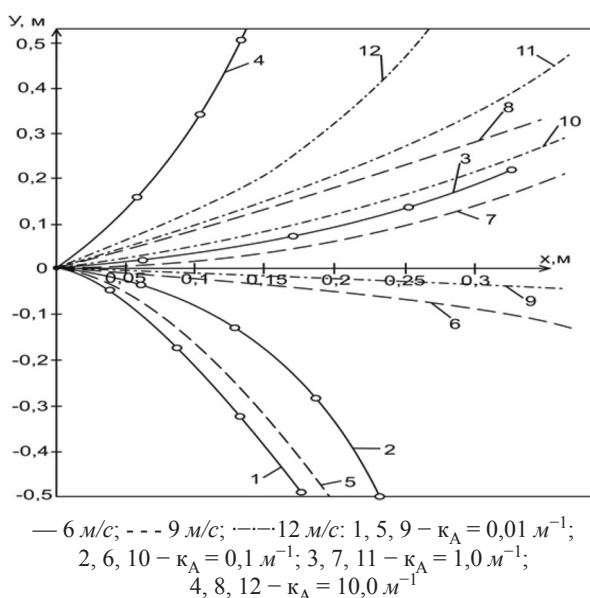


Рисунок 2. — Траектории движения частиц сепарируемой смеси, горизонтально подаваемых в пневмосепарирующий канал с постоянной скоростью 0,4 м/с, при различных скоростях воздушного потока

Скорость воздушного потока в пневматическом сепарирующем канале является одним из основных параметров, определяющих процесс сепарации зерносоломистых смесей. Производительность пневматического сепарирования определяется его конструктивными параметрами. При этом расчет конструктивных параметров осуществляется на основе коэффициента удельной зерновой нагрузки ( $кг/(см·ч)$ ) [4–6]. Однако использование данного коэффициента имеет существенный недостаток – не учитывается глубина пневматического сепарирующего канала. Таким образом, колебания этого показателя для одной и той же удельной ширины канала могут отличаться в 2...3 раза. Так, например, при глубине канала  $B_k = 14 см$   $q_{MF} = 80...100 кг/(см·ч)$ , соответственно, при  $B_k = 20 см$   $q_{MF} = 200 кг/(см·ч)$ , а при  $B_k = 25 см$   $q_{MF} = 300 кг/(см·ч)$ . Поэтому нами предложен коэффициент удельной зерновой нагрузки, определяемый площадью поперечного сечения пневматического сепарируемого канала согласно следующей зависимости:

$$q_M = Q_{CM} / B_k l_k, \quad (12)$$

где  $Q_{CM}$  – подача зерновой смеси в пневматический сепарирующий канал,  $кг/с$ ;

$B_k$  – глубина пневматического сепарирующего канала,  $м$ ;

$l_k$  – длина пневматического сепарирующего канала,  $м$ .

Соответствующая зависимость между предложенным  $q_M$  и используемым  $q_{MF}$  коэффициентами будет равна:

$$q_M = k_{MF} q_{MF},$$

где  $k_{MF}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние ширины пневматического сепарирующего канала на удельную зерновую нагрузку.

$$B_k = B_0 k_{MF}.$$

В соответствии с требуемой производительностью  $Q_{CM}$  и коэффициентом удельной зерновой нагрузки на пневматический сепарирующий канал  $q_{MF}$  определяется площадь его поперечного сечения:

$$F_{ПК} = Q_{CM} / q_{MF}. \quad (13)$$

На основании известной площади поперечного сечения пневматического сепарирующего канала и скорости воздушного потока в нем определяется требуемая производительность вентилятора:

$$Q_{вент} = 3600 F_{ПК} v_A.$$

В соответствии с полученной величиной поперечного сечения пневматического сепарирующего канала, исходя из принятой его глубины в соответствии с требуемой производительностью, определяется его длина:

$$l_k = F_{ПК} / B_k. \quad (14)$$

Высота верхней  $H_{ПК\text{ верх}}$  и нижней  $H_{ПК\text{ низ}}$  частей пневматического сортировального канала относительно места подачи зерносоломистого вороха определяется согласно соотношениям:  $H_{ПК\text{ верх}} = (6...7) B_k$ ;  $H_{ПК\text{ низ}} = (1,5...2) B_k$  [7–9].

## Выводы

Таким образом, на основании установленных зависимостей (8), (11) и (14) основные параметры пневматического сепарирующего канала должны быть равны: скорость воздушного потока  $v_A = 8–12 м/с$ , скорость подачи материала  $v_0 = 0,4–0,8 м/с$ ; глубина канала –  $0,16...0,2 м$ . Исходя из заданной производительности зерноочистительной машины, по зависимости (14) устанавливается длина пневматического сепарирующего канала.

## Литература

1. Чеботарев, В. П. Классификация пневмосепарирующих систем современных технических средств для очистки зерна / В. П. Чеботарев, А. А. Князев, П. М. Немцев // Современная с.-х. техника: исследование, проектирование, применение: материалы междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Минск: БГАТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 6–8.
2. Чеботарев, В. П. Состояние и анализ основных тенденций совершенствования пневмосистем зерноочистительных машин для выделения легких примесей / В. П. Чеботарев, И. В. Барановский, Е. Л. Жилич // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–23 октября 2014 г.: в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2014. – Т. 1. – С. 86–90.
3. Shedd, C. K. Resistance of grain and seeds to air flow / C. K. Shedd // Agricultural Engineering. – 1953. – № 9 (34). – Pp. 616–621.
4. Siegel, W. Pneumatische Forderung / W. Siegel // Vogel Fachbuch Verfahrenstechnik. – Vogel Verlag, Wurzburg, 1991. – S. 98–106.
5. Злочевский, В. Л. Сортирование зерновых материалов воздушным потоком / В. Л. Злочевский, В. П. Зайцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 1. – С. 22–26.
6. Кожуховский, И. Е. Конструкции, проектирование и расчет зерноочистительных машин / И. Е. Кожуховский. – М., 1963. – 55 с.
7. Чеботарев, В. П. Состояние и перспективные направления развития пневмосистем современных технических средств для очистки зерна и семян / В. П. Чеботарев, П. М. Немцев, А. А. Князев // Ресурсосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–21 октября 2004 г.: в 2 т. / РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси». – Минск, 2004. – Т. 1. – С. 208–211.
8. Ловкис, В. Б. О критериях энергетической эффективности сельскохозяйственных технологий / В. Б. Ловкис, В. А. Колос // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. – Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2008. – Т. 1. – С. 13–19.
9. Шило, И. Н. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства / И. Н. Шило, В. Н. Дашков. – Минск: БГАТУ, 2003. – 183 с.

УДК 631.365

Поступила в редакцию 30.06.2017

Received 30.06.2017

### В. П. Чеботарев

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: v.p.chebotarev@tut.by*

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНО-СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В статье приводятся результаты выполненных исследований по обоснованию выбора производительности зерноочистительно-сушильного комплекса. Потребность сельскохозяйственных предприятий в зерноочистительно-сушильных мощностях определяют валовые сборы зерна и агротехнические сроки уборки. Чтобы одновременно и без потерь обрабатывать зерно разных культур и назначения (фуражное или семенное), хозяйства должны иметь комплекс с двумя-тремя технологическими линиями: высокой производительности для обработки зерна валобразующих культур (ржи, ячменя, пшеницы и тритикале), средней производительности на базе установок досушивания и режимного хранения зерна, а также передвижные зерносушилки как вспомогательные к основному оборудованию.

*Ключевые слова:* зерноочистительно-сушильный комплекс, технологическая линия, вентилируемый бункер, зерноуборочный комбайн, зерносушилка, зерноочистительная машина.

### V. P. Chebotarev

*Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university»  
Minsk, Republic of Belarus  
e-mail: v.p.chebotarev@tut.by*

### JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF GRAIN CLEANING AND DRYING COMPLEX

The article presents the results of studies carried out to justify the choice of grain cleaning and drying complex productivity. The need of agricultural enterprises in grain cleaning and drying capacities determines the gross harvest of grain and agrotechnical terms of harvesting. In order to simultaneously process grain of different