

## ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

В.П. ЧЕБОТАРЕВ

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Беларусь, 220023, e-mail: v.p.chebotarev@tut.by

(Поступила в редакцию 28.06.2017)

Универсальная зерноочистительная машина предназначена для предварительной, первичной или вторичной очистки - сепарирования всех видов зерновых, зернобобовых культур и трав. Предложен расчет технологических параметров и эффективности сепарирования универсальной зерноочистительной машины который проводится путем поэтапного определения нагрузок, времени, концентраций, интенсивности разделения при заданных значениях скоростей погружения и транспортирования зернового вороха. На основе разработанных моделей проведены расчеты технологических параметров универсальной зерноочистительной машины для режимов работы на предварительной, первичной и вторичной очистке зерна. В составах технологических линий они могут выполнять все виды очистки. Так, например, благодаря оптимальным конструктивным и технологическим решениям универсальная зерноочистительная машина, занимающая небольшую площадь, может быть использована для выполнения многочисленных задач по очистке зерна, обеспечивая высокое качество работы. В соответствии с требованиями сельскохозяйственного производства Республики Беларусь производительность такой машины должна составлять на предварительной очистке 40, на первичной 20, и на вторичной 4 т/ч.

**Ключевые слова:** воздушно-решетный сепаратор, пневматический сепарирующий канал, универсальная зерноочистительная машина.

*Universal grain cleaner is designed for preliminary, primary or secondary cleaning – separation of all types of cereals, legumes and herbs. We have presented calculation of technological parameters and efficiency of separation of universal grain cleaning machine. It is carried out by gradual determination of loads, time, concentrations, intensity of separation for given values of speeds of immersion and transportation of grain heap. Based on the developed models, calculations were made of technological parameters of a universal grain cleaning machine for operating modes during preliminary, primary and secondary grain cleaning. In technological lines, they can perform all types of cleaning. So, for example, thanks to optimal design and technological solutions, a universal grain cleaning machine that occupies a small area can be used to perform numerous tasks for cleaning grain, providing high quality work. In accordance with the requirements of agricultural production of the Republic of Belarus, the productivity of such a machine should be 40 tons / hour during preliminary cleaning, 20 t/h during primary cleaning, and 4 t/h during secondary cleaning.*

**Key words:** air-grating separator, pneumatic separation duct, universal grain cleaner.

### Введение

Универсальная зерноочистительная машина это, как правило, воздушно-решетный сепаратор с одной или двумя решетными блоками, а также с одним или двумя пневматическими сепарационными каналами, предназначенный для предварительной, первичной или вторичной очистки - сепарирования всех видов зерновых, зернобобовых культур и трав [1].

Расчет технологических параметров и эффективности сепарирования универсальной зерноочистительной машины должен проводиться путем поэтапного определения нагрузок, времени, концентраций, интенсивности разделения при заданных значениях скоростей погружения и транспортирования зернового вороха. Воздушные системы являются составной частью зерноочистительных машин. Они выделяют из зерна минеральные и органические примеси, а также щуплое зерно. Кроме того, эти системы позволяют сортировать зерна или семена.

### Основная часть

Универсальная зерноочистительная машина должна быть оснащена пневматической системой всасывающего действия, так как она меньше выделяет пыли в окружающее пространство и лучше приспособлена для эксплуатации в закрытых помещениях. Пневматическая система такой машины должна иметь два пневматических сепарирующих канала для обеспечения высокой эффективности сепарации зернового вороха при вторичной очистке. Расчет параметров вентилятора основывается на определении величины требуемого воздушного напора и расхода воздуха. Расход воздуха  $Q_L$  определяется согласно следующей зависимости:

$$Q_L = 3600 v_L B_K l_K, \quad (1)$$

где  $v_L$  – скорость воздушного потока, м/с;  $B_K$  – ширина пневмосепарирующего канала, м;  $l_K$  – длина пневмосепарирующего канала, м.

Скорость воздушного потока в канале должна быть меньше скорости витания очищаемого зерна  $v_L \leq 8$  м/с. Длина пневматического сепарирующего канала обычно приравнивается к ширине решетного стана  $B_{pc} = l_K = 1,2$  м. Глубина пневматического сепарирующего канала выбирается в зависимости от загрузки сепарирующего канала и требуемой эффективности сепарации и принимается равной  $B_K = 0,2$  м [2, 3]. Тогда вентилятор должен обеспечивать расход воздуха согласно выражению (1) не менее  $6912$  м<sup>3</sup>/ч. Требуемый воздушный напор рассчитывается по потерям давления потока воздуха в сис-

теме с учетом установки двух пневматических аспирационных каналов [4]. Потери давления в системе состоят из потерь давления на трение, потерь давления на местные сопротивления, а также вида обрабатываемого материала. Потери давления на трение рассчитываются согласно следующей зависимости:

$$H_{\text{тр}} = \lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{l_K \cdot v_L^2}{2g D_{\text{эк}}} \rho_L, \quad (2)$$

где  $D_{\text{эк}}$  – эквивалентный диаметр канала, м;  $\lambda_{\text{тр}}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления движению воздушного потока от трения воздуха о стенки воздуховода;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_L$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения значения  $\lambda_{\text{тр}}$  с достаточной для практических целей точностью используется упрощенная формула Блесса:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,0125 + \frac{0,0011}{D_{\text{эк}}}, \quad (3)$$

Эквивалентный диаметр вычисляется по формуле:

$$D_{\text{эк}} = 1,27 \sqrt[5]{\frac{B_K^3 l_K^3}{8(B_K + \frac{l_K}{2})}}, \quad (4)$$

Тогда  $D_{\text{экв}} = 0,41$  м, а  $\lambda_{\text{тр}} = 0,0152$ . Таким образом, при общей длине необходимых двух каналов  $l_K = 3$  м потери давления на трение составят  $H_{\text{тр}} = 4,22$  Па. Потери давления на преодоление местных сопротивлений определяются в зависимости от величины динамического давления по формуле

$$H_{\text{мс}} = \sum \zeta_{\text{мс}} \frac{v_L^2 \rho_L}{2g}, \quad (5)$$

где  $\zeta_{\text{мс}}$  – коэффициент местного сопротивления в воздуховоде.

Коэффициент местного сопротивления определяется по данным [3] и его величина будет равна  $H_{\text{мс}} = 127,73$  Па. Суммарные потери давления на трение и местные сопротивления будут равны:

$$H_{\text{сид}} = H_{\text{тр}} + H_{\text{мс}} = 4,22 + 127,73 = 131,95 \text{ Па}. \quad (6)$$

С учетом влияния концентрации материала на потери давления воздушного потока определяются общие потери давления в каналах:

$$H_{\text{возд}} = H_{\text{сид}} (1 + \mu_0 K_0), \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент концентрации смеси,  $\mu_0 = 1,0$ ;  $K_0$  – безразмерный эмпирический коэффициент,  $K_0 = 0,30$ .

После подстановки в (7) значений составляющих величин общие потери давления в каналах будут равны  $H_{\text{возд}} = 171,54$  Па. Потери давления на преодоление сопротивления зернового слоя у большинства зерноочистительных машин составляют  $H_3 = 50–150$  Па. Большие значения относятся к высокопроизводительным машинам с высокими удельными нагрузками. Поэтому принимается  $H_3 = 150$  Па.

Потери давления на подъем частиц в вертикальных воздуховодах определяются по формуле:

$$H_{\text{верт}} = \rho_L l_K \mu_0 = 1,2 \cdot 3 \cdot 1,0 = 35,32 \text{ Па}. \quad (8)$$

Общие потери давления в воздушных каналах составят:

$$H_{\text{кан}} = H_{\text{верт}} + H_3 + H_{\text{возд}} = 171,54 + 150 + 35,32 = 356,86 \text{ Па}. \quad (9)$$

Потери давления в осадочной камере ориентировочно принимаются равными динамическому давлению в рабочей зоне пневматического сепарирующего канала:

$$H_{\text{ок}} = \frac{\rho_L v_L^2}{2g}. \quad (10)$$

Тогда  $H_{\text{ок}} = 38,4$  Па. Расчет сопротивления пылеуловителя производится для циклона, который оказывает наибольшее сопротивление. Сопротивление циклона определится по формуле:

$$H_{\text{цик}} = \zeta_{\text{цик}} \frac{\rho_L v_{\text{цик}}^2}{2g}. \quad (11)$$

где  $v_{\text{цик}}$  – скорость входа воздуха в циклон = 18 м/с;  $\zeta_{\text{цик}}$  – коэффициент сопротивления циклона.

Согласно [5] коэффициент сопротивления циклона принимается  $\zeta_{\text{цик}} = 6$ . Тогда  $H_{\text{цик}} = 1166,4$  Па. Таким образом, общее сопротивление всех элементов пневматической системы определяет необходимый напор, который должен создавать вентилятор:

$$H_{\text{пн}} = H_{\text{кан}} + 2H_{\text{ок}} + H_{\text{цик}}. \quad (12)$$

По рассчитанным параметрам пневматической системы: общему сопротивлению  $H_{\text{пн}} = 1600$  Па и расходу воздуха  $V \approx 6912$  м<sup>3</sup>/ч осуществляется подбор вентилятора. Поскольку выделение легких и пылевидных примесей будет осуществляться в пневматической системе, то обоснование и расчет решетчатых станков ограничивается лишь определением параметров колосового и подсевного решет согласно следующей расчетной схеме [3, 6]. Зерно на верхнее решето подается из пневматического сепарирующего канала под действием силы тяжести. Необходимо определить основные конструктивно-технологические параметры подсевного блока и выяснить, будут ли эти параметры обеспечивать требуемые показатели качества очистки. Первоначально определяется в зависимости от требуемой производительности необходимая длина решетчатого стана [6]. Ширина принимается равной  $B_p = 1,2$  м. Расчет параметров решетчатого стана проводится для обработки эталонной культуры – пшеницы. Размеры зерен пшеницы принимаются согласно данным [7]. Колосовое решето должно отсеять максимальное количество семян основной культуры, а крупные примеси выделить сходом. Поэтому рабочие размеры отверстий данного вида решет должны быть несколько больше максимального размера признака делимости культурных семян согласно следующих условий: при применении решет с продолговатыми отверстиями  $b_p > b_{\text{зmax}}$ , при применении решет с круглыми отверстиями  $D_{\text{кр}} > \delta_{\text{зmax}}$  [8]. Согласно нормативным требованиям, выбираются решета с ближайшими стандартными рабочими размерами продолговатых отверстий 3,25 мм и круглых 4,0 мм [9]. Удельные решетчатые нагрузки для этих видов решет определяются по формулам:

– для решет с продолговатыми отверстиями:

$$q_{Fn} = 543c_k - 600; \quad (13)$$

– для решет с круглыми отверстиями:

$$q_{Fkp} = 325c_k - 400. \quad (14)$$

Безразмерный коэффициент  $c_k$  определяется согласно следующей зависимости:

для решет с продолговатыми отверстиями:

$$c_k = b_p / b_{\text{зmax}}; \quad (15)$$

– для решет с круглыми отверстиями:

$$c_k = D_{\text{кр}} / \delta_{\text{зmax}}. \quad (16)$$

Удельная решетчатая зерновая нагрузка будет равна: на решета с продолговатыми отверстиями  $q_{Fn} = 220\text{--}238$  кг/(дм<sup>2</sup>ч), с круглыми отверстиями  $q_{Fkp} = 150\text{--}158$  кг/(дм<sup>2</sup> ч). Длина решета определяется по следующей формуле:

$$l_p = \frac{Q_{\text{зв}}}{B_p \cdot q_{Fn}}, \quad (17)$$

где  $Q_{\text{зв}}$  – производительность машины по зерновому вороху, т/ч.

Так как по расчетам длина решета с круглыми отверстиями оказалась неприемлемой  $l_p = 2,11$  м, то на машину необходимо устанавливать колосовое решето с продолговатыми отверстиями длиной  $l_n = 1,4$  м.

Подсевные решета для обработки пшеницы применяются обычно с продолговатыми отверстиями. Рабочие размеры отверстий этих решет определяются согласно следующего условия:  $b_p > b_{\text{зmin}}$ . В соответствии с нормативными требованиями принимается  $b_p = 2$  мм. Искомая длина определяется по эмпирической формуле [3, 9]:

$$l_p = \frac{K_E K_{\text{э}} q_{MF}}{\left(\frac{1}{E_p} - 1\right)}, \quad (18)$$

где  $K_E$  – безразмерный коэффициент разделения, пропорциональный содержанию мелких примесей в исходном материале,  $K_E = 0,042$ ;  $q_{MF}$  – удельная зерновая нагрузка, кг/(см·ч);  $E_p$  – полнота выделения мелких примесей, равная весовому отношению прохода сквозь решето к содержанию примесей в исходном материале;  $K_{\text{э}}$  – эмпирический коэффициент, характеризующий активность процесса сепарации, зависящий от  $K_{\text{э}}$  и  $q_{MF}$ , (см<sup>2</sup>·ч)/кг.

Качество работы подсевных решет, определяемое полнотой выделения мелких примесей, подразделяется на следующие категории:  $\varepsilon = 0,8$  и больше – высокое (задается для получения семян),  $\varepsilon = 0,6\text{--}0,72$  – среднее (для получения товарного зерна),  $\varepsilon = 0,59$  и менее – низкое (для фуражного зерна). Основной применяемый ряд значений  $\varepsilon = 0,6\text{--}0,85$ . Значения меньше 0,6 считаются браком, больше 0,85 – труднодостижимыми. При производительности  $Q_{\text{зв}} = 40$  т/ч и  $\varepsilon = 0,6$  (предварительная очистка) удельная зерновая нагрузка равна  $q_{MF} = 222,2$  кг/(см·ч) и согласно рекомендациям [2, 3]  $k_{\text{з}} = 0,12$

( $\text{дм}^2 \cdot \text{ч}$ )/кг. Тогда  $l_p = 1,45$  м. Длина подсевого решета принимается равной  $l_p = 1,7$  м. Начальное удельное количество смеси  $q_0$  ( $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ), поступающее на элементарную сепарирующую площадку в зависимости от задаваемой производительности  $Q_{3в}$ , определяется по формуле:

$$q_0 = \frac{Q_{3в}}{3600 B_p l_p}, \quad (19)$$

а начальное  $q_{np0}$  количество мелких примесей ( $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ), при соответствующей засоренности  $\varphi_{np} = Q_{np0} / Q_{3в}$  исходной смеси будет равно:

$$q_{np0} = \varphi_{np} q_0. \quad (20)$$

Начальная  $H_{cл0}$  толщина слоя исходной смеси определяется по формуле:

$$H_{cл0} = \frac{q_0}{g_{нп}}, \quad (21)$$

где  $g_{нп}$  – начальная плотность вороха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Время  $\tau_1$  погружения примесей от верхнего до нижнего слоя будет равно:

$$\tau_1 = \frac{H_{cл0} - H_{cлн}}{v_{погр}}, \quad (22)$$

где  $v_{погр}$  – средняя скорость погружения примесей из верхнего слоя в нижний,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $H_{cлн}$  – толщина нижнего слоя, равная средней ширине зерен,  $\text{м}$ .

Интенсивность  $q_c$  поступления примесей в нижний слой определится согласно выражения:

$$q_c = q_{np0} v_{погр}, \quad (23)$$

а начальная  $q_{u0}$  интенсивность просеивания будет равна:

$$q_{u0} = E_p q_c. \quad (24)$$

Интенсивность просеивания  $q_{u1}$  ( $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ) за время  $\tau_1$  будет равна:

$$q_{u1} = q_{u0} e^{-K_{ин} \tau_1}, \quad (25)$$

где  $K_{ин}$  – коэффициент интенсивности просеивания,  $\text{с}^{-1}$ .

Концентрация примесей  $K_{н1}$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ) в нижнем слое в момент  $\tau_1$  определится согласно выражения:

$$K_{н1} = \frac{q_{u1}}{K_{ин}}. \quad (26)$$

Количество примесей  $Q_{н1}$  ( $\text{г}/\text{см}^2$ ), извлеченное за время  $\tau_1$  будет равно:

$$Q_{н1} = (q_c - q_{u1}) \tau_1. \quad (27)$$

Время  $\tau_n$  перемещения порции смеси по длине решетного канала:

$$\tau_n = \frac{l_p}{v_{двр}}, \quad (28)$$

Время  $\tau_2$ , в течение которого после окончания самосортирования продолжает осуществляться просеивание:

$$\tau_2 = \tau_n - \tau_1. \quad (29)$$

Количество примесей  $Q_{н2}$  ( $\text{г}/\text{см}^2$ ), которое извлекается проходом за это время:

$$Q_{н2} = K_{н2} (1 - e^{-K_{ин} \tau_2}). \quad (30)$$

Так как процесс разделения установившийся и непрерывный  $K_{н2} = K_{н1}$  то общее количество извлеченных мелких примесей будет равно:

$$Q_n = Q_{н1} + Q_{н2}. \quad (31)$$

Тогда полнота извлечения примесей на решетке будет равна:

$$E_p = \frac{Q_n}{Q_{np0}}. \quad (32)$$

По результатам теоретических исследований для выбранных значений следующих показателей: пшеница влажностью 14–16 %; начальная засоренность исходной смеси  $\varphi_0 = 4,2$  %; насыпная плотность  $\rho_{нп} = 0,7129$   $\text{г}/\text{см}^3$ ; толщина нижнего слоя  $H_{cлн} = 0,283$  см; средняя скорость погружения примесей от верхнего до нижнего слоя  $v_{погр} = 0,45$   $\text{см}/\text{с}$ ; коэффициент интенсивности просеивания  $K_{ин} = 0,8$   $\text{с}^{-1}$ ; средняя скорость перемещения материала по решетку  $v_{двр} = 0,18$   $\text{м}/\text{с}$ ; ширина решета  $B = 1,2$  м проведены расчеты технологических параметров работы универсальной зерноочистительной машины для режимов работы на предварительной, первичной и вторичной очистке зерна. Результаты расчетов представлены в таблице.

**Расчетные параметры работы универсальной зерноочистительной машины  
на предварительной, первичной и вторичной очистке зерна**

Наименование параметра	Значение параметра		
	предварительная	первичная	вторичная
Режим работы по очистке зерна			
Производительность, т/ч	40	20	4
Длина рабочей поверхности решетного стана, дм	12,6	16,8	18,36
Начальное количество исходной смеси, приходящееся на элементарную площадку, г/см <sup>2</sup>	3,52	1,7147	0,3429
Количество мелких примесей в исходной смеси, г/см <sup>3</sup>	0,974	0,0720	0,0144
Начальная толщина слоя исходной смеси, см	6,568	2,4052	0,2445
Начальная концентрация примесей в объеме смеси, г/см <sup>3</sup>	2,237	0,1299	0,0589
Начальная концентрация примесей в нижнем слое, г/см <sup>3</sup>	0,328	0,0167	0,0085
Время погружения примесей от верхнего до нижнего слоев, с	9,21	4,716	1,5
Интенсивность поступления примесей в нижний слой, г/(см <sup>2</sup> с)	0,0198	0,0135	0,0265
Начальная интенсивность просеивания, г/(см <sup>2</sup> с)	0,842	0,068	0,0134
Интенсивность просеивания при $\tau_1$ , (г/см <sup>2</sup> с)	0,462	0,0133	0,0265
Концентрация примесей в нижнем слое при $\tau_1$ , г/см <sup>3</sup>	0,0758	0,0166	0,0331
Количество примесей, извлеченное за время $\tau_1$ , г/см <sup>3</sup>	0,186	0,0555	0,015
Время перемещения порции смеси по длине решетного канала, с	12,251	9,3333	1,8667
Время, в течении которого продолжается просеивание после окончания самосортирования, с	9,432	4,6173	1,8667
Количество примесей, извлеченное за время $\tau_2$ , г/см <sup>3</sup>	0,446	0,0362	0,0257
Общее количество извлеченных мелких примесей, г/см <sup>3</sup>	0,512	0,0717	0,0257
Степень извлечения мелких примесей	0,4597	0,9958	0,9997
Остаточная засоренность обработанного материала, %	0,399	0,017	0

Таким образом, рассчитанные параметры, будучи реализованными в конструкции универсальной зерноочистительной машины, обеспечат требуемые производительность и качество сепарирования на предварительной, первичной и вторичной очистке зерна.

### **Заключение**

Для выбранной схемы универсальной зерноочистительной машины, на основе проведенных теоретических исследований, определены основные параметры: для производительности соответственно на предварительной очистке 40 т/ч, первичной – 20 т/ч и вторичной – 4 т/ч: решето колосовое: шириной 1,14 м, длина 1,35 м; решето подсеивное: ширина 1,14 м, длина 1,55 м; расход воздуха на пневмосепарацию 7000 м<sup>3</sup>/ч.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Чеботарев, В. П. Технологические основы и характеристика процессов сепарирования / В.П. Чеботарев, И.В. Барановский, А.В. Новиков // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2013. – Вып. 47. – Т. 1. – С. 123–132.
2. Гладков, Н.Г. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет, проектирование и эксплуатация / Н.Г. Гладков. – М.: Машгиз, 1961. – 388 с.
3. Кожуховский, И.Е. Конструкции, проектирование и расчет зерноочистительных машин / И.Е. Кожуховский. – М., 1963. – 55 с.
4. Бурков, А.И. Замкнуто – разомкнутая пневмосистема зерно- и семяочистительных машин/ А.И. Бурков, В.Л. Андреев// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1995. - №5. – С. 18–21.
5. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
6. Сукокин, Л.М. Разделение зерновых материалов на решетных сепараторах / Л.М. Сукокин, В.М. Дринча //Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. - №1. – С. 28–33.
7. Чеботарев В.П. Сушка зерна. Теория, расчет, эксперимент / В.П. Чеботарев, И.В. Чеботарев. - Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2012. - 520 с.
8. Дашевский, В.И. К расчету параметров ситовых устройств для сортирования зерна по крупности /В.И. Дашевский, Е.А. Непомнящий // Сб. науч. тр. / ВНИИЗ. – М., 1975. – С. 131-140.
9. Корн, А.М. О признаках делимости зернового материала на сепараторах / А.М. Корн [и др.] // Тр. ВИМ. – М., 1974. – Т. 65, ч.11. – С. 25–33.