

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНОВОК ПОДСОЛНЕЧНИКА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Александр Колодий, Сергей Кюрчев

Таврический государственный агротехнологический университет

Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, 72310, Украина. E-mail: aelxandr@rambler.ru

Alexander Kolodiy, Sergei Kyurchev

Tavria State Agrotechnological University

B. Khmelnitsky Avenue, 18, Melitopol, 72310, Ukraine. E-mail: aelxandr@rambler.ru

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Аннотация. В данной статье рассмотренный один из перспективных направлений увеличения урожайности подсолнечника, является использования для севбы предварительно отобранных семян с высокими посевными качествами. Производственная практика и проведенные исследования показывают, что в посевном материале содержатся зерна значительно отличающиеся массой, плотностью и толщиной. Установлено, что с увеличением массы семян, как правило, увеличивается их плотность и толщина, а следовательно и аэродинамические свойства которые определяются скоростью витания. Все это указывает на возможность их дополнительного разделения воздушным потоком. Проведен анализ априорных сведений по сепарации зерна в воздушных каналах, который показал, что воздух воздействует на зерновки, в основном, в момент движения зерновой струи от внутренней стенки к наружной (в прямоугольном канале). В центральной части канала скорость воздуха максимальная, а у стенок она уменьшается, вследствие чего разделение ухудшается. Кроме того в существующих пневмоканалах не используется нижняя зона воздушного потока как конструктивный элемент и фактор разделения семенного материала по аэродинамическим свойствам. Вместе с тем, работоспособность нижней зоны потока, как механизма разделения траекторий движения семян различающихся скоростью витания, и целесообразность ее использования для достижения дополнительного эффекта разделения зерносмеси доказано в работах. Проведено математическое моделирование процессов перемещения а разделения зерновок подсолнечника в аэродинамическом гравитационном сепараторе; получены уравнения которые адекватно описывают режимы движения материала. Получено аналитическая зависимость расстояния разделения траектории падения семян от конструктивных и режимных параметров сепаратора. В результате имитационного моделирования движения зерновок установлено, что использование устройства разрыхляющего поток и задающего рациональные параметры ввода материала позволяет повысить степень извлечения полноценных семян.

Ключевые слова: сепаратор, аспирационный канал, семена, воздушный поток.

Известно, что одним из перспективных направлений увеличения урожайности подсолнечника является использования для севбы предварительно отобранных семян с высокими посевными качествами. Производственная практика и проведенные исследования показывают, что в посевном материале содержатся зерна значительно отличающиеся массой, плотностью и толщиной. [1, 2, 3]. Установлено, что с увеличением массы семян, как правило увеличивается их плотность и толщина, а следовательно и аэродинамические свойства которые определяются скоростью витания. Все это указывает на возможность их дополнительного разделения воздушным потоком. Данные испытаний воздушных каналов серийных машин [4, 5, 6] показывают, что и очистка и сортировка семян производится в них с недостаточно высоким качеством: после сепарации в «ценной» фракции остается большое количество легких (неполноценных) семян, а увеличение массы 1000 зерен составляет всего 4,4% [6]. Это указывает на то, что возможности воздушного потока используются далеко не полностью. Поэтому необходимы испытания принципиально новых конструкций воздушных каналов и способов разделения, которые дают возможность повысить качество разделения семенного материала.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализом априорных сведений по сепарации зерна в воздушных каналах, установлено, что воздух воздействует на зерновки, в основном, в момент движения зерновой струи от внутренней стенки к наружной (в прямоугольном канале). В центральной части канала скорость воздуха максимальная, а у стенок она уменьшается, вследствие чего разделение ухудшается. Кроме того в существующих [7-10] пневмоканалах не используется нижняя зона воздушного потока как конструктивный элемент и фактор разделения семенного материала по аэродинамическим свойствам. Вместе с тем, работоспособность нижней зоны потока, как механизма разделения траекторий движения семян различающихся скоростью витания, и целесообразность ее использования для достижения дополнительного эффекта разделения зерносмеси доказано в работах [11, 12].

Однако использование делителей потока семян в падающем слое в противотоке с воздухом в цилиндрическом канале в виде коаксиально расположенных патрубков разного диаметра [13] позволяет дополнительно (кроме выделения «самых легких» примесей в верхней зоне канала) разделять семена подсолнечника на две фракции, выделяя наиболее полноценную. Однако струйный способ введения потока семян в пневмоканал [13], как показали экспериментальные исследования [12] ограничивает зону (диаметральную) разделения всего 10мм, что снижает возможности нового способа сепарации. Для увеличения величины разделяемости семян по скорости витания, предложено разрыхлять струю подающегося на сепарацию материала осуществляя ее торможения и распределение зернового потока по радиусу с помощью распределяющего конусного устройства. При этом обеспечивается не вертикальный, ввод материала, а под определенным углом к вертикальному воздушному потоку.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Целью настоящей работы является определение конструктивных и режимных параметров кольцевого пневмоканала с распределенным вводом материала, обеспечивающих повышение эффективности разделения

Рассмотрим пневмосепарирующий кольцевой канал (рис.1) материал в котором подается с конического распределителя под начальным углом α_0 , со скоростью V_0 в вертикальный (равномерно распределенный по радиусу) воздушный поток.

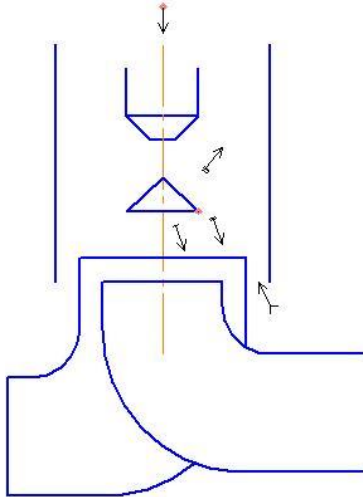


Рис.1. Схема работы сепаратора
Fig.1. The scheme of the separator

Разделение семян в гравитационном пневмосепарирующем сепараторе основано на разнице в скорости витания и осуществляется пересечением под определенным углом вертикального воздушного потока.

Математическое описание движения зерновки в воздушном потоке составим для текущего момента времени при таких упрощающих допущениях:

- рассматривается движение изолированных (друг от друга) частиц;
- размер частицы и ее вес определяется скоростью витания;

- скорость вертикального перемещения воздушного потока принимается равномерно распределенной по радиусу пневмоканала;
- частицы не меняют своего ориентирования (по оси симметрии зерновки) по отношению к направлению воздушного потока;
- поток воздуха направлен вертикально вверх.

Абсолютное движение частиц в воздушном потоке (канале) можно считать состоящим из относительного перемещения зерновки в самом потоке воздуха и переносом перемещения зерновки вместе с потоком воздуха. Таким образом абсолютная скорость зерновки равна:

$$\bar{v} = \bar{u} + v_v,$$

где: \bar{u} – относительная скорость зерновки; v_v – скорость воздушного потока (скорость зерновки в переносном движении).

Рассмотрим взаимодействие частицы с восходящим воздушным потоком (рис. 2).

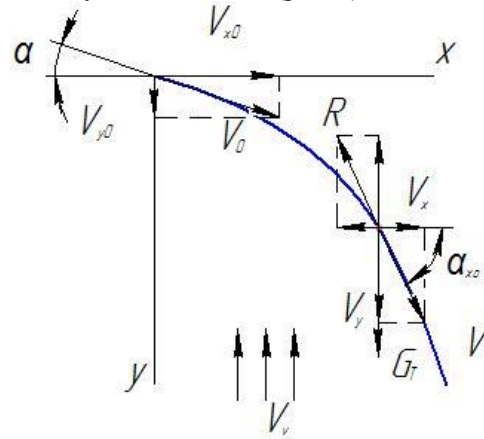


Рис.2. Схема сил действующих на зерновку в потоке воздуха

Fig.2. Driving forces acting on the air stream in the caryopsis

Принимаем за начало координат месте схода частицы в воздушный поток. Согласно принятой системы координат и действующих на частицы сил: тяжести $G = mg$ и сопротивления воздушному потоку R , движение частицы описывается известными дифференциальными уравнениями [9, 14]:

$$m\ddot{x} = -R \cos \alpha, \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = mg - R \sin \alpha, \quad (2)$$

где: α – текущее значение угла между скоростью частицы при движении ее по траектории и горизонтальной осью.

Согласно схеме действия сил можно записать очевидные соотношения:

$$v_x = v \cos \alpha; \quad v_x = \dot{x} = \frac{dx}{dT};$$

$$v_y = v \sin \alpha; \quad v_y = \dot{y} = \frac{dy}{dT} + v_v \quad (3)$$

где: v_v – скорость воздушного потока.

Сила аэродинамического сопротивления принята пропорциональной квадрату относительной скорости частицы (скорости ее обтекания):

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНОВОК ПОДСОЛНЕЧНИКА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

$$R = K_c(v - v_v)^2, \quad (4)$$

где: K_c – коэффициент сопротивления (обобщенный); C_x – коэффициент сопротивления, зависящий от формы частицы и условий обтекания (ламинарный режим, турбулентный) характеризующий величиной критерия Рейнольдса; S_M – Миделево сечение частицы; ρ – плотность воздуха; при известной скорости витания частицы $v_{вум}$ силу сопротивления можно выразить формулой $R = \frac{mg}{v_{вум}^2} = mk_{II}$.

Величину k_{II} называют коэффициентом парусности.

С учетом указанных соотношений уравнения (1) и (2) можно переписать в таком виде:

$$\frac{d^2}{dt^2}x(t) = -k_{II} \frac{d}{dt}x(t) \sqrt{\left(\frac{d}{dt}x(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}(y(t) + v_v)\right)^2}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}y(t) = g - k_{II} \left(\frac{d}{dt}y(t) + v_v\right) \times \sqrt{\left(\frac{d}{dt}x(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}(y(t) + v_v)\right)^2}, \quad (6)$$

Начальные условия к уравнениям запишем в виде:

$$x(0) = 0; y(0) = 0; \dot{x}(0) = v_0 \cos \alpha_0; \dot{y}(0) = v_0 \sin \alpha_0,$$

где: α_0, v_0 – угол ввода частиц в воздушный поток и их начальная скорость.

Указанные параметры определяются, кроме угла наклона образующей загрузочно-распределительного устройства, еще и скоростью ввода материала в поток. Поскольку основной функцией устройства есть транспортирование зерноматериала от загрузочного бункера и материалопровода к воздушному каналу и ввода его в поток воздуха под определенным углом и заданной скоростью, необходимо определить эти параметры. Принимая (в идеальном виде), что частица движется по образующей конуса от места ввода до места схода определим зависимость скорости движения от координаты и угла наклона прямой линии (плоскости) по которой разгоняется частица. При этом принимаем, что частица движется строго по образующей плоскости. Кроме того принимаем, что в виду относительно малой скорости перемещения (0,2-0,8м/с). Частицы по шероховатой поверхности, влиянием аэродинамического сопротивления пренебрегаем (в первом приближении). При принятых допущениях уравненные движения частицы будет иметь вид [15]:

$$m \frac{dS^2}{dT^2} = m \frac{dv}{dT} = mg \sin \alpha - fmg \cos \alpha + k_a \dots \quad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) при начальных условиях:

$$\tau = 0; v = v_0$$

$$v = v_0 + g(\sin \alpha - f \cos \alpha)\tau \quad (8)$$

Учитывая, что $v = \frac{dS}{d\tau}$ и интегрируя уравнение (8) при начальных условиях: $\tau = 0; S = 0$ получим:

$$S = v_0\tau + \frac{g}{2}(\sin \alpha - f \cos \alpha)\tau^2 \quad (9)$$

Определив из уравнения (8) величину τ и подставив его значение в уравнение (9) после преобразований получим выражение определяющее скорость:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g(\sin \alpha - f \cos \alpha)S}, \quad (10)$$

схода (подачи) частички в воздушный поток в зависимости от угла наклона образующей конуса α и ее длины S .

Скорость подачи материала на конический распределитель, т.е. начальную скорость движение v_0 примем равную скорости истечения из загрузочного устройства, которая согласно [16] определяется по формуле:

$$v_0 = (2,546 - 0,16d_s) \left(1 - 66 \left(\frac{d_s}{D}\right)^3\right) F^{0,25}, \quad (11)$$

где: d – эквивалентный диаметр зерновки, м; D – диаметр сечения выгрузного отверстия, м; F – площадь сечения выгрузного отверстия, м².

Для учета влияния сопротивления воздуха при движении зернового материала по распределительному конусу можно использовать уточненную формулу Р.Л. Зенкова:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2g(\sin \alpha - f \cos \alpha) + v_0^2}{1 + 2Sk_{II}}}, \quad (12)$$

где: k_{II} – коэффициент парусности, $\frac{1}{m}$.

На рис.3 приведен график изменения скорости схода материалов конического распределителя в зависимости от угла наклона образующей и ее длины.

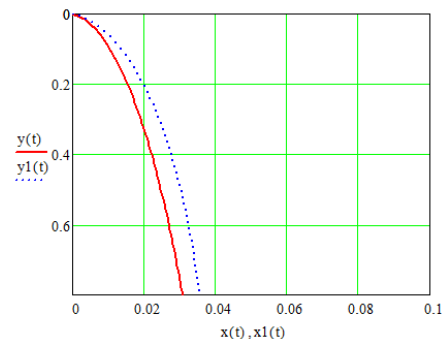


Рис.3. Траектории зерновок частиц различных фракций при самотоке

Fig.3. The trajectories of particles of different fractions of grains in the gravity

Уравнения (5) и (6) не имеют аналитического решения, поэтому их анализ выполнен с помощью ЭВМ.

Определение значений скоростей и траекторий движения зерновок подсолнечника в вертикальном пневмоканале предшествовало экспериментальное определение скоростей витания отдельных зерновок

которые подлежат распределению. При массе 1000 зерновок 60гр скорость отрыва и улета зерновок колебалась в пределах $4,8-7,2 \frac{1}{м}$, а при массе 80гр - $6,8-8,9 \frac{1}{м}$. Для средних значений скорости витания отдельных фракций соответствующие коэффициенты парусности равны $k_1=0,2725$, $k_2=0,159$.

На рис.4 приведены траектории движения отдельных зерновок различающихся массой ($m_1=0,06г$, $m_2=0,08г$ и величиной средней скорости витания $v_1=6 \frac{1}{м}$, $v_2=7,85 \frac{1}{м}$) при отсутствии разделительного конуса кольцевой выпускной канал.

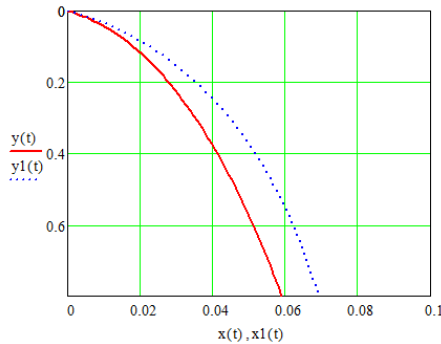


Рис.4. Траектории зерновок частиц различных фракций при разделительном конусе

Fig.4. The trajectories of grains of different fractions of particles in the separation cone

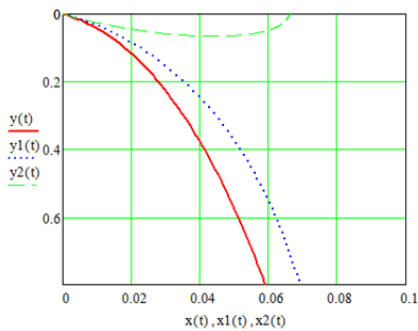


Рис.5. Траектории зерновок частиц различных фракций при разделительном конусе для тяжелой, основной и легкой фракций

Fig.5. The trajectories of grains of different fractions of particles in the separation cone for heavy and light fractions of the main

Как следует из анализа траекторий движения семян на высоте канала 0,8 м расхождение траекторий составляет 10 мм, а опытные данные соответ-

ствуют расхождению в 9мм [12], что вполне допустимо.

При наличии распределяющегося конуса расхождения траекторий при тех же режимах воздушного потока увеличивается (Рис. 5).

Для получения аналитических зависимостей траекторий перемещения зерновок в воздушном потоке от конструктивных и режимных параметров пневмогравитационного сепаратора введем упрощающие допущения [9]. Преобразуем уравнения (5) и (6) к такому виду:

$$\ddot{x} = -k_{II} \dot{x} v_v \sqrt{\left(\frac{x}{v}\right)^2 + \left(1 + \frac{y}{v}\right)^2}, \quad (13)$$

$$\ddot{y} = \ddot{g} = -k_{II} (\dot{y} + v_v) v_v \sqrt{\left(\frac{x}{v}\right)^2 + \left(1 + \frac{y}{v}\right)^2} \quad (14)$$

По данным числовых экспериментов величина $\sqrt{\left(\frac{x}{v}\right)^2 + \left(1 + \frac{y}{v}\right)^2}$ для реальных аэродинамических

режимов сепарации $v=6-9 \frac{M}{c}$, $v_x = 0,2-0,15 \frac{M}{c}$,

$v_y = 0,7-0,8 \frac{M}{c}$ изменяется незначительно в пределах

1,08-1,14 и ее можно принять постоянной равна $k=1,11$. Тогда уравнение (13) и (14) можно записать в приближенном виде:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = \frac{dv_x}{d\tau} = -Av_x, \quad (15)$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = \frac{dv_y}{d\tau} = g - B(v_x + v_y), \quad (16)$$

где: $A=1,11k_{II}v_v$; $B=1,11k_{II}v_v$

Интегрируя уравнения (15) и (16) при начальных условиях:

$$\tau = 0; x = 0; y = 0; v_x = v_{x0}; v_y = v_{y0}$$

где: v_{x0} , v_{y0} – проекции начальной скорости на оси ОХ и ОУ получим уравнения проекций скорости зерновки и ее перемещения в вертикальном потоке воздуха:

$$v_x = v_{0x} e^{-A\tau}, \quad (17)$$

$$x = \frac{v_0}{A} (1 - e^{-A\tau}), \quad (18)$$

$$v_y = \frac{a}{B} - \left(\frac{a}{B} - v_{y0}\right) e^{-B\tau}, \quad (19)$$

$$y = \frac{a}{B} \tau - \frac{1}{B} \left(\frac{a}{B} - v_{y0}\right) (1 - e^{-B\tau}), \quad (20)$$

где: $a = g - Bv_v$.

Определив из уравнения (18) время:

$$\tau = \frac{1}{A} \ln \frac{v_{0x}}{v_{0x} - A_x}, \quad (21)$$

И подставив его значение в уравнение (20) получим зависимость определяющую траекторию движения зерновки:

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНОВОК ПОДСОЛНЕЧНИКА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

$$y = \frac{a}{BA} \ln \frac{v_{0x}}{v_{0x} - AX} - \frac{1}{B} \left(\frac{a}{B} - v_{0y} \right) \times \left[1 - \exp \left(- \frac{B}{A} \ln \frac{v_{0x}}{v_{0x} - AX} \right) \right] \quad (22)$$

Подставляя значение $y = H$ (высота падения частицы в воздушном канале) можно вычислить величину отклонения траектории вместе падения (забора) фракции, массой m_1 и коэффициентом парусности k_{II} . Установить место делителя разделяемых фракций.

Эффективность процесса разделения семян подсолнечника должна определяться по величине отклонения траектории исходя из семян в высеву, путем отделения от общей массы, некондиционных зерновок (пустота, повреждение насекомыми, «выедание») так попадание последних в посевной материал приносит максимальный ущерб всей технологии выращивания подсолнечника. Отделение «легких» зерновок на стадии ввода материала в воздушный поток сепаратора, является эффективным способом повышения четкости разделения (по попаданию не кондиции в основную фракцию) так как уменьшают интенсивность солидарного перемещения (т.е. тяжелые частицы подталкивают легкие в процессе их перемещения)

Траектории движения «легких» зерновок $m < 0,03; v_{вст} < 4 \frac{M}{c}, k_{II} = 0,6$ показаны на рис. 5.

Таким образом, при использовании для ввода материала в воздушный поток с помощью распределительного устройства (конуса) сепаратор реализует разделение частиц на три фракции.

ВЫВОДЫ

1. Проведено математическое моделирование процессов перемещения а разделения зерновок подсолнечника в аэродинамическом гравитационном сепараторе; получены уравнения которые адекватно описывают режимы движения материала.

2. Получено аналитическая зависимость расстояния разделения траектории падения семян от конструктивных и режимных параметров сепаратора.

3. В результате имитационного моделирования движения зерновок установлено, что использование устройства разрыхляющего поток и задающего рациональные параметры ввода материала позволяет повысить степень извлечения полноценных семян.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алейников В.И. 1979.** Послеуборочная обработка семян подсолнечника М.: Колос, 143.
2. **Ткаченко О.В. 2004.** Технологические свойства семян подсолнечника Труды ТГАТУ. – Мелитополь ТГАТУ. Вип.19, 166-175 (Украина)

3. **Щеглов А.В. 2006.** Определение характеристик семян подсолнечника Сборник научных трудов. Сред. Технические науки. Луганск. №68/91, 243-247(Украина)
4. **Малис А.Я., Демидов А.Р. 1962.** Машины для очистки зерна воздушным потоком М.:Машгиз, 175.
5. **Нелюбов А.И., Ветров Е.Ф. 1977.** Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин М.: Машиностроение, 190.
6. **Бурков А.И., Сычугов Н.П. 2000.** Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров: Изд-во ННПИСХ Северо-Восток, 258.
7. **Котов Б.И., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. 2003.** Тенденции развития конструкций машин и оборудования для очистки и сортировки зерна материалов. Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин: Общегосударственный межведомственный сборник. Кировоград. Вип.33, 53-59. (Украина)
8. **Васильковский О.М., Петренко Ф.И. 2005.** Повышение эффективности воздушной очистки зерна. Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин. Кировоград. Вип. 35. 286-288 (Украина).
9. **Горгинский В.В., Денский А.Б., Борискин М.А. 1980.** Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях М.: Колос, 304.
10. **Степаненко С.П. 2008.** Исследование процесса пневматического сепарации семян в кольцевом зигзагообразному сепараторе. Вестник ХНТУСГ Харьков.: ХНТУСГ, 59-65(Украина).
11. **Ермак В.П. 2006.** Результаты исследования распределения скорости воздушного потока в пределах основной сепарационной камеры и расстояния установления главной разделяющей заслонки сепаратора. Сборник научных трудов ЛНАУ. Серия технические науки. Луганск. №68/91, 92-98 (Украина).
12. **Кюрчев С.В., Колодий А.С. 2013.** Результаты исследования рациональных размеров вертикального аспирационного канала сепаратора семян сельскохозяйственных культур Motrol "Motorization and energetics in agriculture", Lublin-Rzeszow, Vol.15, No2.169-175.
13. **Аэродинамический сепаратор для семян. патент на полезную модель №86300. 25.12.2013 (Украина).**
14. **Василенко П.М. 1970.** Об уравнениях транспортировки частиц в сопротивляющихся средах Доклады ВАСХНИЛ М. №4, 44-46.
15. **Василенко П.М.** Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев. Из-во ВАСХНИЛ, 283.
16. **Зернов Р.Л. 1964.** Механика насыпных грузов М.: 25.

17. **Кюрчев С.В., Колодий А.С. 2013.** Анализ существующих способов и средств для сепарации семян. MOTROL. Motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol.15. No2. 197-205.
18. **Кюрчев С.В., Колодий А.С. 2013.** Методики исследования параметров сепаратора семян предложенного типа. MOTROL. Motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol. 15. No 2. 205-213.
19. **Матвеев А.С. 1969.** Сепарирование зерновой смеси вертикальным воздушным потоком. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. №11, 17-19.
20. **Ткаченко О.В. 2004.** Технологические свойства семян подсолнечника. Труды Таврического государственного агротехнологического университета. Мелитополь: ТГАТУ. Вып.19, 166-175 (Украина).

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE BEHAVIOR OF SUNFLOWER KERNELS IN THE AIR FLOW SEPARATION UNITS

Summary. In this article considered one of perspective directions of increase productivity of sunflower

namely using previously selected seeds with high sowing qualities. Work practice and researches show us how sowing material characterized by weight, density and thickness. It is established that with increase in mass of seeds, as a rule increases their density and thickness. Consequently also influence on aerodynamic properties and rotation speed increase. It is all indicates possibility additional division by air stream. The analysis of data of grain separation in air channels showed how air influences stream seed from internal wall to external (in rectangular channel). The air speed is maximum in the central part of channel but at walls it is decreases whereupon division worsens. Besides the lower zone of air stream not using as constructive element and factor of division of seed material according to aerodynamic properties in existing pneumatic channels. As result we got mathematical models processes of movement and division sunflower seed in aerodynamical separator and equations describing movement modes of material were received. As result of imitating modeling movement seed was established that use device of stream loosening and setting rational parameters of input material increases extent of extraction full-fledged seeds.

Key words: a separator, an aspiration channel, the seeds, the air flow.