

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.726.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ ПО ПЛОТНОСТИ В ВИБРОПНЕВМОСЕПАРАТОРЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ СЕМЯН ОТ ВРЕДНЫХ ТРУДНООТДЕЛИМЫХ ПРИМЕСЕЙ

А.В. Иванов, А.И. Ермаков, В.М. Поздняков, А.А. Шинкарев

Разработана математическая модель процесса расслоения компонентов зерновой смеси по плотности в вибропневмосепараторе. На основе проведенных исследований получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать скорость «всплытия» частиц спорыньи в зерновых смесях под действием колебаний, восходящего воздушного потока и силы тяжести в рабочей камере сепаратора.

Введение

Процесс разделения зерновой смеси на фракции различной плотности занимает важное место при подготовке семян злаковых культур на предприятиях зерноперерабатывающей промышленности и ряде других производств.

Вибропневматический метод сепарирования, как показывает производственная практика, обеспечивает эффективное устойчивое расслоение зерновой смеси по плотности при сравнительно простом регулировании технологических параметров процесса в зависимости от культуры и дисперсного состава смеси.

Явления, происходящие в рабочей камере вибропневмосепаратора, очень сложны. В настоящее время разработано множество моделей, описывающих механизм расслоения зерновых смесей по плотности. Основными являются работы [1, 2], в которых рассмотрено расслоение зерновой смеси по плотности под воздействием вибрации и решена задача о равномерном вертикальном перемещении частиц. Однако данные зависимости получены лишь для случая плоских круговых колебаний, не учитывают влияния восходящего воздушного потока и не подходят для практического применения при расчете и проектировании вибропневмосепараторов. Следовательно, возможность применения полученных ранее моделей для процесса расслоения компонентов зерновой смеси по плотности в вибропневмосепараторе [3] требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Результаты исследований и их обсуждение

Остановимся более подробно на закономерностях расслоения смесей в вибропневмосепараторах: рассмотрим задачу, представляющую наибольший практический интерес – определим скорость «всплытия» частиц зерновой смеси, обладающих меньшей плотностью, чем остальные частицы той же смеси.

В случае воздействия на сыпучую смесь прямолинейных колебаний пространственная задача относительного движения частицы в среде сводится к плоской, т.к. частица имеет возможность относительного перемещения только в плоскости колебаний. Перемещением в направлении перпендикулярном плоскости колебаний можно пренебречь.

Согласно основному уравнению динамики

$$m \cdot \bar{a} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг;

\bar{a} – вектор абсолютного ускорения частицы, м/с^2 ;

$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i$ – сумма векторов внешних сил, действующих на частицу, Н.

Для случая относительного перемещения частицы в движущейся среде

$$\bar{a} = \bar{u} + \bar{v}, \quad (2)$$

где \bar{u} – вектор ускорения частицы в относительном движении, м/с^2 ;

\bar{v} – вектор ускорения частицы в переносном движении, м/с^2 .

Рассмотрим внешние силы, действующие на «всплывающую» частицу. Задача рассматривается в поле сил тяжести, характеризуемом ускорением свободного падения, поэтому к частице приложена сила тяжести, равная по величине:

$$G = m \cdot g, \quad (3)$$

где G – сила тяжести, Н;

g – ускорение свободного падения частицы, м/с^2 .

Как установлено исследованиями [2], сыпучая среда под действием восходящего воздушного потока и колебаний приобретает свойства жидкости, кроме того, ее следует рассматривать и как совокупность твердых частиц. Уподобляя сыпучую среду жидкости, необходимо в число сил, действующих на частицу, включить силу Архимеда, равную по величине:

$$P_A = V \cdot \rho_0 \cdot g, \quad (4)$$

где P_A – сила Архимеда, Н;

V – объем частицы, м^3 ;

ρ_0 – средняя плотность частиц среды, кг/м^3 .

Среда, в свою очередь, препятствует любому относительному перемещению частицы, воздействуя на нее с некоторой силой. При равномерном движении или гармонических колебаниях твердой частицы в вязкой несжимаемой жидкости в работе [2] предложено определять данную силу следующим образом:

$$\bar{\Phi} = -m_1 \cdot \bar{u} + \bar{F}, \quad (5)$$

где $\bar{\Phi}$ – вектор силы, с которой среда действует на частицу, Н;

m_1 – присоединенная масса частицы, кг;

\bar{F} – вектор силы сопротивления относительному движению частицы (направлен противоположно вектору относительной скорости частицы в среде \bar{v}), Н.

Знак минус в уравнении (5) указывает на то, что вектор ускорения частицы в относи-

тельном движении \vec{u} направлен противоположно вектору силы $\vec{\Phi}$.

Уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$m \cdot (\vec{u} + \vec{v}) = \vec{P}_A + \vec{G} + \vec{\Phi}. \quad (6)$$

Произведя элементарные преобразования, получим

$$(m + m_1) \cdot \vec{u} = \vec{P}_A + \vec{G} + \vec{F} - m \cdot \vec{v}. \quad (7)$$

Отметим, что последнее слагаемое в уравнении (7) является силой инерции частицы в переносном движении:

$$\vec{P}_И = -m \cdot \vec{v}, \quad (8)$$

где $\vec{P}_И$ – вектор силы инерции частицы в переносном движении, Н.

Знак минус в уравнении (8) указывает на то, что вектор ускорения частицы в переносном движении \vec{v} направлен противоположно вектору силы инерции частицы в переносном движении $\vec{P}_И$.

В окончательном виде уравнение относительного движения частицы в колеблющейся среде можно записать как

$$(m + m_1) \cdot \vec{u} = \vec{P}_A + \vec{G} + \vec{F} + \vec{P}_И = \vec{R}, \quad (9)$$

где \vec{R} – вектор равнодействующей внешних сил, Н.

Схема сил, действующих на частицу в относительном движении в среде, для случая сепарирования зерновой смеси на горизонтальной шероховатой поверхности под действием прямолинейных колебаний, восходящего воздушного потока и силы тяжести, показана на рисунке 1.

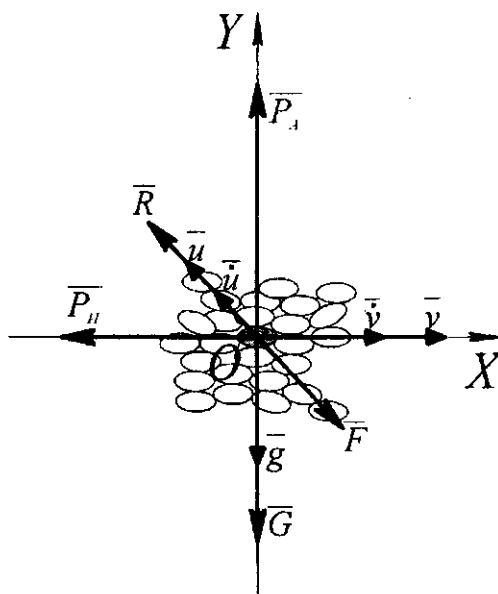


Рисунок 1 – Схема сил действующих на частицу в относительном движении в среде

В рассматриваемом случае проекции сил сопротивления на координатные оси X, Y (рисунок 1) можно определить как [4]:

$$F_x = -F_v \cdot k_1 \cdot \frac{u_x}{v}, \quad (10)$$

$$F_y = -F_h \cdot k_1 \cdot \frac{u_y}{v}, \quad (11)$$

где F_v – максимальная сила сопротивления при относительном движении частицы в горизонтальном направлении, Н;

F_h – максимальная сила сопротивления при относительном движении частицы в вертикальном направлении, Н;

k_1 – коэффициент пропорциональности, показывающий во сколько раз скорость частицы относительно среды u меньше скорости переносного движения v .

Знак минус в уравнениях (10, 11) указывает на то, что проекции на соответствующие оси силы сопротивления при относительном движении и скорости частицы относительно среды противоположно направлены.

Решим уравнение (9) для случая сепарирования сыпучей смеси на горизонтальной шероховатой поверхности под действием прямолинейных колебаний, восходящего воздушного потока и силы тяжести.

При этом проекции на оси X, Y скорости переносного движения среды (рисунок 1) определяются равенствами:

$$v_x = A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi), \quad (12)$$

$$v_y = 0, \quad (13)$$

где A – амплитуда колебаний, м;

ω – угловая частота колебаний, рад/с;

τ – время, с;

φ – начальная фаза колебаний, рад.

Величины A и φ при послыном движении зависят от расстояния до шероховатой поверхности, однако в первом приближении их изменение в уравнениях относительного движения можно не учитывать. Тогда уравнение (9) в проекциях на координатные оси X, Y можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_1) \cdot \dot{u}_x &= -m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) - F_v \cdot k_1 \cdot \frac{u_x}{A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)} \\ (m + m_1) \cdot \dot{u}_y &= V \cdot \rho_0 \cdot g - m \cdot g - F_h \cdot k_1 \cdot \frac{u_y}{A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Введем коэффициент Δ , показывающий отношение средних плотностей частицы и среды:

$$\Delta = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (15)$$

где ρ – средняя плотность частицы, кг/м³;

ρ_0 – средняя плотность частиц среды, кг/м³.

Произведя элементарные преобразования (14) с учетом (15), получим:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_1) \cdot \dot{u}_x &= -m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) - F_v \cdot k_1 \cdot \frac{u_x}{A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)} \\ (m + m_1) \cdot \dot{u}_y &= m_0 \cdot (1 - \Delta) \cdot g - F_h \cdot k_1 \cdot \frac{u_y}{A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где m_0 – масса частицы среды, кг.

В случае равномерного относительного движения частицы ($u = \text{const}$) система уравнений (16) имеет решение вида:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{-m_0 \cdot A^2 \cdot \omega^3 \cdot \sin 2(\omega \cdot \tau + \varphi)}{2 \cdot F_v \cdot k_1} \\ u_y &= \frac{m_0 \cdot (1 - \Delta) \cdot g \cdot A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)}{F_h \cdot k_1} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Анализ литературных данных показал, что на данный момент не существует точной методики экспериментального определения максимальных сил сопротивления относительному движению частицы F_v, F_h в колеблющейся среде.

С практической точки зрения представляет большой интерес получение точных расчетных зависимостей для определения скорости «всплытия» частиц u_y , обладающих меньшей плотностью, чем остальные частицы той же смеси, как основного показателя эффективности процесса расслоения, необходимого для расчета и проектирования вибропневмосепараторов.

Введем коэффициент пропорциональности k_2 , показывающий во сколько раз сила инерции частицы среды в переносном движении $P_{и0}$ больше максимальной силы сопротивления при относительном движении частицы в вертикальном направлении F_h :

$$k_2 = \frac{P_{и0}}{F_h} = \frac{m_0 \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)}{F_h} \quad (18)$$

Тогда, подставив (17) в (18), можно получить уравнение для расчета скорости «всплытия» частиц u_y в следующем виде:

$$u_y = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{(1 - \Delta) \cdot g}{\omega} \quad (19)$$

Отношение коэффициентов пропорциональности k_2/k_1 заменим одним общим безразмерным коэффициентом K , который является функцией режимных параметров работы вибропневмосепарирующей машины и характеристик сыпучей смеси, тогда:

$$u_y = K \cdot \frac{(1 - \Delta) \cdot g}{\omega} \quad (20)$$

Для экспериментальных исследований процесса расслоения компонентов зерновой смеси по плотности в вибропневмосепараторе при очистке семян тритикале и ржи от спорыньи был разработан экспериментальный стенд [5].

При проведении эксперимента влажность зерновых смесей поддерживалась равной 13–14 %. Режимные параметры работы вибропневмосепаратора варьировались в следующих интервалах: угол наклона сетчатой деки к горизонтали $\alpha = 4,5–5,5^\circ$; угол действия добавоч-

ной силы от электровибраторов $\beta=40-50^\circ$; скорость воздуха в камере вибропневмосепаратора $v_B=0,75-1,1$ м/с; угловая частота колебаний сетчатой деки $\omega=105-157$ рад/с (частота вращения роторов электровибраторов $n=1000-1500$ об/мин). Амплитуда колебаний деки и высота смеси у патрубка для очищенных семян поддерживались постоянными 2 и 50 мм. Средние плотности зерновок ржи, тритикале и рожков спорыньи соответственно равны 1215, 1290, 1160 кг/м³. Эксперимент проводился по плану 2⁴ со звездой в десяти повторностях для каждой зерновой смеси.

При обработке экспериментальных данных при помощи статистического пакета программ STATGRAPHICS Plus была получена аналитическая зависимость для расчета коэффициента K в случае сепарирования семян ржи и тритикале в разработанном вибропневмосепараторе при изменении режимных параметров работы в пределах варьирования факторов:

$$K = [Z_1 \cdot M + Z_2 \cdot B + Z_3 \cdot C + Z_4 \cdot D + Z_5 \cdot M^2 + Z_6 \cdot M \cdot B + Z_7 \cdot M \cdot C + Z_8 \cdot M \cdot D + Z_9 \cdot B^2 + Z_{10} \cdot B \cdot C + Z_{11} \cdot B \cdot D + Z_{12} \cdot C^2 + Z_{13} \cdot C \cdot D + Z_{14} \cdot D^2 + Z_{15}] \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

где Z_1, Z_2, \dots, Z_{15} – безразмерные эмпирические коэффициенты, характеризующие свойства сыпучей смеси (форму частиц смеси, коэффициент их внутреннего трения, сыпучесть смеси и т.д.);

M, B, C, D – безразмерные коэффициенты, зависящие от режимных параметров работы вибропневмосепаратора.

Безразмерные эмпирические коэффициенты, характеризующие свойства сыпучей смеси, являются индивидуальными для различных смесей, их значения для случая сепарирования семян ржи и тритикале представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения безразмерных эмпирических коэффициентов, характеризующих свойства сыпучей смеси

Обозначение эмпирического коэффициента	Значение эмпирического коэффициента для соответствующей сыпучей смеси	
	Семена ржи	Семена тритикале
Z_1	18703,8	9179,22
Z_2	2610,33	1070,69
Z_3	2367,49	1231,6
Z_4	-23671,7	-13909,6
Z_5	-54014,2	-29272,2
Z_6	-167,244	222,653
Z_7	-758,177	-171,807
Z_8	34741,7	19596,1
Z_9	-786,363	-380,381
Z_{10}	-53,519	14,236
Z_{11}	2787,41	2272,13
Z_{12}	-1177,86	-626,687
Z_{13}	-993,767	-1534,41
Z_{14}	59131,9	33596,7
Z_{15}	-3808,3	-1553,95

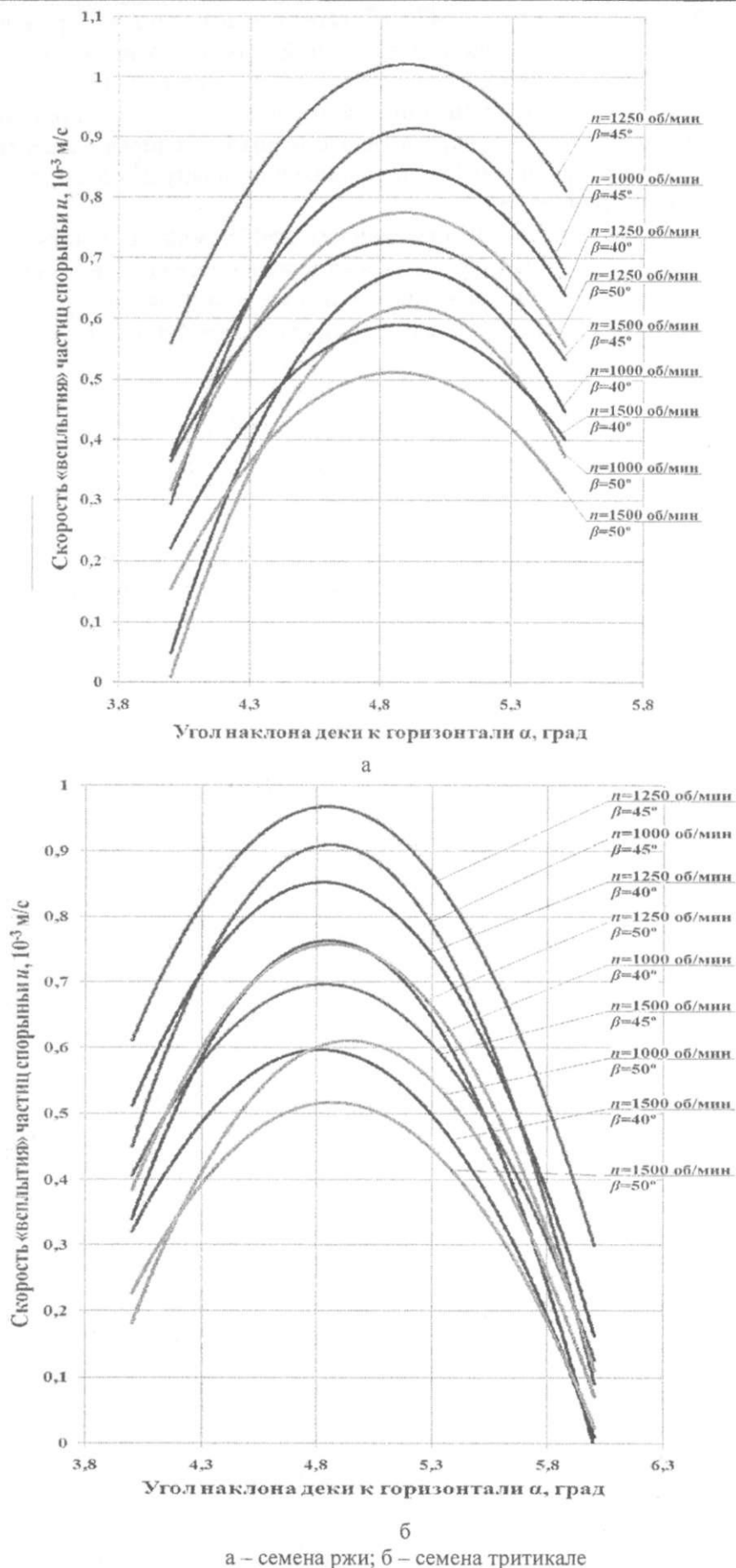


Рисунок 2 – Диаграммы для определения скорости «всплытия» частиц спорыньи в сыпучих смесях при $v_B=0,925$ м/с

Безразмерные коэффициенты, зависящие от режимных параметров работы вибропневмосепаратора, определяются по следующим выражениям:

$$M = \frac{\alpha}{\gamma}; \quad B = \frac{\beta}{\gamma}; \quad C = \frac{n}{n^*}; \quad D = \frac{v_B}{v_B^*}, \quad (22)$$

где α – угол наклона сетчатой деки к горизонтали, град;

γ – угол естественного откоса сыпучей смеси, град;

β – угол действия добавочной силы от электровибраторов, град;

n – частота вращения роторов электровибраторов, об/мин;

n^* – асинхронная частота вращения дебалансов применяемых зерноочистительных машин, об/мин;

v_B – скорость воздуха в камере вибропневмосепаратора, м/с;

v_B^* – скорость витания частиц сыпучей смеси, м/с.

Угол естественного откоса семян ржи и тритикале, а также скорости их витания были приняты соответственно $\gamma = 25^\circ$, $v_B^* = 9,5$ м/с, асинхронная частота вращения дебалансов $n^* = 1500$ об/мин.

Для упрощения инженерных расчетов с использованием аналитической зависимости (21) были разработаны диаграммы, представленные на рисунке 2, позволяющие графически определить скорость «всплытия» частиц спорыньи в сыпучих смесях в зависимости от режимных параметров работы вибропневмосепаратора.

Математическая модель процесса расслоения (20) – адекватна (экспериментальный критерий Фишера $F_{эксп} = 1,955$ меньше табличного – $F_{табл} = 1,995$). Полученное уравнение для расчета скорости «всплытия» рожков спорыньи в семенах тритикале и ржи под действием воздушного потока, колебаний и силы тяжести в разработанном вибропневмосепараторе корректно описывает технологический процесс и может использоваться при расчетах и проектировании вибропневмосепараторов.

Заключение

Разработана математическая модель процесса расслоения компонентов зерновой смеси по плотности в вибропневмосепараторе. Модель адекватно описывает процесс «всплытия» рожков спорыньи в сыпучих смесях при изменении режимных параметров работы вибропневмосепаратора в следующих пределах: угол наклона сетчатой деки к горизонтали $\alpha = 4,5 - 5,5^\circ$; угол действия добавочной силы от электровибраторов $\beta = 40 - 50^\circ$; скорость воздуха в камере вибропневмосепаратора $v_B = 0,75 - 1,1$ м/с; угловая частота колебаний сетчатой деки $\omega = 105 - 157$ рад/с (частота вращения роторов электровибраторов $n = 1000 - 1500$ об/мин). Полученные уравнения могут использоваться при расчетах и проектировании вибропневмосепараторов для очистки семян от вредных трудноотделимых примесей.

Литература

- 1 Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 303 с.
- 2 Блехман, И.И. О теории вибрационного разделения сыпучих смесей / И.И. Блехман, В.Я. Хайнман // Изв. АН СССР. – Сер. Механика. – 1965. – №5 – С.22–30.
- 3 Вибропневмосепаратор: пат. №14105 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 07 В 4/00 / А.В.Иванов, В.М. Поздняков, А.И. Ермаков; заявитель Могилёвский гос. ун-т продовольствия. – № а20081638; заявл. 18.12.08.; опубл. 28.02.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – №1. – С. 84–85.
- 4 Иванов, А.В. Математическое описание процесса самосортирования компонентов зерновой смеси по плотности в вибропневмосепараторе / А.В. Иванов, А.И. Ермаков, В.М. Поздняков, В.Ю. Тыщенко, А.А. Шинкарев // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2011. – № 1(11). – С. 81–89.
- 5 Поздняков, В.М. Перспективы развития специализированного зерноочистительного оборудования / В.М. Поздняков, А.В. Иванов, А.И. Ермаков // Вестник МГУП. – 2009. – № 2(7). – С. 85–90.

Поступила в редакцию 23.09.2011