



УДК 631.362.36:635.62

А.А. Ильченко
A.A. Ilchenko

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

MATHEMATICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC SEPARATOR OPERATION

Ключевые слова: семя, аэродинамический сепаратор, математическая модель, сила вакуумного присасывания семени, цилиндрическое перфорированное решето.

Разработан аэродинамический сепаратор для разделения семян бахчевых культур по массе, в котором устранены недостатки сепараторов-прототипов. Его рабочий орган состоит из цилиндрической перфорированной сепарирующей поверхности, из середины которой отсасывается воздух, что позволяет уменьшить ее сопротивление воздушному потоку и, следовательно, расход энергии. Для определения параметров цилиндрического перфорированного решета исследован закон перемещения семени тыквы по его поверхности. Составлена схема сил, действующих на семя при движении по поверхности цилиндрического решета, составлено и решено дифференциальное уравнение движения семени по поверхности решета. После решения найдены уравнения, определяющие угловую скорость семени в момент отрыва и условие отрыва от решета. Далее построена имитационная модель распределения и движения слоя семян по поверхности барабана. Рабочую поверхность барабана представляли матрицами размерности количества семян, расположенных, соответственно, по длине и ширине решета. Рассмотрено два элемента матрицы: первый учитывает перекрываемые семенами отверстия решета, второй – условие отрыва семени. Для каждого семени находили угол отрыва и скорость в момент отрыва, эти данные сохраняли для дальнейшего расчета траектории движения после отрыва. Определяли траектории движения семян по осям x и y . Решая уравнение, получили координаты перемещения семени после отрыва от барабана. При виртуальных экспериментах получали траектории семян каждой из фракций. По полученным зависимостям была разработана компьютерная программа, которая имитирует работу сепаратора. Благодаря построению имитационной модели работы сепаратора определены параметры точки отрыва зерна от барабана, рассмотрено движение семян после отрыва от барабана для определения положения угла

установки делительной перегородки, отделяющей семена с необходимой массой тысячи, в зависимости от конструктивных и технологических параметров сепаратора.

Keywords: seed, aerodynamic separator, mathematical model, seed vacuum suction force, cylindrical perforated screen.

The aerodynamic separator to separate seeds of cucurbits crops by thousand-seed weight was developed. Its operating element consists of cylindrical perforated separating surface from the middle of which the air flow is sucked by two fans. The resistance to the air flow and power consumption is reduced. The pattern of pumpkin seed displacement on the cylindrical perforated screen surface was analyzed to determine the perforated screen specifications. The scheme of the forces acting on the seed during its displacement on the screen surface was drawn out, the differential equation of seed movement on the screen surface was derived and solved, and the equations that determined the rotation speed of the seed at the moment of the separation and the condition of the separation from the screen were found. The simulation model of the distribution and movement of the seed layer on the surface of the separator drum was developed. The working surface of the drum was presented by the matrix of the seed amounts that were arranged screen lengthwise and broadwise. Two elements of the matrix were examined: the first one registers the openings that are covered with the seeds, and the second one registers the conditions of seed separation. We found separation angle and the speed at the moment of separation for every seed and saved that data for the future path-planning calculation after the separation. Owing to the development of the simulation model of the separator operation, the characteristics of the point of seed separation from the drum were determined; the movement of the seeds after the separation from the drum was analyzed to determine the angle of the partition to separate the seeds with the required thousand-seed weight according to the design and technological specifications of the separator.

Ильченко Артем Анатольевич, ассистент, каф. механизации производственных процессов в животноводстве, Луганский национальный аграрный университет, Украина. Тел. +380-991625384. E-mail: strong.ilchenko@list.ru.

Ilchenko Artem Anatolyevich, Asst., Chair of Mechanization of Animal Farming Production Processes, Lugansk National Agricultural University, Ukraine. Ph.: +380-991625384. E-mail: strong.ilchenko@list.ru.

Введение

Нами предложен новый сепаратор для подготовки семян бахчевых культур к посеву путем сепарации их по массе (рис. 1) [1-3]. Был разработан рабочий орган, состоящий из цилиндрической сепарирующей поверхности, из которой параллельно высасывается воздушный поток двумя вентиляторами, что позволяет уменьшить ее сопротивление воздушному потоку и расход энергии по сравнению с аналогами. В качестве сепарирующей поверхности предлагается использовать цилиндрическое перфорированное полотно, которое имеет круглые отверстия диаметром меньше, чем ширина семени.

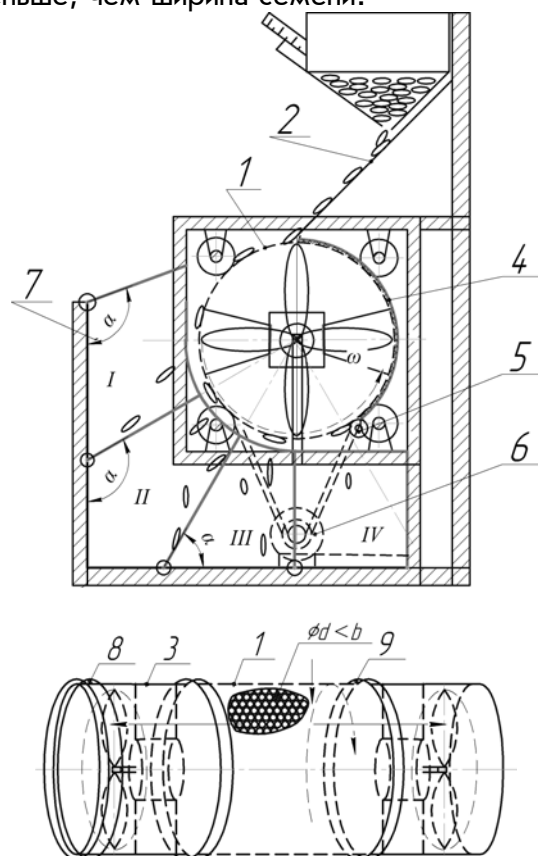


Рис. 1. Схема аэродинамического сепаратора семян:
 1 – сепарирующая поверхность;
 2 – скатной лоток; 3 – камера с вентиляторами; 4 – приспособление для закрытия нерабочей части решета;
 5 – очистная щетка; 6 – привод цилиндрического решета;
 7 – приемники разделенного материала;
 8 – паз под ремень

Для аналитического исследования сепарации семян сельскохозяйственных культур исследуемым аэродинамическим сепаратором и определения его параметров и режимов работы необходимо провести математическое моделирование движения семян по поверхности цилиндрического перфорированного решета.

Цель исследований – разработать математическую модель рабочего процесса предлагаемого аэродинамического сепаратора семян.

Для достижения поставленной цели были определены **задачи**:

- представить схему сил, действующих на семя при его движении по цилиндрической перфорированной сепарирующей поверхности;
- составить дифференциальное уравнение движения семени по поверхности барабана, получить условие отрыва семени;
- создать математическую модель, имитирующую работу аэродинамического сепаратора.

Результаты теоретических исследований

План моделирования работы, разработанного аэродинамического сепаратора представлен на рисунке 2.

Для описания распределения семян по массе общепринятым является нормальный закон распределения случайных величин:

$$f(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(m_j - a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение;

m_{1j} – текущая масса семени, г;

– мат. ожидание.

Рабочую поверхность барабана имитируем матрицами размерности $k \times n$ (k и n – количество семян, расположенных в длину и ширину решета соответственно), H_l – удвоенный шаг установки отверстий на поверхности барабана:

$$k = \left\lfloor \frac{L}{H_l} \right\rfloor, \quad n = \left\lfloor \frac{C}{H_l} \right\rfloor,$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{441} & a_{442} & \dots & a_{448} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{18} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{441} & b_{442} & \dots & b_{448} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В качестве элемента матрицы A рассматривали четыре отверстия, перекрываемых семенем. Если отверстия перекрыты семенем, присваиваем a_{ij} значение массы семени, в обратном случае – значение 0. Матрица B соразмерна матрице A и ее элементы содержат значения силы нормальной реакции

Н. Матрицы А и В составлены для решета с параметрами: длина решета по окружности – 1 м, ширина решета – 0,1 м.

Рассмотрим движение семени по поверхности цилиндрического перфорированного барабана (рис. 3). На семя, находящееся на поверхности барабана, действуют такие силы: F_m – сила тяжести, Н; $F_{\omega}^{(H)}$ – центробежная сила инерции, Н; $F_{\omega}^{(m)}$ – тангенциальная составляющая силы инерции; F_{mp} – сила трения семени по цилиндрической сепарирующей поверхности, Н; $F_{в.с}$ – сила ваку-

умного присасывания семени к отверстию решета, Н; F_a – аэродинамическая сила воздушного потока, Н; $F_{с.б}$ – сила сопротивления воздуха, Н.

Спроецируем рассмотренные силы на касательную к поверхности сепарирующего цилиндра и составим дифференциальное уравнение движения семени [4], а также значение нормальной реакции семени на решето:

$$mr\ddot{\varphi} = mg \cdot \sin\varphi - fN + mk_n V_c^2. \quad (3)$$

$$N = mg \cdot \cos\varphi - \Delta ps - mk_n V_{в.н}^2 - mr\dot{\varphi}^2. \quad (4)$$

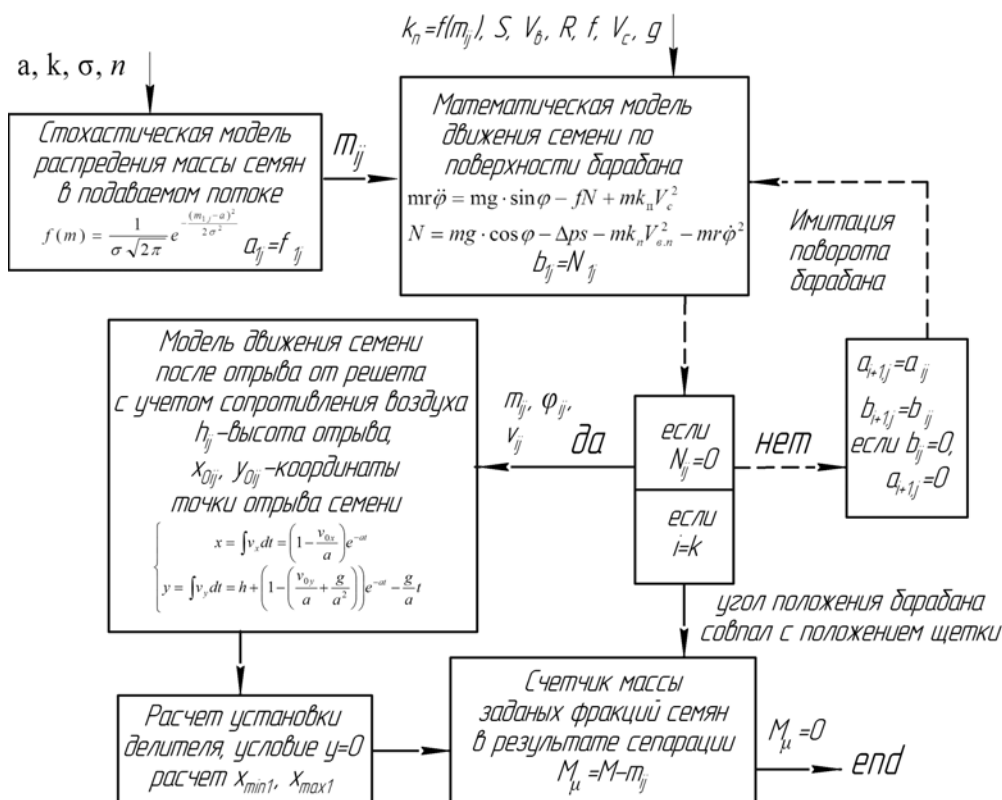


Рис. 2. Функциональная схема математической модели, имитирующей работу аэродинамического сепаратора

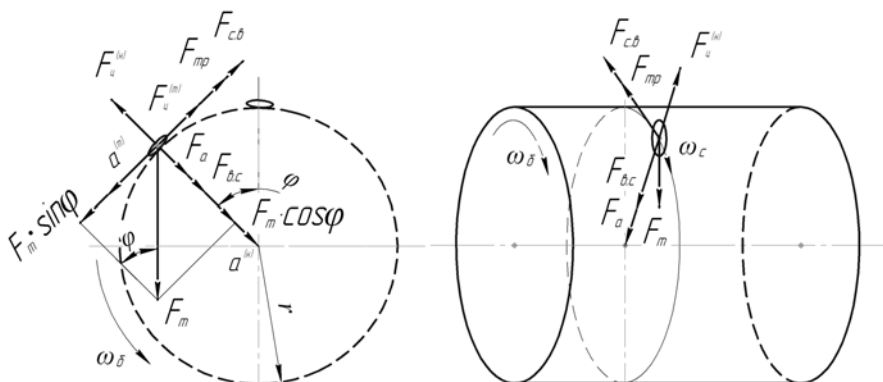


Рис. 3. Схема сил, действующих на семя при его движении по цилиндрической поверхности перфорированного решета

Исключив из уравнения 1 нормальную реакцию N и проведя тождественные преобразования, получим:

$$\ddot{\varphi} - f\dot{\varphi}^2 = \frac{g}{r} \cdot \sin \varphi - f \frac{g}{r} \cdot \cos \varphi + \frac{k_n}{r} V_c^2 + f \frac{\Delta ps}{mr} + f \frac{k_n V_{\epsilon.n}^2}{r} \quad (5)$$

Понизив порядок уравнения (5) и решив его, получим:

$$(\varphi')^2 = \frac{1}{4f^2 + 1} (\cos \varphi + 2f \sin \varphi) + \frac{1}{1 - 4f^2} (\sin \varphi - 2f \cos \varphi) - \frac{D}{f} + \left(\frac{D}{f} + \frac{2f}{1 - 4f^2} - \frac{1}{4f^2 + 1} \right) e^{2f\varphi} \quad (6)$$

Подставив $(\varphi')^2$ в уравнение (4) и приравняв его к нулю, получим уравнение для определения угла отрыва семени от поверхности барабана:

$$mg \cdot \cos \varphi - \Delta ps - mk_n V_{\epsilon.n}^2 - mr \left(\frac{1}{4f^2 + 1} (\cos \varphi + 2f \sin \varphi) + \frac{1}{1 - 4f^2} (\sin \varphi - 2f \cos \varphi) - \frac{D}{f} + \left(\frac{D}{f} + \frac{2f}{1 - 4f^2} - \frac{1}{4f^2 + 1} \right) e^{2f\varphi} \right) = 0 \quad (7)$$

Полученное уравнение решали численно, используя метод Ньютона. Параметры изменения угла поворота барабана φ варьировали от $\frac{\pi}{2}$ до $\frac{7\pi}{4}$, точность $\varepsilon = 0,01$.

После отрыва определяли траекторию движения семени с учетом сопротивления воздушного потока (рис. 4) [5, 6]. Входными параметрами являлись: m_k – масса семени, г; v_{0k} – начальная скорость семени, м/с; φ_k – угол отрыва семени от барабана; a – константа, учитывающая воздействие на траекторию встречного потока воздуха; k – номер оторвавшегося от барабана семени.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение семени:

$$v'_x = -av_x \quad (8)$$

$$v'_y = -av_y - g \quad (9)$$

Начальные условия для нахождения траектории движения семени после отрыва:

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= (r+d) - BC = (r+d) - r \cos(180 - \varphi) = \\ &= r \cdot (1 + \cos \varphi_{omp}) + d, \\ y_0 &= h = (r+h_0) - r \cdot \sin \varphi_{omp} = \\ &= r(1 - \sin \varphi_{omp}) + h_0. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

m, v_0, φ_{omp} .

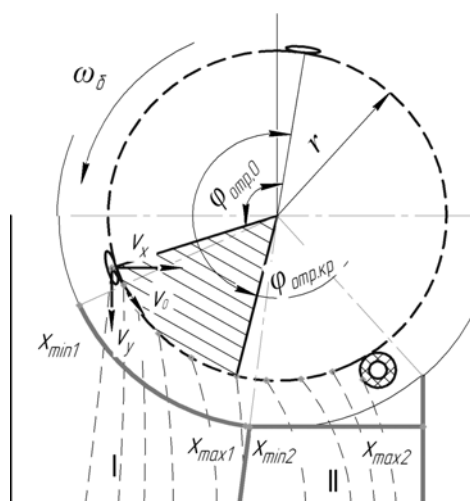
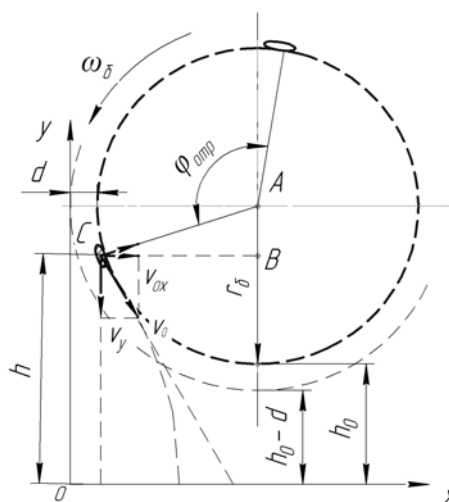


Рис. 4. Траектория движения семени после отрыва от перфорированного барабана и разнесение семян по фракциям I и II соответственно

Для учета сопротивления набегающего воздушного потока при движении семени по траектории рассчитывали коэффициент сопротивления:

$$a = u \cdot k_n^2 + u \cdot k_n + c, \quad (11)$$

где a, b, c – коэффициенты, полученные при аппроксимации экспериментальных данных;

$k_n = k_n(\bar{m})$ – коэффициент парусности, зависимость которого от массы семени установлена при аппроксимации экспериментальных данных.

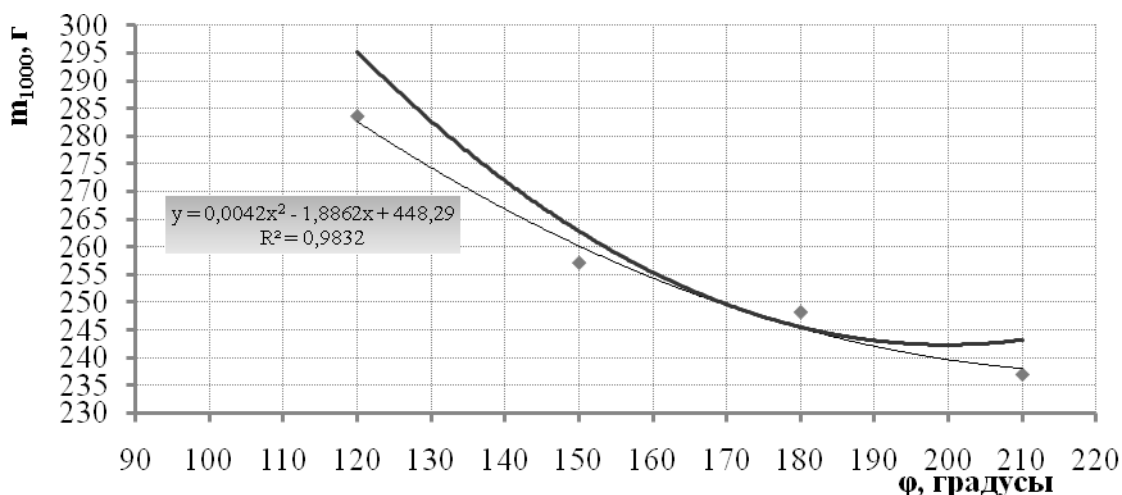


Рис. 5. Теоретическая и экспериментальная зависимость значения массы тысячи семян от угла установки делителя (при частоте вращения барабана $n = 50 \text{ мин.}^{-1}$, скорости воздушного потока $V_b = 2,6 \text{ м/с}$)

Для определения положения разделителя приемного лотка использовали уравнения расчета текущих координат семени:

$$\begin{cases} x = \int v_x dt = \left(1 - \frac{v_{0x}}{a}\right) e^{-at}, \\ y = \int v_y dt = h + \left(1 - \left(\frac{v_{0y}}{a} + \frac{g}{a^2}\right)\right) e^{-at} - \frac{g}{a} t. \end{cases} \quad (12)$$

Координату падения семени в приемный лоток находим из условия $y = 0$. При достаточно большом количестве виртуальных экспериментов получим интервал $[x_{\min}, x_{\max}]$ для каждого из классов семян. В качестве размеров принимающего лотка брали эти значения.

Пользуясь разработанной выше методикой и полученными зависимостями, была составлена компьютерная программа, имитирующая работу сепаратора [6, 7] и позволяющая получить угол установки делительной перегородки для отделения семян с заданной массой тысячи. Значение массы тысячи семян в программе просчитывается автоматически.

В программу закладываются механико-технологические свойства сепарируемых семян, режимные и конструктивные параметры сепаратора. По результатам работы программы отклонение теоретических и экспериментальных зависимостей угла отрыва семян находится в пределах 1% (рис. 5).

Выводы

1. Представлена схема действующих на семя сил при его движении по цилиндрической сепарирующей поверхности аэродинамического сепаратора.

2. На основе сил, действующих на семя, составлено дифференциальное уравнение движения семени по поверхности барабана,

при решении которого получено условие отрыва его от поверхности (4-7).

3. Определено положение разделителя приемного лотка. Создана функциональная модель, имитирующая работу аэродинамического сепаратора. Пользуясь полученными зависимостями, составили компьютерную программу для практической реализации полученных результатов.

Библиографический список

1. Пат. 85887 Україна, МКП В07В 4/00. Повітряно-відцентровий пристрій для сепарування насіння баштанних культур / М.В. Брагінець, В.П. Єрмак, А.А. Ільченко; заявник та власник Луганський національний аграрний університет. № u 201304592; заявл. 12.04.13; опубл. 10.12.13, Бюл. №23/2013
2. Єрмак В.П., Богданов Є.В., Ільченко А.А. Побудування розрахункової моделі функціонування сепаратора насіння гарбуза // Збірник наукових праць Львівського національного аграрного університету. Серія: Агроінженерні дослідження. – Львів: ЛНАУ, 2012. – № 16. – С. 179-189.
3. Єрмак В.П., Ільченко А.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров аэродинамического сепаратора семян тыквы // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський Агротехнологічний університет». Серія: Технічні науки. Вип. 153. – Сімферополь: ВД «Аріал», 2013. – С. 99-103.
4. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. – Киев: Укр. акад. с.-х. наук, 1960. – 283 с.
5. Gary K. Design of Agricultural Machinery / Gary Krutz, Lester Thomposon, Paul Claar. – USA, New York: John Willey & Sons, 1994 – 472 с.

6. Остапчук Н.В. Математическое моделирование технологических процессов хранения и переработки зерна. – М.: Колос, 1977. – 239 с.

7. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.

References

1. Pat. 85887 Ukraïna, MKP V07V 4/00. Povitriano-vidcentrovij prystrij dlja separuvannja nasinnja bashtannyh kul'tur / Braginec' M.V., Jermak V.P., Il'chenko A.A., zavavnyk ta vlasnyk Lugans'kyj nacional'nyj agrarnyj universytet. № u 201304592; zavavl. 12.04.13; opubl.10.12.13, Bjul. №23/2013.

2. Jermak V.P. Pobuduvannja rozrahunkovoi' modeli funkcionuvannja separatora nasinnja garbuza / V.P. Jermak, Je.V. Bogdanov, A.A. Il'chenko // Zbirnyk naukovyh prac' L'vivs'kogo nacional'nogo agrarnogo universytetu. Serija: Agroinzhenerni doslidzhennja. – L'viv: LNAU, 2012. – №16 – S.179-189.

3. Ermak V.P., Il'chenko A.A. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov aerodinamicheskogo separatora semyan tykvy // Naukovi prac'i Pivdenного filialu Nacional'nogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannja Ukraïny «Kryms'kyj Agrotehnologichnyj universytet». Serija: Tehnichni nauky. Vyp. 153. – Simferopol': VD «Arial», 2013. – S. 99-103.

4. Vasilenko P.M. Teoriya dvizheniya chastitsy po sherokhovatym poverkhnostyam sel'skokhozyaistvennykh mashin. – K.: Ukr. akad. s.-kh. nauk, 1960. – 283 s.

5. Gary K. Design of Agricultural Machinery / Gary Krutz, Lester Thomposon, Paul Claar. – USA, New York: John Willey & Sons, 1994 – 472 pp.

6. Ostapchuk N.V. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov khraneniya i pererabotki zerna. – M.: Kolos, 1977. – 239 s.

7. Strutins'kii V.B. Matematichne modelyuvannya protsesiv ta sistem mekhaniki. – Zhitomir: ZHITI, 2001. – 612 s.

