

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 519.87 : 633.491

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-43-46

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ОТ КАРТОФЕЛЯ НА ЭЛЕВАТОРЕ

БЕЛОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ[✉], *д-р техн. наук, профессор*¹belov@rgau-msha.ru[✉]; Scopus Author ID: 57212563127**ГАДЖИЕВ ИМРАН ПАРВИЗОВИЧ**, *инженер*²

imgadjiev@mail.ru

ШЕМЯКИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ, *д-р техн. наук, профессор*²

shem.alex62@yandex.ru

КАБДИН НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*¹

energo-nek@rgau-msha.ru

МЕЛЬНИКОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*¹melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева; 390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, 1

Аннотация. В связи с недостаточностью теоретических исследований моделирования сепарации картофеля на прутковом элеваторе проведены исследования полноты сепарации картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна типа КПК-3. Представлена математическая модель отделения примесей от картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна, позволяющая рассчитать полноту сепарации на элеваторе. Получены уравнения распределения полноты сепарации по длине полотна элеватора и обоснованы уравнения связи между длиной элеватора и полнотой сепарации. Установлено, что полнота сепарации функционально зависит от длины участка полотна элеватора и двух коэффициентов, каждый из которых можно определить по экспериментальным данным полноты сепарации на двух участках рабочей ветви элеватора. Установлено, что на картофелеуборочном комбайне типа КПК-3 90%-ная полнота сепарации достигается при увеличении длины пруткового элеватора до 1800 мм при заданной доле отделившихся примесей 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм.

Ключевые слова: картофелеуборочный комбайн, элеватор, полнота сепарации, математическая модель сепарации

Формат цитирования: Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. Математическая модель отделения примесей от картофеля на элеваторе // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 6. С. 43-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-43-46>.

© Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М., 2022



ORIGINAL PAPER

MATHEMATICAL MODEL OF SEPARATING POTATO IMPURITIES AT THE ELEVATOR

MIKHAIL I. BELOV[✉], *DSc (Eng), Professor*¹belov@rgau-msha.ru[✉]; Scopus Author ID: 57212563127**IMRAN P. GADZHIEV**, *Eng*²

imgadjiev@mail.ru

ALEKSANDR V. SHEMYAKIN, *DSc (Eng), Professor*²

shem.alex62@yandex.ru

NIKOLAY E. KABDIN, *PhD (Eng), Associate Professor*¹

energo-nek@rgau-msha.ru

OLEG M. MELNIKOV, *PhD (Eng), Associate Professor*¹melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643¹ Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation² Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev; 1, Kostycheva Str., Ryazan, 390044, Russian Federation

Abstract. Due to the lack of theoretical studies of modelling potato separation on the rod elevator, the authors conducted research of potato separation completeness on the elevator of potato harvester type KPK-3. The research resulted in designing a mathematical model of separating

potato impurities on the potato harvester elevator that can help determine the completeness of separation on the elevator. As a result, the authors derived equations of the distribution of separating fineness over the elevator apron length; proved equations of connection between the elevator length and separating fineness. It was established that separation fineness depends functionally on the length of the elevator apron section and two coefficients, each of which can be determined according to the experimental data of separation fineness at two sections of the elevator's operating flight. It is established that when using the КРК-3 type potato harvester, 90% separation is reached when increasing the length of the rod elevator to 1800 mm with a given proportion of separated impurities of 50% at the length of 600 mm and 75% at the length of 1000 mm.

Keywords: potato harvester, elevator, potato separation, mathematical model of separation

For citation: Belov M.I., Gadzhiev I.P., Shemyakin A.V., Kabdin N.E., Melnikov O.M. Mathematical model of separating potato impurities at the elevator. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(6): 43-46. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-43-46>.

Введение. Повышение полноты отделения картофеля от примесей является актуальной проблемой уборки урожая картофелеуборочными комбайнами¹ [1-8]. Проблема сепарации картофеля на прутковом элеваторе изучена достаточно широко^{2,3,4} [8-13]. Однако вопрос разработки математической модели сепарации, устанавливающей взаимосвязь полноты сепарации с параметрами элеватора (в частности, с длиной элеватора), рассмотрен недостаточно. Представляет интерес математическая модель сепарации зерна в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна².

Цель исследований: повышение полноты сепарации картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна типа КРК-3.

Материалы и методы. Вывод уравнений распределения полноты отделения примесей по длине полотна элеватора, обоснование уравнений связи между длиной элеватора и полнотой сепарации основывались на материалах испытаний картофелеуборочных комбайнов [1]. Задача заданной величины сепарации на элеваторе решалась при регламентируемой техническим заданием подаче почвенно-клубеносной массы на элеватор картофелеуборочного комбайна. При разработке модели отделения примесей от картофеля использованы методы математического анализа, численного анализа и среды программирования Lazarus.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим установившийся режим работы картофелеуборочного комбайна.

На схеме пруткового элеватора (рис. 1) введем следующие обозначения: Oxy – прямоугольная декартова система координат, жестко связанная с комбайном, в плоскости, перпендикулярной рабочему полотну элеватора с центром O на оси ведомого колеса, осью Ox , параллельной скорости точки полотна относительно комбайна; L – длина рабочей ветви полотна элеватора без учета прогиба, м; x – координата точки рабочей ветви полотна элеватора по оси Ox и точки сечения пласта, перпендикулярного оси Ox ($0 \leq x \leq L$), м; Q – подача клубеносного почвенного пласта, подрезанного лемехом без учета ботвы, кг/с; Q_0 – подача клубней

за исключением мелкой фракции, относящейся к примесям, кг/с; Q_1 – подача примесей, которые не разрушены и не могут пройти в зазор между прутками элеватора, кг/с; Q_2 – подача примесей, которые могут пройти в зазор между прутками элеватора, кг/с; Q_3 – подача примесей, отделенных от клубней на участке полотна перед данным сечением пласта, кг/с; m – доля отделившихся примесей на участке полотна элеватора длиной x с отсчетом от начала ($0 \leq m \leq 1$).

В установившемся режиме переменные Q, Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 не зависят от времени. При этом подачи Q и Q_0 не изменяются, а переменные Q_1, Q_2, Q_3 зависят от x . Подача Q определяется скоростью комбайна, заглублением лемеха, шириной захвата и плотностью пласта. Подача Q_0 определяется урожайностью картофеля, скоростью комбайна и шириной захвата.

По определению

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q - Q_0. \tag{1}$$

По мере продвижения пласта на элеваторе некоторые комки разрушаются и переходят в состояние, в котором могут отделиться через зазоры между прутками, то есть с увеличением координаты сечения x подача неразрушенных примесей, которые не могут пройти в зазоры между прутками, уменьшается. Будем полагать, что уменьшение подачи неразрушенных примесей на малом участке полотна тем больше, чем больше подача неразрушенных примесей при линейной связи между подачей и ее изменением на малом участке, то есть

$$\frac{dQ_1}{dx} = -k_1 Q_1, \tag{2}$$

где k_1 – постоянный коэффициент, m^{-1} .

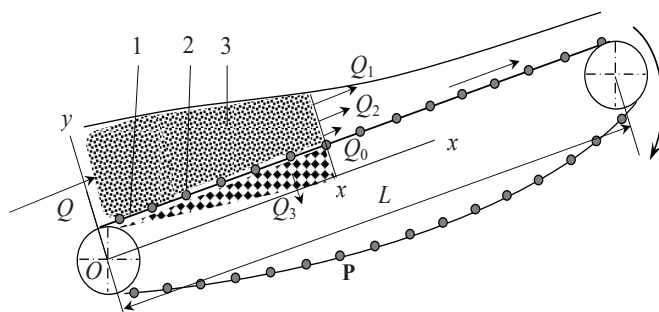


Рис. 1. Схема пруткового элеватора (без указания встряхивателей и поддерживающих роликов):

- 1 – полотно элеватора; 2 – пруток элеватора;
- 3 – пласт на участке полотна длиной x от начала

Fig. 1. Scheme of a bar elevator (without specifying shakers and supporting rollers):

- 1 – elevator apron; 2 – elevator rod;
- 3 – layer on a apron section with a length of x from the beginning

¹ Суздалева Г.Ф. Технология сепарации почвенно-картофельного вороха с обоснованием конструктивно-режимных параметров элеватора с комбинированными прутками и интенсификатором: Автореф. ... канд. техн. наук. Рязань: Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева, 2005. 23 с.

² Рязанов Н.А. Усовершенствованный технологический процесс и интенсификатор основного элеватора картофелеуборочных машин: Автореф. ... канд. техн. наук. Рязань: Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева, 2012. 20 с.

³ Босой Е.С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан-Шах; Под ред. Е.С. Босого. М.: Машиностроение, 1978. 567 с.

⁴ Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 831 с.

Аналогично полагаем, что отношение изменения подачи отделенных от клубней примесей к изменению длины участка прямо пропорционально подаче примесей, которые могут пройти через зазоры, то есть

$$\frac{dQ_3}{dx} = k_2 Q_2, \quad (3)$$

где k_2 – постоянный коэффициент, m^{-1} .

Три уравнения (1), (2), (3) позволяют определить три неизвестные Q_1, Q_2, Q_3 как функции от x , если заданы подачи Q и Q_0 , коэффициенты k_1, k_2 и краевые условия подачи на входе пласта на элеватор.

На входе подрезанного лемехом пласта на элеватор имеем

$$Q_1(x)|_{x=0} = Q - Q_0; \quad Q_2(x)|_{x=0} = 0; \quad Q_3(x)|_{x=0} = 0.$$

Решение дифференциального уравнения (2) запишем как

$$Q_1 = (Q - Q_0)e^{-k_1 x}. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (3) после исключения переменной Q_2 с помощью уравнения (1) и подстановки вместо Q_1 выражения (4) можно записать как

$$Q_3 = Q - Q_0 - \frac{Q - Q_0}{k_1 - k_2} [k_1 e^{-k_2 x} - k_2 e^{-k_1 x}]. \quad (5)$$

Запишем равенство (5):

$$Q_3 = m(Q - Q_0),$$

$$\text{где} \quad m = 1 - (k_1 e^{-k_2 x} - k_2 e^{-k_1 x}) / (k_1 - k_2). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что в рамках модели 100%-ная полнота сепарации достигается на элеваторе бесконечной длины. При этом полнота отделения примесей m на участке элеватора зависит от длины участка и двух коэффициентов: k_1 и k_2 . Формула позволяет определить коэффициенты k_1, k_2 по заданной полноте отделения примесей, а также рассчитать длину полотна элеватора при известных коэффициентах k_1, k_2 . Уравнения для определения коэффициентов k_1, k_2 по результатам эксперимента, в которых установлены полнота m_1 на участке элеватора длины l_1 и полнота m_2 на участке элеватора длины l_2 , запишем как

$$\begin{cases} m_1 = 1 - (k_1 e^{-k_2 l_1} - k_2 e^{-k_1 l_1}) / (k_1 - k_2) \\ m_2 = 1 - (k_1 e^{-k_2 l_2} - k_2 e^{-k_1 l_2}) / (k_1 - k_2). \end{cases} \quad (7)$$

При заданной доле 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм из уравнений (7)

Список использованных источников

- Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. М.: Машиностроение, 1972. 400 с.
- Бышов Н.В., Борычев С.Н., Костенко М.Ю., Рембалович Г.К., Байбобоев Н.Г., Жбанов Н.С. Влияние конструктивно-технологической схемы на показатели работы картофелеуборочной машины // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 108-114. EDN: WMFWRX.
- Нефедов Б.А. и др. Новые технические решения сепарирующих органов картофелеуборочных машин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 124. С. 346-365. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-018>
- Аббасов Г.И. Исследование технологического процесса уборки и послеуборочной обработки картофеля // Аграрная наука. 2019. № 6. С. 33-35. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-33-35>
- Бышов Н.В., Борычев С.Н., Рембалович Г.К., Безносюк Р.В., Савина О.А. Математическая модель технологического процесса картофелеуборочного комбайна при работе в условиях тяжелых

численным методом Ньютона определены неизвестные коэффициенты³, имеющие значения $k_1 = 4,83 \text{ м}^{-1}$; $k_2 = 1,85 \text{ м}^{-1}$.

Расчеты по формуле (6) показали, что 90%-ная полнота сепарации достигается на данном элеваторе при увеличении его длины до 1800 мм и более (рис. 2a). При этом на полотне остаются только те примеси, которые могут пройти в зазоры между прутками (рис. 2b).

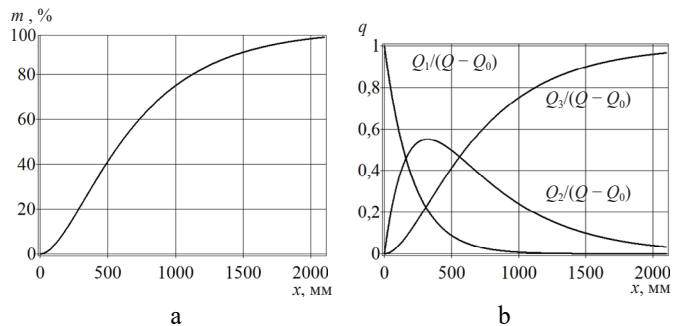


Рис. 2. Зависимость доли m отделенных примесей на участке полотна элеватора (a) и относительной подачи q примесей (b) от длины x участка при $k_1 = 4,83 \text{ м}^{-1}$; $k_2 = 1,85 \text{ м}^{-1}$

Fig. 2. Relationship between the proportion m of separated impurities in the section of the elevator apron (a) and the relative supply q of impurities (b), and the length x of the section at $k_1 = 4.83 \text{ m}^{-1}$; $k_2 = 1.85 \text{ m}^{-1}$

Выводы

- Представленная математическая модель позволяет рассчитать полноту отделения примесей на элеваторе картофелеуборочного комбайна.
- Полнота отделения примесей от картофеля на прутковом элеваторе зависит от длины участка полотна элеватора и двух коэффициентов, определяемых экспериментально по данным полноты отделения примесей на двух участках рабочей ветви элеватора.
- На картофелеуборочном комбайне типа КПК-3 90%-ная полнота сепарации достигается при увеличении длины пруткового элеватора до 1800 мм при заданной доле отделенных примесей 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм.

References

- Petrov G.D. Potato harvesters. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 400 p. (In Rus.)
- Byshov N.V., Borychev S.N., Kostenko M.Yu., Rembalovich G.K., Bayboboiev N.G., Zhanov N.S. Influence of the constructive-technological scheme on the performance of a potato harvester. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2019; 1(41): 108-114 (In Rus.)
- Nefedov B.A. et al. New technical solutions for separating organs of potato harvesters. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; 124(10): 346-365. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-018> (In Rus.)
- Abbasov G.I. Study of the technological process of harvesting and post-harvest processing of potatoes. *Agrarnaya nauka*. 2019; (6): 33-35. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-33-35> (In Rus.)
- Byshov N.V., Borychev S.N., Rembalovich G.K., Beznosyuk R.V., Savina O.A. Mathematical model of the technological process of a potato harvester when working in difficult conditions. *Vestnik Ryazanskogo*

суглинистых почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2014. № 4 (24). С. 59-64. EDN: TGEQAT.

6. Lü J., Wang P., Liu Z., Li Z., Zou F., Yang D. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019; 50 (6): 100-109. <http://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/829>.

7. Xin L., Liang J. A dynamic analysis on the potato conveying and separation system considering the acting force of a material. *Transactions of FAMENA*. 2019; 43 (SI-1): 35-42. <https://doi.org/10.21278/TOF.43Si104>

8. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин. М.: ВИМ, 2006. 158 с.

9. Кушнир В.Г., Ким Н.П., Романюк Н.Н., Астрахан Б.М., Клавтусь П.В. Улучшение качества работы элеватора картофелеуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 3. С. 41-43. EDN: RZLOKR.

Критерии авторства

Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.08.2022

Одобрена после рецензирования 13.09.2022

Принята к публикации 14.09.2022

gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. 2014; 4 (24): 59-64. (In Rus.)

6. Lü J., Wang P., Liu Z., Li Z., Zou F., Yang D. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019; 50 (6): 100-109. <http://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/829>.

7. Xin L., Liang J. A dynamic analysis on the potato conveying and separation system considering the acting force of a material. *Transactions of FAMENA*. 2019; 43 (SI-1): 35-42. <https://doi.org/10.21278/TOF.43Si104>

8. Sorokin A.A. Theory and design analysis of potato harvesters. Moscow, VIM, 2006, 158 p. (In Rus.)

9. Kushnir V.G., Kim N.P., Romanyuk N.N., Astrakhan B.M., Klavtus P.V. Improving the quality of the potato harvester elevator. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014; 3: 41-43. (In Rus.)

Contribution

M.I. Belov, I.P. Gadzhiev, A.V. Shemyakin, N.E. Kabdin and O.M. Melnikov performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. M.I. Belov, I.P. Gadzhiev, A.V. Shemyakin, N.E. Kabdin and O.M. Melnikov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 02.08.2022

Approved after reviewing 13.09.2022

Accepted for publication 14.09.2022