

Теоретические предпосылки интенсификации уборки лука-севка

Алексей Семенович Дорохов,
доктор технических наук, академик РАН,
e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru;

Александр Геннадьевич Аксенов,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: 1053vim@mail.ru;

Алексей Викторович Сибирев,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;

Андрей Григорьевич Пономарев,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: agrodisel@mail.ru;

Николай Викторович Сазонов,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: sazonov_nikolay@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что совершенствование конструкции сепарирующих устройств машин для уборки лука путем установки различных типов интенсификаторов сепарации не в полной мере повышает качество очистки товарной продукции. Отметили необходимость соблюдения жестких технологических параметров настройки сепарирующих систем (подача луковец на штифтовое полотно без потерь, снижение максимальной скорости соударения с рабочими элементами установки, улучшение полноты очистки). Показали, что одним из вариантов интенсификации очистки лука-севка от почвы и соизмеримых с ним почвенных комков может стать увлажнение вороха при сепарации с ультразвуковым воздействием. (*Цель исследования*) Определить теоретические закономерности интенсификации очистки лука-севка от механических примесей. (*Материалы и методы*) Использовали методы системного анализа и синтеза, физического моделирования, основанные на теории вероятности и принципах математической статистики, численные методы решения аналитических зависимостей, методы классической механики – основные положения теории разрушения, механики грунтов. (*Результаты и обсуждение*) Обосновали необходимый рациональный режим интенсификации уборки лука-севка и очистки его от механических примесей, функциональную схему машины для уборки лука выкапывающего типа с модулем ультразвуковой очистки, учитывающую функции состояния, внешнего и управляющего воздействий, а также показатели качества работы. (*Выводы*) Разработали конструктивную схему сепарирующего модуля уборочной машины с ультразвуковым воздействием для совершенствования процесса очистки лука-севка, исходя из условий максимального просеивания почвенных и других примесей в пределах агротехнических требований (не менее 98 процентов), а также сокращения до минимума потерь (не более 2 процентов) и повреждений луковец (не более 2 процентов).

Ключевые слова: уборка лука-севка, комки почвы, сепарация с ультразвуковым воздействием, система сепарации, модуль ультразвуковой очистки, прутковый элеватор, пальчатая горка.

■ **Для цитирования:** Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Пономарев А.Г., Сазонов Н.В. Теоретические предпосылки интенсификации уборки лука-севка // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №3. С. 85-92. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-85-92. EDN ITQKLE.

Theoretical Foundations for Intensifying Onion Set Harvesting

Aleksey S. Dorokhov,
Dr.Sc.(Eng.), member of the Russian Academy
of Sciences,
e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru;

Aleksandr G. Aksenov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: 1053vim@mail.ru;

Aleksey V. Sibirev,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;

Andrey G. Ponomarev,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: agrodisel@mail.ru;
Nikolai V. Sazonov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: sazonov_nikolay@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper shows that upgrading the design of onion harvesting machines through the integration of diverse separation intensifiers demonstrates limited efficacy in improving the quality of cleaning commercial produce. They noted the need to comply with strict technological parameters for setting up separating systems (feeding bulbs to a straight section of the pin web surface in the absence of losses, reducing the maximum speed of collision of the bulbs with the working elements of the cleaning unit to reduce damage, as well as improving the completeness of cleaning). The study reveals that one of the options for intensifying the process of onion set cleaning from soil and soil clods can be ultrasonic-assisted heap moistening during separation. (*Research purpose*) The research aims to determine theoretical principles driving the intensification of onion set cleaning from mechanical impurities. (*Materials and methods*) The research employed system analysis and synthesis methods, physical modeling based on probability theory and mathematical statistics, numerical techniques for solving analytical dependencies, classical mechanics methods - fundamental principles of fracture theory, soil mechanics. (*Results and discussion*) The paper justifies the necessary optimum regime for intensifying onion set harvesting and cleansing them from mechanical impurities. It substantiates the functional diagram of a digging-type onion harvester featuring an ultrasonic cleaning module, taking into account the functions of the state, external and control actions, as well as performance indicators. (*Conclusions*) The research resulted in developing a design concept for an ultrasonic-equipped separating module of a harvester to improve the onion set cleaning process. This design conforms to the agrotechnical requirements, ensuring maximum soil and impurity sieving (at least 98 percent), minimizing losses (not exceeding 2 percent) and bulb damage (not exceeding 2 percent).

Keywords: onion set harvesting, soil clods, ultrasonic separation, separation system, ultrasonic cleaning module, rod elevator, finger conveyor.

■ **For citation:** Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Ponomarev A.G., Sazonov N.V. Teoreticheskie predposylki intensivifikatsii uborki luka-sevka [Theoretical foundations for intensifying onion set harvesting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N3. 85-92 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-85-92. EDN ITQKLE.

К особенностям физико-механических свойств луковиц, в первую очередь лука-севка, можно отнести их малые размеры (10-30 мм), что выдвигает специфические требования к уборочным машинам – способность отделять почвенные комки, соизмеримые по размерам с луковицами [1-3]. Чтобы исключить подачу переуплотненных почвенных слоев на сепарирующие рабочие органы уборочной машины, необходимо уменьшать глубину подкапывания почвенного пласта с сохранением качественных показателей извлеченной товарной продукции из почвы. Для качественной сепарации корнеплодов и луковиц от механических примесей требуется выполнить немало условий по регулировке технологических параметров рабочих органов уборочных машин. [4, 5].

Сепарирующие рабочие органы уборочных машин не способны выделить из почвенно-растительного вороха, комки почвы соизмеримые с мелкими луковицами лука-севка. Так, устройства первичной сепарации в большинстве своем представлены прутковыми элеваторами, через щелевые отверстия которых проходят почвенные примеси размером менее 10 мм, а крупные и соизмеримые с луковицами комки (более 10 мм) выносятся на устройства вторичной сепарации, как правило оборудованные пальчатыми горками. Принцип работы таких устройств основан на разделении с учетом различий по коэффициентам трения скольжения и качения, что также не обеспечивает полного решения рассматриваемой задачи [6-8]. Данное обстоятельство указывает на невозможность полного выделения из вороха лука-севка почвенных и растительных примесей [9-11].

Качество машинной уборки можно повысить путем предварительного полива почвы с нормой расхода воды 210-280 м³/га [12]. Однако это направление снижения содержания почвенных комков сдвигает сроки уборки, так как после полива необходима 2-4-суточная естественная подсушка поверхности почвы.

Одним из вариантов интенсификации процесса очистки луковиц от соизмеримых с ними почвенных комков можно назвать увлажнение вороха при сепарации [12].

Чтобы в перспективе устранить недостатки существующих способов сепарации лука-севка от механических примесей, необходимо выполнить теоретические исследования по обоснованию процессов интенсификации этого процесса.

Цель исследований – определение теоретических закономерностей интенсификации очистки лука-севка от механических примесей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В работе использовали методы системного анализа и синтеза, физического моделирования, основанные на теории вероятности и принципах математической статистики, численные методы решения аналитических зависимостей, методы классической механики – основные положения теории разрушения, механики грунтов.

Так как сепарирующая поверхность функционирующих элементов уборочных машин образована набором колосниковых элементов диаметром d_n с различным межпрутковым расстоянием S_n , что обусловлено размерными характеристиками лука-севка, условия разделения почвенных и механических примесей будут следующие (*рис. 1*):

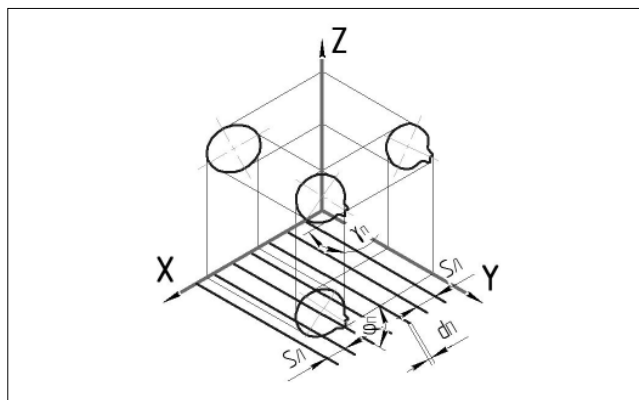


Рис. 1. Схема к определению вероятности прохождения луковицы через просветы пруткового элеватора: $d_{п}$ – диаметр колосникового элемента, м; $S_{л}$ – межпрутковое расстояние, м; $\varphi_{п}$ – угол расположения луковицы на прутковой поверхности в горизонтальной плоскости, град.; $\gamma_{п}$ – угол расположения луковицы на прутковой поверхности в вертикальной плоскости, град.

Fig. 1. Diagram for determining the probability of a bulb passing through the gaps of a rod elevator: $d_{п}$ – diameter of the grate element, m; $S_{л}$ – rod spacing, m; $\varphi_{п}$ – the angle of the bulb's position on the rod surface in the horizontal plane, degrees; $\gamma_{п}$ – the angle of the bulb's position on the rod surface in the vertical plane, degrees

- максимальное просеивание почвенных и других примесей в пределах агротехнических требований (не менее 98%);

- сокращение до минимума потерь (не более 2%) и повреждений луковицы (не более 2%) [12, 13].

Выполнение первого условия возможно при увеличении межпруткового расстояния до размеров прохода мелких почвенных комков (не менее 10 мм) между колосниками сепарирующего устройства. В то же время для соблюдения второго условия необходимо уменьшить динамическое воздействие и расстояние между прутками рабочих органов очистки с целью снижения кинетической энергии и, как следствие, повреждений луковицы при соударении с прутками полотна.

Варьирование углов $\varphi_{п}$ и $\gamma_{п}$ в диапазоне от 0 до 180° характеризует вероятность прохода луковиц и комков почвы через щелевые отверстия. Если эти углы равны 0-30°, то происходит сход луковиц, а если 30-90°, то наблюдается их западание.

Результаты и обсуждение. Кинетическая энергия T_1 материальной точки в начальный момент времени при воздействии интенсификатора в момент подъема с поверхности полотна определяется по формуле (рис. 2):

$$T_1 = \frac{1}{2} m_B \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} m_B \cdot \omega_{эл}^2 \cdot r_A^2 - g^2, \quad (1)$$

где m_B – масса вороха, кг;

v_1 – начальная скорость перемещения материальной точки M в момент времени t_1 (повторного соприкосновения с прутковым элеватором), м/с;

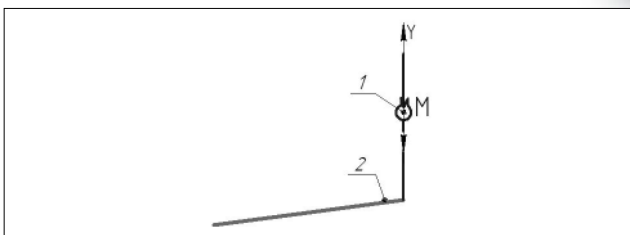


Рис. 2. Схема к определению скорости луковицы в момент взаимодействия с прутковым элеватором: 1 – луковица; 2 – элеватор прутковый; M – материальная точка

Fig. 2. Diagram for determining the bulb speed at the time of interaction with the rod elevator: 1 – bulb; 2 – rod elevator; M – point particle

$\omega_{эл}$ – круговая скорость колебаний полотна пруткового элеватора, c^{-1} ;

r_A – амплитуда колебаний полотна пруткового элеватора, м;

g – ускорение свободного падения материальной точки, $м/с^2$.

В конечном положении при падении на полотно пруткового элеватора материальная точка приобретает скорость v_2 . Следовательно, кинетическую энергию можно определить из выражения:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_B \cdot v_2^2, \quad (2)$$

где v_2 – конечная скорость материальной точки M в момент времени t_2 (достижения противоположной стороны пруткового элеватора), м/с.

При установленной схеме машины для уборки лука с устройствами первичной и вторичной сепарации в различных исполнениях выделение механических примесей происходит при условии:

$$S_{л} \leq d_k, \quad (3)$$

где d_k – минимальный диаметр луковицы, м.

Вероятность западания луковиц на колосники пруткового элеватора составляет [14]:

$$P = \frac{8}{\pi^2 \cdot S_{л}} \int_{\varphi_{п1}}^{\varphi_{п2}} \int_{\gamma_{п1}}^{\gamma_{п2}} \frac{d_k \cdot \sin \varphi_{п} \cdot \sin \gamma_{п} - S_{л}}{2} d\varphi_{п} d\gamma_{п}, \quad (4)$$

где $\varphi_{п}$ – угол между горизонтальной проекцией луковицы и прутками элеватора, град;

$\gamma_{п}$ – угол между вертикальной проекцией луковицы и прутками элеватора, град.

Положение луковиц на поверхности пруткового элеватора при западании в щелевые отверстия и сходе с поверхности характеризуется углами между горизонтальной ($\varphi_{п1}$, $\varphi_{п2}$) и вертикальной ($\gamma_{п1}$, $\gamma_{п2}$) проекциями луковицы, которые рассчитываются по формулам:

$$\varphi_{п1} = \arcsin \frac{S_{л}}{d_k \cdot \sin \gamma_{п}}. \quad (5)$$

$$\varphi_{п2} = \arcsin \frac{2 S_{л}}{d_k \cdot \sin \gamma_{п}}. \quad (6)$$

$$\gamma_{\Pi 1} = \arcsin \frac{S_{\text{Л}}}{d_{\text{К}} \cdot \sin \varphi_{\Pi}} \quad (7)$$

$$\gamma_{\Pi 1} = \arcsin \frac{2S_{\text{Л}}}{d_{\text{К}} \cdot \sin \varphi_{\Pi}} \quad (8)$$

Вероятность P' отсутствия потерь товарной продукции через отверстия, образованные колосниками сепарирующего устройства [14]:

$$P' = \frac{\pi - 2\eta_2}{\pi} + \frac{2d_{\text{К}}}{\pi^2 \cdot S_{\text{Л}}} \cdot (\eta_2 - \eta_1) - \frac{d_{\text{К}}}{\pi^2 \cdot S_{\text{Л}}} \cdot (\sin 2\eta_2 - \sin 2\eta_1) - \frac{4}{\pi^2} \cdot (\eta_2 - \eta_1), \quad (9)$$

где η_1, η_2 – положение лукович на прутковом элеваторе при западании в щелевые отверстия и сходе с поверхности соответственно, град.:

$$\eta_1 = \arcsin \sqrt{\frac{S_{\text{Л}}}{d_{\text{К}}}} \quad (10)$$

$$\eta_2 = \arcsin \sqrt{\frac{2S_{\text{Л}}}{d_{\text{К}}}} \quad (11)$$

Масса вороха товарной продукции при завершении процесса сепарации

$$m_{\text{СХэл}} = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \cdot P', \quad (12)$$

где m_1 – комки почвы, соизмеримые по размерам с луковичами, кг;

m_2 – крупные почвенные комки, кг;

m_3 – луковичи, кг;

m_4 – растительные примеси, кг.

Вероятность западания товарной продукции в щелевые отверстия между колосниками

$$P'_{\Pi} = 1 - P' \quad (13)$$

определяет массу вороха при завершении процесса сепарации с учетом вероятности западания в щелевые отверстия пруткового элеватора и вероятности отсутствия потерь продукции, то есть предопределяет вероятность требуемой максимальной очистки.

Масса мелких почвенных примесей с минимальными размерами, обуславливающими прохождение через щелевые отверстия, определяется по формуле:

$$m_5 = m_{\text{Вп}} - m_{\text{СХэл}}, \quad (14)$$

где $m_{\text{Вп}}$ – масса вороха лукович, поступающего с подкапывающих на сепарирующие рабочие органы, кг.

$$m_{\text{Вп}} = \frac{Q_{\text{Вп}} \cdot l_{\Pi}}{v_{\text{Л}}}, \quad (15)$$

где $Q_{\text{Вп}}$ – интенсивность подачи лукович, кг/с;

l_{Π} – длина подкапывающего лемеха, м;

$v_{\text{Л}}$ – поступательная скорость движения подкапывающего лемеха, м/с.

Проход комка почвы через щелевые отверстия элеватора (рис. 3) определяется условием:

$$d_{\text{п}} < S_{\text{Л}}, \quad (16)$$

где $d_{\text{п}}$ – диаметр частицы почвы, м.

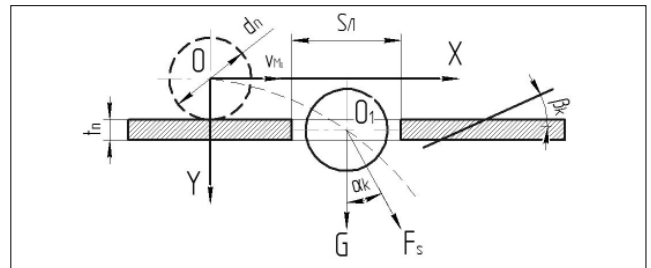


Рис. 3. Схема прохода частицы по сепарирующей поверхности: t_{Π} – толщина полотна пруткового элеватора, м; $v_{\text{Ма}}$ – переносная скорость движения луковичи, м/с; G – сила тяжести, Н; $F_{\text{С}}$ – сила воздействия луково-почвенного вороха, Н; $\alpha_{\text{К}}$ – угол между силой тяжести G и силой $F_{\text{С}}$ воздействия луково-почвенного вороха, град.; $\beta_{\text{К}}$ – угол между нормалью и поверхностью полотна пруткового элеватора, град.

Fig. 3. Diagram illustrating particle passage across separating surface: t_{Π} – thickness of the rod elevator web, m; $v_{\text{Ма}}$ – transport speed of the bulb, m/s; G – gravity, N; $F_{\text{С}}$ – force of onion-soil heap impact, N; $\alpha_{\text{К}}$ – angle between force of gravity G and force of onion-soil heap impact $F_{\text{С}}$, degrees; $\beta_{\text{К}}$ – angle between the normal and the surface of the rod elevator web, degrees

При западании луковичи в межпрутковое расстояние и ее перемещении из точки O в O_1 на нее действуют сила тяжести G и сила $F_{\text{С}}$ под углом $\alpha_{\text{К}}$ к нормали $\beta_{\text{К}}$ сепарирующей поверхности:

$$F_{\text{С}} = m_1 \cdot a_{\text{С}}, \quad (17)$$

где $a_{\text{С}}$ – ускорение частицы при прохождении над отверстием, м/с^2 .

Материальная точка совершает движение над отверстием $S_{\text{Л}}$, образованным смежными прутками согласно системе уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = v_{\text{Ма}} \cdot \sin \alpha_{\text{К}}, \\ \ddot{y} = v_{\text{Ма}} \cdot \cos \alpha_{\text{К}}, \end{cases} \quad (18)$$

где $v_{\text{Ма}}$ – переносная скорость движения луковичи, м/с; $F_{\text{С}}$ – сила воздействия луково-почвенного вороха, Н; $\alpha_{\text{К}}$ – угол между силой тяжести G и силой $F_{\text{С}}$ воздействия луково-почвенного вороха, град.

Учитывая, что $a_{\text{С}} = \text{const}$, и принимая $v_{\text{Ма}} = 0$, уравнение движения частицы почвы выглядит следующим образом [13, 14]:

$$x = y \cdot \text{tg} \alpha_{\text{К}} + v_{\text{Ма}} \sqrt{\frac{2g}{a_{\text{С}} \cdot \cos \alpha_{\text{К}}}} \quad (19)$$

После соответствующих преобразований формула для определения максимальной скорости движения частицы почвы $v_{\text{Ма}}$ принимает вид:

$$v_{\text{Ма} \text{ max}} = \frac{1}{2} \cdot [S_{\text{Л}} - (d_{\text{н}} + t_{\text{н}}) \cdot \text{tg} \alpha_{\text{К}}] \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{С}} \cdot \cos \alpha_{\text{К}}}{d_{\text{н}} + t_{\text{н}}}} \quad (20)$$

В случае превышения предельного значения скорости комков почвы проходит через отверстие $S_{\text{Л}}$, образованное смежными прутками сепарирующего устройства. Следовательно, с поверхности пруткового элеватора сходит сепарируемый ворох, состоящий

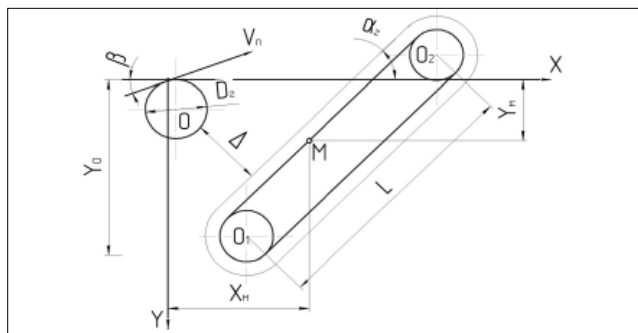


Рис. 4. Схема взаимодействия частицы с полотном пальчатой горки: D_r – диаметр окружности, описываемой наружной частью штифтов полотна, м; α_r – угол наклона полотна горки, град.; β – угол наклона питающего транспортера, град.; L – рабочая длина пальчатой горки, м; X_{M1} – абсцисса пересечения траектории движения частицы с осью X , м; Y_{M1} – ордината пересечения траектории движения частицы с осью Y , м; Y_0 – ордината точки пересечения проекции продолжения рабочей ветви полотна горки с осью Y

Fig. 4. Diagram of particle interaction with finger conveyor surface: D_r – diameter of the circle traced by the outer part of the web pins, meters, m; α_r – angle of inclination of the finger conveyor web, degrees; L – working length of the finger conveyor, meters; X_{M1} – abscissa of particle trajectory intersection with X axis, meters; Y_{M1} – ordinate of particle trajectory intersection with Y axis, meters; Y_0 – ordinate of the intersection point of the extension projection of the finger conveyor's working segment with the Y -axis, meters

преимущественно из луковиц и соизмеримых с ними почвенных комков, и поступает для очистки на пальчатую горку (рис. 4).

Одно из лимитирующих требований достижения качественных показателей работы очистки – это оптимальная скорость питающего транспортера (обводной ролик транспортера O), которая должна обеспечить подачу луковиц на прямолинейный участок O_1O_2 поверхности штифтового полотна без потерь товарной продукции согласно условию:

$$\begin{cases} \frac{D+D_r}{2} \cdot \cos(-\alpha_r) \leq X_{M1} \leq \left(L + \frac{D+D_r}{2}\right) \cdot \cos(-\alpha_r), \\ \frac{D+D_r}{2} \cdot \sin(-\alpha_r) \leq Y_{M1} \leq Y_0 + \left(L + \frac{D+D_r}{2}\right) \cdot \sin(-\alpha_r), \end{cases} \quad (21)$$

где D – диаметр окружности, описываемой точками полотна питающего транспортера в зоне схода частицы, м;

D_r – диаметр окружности, описываемой наружной частью штифтов полотна, м;

α_r – угол наклона полотна пальчатой горки, град.;

L – рабочая длина пальчатой горки, м;

X_{M1} – абсцисса пересечения траектории движения частицы с осью X , м;

Y_{M1} – ордината пересечения траектории движения частицы с осью Y , м;

Y_0 – ордината точки пересечения проекции продолжения рабочей ветви полотна горки с осью Y , м.

При несоблюдении левой части неравенств (21) луковицы будут выноситься в потери; при несоблюдении правой скорость падения луковиц на последующие рабочие органы может превышать критическую [15]:

$$Y_0 = \frac{D}{2 \cdot [1 + \cos(\alpha_r - \beta)] + \Delta} \cdot \cos \alpha_r, \quad (22)$$

где β – угол наклона питающего транспортера, град.; Δ – зазор между питающим транспортером и пальчатой горкой, м.

Согласно выражению (22), к настройке режимных параметров пальчатой горки предъявляются более жесткие требования, чем к устройствам первичной сепарации. Эти задачи, в том числе, решаются путем установки различных типов интенсификаторов сепарации [13-15].

Одним из вариантов интенсификации процесса очистки луковиц от почвы и соизмеримых с ними почвенных комков может быть увлажнение вороха с ультразвуковым воздействием при его сепарации, что ранее было обосновано на примере корнеплодов моркови и клубней картофеля [12].

Для создания экспериментальной установки по интенсификации очистки лука-севка разработана функциональная схема устройства ультразвукового воздействия (рис. 5). Основой конструктивной схемы экспериментальной установки послужило известное устройство для отделения клубней картофеля в почвенной суспензии. Дополнительно предлагается приспособление для разделения посредством ультразвукового воздействия. Оно состоит из ультразвуковой ванны, по внутреннему периметру которой расположены пьезоэлектрические источники, а в верхней части на небольшой глубине расположен прутковый транспортер выноса луковиц (рис. 6).

Ворох лука в ультразвуковую ванну подается транспортером с поступательной скоростью движения v_{m1} . Для выноса почвенных примесей в нижней части ванны расположен скребковый транспортер, который движется со скоростью v_{m2} .

Согласно результатам экспериментальных исследований и методике по очистке клубней картофеля и корнеплодов моркови, необходимы дополнительные исследования [12]. То же самое касается в отношении лука: требуется разработать лабораторную установку с модулем ультразвукового воздействия и выполнить экспериментальные исследования по определению режимных и технологических параметров, оказывающих наибольшее влияние на сепарацию. При этом следует учесть массу вороха луковиц, поступающего на сепарирующие рабочие органы, угол наклона питающего транспортера, а также максимальную скорость движения вороха луковиц и почвенных примесей по сепарирующей поверхности пруткового элеватора.

Выводы. Определены теоретические закономер-

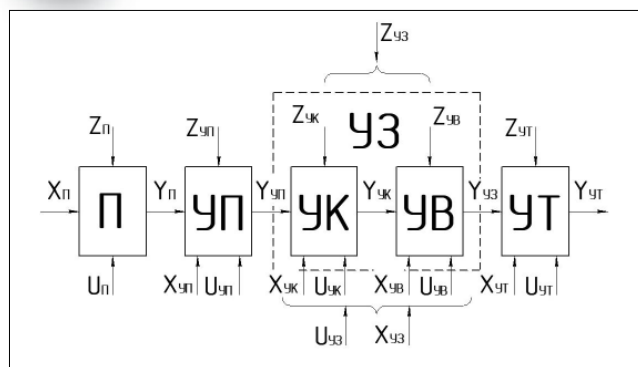


Рис. 5. Функциональная схема машины для уборки лука выкапывающего типа для однофазной уборки или ее первой фазы: П – подкапывающий рабочий орган; УП – рабочий орган первичной сепарации; УК – рабочий орган первичной сепарации с интенсификатором сепарации; УВ – рабочий орган вторичной сепарации; УТ – валкоукладывающее устройство или выгрузной транспортер; УЗ – устройство ультразвукового воздействия; $X_{п}, X_{уп}, X_{ук}, X_{уб}, X_{уз}$ и $X_{ут}$ – функции внешнего воздействия; $Z_{п}, Z_{уп}, Z_{ук}, Z_{уб}, Z_{уз}$ и $Z_{ут}$ – функции состояния; $U_{п}, U_{уп}, U_{ук}, U_{уб}, U_{уз}$ и $U_{ут}$ – функции управляющего воздействия; $Y_{п}, Y_{уп}, Y_{ук}, Y_{уб}, Y_{уз}$ и $Y_{ут}$ – результирующие параметры соответствующих рабочих органов

Fig. 5. Functional diagram of a digging-type onion harvester for single-phase harvesting or its initial phase: П – digging working body; УП – primary separation working body; УК – primary separation working body with a separation intensifier; УВ – secondary separation working body; УТ – windrower or unloading conveyor; УЗ – ultrasonic treatment device. $X_{уп}, X_{ук}, X_{уб}, X_{ут}, X_{уз}$ – external impact functions; $Z_{п}, Z_{уп}, Z_{ук}, Z_{уб}, Z_{уз}$ and $Z_{ут}$ – state functions; $U_{п}, U_{уп}, U_{ук}, U_{уб}, U_{уз}$, and $U_{ут}$ – control impact functions; $Y_{п}, Y_{уп}, Y_{ук}, Y_{уб}, Y_{уз}$ and $Y_{ут}$ – resulting parameters of relevant working bodies

ности интенсификации очистки лука-севка от механических примесей сепарирующей системой машины для уборки лука, а также условия снижения потерь от повреждений.

Установлены масса и фракционный состав почвенных примесей, поступающих на устройства первичной и вторичной очистки уборочной машины. Определены условия, способствующие снижению механических примесей при уборке лука.

Предложен алгоритм расчета максимальной скорости движения частицы почвы по сепарирующей по-

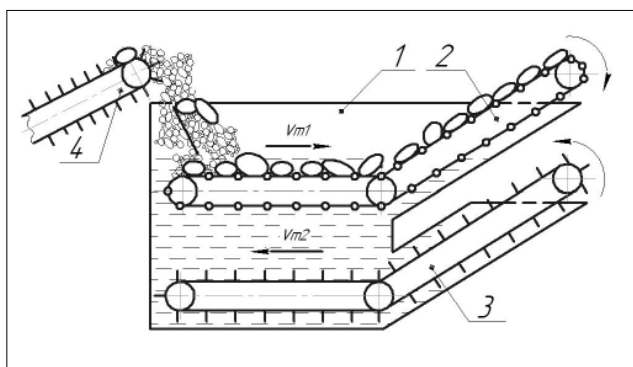


Рис. 6. Конструктивная схема устройства для ультразвукового воздействия при уборке лука-севка: 1 – ультразвуковая ванна; 2 – прутковый транспортер выноса луковиц; 3 – скребковый транспортер выноса примесей; 4 – транспортер подачи вороха лука и почвенных примесей

Fig. 6. Structural schematization of the ultrasonic treatment device for onion set harvesting: 1 – ultrasonic bath; 2 – bar conveyor for bulb removal; 3 – scraper conveyor for impurity removal; 4 – conveyor for supplying onion heaps and soil impurities

верхности, а также массы почвенных примесей с минимальными размерами в целях эффективного прохождения через щелевые отверстия пруткового элеватора.

Разработана сепарирующая система уборочной машины с ультразвуковым воздействием.

Установлены закономерности определения массы и фракционного состава почвенных примесей, поступающих на устройства первичной и вторичной очистки уборочной машины. Определены условия, способствующие снижению механических примесей при уборке лука при варьировании конструктивных (длина пальчатой горки) и технологических (угол наклона пальчатой горки) параметров сепарирующих устройств.

Выявлено, что максимальная скорость движения частицы почвы по сепарирующей поверхности зависит от толщины полотна пруткового элеватора, диаметра прутков и расстояния между ними.

Полученные теоретические закономерности очистки лука-севка необходимы для создания экспериментальной установки по интенсификации процессов сепарации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Емельянов П.А., Аксенов А.Г. и др. Машинная технология производства лука. М.: ВИМ. 2016. 168 с.
2. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Кудрявцев П.П. Почвенное состояние в интенсивной технологии // Картофель и овощи. 2016. N2. С. 35-36.
3. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П. и др. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. N3. С. 43-47.
4. Протасов, А.А. Функциональный подход к созданию лукоуборочной машины // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П.Горячкина». 2011. N2(47). С. 37-43.
5. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. и др. Инновационные технологии и комплекс машин для уборки лу-



- ка-севка. М.: Цифровичок, 2021. 442 с.
6. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Метод комплексной оценки качества выполнения технологических операций энергоресурсосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. №1. С. 12-16.
 7. Гэфке И.В., Жаркова С.В. Особенности агрофизических свойств почвы при возделывании лука репчатого // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2018. №8(166). С. 78-82.
 8. Lu J.Q., Sun H., Dui H., et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition. *Transactions of the CSAM*. 2017. N48(11). 146-155.
 9. Lü J.Q., Shang Q.Q., Yang Y., et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016. Vol. 47. N5. 106-114.
 10. Ларюшин Н.П., Кухарев О.Н., Кирюхина Т.А. Исходные положения при проектировании машин для уборки лука // *Наука в центральной России*. 2015. №6(18). С. 48-58.
 11. Калинин А.Б., Смелик В.А., Теплинский И.З. и др. Выбор и обоснование параметров экологического состояния агроэкосистемы для мониторинга технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. №39. С. 315-319.
 12. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Результаты сравнительных лабораторных исследований очистки корнеплодов моркови и клубней картофеля ультразвуковым воздействием // *Вестник Ульяновской ГСХА*. 2020. №2. С. 6-15.
 13. Dandekar I., Joshi A., Patil V. A review paper based on design and development of an onion harvesting machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2020. №9. 333-337.
 14. Бышов Н. В., Якутин Н. Н., Ковешников Р. Ю. и др. Модернизация копателя КСТ-1,4 // *Вестник Рязанского ГАУ им. П.А.Костычева*. 2016. №2(30). С. 75-78.
 15. Коршунов А.В., Симаков Е.А., Лысенко Ю.Н. и др. Актуальные проблемы и приоритетные направления развития картофелеводства // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. №3. С. 12-20.

REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Emel'yanov P.A., Aksenov A.G., et al. Mashinnaya tekhnologiya proizvodstva luka [Machine technology for onion production]. Moscow: VIM. 2016. 168 (In Russian).
2. Kalinin A.B., Teplinskiy I.Z., Kudryavtsev P.P. Pochvennoe sostoyanie v intensivnoy tekhnologii [Soil condition in the intensive technology]. *Kartofel' i ovoshchi*. 2016. №2. 35-36 (In Russian).
3. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., et al. Sovremennye tekhnologii i spetsial'naya tekhnika dlya kartofelevodstva [Modern technologies and special equipment for potato production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. №3. 43-47 (In Russian).
4. Protasov A.A. Funktsional'nyy podkhod k sozdaniyu luko-uborochnoy mashiny [Functional approach to onion harvester designing]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta imeni V.P. Goryachkina*. 2011. №2(47). 37-43 (In Russian).
5. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., et al. Innovatsionnye tekhnologii i kompleks mashin dlya uborki luka-sevka [Innovative technologies and machinery ensemble for onion set harvesting]. Moscow: Tsifrovichok, 2021. 442 (In Russian).
6. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Metod kompleksnoy otsenki kachestva vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy energoresursosberegayushchey tekhnologii uborki korneplodov i kartofelya [Comprehensive assessment of the technological performance quality of energy-and-resource-saving technology of root and potato harvesting]. *Agroinzheneriya*. 2022. Vol. 24. №1. 12-16 (In Russian).
7. Gefke I.V., Zharkova S.V. Osobennosti agrofizicheskikh svoystv pochvy pri vozdelevanii luka repchatogo [The features of soil agrophysical properties under bulb onion]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. №8(166). 78-82 (In Russian).
8. Lu J.Q., Sun H., Dui H., et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition. *Transactions of the CSAM*. 2017. N48(11). 146-155 (In English).
9. Lü J.Q., Shang Q.Q., Yang Y., et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016. Vol. 47. N5. 106-114 (In English).
10. Laryushin N.P., Kukharev O.N., Kiryukhina T.A. Iskhodnye polozheniya pri proektirovanii mashin dlya uborki luka [Original position when designing onion harvesting machines]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2015. №6(18). 48-58 (In Russian).
11. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinskiy I.Z., et al. Vybory i obosnovaniye parametrov ekologicheskogo sostoyaniya agroekosistemy dlya monitoringa tekhnologicheskikh protsessov vozdelevaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Choice and justification parameters of ecological state in the agroecosystem for monitoring technology process growing agricultural crops]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. №39. 315-319 (In Russian).
12. Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V. Rezultaty sravnitel'nykh laboratornykh issledovaniy ochistki korneplodov morkovi i klubney kartofelya ul'trazvukovym vozdeystviem [The results of comparative laboratory investigations on the ultrasonic cleaning of carrot roots and potato tubers]. *Vestnik Ul'yanovskoy GSKHA*. 2020. №2. 6-15 (In Russian).
13. Dandekar I., Joshi A., Patil V. A review paper based on design and development of an onion harvesting machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2020. №9. 333-337.

- nal of Information and Computational Science*. 2020. N9. 333-337 (In English).
14. Byshov N.V., Yakutin N.N., Koveshnikov R.Yu., et al. Modernizatsiya kopatelya KST-1,4 [Modernization of digging machine KST-1.4]. *Vestnik Ryazanskogo GAU im. P.A.Kostycheva*. 2016. N2(30). 75-78 (In Russian).
15. Korshunov A.V., Simakov E.A., Lysenko YU.N., et al. Aktual'nye problemy i prioritetye napravleniya razvitiya kartofelevodstva [Actual problems and priority directions of innovative development of potato breeding]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2018. Vol. 32. N3. 12-20 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Сибирев А.В. – подготовка начального варианта текста, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение теоретических исследований, доработка текста;

Аксенов А.Г. – определение методологии исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения;

Пономарев А.Г. – подготовка начального варианта текста, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования;

Сазонов Н.В. – редактирование и доработка текста статьи, подготовка материала к публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dorokhov A.S. – scientific guidance, formulation of the main goals and objectives of theoretical research, manuscript refinement;

Sibirev A.V. – preparing the draft manuscript, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, conducting theoretical research, manuscript refinement;

Aksenov A.G. – determining the research methodology, formation of general conclusions, critical analysis and finalization of the solution;

Ponomarev A.G. – preparing the draft manuscript, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, conducting theoretical research, manuscript refinement;

Sazonov N.V. – editing and finalizing the manuscript, preparing the material for publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

07.07.2023
30.08.2023