

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.52-61>

УДК 631.171+635.25



Теоретические исследования технологического процесса работы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна

© 2020. А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв , А. Г. Аксенов

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

В статье представлена конструкция пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна, обеспечивающего снижение повреждений товарной продукции корнеплодов и луковиц при максимальной полноте сепарации. Приведены результаты теоретических исследований пруткового элеватора по обоснованию конструктивных и технологических параметров при его взаимодействии с ворохом лука-севка. Обоснована и разработана конструктивно-технологическая схема сепарирующего пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна, обеспечивающего повышение качественных показателей уборки лука-севка. Установлено, что с увеличением угла продольного наклона полотна относительная скорость движения вороха лука-севка уменьшается. При отсутствии воздушного потока относительная скорость движения вороха лука-севка при изменении угла наклона полотна пруткового элеватора в продольном направлении в рассматриваемом диапазоне изменяется от 0,34 до 0,47 м/с. Изменение угла продольного наклона пруткового элеватора на 5° значительно изменяет относительную среднюю скорость движения вороха лука-севка. Разработана математическая модель движения вороха лука-севка по поверхности пруткового элеватора при изменении направления его колебаний в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: перемещение вороха, математическая модель, скорость движения луковиц

Благодарности: работа выполнена по гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук МК – 4002.2018.8.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Аксенов А. Г. Теоретические исследования технологического процесса работы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(1):52-61. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.52-61>

Поступила: 03.12.2019

Принята к публикации: 11.02.2020

Опубликована онлайн: 28.02.2020

Theoretical studies of the technological process of a rod elevator with an adjustable inclination angle of the apron

© 2020. Aleksey S. Dorokhov, Aleksey V. Sibiriev , Aleksandr G. Aksenov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The article presents the design of a rod elevator with an adjustable inclination angle of the apron, which reduces damage to marketable products of root crops and bulbs with maximum separation. The results of theoretical studies of a rod elevator on substantiation of the structural and technological parameters during its interaction with a heap of onion sets are presented. The constructive-technological scheme of the separating rod elevator with an adjustable inclination angle of the apron which improves the quality indicators of harvesting onion sets is substantiated and developed. It has been established that with increasing angle of the longitudinal inclination of the apron, the relative speed of movement of the heap of onion sets decreases. In the absence of air flow, the relative velocity of the onion set heap with a longitudinal change in the inclination of the rod elevator apron in the considered range varies from 0.34 to 0.47 m / s. Changing the angle of the longitudinal inclination of the rod elevator by 5° significantly changes the relative average speed of movement of the heap of onion sets. A mathematical model of the movement of a heap of onion sets along the surface of the rod elevator with a change in the direction of its oscillations in the horizontal plane is developed.

Keywords: heap movement, mathematical model, bulb speed

Acknowledgement: The study was conducted within the RF President grant for state support of young Russian scientists – PhD MK – 4002.2018.8.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Dorokhov A. S., Sibiriev A. V., Aksenov A. G. Theoretical studies of the technological process of a rod elevator with an adjustable inclination angle of the apron. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(1):52-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.52-61>

Received: 03.12.2019

Accepted for publication: 11.02.2020

Published online: 28.02.2020

Наиболее энергоемкой отраслью сельского хозяйства остается растениеводство, на которое приходится 70 % всех затрат, в том числе более 40 % на операции, связанные с уборкой урожая.

Важнейшей проблемой при реализации любой технологии является уменьшение затрат труда, энергии и ресурсосбережение с одновременным повышением урожайности возделываемых культур и, как следствие, снижение себестоимости продукции. Несмотря на значительное количество научных изысканий, посвященных проблеме энерго-, ресурсосбережения при возделывании и уборке сельскохозяйственных культур и разработке средств механизации, обеспечивающих качественное выполнение технологических операций, остаются вопросы, которые до настоящего времени решены не полностью. Не все результаты известных теоретических и экспериментальных исследований могут быть непосредственно применены для интенсификации процесса уборки корнеплодов и лука, так как в зависимости от типа и технологических параметров сепарирующих рабочих органов зависят качественные показатели товарной продукции. Специфической особенностью уборки лука является потребность в таком агротехническом приеме, как дозаривание и просушивание луковиц после извлечения их из почвы. С учетом вышеизложенного различают два способа уборки лука: однофазный и двухфазный.

На этапе второй фазы уборки лука используются машины, технологический процесс работы которых повторяет этап первой фазы уборки. Таким образом, возникает противоречивая ситуация, обусловленная постоянством режимно-технологических параметров уборочной машины на всех этапах уборки лука, что является неприемлемым для работ второй фазы уборки и приводит к повреждению луковиц [1]. Данное обстоятельство обусловлено тем, что уменьшение заглубления лемеха в почву на этапе подбора луковиц из валков приводит к снижению подъема совместно с луковицами соизмеримых с ними почвенных комков, что обеспечивает более качественный процесс сепарации лука. С другой стороны, за счет снижения поступления количества почвы на под-

капывающие и сепарирующие органы возникают повреждения луковиц в результате уменьшения почвенной прослойки между рабочей поверхностью элеватора и очищаемой продукцией, кроме того, прутковые элеваторы не всегда обеспечивают качественное отделение почвенных примесей [2, 3, 4].

С целью повышения качества сепарации вороха лука в конструкции прутковых элеваторов применяют различные типы пассивных или активных встряхивателей. Кинематический режим колебания рабочей ветви пруткового элеватора принимается таким, что луковицы (или клубни картофеля) подбрасываются на полотно элеватора и, падая на прутки, повреждаются за счет вертикальной составляющей силы тяжести [5, 6, 7]. Для снижения разрушающих воздействий сепарирующих рабочих органов машин на луковицы необходима конструкция сепарирующего устройства, интенсифицирующего процесс очистки и снижающего до минимума воздействие вертикальной составляющей силы тяжести [8, 9, 10].

Известно, что сепарирующая способность пруткового элеватора зависит от угла наклона α и скорости $v_{эл}$ движения элеватора (рис. 1). Коэффициент сепарации ε при любом угле наклона α возрастает с увеличением скорости $v_{эл}$ движения пруткового элеватора до некоторого максимального значения, после которого она начинает уменьшаться. Оптимальной скоростью $v_{эл}$ движения пруткового элеватора является интервал 2,0-2,5 м/с. Кроме того, для исключения сгруживания вороха лука на поверхности пруткового элеватора необходимо соблюдение условия [4, 11]:

$$v_{эл} = v_{ме} = v_K \cdot A, \quad (1)$$

где v_K — поступательная скорость движения уборочной машины, м/с; A — коэффициент ($A = 1,3$).

Таким образом, решение проблемы повышения качества уборки лука видится, с одной стороны, в экстенсивном развитии и совершенствовании технических средств, способствующих повышению качественных показателей выполнения технологического процесса уборки лука, что приводит к повышению их материалоемкости за счет механического наращивания массы сепарирующих

устройств [12]. С другой стороны – в повышении уровня интеллектуальности, быстродействия и отзывчивости функционирующих

элементов уборочной машины на изменяющиеся условия внешней среды с регулированием их технологических и режимных параметров.

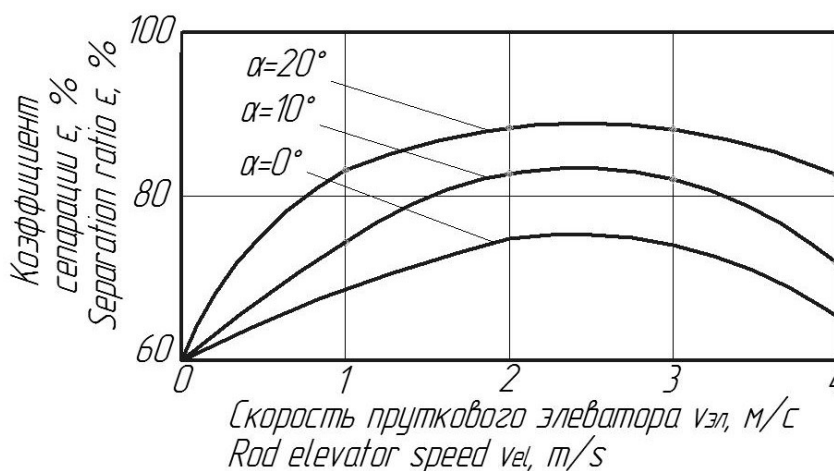


Рис. 1. График зависимости коэффициента сепарации ϵ пруткового элеватора от угла α наклона пруткового элеватора и поступательной $v_{ЭЛ}$ скорости движения /

Fig. 1. Graph of dependence of the separation coefficient ϵ of the rod elevator on the angle α of the inclination of the rod elevator and translational speed v_{EL}

Цель исследования – теоретически обосновать технологический процесс работы сепарирующего пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна в зависимости от изменяющихся почвенно-климатических условий уборки лука.

Материал и методы. Сепарирующий прутковый элеватор с асимметрично установленными эллиптическими встряхивателями и регулируемым углом наклона (патент РФ № 2679734) обеспечивает уменьшение повреждений и повышение качества сепарируемой продукции в результате снижения до минимума воздействия вертикальной составляющей силы тяжести луковиц, а также повышение равномерности распределения вороха луковиц по сепарирующей поверхности при изменении угла α наклона пруткового элеватора в результате изменения почвенно-климатических условий уборки лука [13].

Сепарирующий транспортер машины для уборки лука содержит установленный на раме 1 прутковый элеватор 2, под сторонами 3 и 4 которого установлены ведущий 5, поддерживающий 6 и ведомый 7 ролики, смонтированные на раме 1.

Под противоположными сторонами 3 и 4 пруткового элеватора 2 установлены встряхиватели 8 со смещением осей вращения в горизонтальной плоскости по длине на величину S и несовпадением фаз подъема и опускания

противоположных сторон 3 и 4 пруткового элеватора 2.

Для регулирования угла α наклона пруткового элеватора в пределах $15-23^\circ$ вал 9 ведомого ролика 7 перемещается в пазу 10 рамы 1 на механизме 11 регулирования вертикального перемещения. При данном расположении встряхивателей 8 на сепарирующем элеваторе обеспечивается режим работы, при котором происходит перемещение вороха лука по поверхности пруткового элеватора 2 без подбрасывания.

В момент опускания стороны 3 пруткового элеватора 2 происходит подъем противоположной стороны 4 по длине S пруткового элеватора, т.е. противоположные стороны 3 и 4 пруткового элеватора 2 работают в противофазе. Вероятность повреждения луковиц в этом случае меньше, а качество сепарации лучше, так как время соприкосновения луковицы с поверхностью пруткового элеватора будет продолжительнее. При этом повышение качественных показателей сепарации лука-севка в результате исполнения ведомого ролика 7 на механизме 11 вертикального перемещения обеспечивается изменением угла α наклона пруткового элеватора 2, в зависимости от величины подачи вороха лука-севка с подкапывающих рабочих органов при постоянной поступательной скорости движения пруткового элеватора 2, так как коэффициент сепарации возрастает пропорционально углу α наклона пруткового элеватора 2.

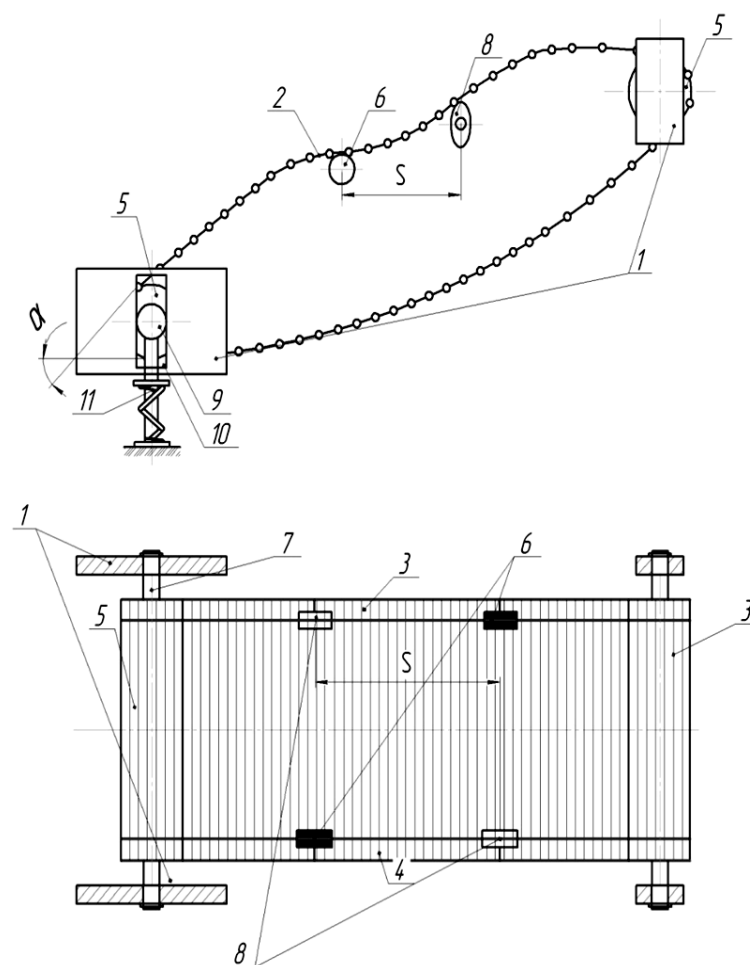


Рис. 2. Схема сепарирующего пруткового элеватора: 1 – рама; 2 – элеватор прутковый; 3, 4 – ветви пруткового элеватора; 5 – ролик ведущий; 6 – ролик поддерживающий; 7 – ролик ведомый; 8 – эллиптический встряхиватель; 9 – вал ведомого ролика; 10 – паз рамы; 11 – механизм регулирования вертикального перемещения /

Fig. 2. Diagram of a separating rod elevator: 1 – frame; 2 – rod elevator; 3, 4 – flights of a rod elevator; 5 – leading roller; 6 – supporting roller; 7 – driven roller; 8 – elliptical shaker; 9 – shaft of the driven roller; 10 – frame groove; 11 – mechanism for regulating vertical movement

Кроме того, варьирование угла α наклона пруткового элеватора, в зависимости от величины подачи вороха лука, обеспечивает регулирование равномерности подачи вороха на устройства вторичной сепарации при постоянной поступательной скорости движения пруткового элеватора, что приводит к повышению производительности и полноты сепарации при работе машины для уборки лука.

Результаты и их обсуждение. Для регулирования угла наклона полотна пруткового элеватора 1 используются датчики веса 2, закрепленные на подкапывающем лемехе 3 (рис. 3).

Датчики веса 2 в процессе выполнения технологической операции сепарации вороха лука и регулирования угла α_1 наклона пруткового элеватора 1 измеряют вес поступающего вороха лука на подкапывающем лемехе 3 и передают показания на микроконтроллер 4.

Линейный привод, представленный электроцилиндрами 5 в зависимости от показаний датчиков веса 2, получая сигнал от микроконтроллера 4, перемещает шток линейного привода на требуемое расстояние S_1 или S_2 , изменяя угол α_1 наклона полотна пруткового элеватора 1.

При прохождении вороха лука по поверхности пруткового элеватора 1 происходит просеивание почвы через щелевые отверстия, образованные смежными прутками полотна. Регистрация просеянной почвы осуществляется посредством инерционных датчиков 6, установленных по длине пруткового элеватора 1. При оценке эффективности сепарации инерционным датчиком 6 частота колебаний будет характеризоваться и скоростью движения пруткового элеватора 1 (сменой просветов и прутков над датчиком). Однако количество

просеившейся почвы будет характеризоваться пиковыми амплитудными значениями. Поэтому

му оценка эффективности сепарации элеватора проводится по амплитудным значениям.

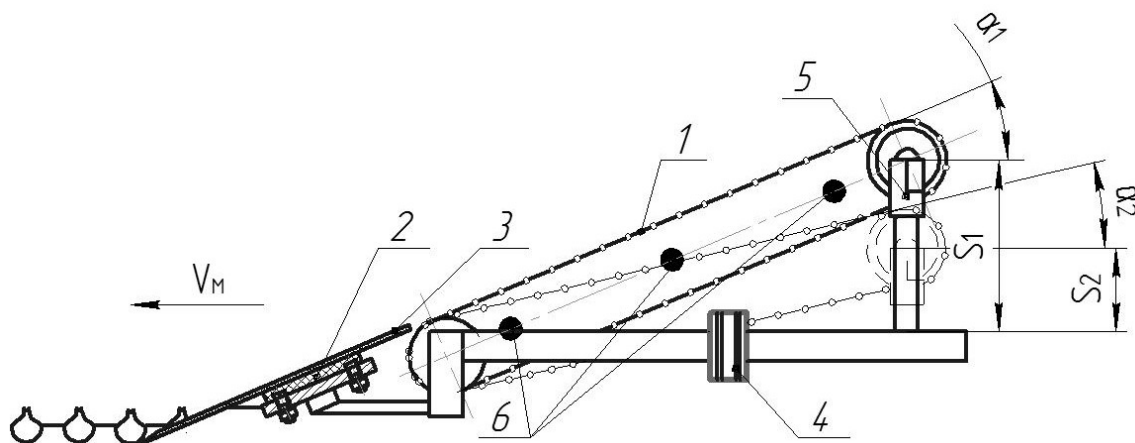


Рис. 3. Схема изменения угла наклона полотна пруткового элеватора: 1 – элеватор прутковый; 2 – датчик веса подкапывающего лемеха; 3 – лемех подкапывающий; 4 – микроконтроллер; 5 – электроцилиндр; 6 – датчик инерционный /

Fig. 3. Diagram of changes in the angle of inclination of the rod elevator apron: 1 – rod elevator; 2 – weight sensor of digging share; 3 – digging share; 4 – microcontroller; 5 – electric cylinder; 6 – inertial sensor

Если просеивание почвы на прутковом элеваторе осуществляется ниже требуемого значения, установленного микроконтроллером 4, происходит корректировка угла α_1 наклона полотна пруткового элеватора 1 в установленном интервале значений.

Основным компонентом системы адаптации рабочих органов пруткового элеватора машины для уборки лука является микроконтроллер управления движением исполнительных устройств – линейных актуаторов. Определив массу вороха лука на подкапывающем лемехе, контроллер с задержкой времени (T , с) движением пруткового элеватора передает управляющий сигнал на перемещение штока актуаторов.

Задание и контроль регулируемого угла α_1 наклона пруткового элеватора осуществляется автоматически посредством бортового компьютера (БУ). Относительное изменение управляемого перемещения рабочего исполнительного механизма (РО), регулирующего угол α наклона пруткового элеватора, производится в соответствии с разработанным алгоритмом:

$$\frac{\Delta y}{y} = \delta Q_{Вп} + K_m \frac{1}{f_m}, \quad (2)$$

где $Q_{Вп}$ – подача вороха лука-севка на подкапывающий лемех, кг/с; K_m – коэффициент преобразования тензодатчика веса в частоту электрического сигнала; f_m – частота электрического сигнала на выходе из тензодатчика, Гц.

$$Q_{Вп} = \frac{m \cdot v_{Л}}{L_{Л}}, \quad (3)$$

где m – масса луко-почвенного вороха, кг; $v_{Л}$ – поступательная скорость движения уборочной машины, м/с; $L_{Л}$ – длина подкапывающего лемеха, м.

В связи с тем, что регулирование угла α_1 наклона полотна пруткового элеватора осуществляется перемещением заднего вала приводного барабана пруткового элеватора диаметром $D_{ПР}$, то требуемое расстояние S_1 перемещения штока актуаторов в теле цикла осуществляется по формуле:

$$S_1 = \left[L_{ЭЛ} - \left(\frac{D_{ВЕД}}{2} + \frac{D_{ПР}}{2} \right) \right] \cdot \sin \alpha_1, \quad (4)$$

где $L_{ЭЛ}$ – длина пруткового элеватора, м; $D_{ВЕД}$ – диаметр ведомого вала барабана пруткового элеватора, м; $D_{ПР}$ – диаметр приводного вала барабана пруткового элеватора, м.

Угол продольного наклона поверхности пруткового элеватора (рис. 4) относительно горизонта α_1 определен в виде суммы углов – наклона поверхности пруткового элеватора относительно подкапывающего лемеха σ и наклона подкапывающего лемеха относительно горизонта σ_k :

$$\alpha_1 = \sigma + \sigma_k, \quad (5)$$

где α_1 – угол наклона пруткового элеватора относительно горизонта, град; σ – угол наклона поверхности пруткового элеватора относительно подкапывающего лемеха, град; σ_k – угол наклона подкапывающего лемеха относительно горизонта, град.

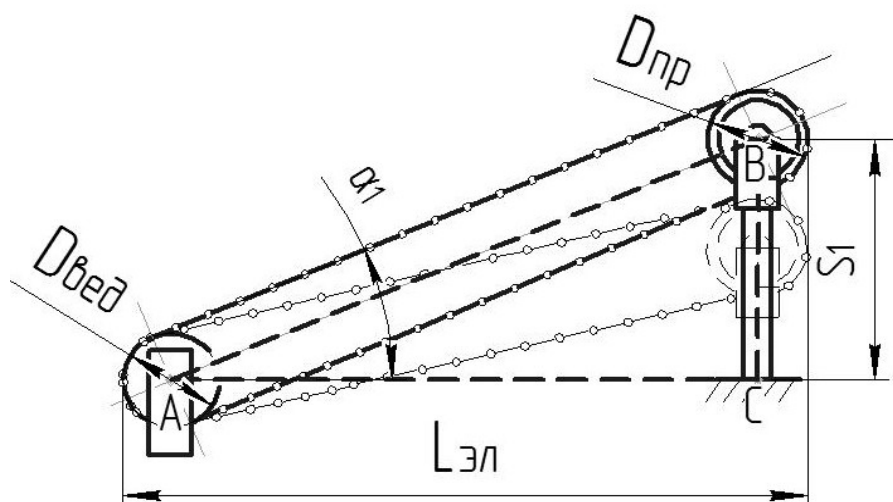


Рис. 4. Схема определения расстояния перемещения штоков актуаторов /
Fig. 4. Scheme for determining the distance of movement of the actuator rods

Рассмотрим движение элемента вороха лука, имеющего приведённый коэффициент парусности и фрикционные свойства вороха

лука. Схема сил, действующих на элемент, представлена на рисунке 5.

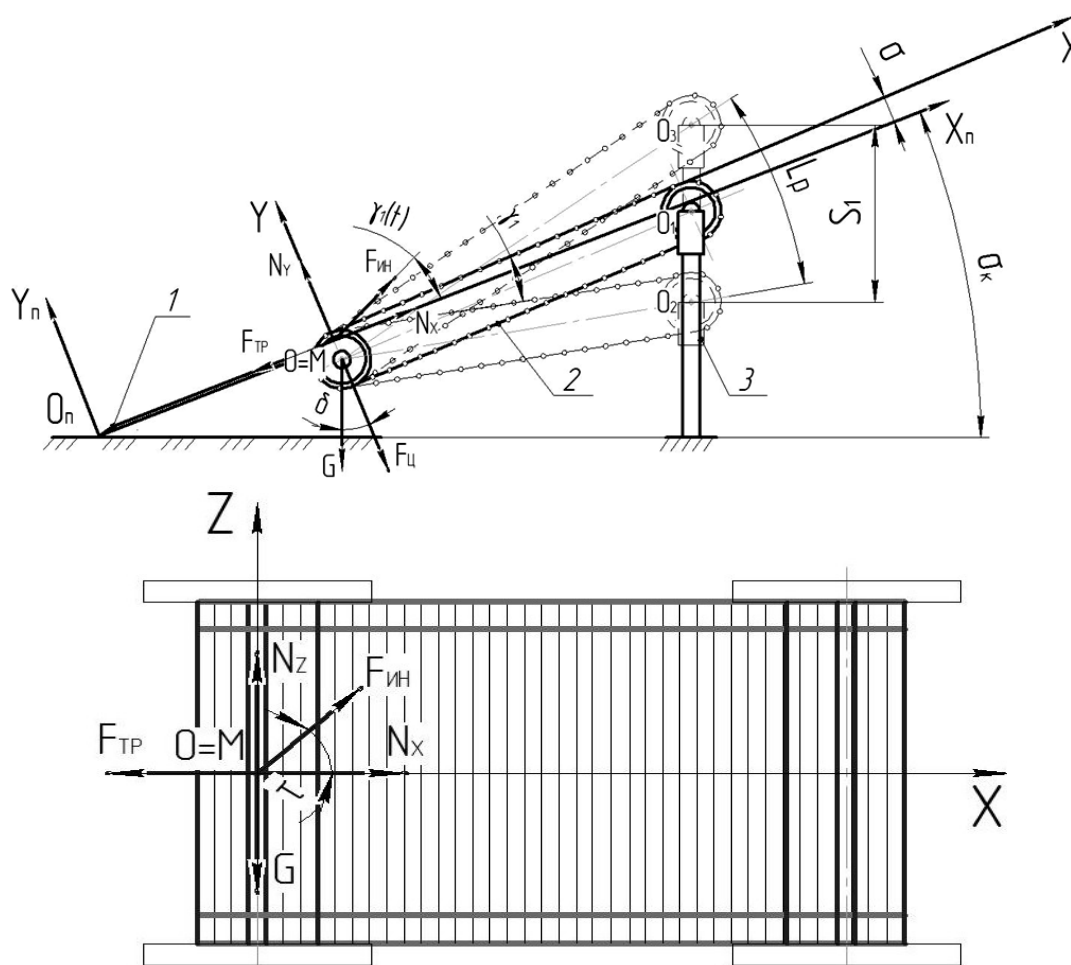


Рис. 5. Силы, действующие на элемент вороха лука: 1 – лемех подкапывающий; 2 – элеватор прутковый; 3 – электроцилиндр /

Fig. 5. Forces acting on an element of a heap of onion sets: 1 – digging share; 2 – rod elevator; 3 – electric cylinder

Введём подвижную систему координат ОХУ, связанную с поверхностью пруткового элеватора, и систему координат ОПХПУП, связанную с подкапывающим лемехом лукоуборочной машины.

Направление действия сил, воздействующих на элемент луко-почвенного вороха, находящегося на прутковом элеваторе с регулируемым углом наклона полотна, выбрано исходя из законов динамики движения материальной точки, совершающей сложное движение, а именно: G — сила тяжести луко-почвенного вороха, H ; N_X, N_Y — нормальные реакции пруткового элеватора на элемент луко-почвенного вороха по осям X, Y и Z, H ; $F_{ин}$ — сила инерции элемента луко-почвенного вороха от колебаний пруткового элеватора в горизонтальной плоскости, H ; $F_{тр}$ — сила трения элемента луко-почвенного вороха о поверхность пруткового элеватора, H ; $F_{ц}$ — центробежная сила инерции, H .

$$G = m_B \cdot g, \quad (6)$$

где m_B — масса луко-почвенного вороха, кг.

Силами воздействия R_V и сопротивлению R_W воздушного потока при движении элемента луко-почвенного вороха в поперечном направлении пренебрегаем, так как согласно результатам исследований Н. П. Ларюшина [8] следует, что траектория движения элемента луко-почвенного вороха с учетом сопротивления воздуха незначительно отличается от траектории без учета составляющей данной силы.

При движении вороха лука по поверхности пруткового элеватора большое значение имеет направление его скорости в момент отрыва, поэтому рассмотрим движение элеватора по дуге окружности L_P с углом сектора при

основании α_1 , имеющий радиус R_P , равным ходу штока электроцилиндра S_1 , т. е.:

$$R_P = S_1. \quad (7)$$

Длину элеватора $L_{эл}$ принимаем равной расстоянию между осями вращения его барабанов:

$$L_{эл} = OO_1. \quad (8)$$

В связи с тем, что движение пруткового элеватора происходит по дуге окружности с радиусом R_P , то на элемент вороха лука-севка также действует центробежная сила инерции:

$$F_{ц} = m_B \cdot \omega_c^2 \cdot R_P, \quad (9)$$

где ω_c — угловая скорость элемента вороха лука-севка, c^{-1} .

Центробежная сила инерции $F_{ц}$ совершает движение по направлению к центру приложения силы, соответственно в нашем случае она приложена к центру нижнего вала пруткового элеватора, в точке M . Для определения направления силы инерции $F_{ин}$ примем допущение о том, что сила инерции вороха лука направлена по хорде под углом $\gamma_1 = \text{const}$. Однако при небольшом ходе штока электроцилиндра, указанное допущение приводит к большой погрешности определения направления силы инерции.

Следовательно, угол γ_1 определен в виде функции времени t :

$$\gamma_1(t) = \gamma_1 + \arcsin \frac{\cos(\omega_c \cdot t)}{S_1}. \quad (10)$$

Дифференциальные уравнения относительного движения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна имеют следующий вид (верхние знаки — при движении элемента в положительном направлении осей):

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = F_{ин} \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + F_{ц} \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + N_X - F_{тр} - G \cdot \sin \delta, \\ m \cdot \ddot{y} = F_{ин} \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \sin \tau + F_{ц} \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \sin \tau + N_Y - G \cdot \cos \delta, \\ m \cdot \ddot{z} = F_{ин} \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - F_{ц} \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + N_Z - F_{тр} - G \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (11)$$

Предположим, что элемент вороха лука начинает движение по поверхности пруткового элеватора в положительном направлении оси X в момент времени t_1 , не отрываясь от поверхности пруткового элеватора, т. е. при $t = t_1, z = 0, \dot{z} = 0, \ddot{z} = 0, N_Z > 0, N_X = 0$.

Из третьего выражения системы уравнений (11) имеем:

$$N_Z = -F_{ин} \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + F_{ц} \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + F_{тр} + G \cdot \cos \delta. \quad (12)$$

Принимаем, что

$$F_{тр} = f_{эл} \cdot N_Z, \quad (13)$$

где $f_{эл}$ — коэффициент трения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора, $f_{эл} = 0,4$.

$$F_{ин} = \omega \cdot R_P \cdot \cos(\omega \cdot t_1). \quad (14)$$

Согласно выражениям (13) и (14) условие движения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора с регулируе-

мым углом наклона полотна в положительном направлении оси X запишется в виде:

$$\omega \cdot R_p \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + m_B \cdot \omega_c^2 \cdot R_p \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - f_{эл} \cdot N_z - m_B \cdot g \cdot \sin \delta = 0. \quad (15)$$

Условие отрыва элемента вороха лука от поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна:

$$\begin{cases} t = t_0, \\ z = 0, \dot{z} = 0, \ddot{z} = 0, \\ N_z = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Из третьего выражения системы уравнений (12) согласно условию отрыва элемента

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \omega \cdot R_p \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + \omega_c^2 \cdot R_p \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - \frac{f_{эл} \cdot N_z}{m_B} \cos \left(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) - g \cdot \sin \delta = 0, \\ \frac{dy}{dt} = \omega \cdot R_p \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \sin \tau + \omega_c^2 \cdot R_p \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \sin \tau + \frac{f_{эл} \cdot N_z}{m_B} \sin \left(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) - g \cdot \cos \delta, \\ \frac{dz}{dt} = \omega \cdot R_p \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - \omega_c^2 \cdot R_p \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau + N_z \cdot (1 - f_{эл}) - g \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (19)$$

Система дифференциальных уравнений (19) движения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна предназначена для определения абсолютной скорости движения материальной точки M элемента вороха лука при условии отрыва элемента вороха лука от поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона, следовательно, для проведения исследований необходимо лишь третье выражение системы уравнений (19).

Силы N_x, N_y при проецировании на координатную ось Z равны нулю, соответственно в уравнении (12) и последующих аналитических зависимостях они не учитывались.

После двойного интегрирования системы уравнений (19) получаем уравнение движения материальной точки M элемента вороха лука в проекции на координатные оси XYZ с последующим определением скорости движения материальной точки M элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна по выражению:

$$v_{Mг} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (20)$$

где v_x — проекция относительной скорости движения материальной точки элемента вороха лука на ось X , м/с; v_y — проекция относительной скорости движения материальной точки элемента вороха лука на ось Y , м/с; v_z — проекция относительной скорости дви-

вороха лука имеем:

$$F_{ин} \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - F_{ц} \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - F_{тр} - G \cdot \cos \delta = 0. \quad (17)$$

После преобразования выражения (17) имеем:

$$\omega \cdot R_p \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \cdot \sin \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - m_B \cdot \omega_c^2 \cdot R_p \cdot \cos \gamma_1(t) \cdot \cos \tau - m_B \cdot g \cdot \cos \delta = 0. \quad (18)$$

Дифференциальные уравнения движения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна имеют вид:

жения материальной точки элемента вороха лука на ось Z , м/с.

Выводы. Обоснована и разработана конструктивно-технологическая схема сепарирующего пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна, обеспечивающего повышение качественных показателей уборки лука. Анализ системы уравнений (11), отражающей относительную скорость движения элемента вороха лука по поверхности пруткового элеватора в продольном направлении, свидетельствует о том, что с увеличением угла α_1 продольного наклона полотна относительная скорость $v_{Mг}$ движения вороха лука уменьшается. При отсутствии воздушного потока относительная скорость $v_{Mг}$ движения вороха лука при изменении угла наклона полотна пруткового элеватора в продольном направлении в рассматриваемом диапазоне изменяется от 0,34 до 0,47 м/с. Изменение угла α_1 продольного наклона пруткового элеватора на 5° значительно $v_{Mг}$ изменяет относительную среднюю скорость движения вороха лука, что повышает качество сепарации вороха лука без увеличения поступательной скорости движения пруткового полотна, но приводит к повышению повреждений лукович в результате интенсивного воздействия встряхивателей полотна пруткового элеватора на обрабатываемый ворох лука.

Получена математическая модель движения вороха лука по поверхности пруткового элеватора при изменении направления его колебаний в горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. Протасов А. А. Функциональный подход к созданию лукоуборочной машины. Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. 2011;(2((47))):37-43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20231280>
2. Рембалович Г. К. Повышение эффективности уборки картофеля на тяжелых суглинистых почвах совершенствованием сепарирующих органов комбайнов (монография). Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2014. 300 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008509833>
3. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019;(2(58)):63-75. URL: http://www.inmateh.eu/INMATEH_2_2019/INMATEH-Agricultural_Engineering_58_2019.pdf
4. Трубилин Е. И., Абликов В. А. Машины для уборки сельскохозяйственных культур (конструкции, теории и расчет). Краснодар: КГАУ, 2010. 325 с. Режим доступа: <https://kubsau.ru/upload/iblock/03e/03e2ee02ecd7db9a0a557082bdc4446b.pdf>
5. Рембалович Г. К., Костенко М. Ю., Каширин И. А., Успенский И. А., Голиков А. А. Теоретические исследования процесса интенсификации первичной сепарации в картофелеуборочных машинах динамическим методом. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014;102:417-431. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22628249>
6. Subaeva A. K., Zamaidinov A. A., Kurdyumov V. I., Zykin E. S. Quality control indicators of soil ridges at sowing cultivated crops. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016;8(3):14965-14972. URL: https://www.researchgate.net/publication/309671675_Quality_control_indicators_of_soil_ridges_at_sowing_cultivated_crops
7. Subaeva A. K., Zamaidinov A. A., Kurdyumov V. I., Zykin E. S. Theoretical substantiation of ridger-seeder roll draught. Journal of fundamental and applied sciences. 2017;9(1S):1945-1955. Режим доступа: <https://jfas.info/pjfas/index.php/jfas/article/view/2897/1519>
8. Ларюшин Н. П., Пивоваров В. Ф., Кухарев О. Н., Вершинин Ю. А. Комплекс машин для производства лука по ресурсосберегающим технологиям. Овощи России. 2019;(6):141-145. DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-141-145>
9. Калинин А. Б., Теплинский И. З., Кудрявцев П. П. Почвенное состояние в интенсивной технологии. Картофель и овощи. 2016;(2):35-36. Режим доступа: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/2_2016_kio.pdf
10. Рейнгарт Э. С., Сорокин А. А., Пономарев А. Г. Унифицированные картофелеуборочные машины нового поколения. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006;(10):3-5. Режим доступа: <http://www.avtomash.ru/gur/2006/200610.htm>
11. Ларюшин Н. П., Кухарев О. Н., Кирюхин Т. А. Исходные положения при проектировании машин для уборки лука. Наука в центральной России. 2015;(6(18)):48-58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25118239>
12. Nevko R. B., Tkachenko I. G., Synii S. V. Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters. INMATEH-agricultural engineering. 2016;49(2):53-60. URL: <http://oaji.net/articles/2016/1672-1481650176.pdf>
13. Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Кынев Н. Г., Сазонов Н. В. Сепарирующий транспортер машины для уборки корнеклубнеплодов и лукович: пат. № 2679734 (Российская Федерация). № 2018117525: заяв. 11.05.2018; опубл. 12.02.2019. Бюл. № 5. 8 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2679734C1_20190212

References

1. Protasov A. A. *Funktsional'noy podkhod k sozdaniyu lukouborochnoy mashiny*. [Functional approach to onion harvester designing]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina* = Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2011;(2((47))):37-43. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20231280>
2. Rembalovich G. K. *Povyshenie effektivnosti uborki kartofelya na tyazhelykh suglinistyykh pochvakh sovershenstvovaniem separiruyushchikh organov kombaynov (monografiya)*. [Improving the efficiency of potato harvesting on heavy loamy soils by improving the separating organs of combines (monograph)]. Ryazan': FGBOU VPO RGATU, 2014. 300 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008509833>
3. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019;(2(58)):63-75. URL: http://www.inmateh.eu/INMATEH_2_2019/INMATEH-Agricultural_Engineering_58_2019.pdf
4. Trubilin E. I., Ablikov V. A. *Mashiny dlya uborki sel'skokhozyaystvennykh kul'tur (konstruktsii, teorii i raschet)*. [Machines for harvesting agricultural crops (construction, theory and calculation)]. Krasnodar.: KGAU, 2010. 325 p. URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/03e/03e2ee02ecd7db9a0a557082bdc4446b.pdf>

5. Rembalovich G. K., Kostenko M. Yu., Kashirin I. A., Uspenskiy I. A., Golikov A. A. *Teoreticheskie issledovaniya protsessa intensivifikatsii pervichnoy separatsii v kartofeleuborochnykh mashinakh dinamicheskim metodom*. [Theoretical studies of the process of intensification of the primary separation in potato machines using a dynamic method]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2014;102:417-431. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22628249>
6. Subaeva A. K., Zamaidinov A. A., Kurdyumov V. I., Zykin E. S. Quality control indicators of soil ridges at sowing cultivated crops. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016;8(3):14965-14972. URL: https://www.researchgate.net/publication/309671675_Quality_control_indicators_of_soil_ridges_at_sowing_cultivated_crops
7. Subaeva A. K., Zamaidinov A. A., Kurdyumov V. I., Zykin E. S. Theoretical substantiation of ridger-seeder roll draught. *Journal of fundamental and applied sciences*. 2017;9(1S):1945-1955. Режим доступа: <https://jfas.info/pjfas/index.php/jfas/article/view/2897/1519>
8. Laryushin N. P., Pivovarov V. F., Kukharev O. N., Vershinin Yu. A. *Kompleks mashin dlya proizvodstva luka po resursosberegayushchim tekhnologiyam*. [Complex machines for the production of onions on resource-saving technologies]. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2019;(6):141-145. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-141-145>
9. Kalinin A. B., Teplinskiy I. Z., Kudryavtsev P. P. *Pochvennoe sostoyanie v intensivnoy tekhnologii*. [Soil condition in the intensive technology]. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2016;(2):35-36. (In Russ.). URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/2_2016_kio.pdf
10. Reyngart E. S., Sorokin A. A., Ponomarev A. G. *Unifitsirovannye kartofeleuborochnye mashiny novogo pokoleniya*. [Unified new generation potato harvesters]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2006;(10):3-5. (In Russ.). URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2006/200610.htm>
11. Laryushin N. P., Kukharev O. N., Kiryukhin T. A. *Iskhodnye polozheniya pri proektirovanii mashin dlya uborki luka*. [Original position when designing onion harvesting machines]. *Nauka v tsentral'noy Rossii* = Science in Central Russia. 2015;(6(18)):48-58. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25118239>
12. Hevko R. B., Tkachenko I. G., Synii S. V. Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters. *INMATEH-agricultural engineering*. 2016;49(2):53-60. URL: <http://oaji.net/articles/2016/1672-1481650176.pdf>
13. Sibirev A. V., Aksenov A. G., Kynev N. G., Sazonov N. V. The separating conveyor of the machine for harvesting root crops and bulbs: patent RF no. 2679734, 2019. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2679734C1_20190212

Сведения об авторах

Дорохов Алексей Семенович, доктор техн. наук, член-корреспондент РАН, зам. директора по научно-организационной работе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru

✉ **Сибирёв Алексей Викторович**, кандидат техн. наук, ст. научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Аксенов Александр Геннадьевич, кандидат техн. наук, вед. научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, e-mail: 1053vim@mail.ru

Information about the authors

Aleksey S. Dorokhov, DSc in Engineering, corresponding member of RAS, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru

✉ **Aleksey V. Sibirev**, PhD in Engineering, senior researcher, Department of Technology and Machines in Vegetable Farming, Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Aleksandr G. Aksenov, PhD in Engineering, leading researcher, Department of Technology and Machines in Vegetable Farming, Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, e-mail: 1053vim@mail.ru

✉ - Для контактов / Corresponding author