



По мере продвижения машины для уборки корнеплодов и лука происходит изменение физико-механических свойств почвы, изменение урожайности товарной продукции, следовательно, происходит изменение подачи вороха на сепарирующие рабочие органы уборочной машины, что оказывает влияние на качественные показатели уборки. В каждый момент времени происходит изменение возмущающего воздействия  $F_2(t)$  (массы вороха лука), которое воспринимается измерительным органом (ИО) (датчик веса) и передается на сравнивающий орган (БУ) (блок управления). Если измеряемая величина больше определенного значения, то сигнал поступает на рабочий орган (РО) (механизм вертикального перемещения) и передается на объект управления (ОУ) (вал ведомого ролика и вал интенсификатора), изменяющий управляемую величину  $y_2(t)$  и  $y_3(t)$ .

В случае если возмущающее воздействие  $F_2(t)$  (массы вороха лука) на сходе с первого пруткового элеватора отличается от требуемого значения массы вороха корнеплодов и лука, воспринимаемое измерительным органом (ИО) (датчик веса), то сигнал передается на сравнивающий органа (БУ), и далее поступает на рабочий орган (РО) (механизм вертикального перемещения) и передается на объект управления (ОУ) (вал ведомого ролика и вал интенсификатора сепарации).

Задание и контроль регулируемого угла  $\alpha$  наклона пруткового элеватора и частоты вращения  $n_{ин}$  интенсификаторов сепарации осуществляется автоматически посредством бортового компьютера (БУ).

**Результаты исследований.** Схема автоматизированной сепарирующей системы и общий вид машины для уборки лука представлена на рис. 2.

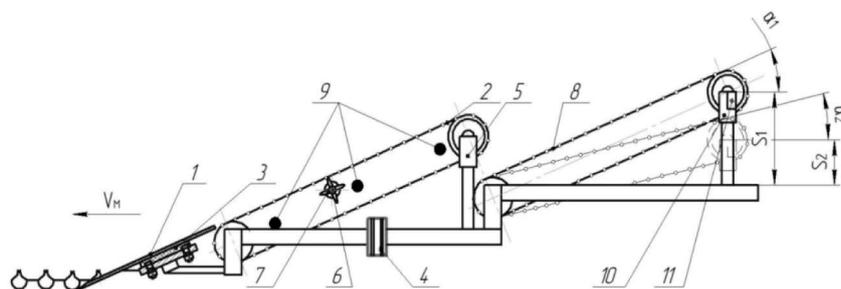


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема автоматизированной сепарирующей системы машины для уборки лука: 1 – лемех подкапывающий; 2, 8 – прутковый элеватор; 3 – датчик веса подкапывающего лемеха; 4 – микроконтроллер; 5 – опорная стойка пруткового элеватора; 6 – интенсификаторы сепарации; 7 – электродвигатели привода интенсификаторов; 9 – датчик инерционный; 10 – реле ограничения подъема; 11 – электроцилиндр

Изменение частоты вращения интенсификаторов сепарации 6, закрепленных на одном приводном валу под противоположными сторонами пруткового элеватора 2 осуществляется посредством их привода электродвигателями 7. При этом подача сигнала на варьирование регулируемого параметра поступает от микроконтроллера 4, входным параметром для которого является масса вороха луковок на подкапывающем лемехе 1.

Определив массу вороха корнеплодов и лука на подкапывающем лемехе, контроллер с задержкой времени  $T$ , с движением пруткового элеватора, передает управляющий сигнал на перемещение штока актуаторов.

В связи с тем, что регулирование угла  $\alpha_1$  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 [8, 9], рис. 3:

$$S_1 = \left[ L_{эл} - \left( \frac{D_{вед}}{2} + \frac{D_{пр}}{2} \right) \right] \cdot \sin \alpha_1, \quad (1)$$

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.

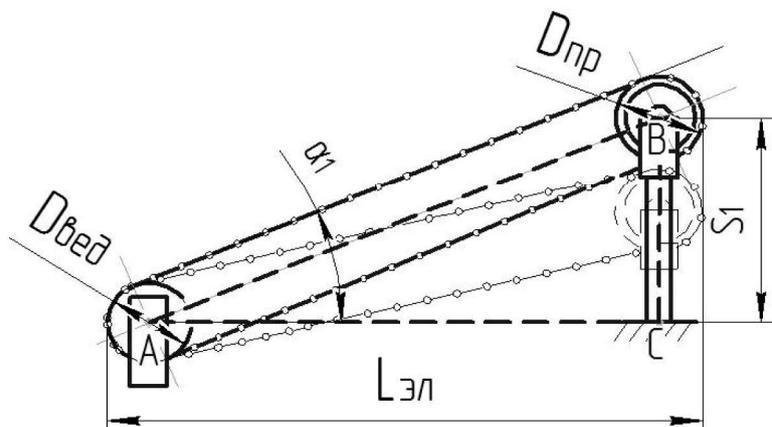


Рис. 3. Схема определения расстояния перемещения штоков актуаторов



При изменении угла  $\alpha_1$  наклона полотна пруткового элеватора и воздействии встряхивателей на сепарируемый луко-почвенный ворох появляется поперечная составляющая смещения вороха, обусловленная набеганием полотна пруткового элеватора на эллиптический встряхиватель диаметром  $D_{Вс}$  :

$$l = \frac{0,5m\omega_{ЭЛ}^2 r_{Аг} \left( \frac{\omega_{ЭЛ}^2}{g^2} - 1 \right)}{(\sin \alpha_{П} - f_{ЭЛ} \cos \alpha_{П})}. \quad (2)$$

Причем следует отметить, что полотно пруткового элеватора совершает колебание как в продольном направлении (рис. 4), в зависимости от подачи  $Q_{Вп}$  вороха лука-севка с подкапывающего лемеха на сепарацию с амплитудой:

$$A_X = L_{ЭЛ} \cos \alpha_1, \quad (3)$$

где  $L_{ЭЛ}$  – длина пруткового элеватора, м.

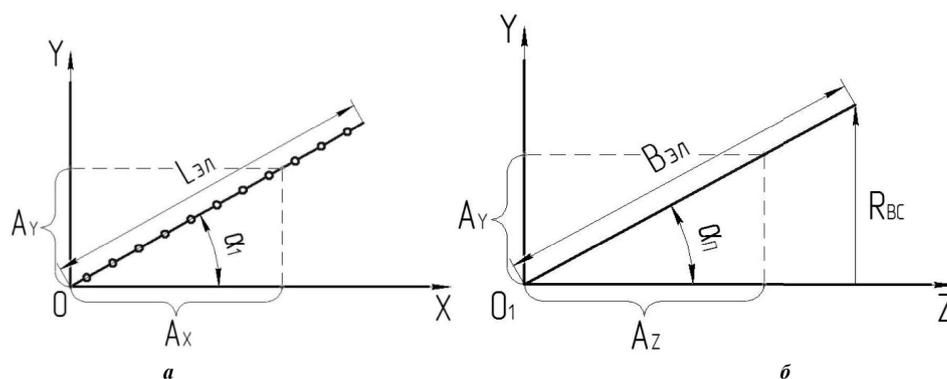


Рис. 4. Схема определения амплитуды колебаний полотна пруткового элеватора: а – в продольном направлении; б – в поперечном направлении

$$A_Y = L_{ЭЛ} \sin \alpha_1. \quad (4)$$

Угол  $\alpha_{П}$  подъема полотна пруткового элеватора в поперечном направлении определяется по формуле:

$$\alpha_{П} > \varphi_{ЭЛ} + \arctg \frac{a_e}{g}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{ЭЛ}$  – угол трения луко-почвенного вороха по поверхности пруткового элеватора, град;  $a_e$  – переносное ускорение материальной точки, м/с<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения материальной точки, м/с<sup>2</sup>.

Следовательно, амплитуда  $A_Z$  колебаний полотна пруткового элеватора в поперечном направлении:

$$A_Z = B_{ЭЛ} \cos \alpha_{П}, \quad (6)$$

где  $B_{ЭЛ}$  ширина пруткового элеватора, м.

$$A_Y = B_{ЭЛ} \sin \alpha_{П}. \quad (7)$$

Угол  $\alpha_{П}$  подъема полотна пруткового элеватора в зависимости от амплитуды колебаний полотна:

$$\alpha_{П} = \arctg \frac{A_Y}{A_Z}. \quad (8)$$

На рис. 5 графически представлены зависимости направления и амплитуды колебаний пруткового элеватора в продольном направлении от амплитуды колебаний в поперечном направлении [8, 9].

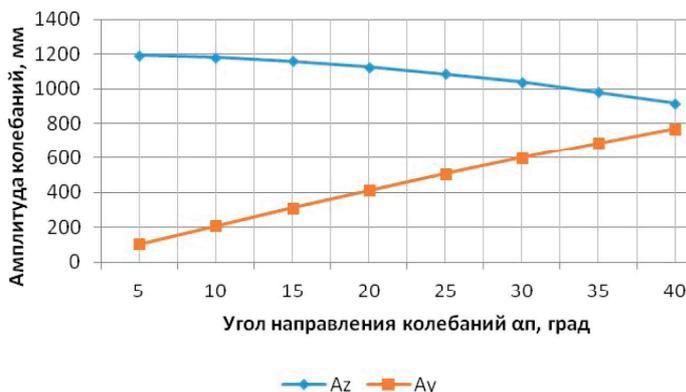


Рис. 5. Зависимость направления и амплитуды колебаний пруткового элеватора в продольном направлении от амплитуды колебаний в поперечном направлении



Для равномерного распределения вороха лука по поверхности рабочего органа первичной сепарации перед поступлением устройства вторичной очистки необходимо обеспечить уменьшение амплитуды колебаний пруткового элеватора [10, 11].

Известно, что минимальная скорость полотна элеватора должна быть больше 1 м/с.

Для прутковых элеваторов современных конструкций наиболее рациональная скорость, соответствующая наибольшему проценту сепарации, составляет 1,5–2,5 м/с.

Но в данном диапазоне скорости полотна элеватора травмирование луковец увеличивается.

Изменение кинематического режима встряхивания полотна  $K$ , соответствующее увеличению поступательной скорости движения  $v_{ЭЛ}$  до ее критического значения  $v_{ЭЛк}$  (больше или равное кинематическому режиму критического значения встряхивания полотна элеватора  $K_k$ ), при сообщаемом интенсификатором рабочей ветви элеватора ускорении, больше ускорения свободного падения материальной точки:

$$K_k \geq v_{ЭЛк}. \quad (9)$$

Обеспечить выполнение условия (16) возможно при условии создания дополнительного крутящего момента  $M_{ИН}$  интенсификатору сепарации, т.е. необходимо, чтобы встряхиватель элеватора совершал вращательное движение с частотой вращения  $n_{ИН}$  независимо от значения поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора, а от физико-механических свойств вороха и размерно-массовых характеристик подкапываемого вороха лука, следовательно, необходимо установить зависимость между частотой вращения интенсификаторов сепарации и массой вороха лука, поступающего на сепарацию.

Известно, что сход  $Q_{ВЭЛ}$  вороха луковец определяется:

$$Q_{ВЭЛ} = \frac{mv_{ЭЛ}}{L_{ЭЛ}}, \quad (10)$$

где  $m$  – масса вороха луковец на прутковом элеваторе, кг;  $L_{ЭЛ}$  – длина пруткового элеватора, м.

Принимая во внимание зависимость Н.В. Фирсова, который определил минимальную скорость  $v_{ЭЛ}$  полотна элеватора с эллиптическими встряхивателями, совершающими вращательные движения в результате зацепления с полотном элеватора, имеем:

$$v_{ЭЛ} = \pi \sqrt{R_{ВС} \cos \alpha}, \quad (11)$$

где  $R_{ВС}$  – радиус встряхивателя, м/с.

$$v_{ЭЛ} = \frac{\pi n_{ИН}}{30}. \quad (12)$$

$$n_{ИН} = \left[ 30 \left( \frac{Q_{ВЭЛ} L_{ЭЛ}}{m} \right) \right] / \pi. \quad (13)$$

Таким образом, изменение частоты вращения  $n_{ИН}$  интенсификаторов сепарации, закрепленных на одном приводном валу под противоположными сторонами пруткового элеватора осуществляется посредством их привода электродвигателями, в соответствии с конструктивно-технологической схемой рис. 3.

Мощность, затрачиваемая на привод интенсификаторов сепарации – активных эллиптических встряхивателей представим в виде двух слагаемых:

$$N_{ИН} = N_1 + N_2, \quad (14)$$

где  $N_1$  – мощность, затрачиваемая на деформацию почвы, кВт;  $N_2$  – мощность, затрачиваемая на отбрасывание почвенных частиц, кВт.

$$N_1 = \frac{10^{-4} k c h z n_{ИН}}{6}, \quad (15)$$

где  $k$  – удельное сопротивление деформации почвы, МПа ( $k = 0,217$  МПа);  $c$  – площадь почвенных частиц, м<sup>2</sup>;  $h$  – глубина подкапывания луковец, м;  $Z$  – количество зубьев эллиптической звездочки, шт.

$$c = 2L \cos 30h, \quad (16)$$

где  $L$  – длина подкапывающего лемеха, м.

$$c = 2 \cdot 0,125 \cos 30 \cdot 0,04 = 0,094 \text{ м}^2.$$

$$N_1 = \frac{10^{-4} \cdot 0,217 \cdot 0,094 \cdot 0,04 \cdot 5 \cdot 120}{6} = 1,7 \text{ кВт.} \quad (17)$$

$$N_2 = 5 \cdot 10^{-4} \delta Q_{ВП} v_{ВЛ},$$

где  $\delta$  – коэффициент отбрасывания, зависящий от формы рабочего органа,  $\delta = 0,75$ ;  $v_{ВЛ}$  – скорость движения лукового вороха, м/с, 1,7 м/с.



$$N_2 = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,75 \cdot 20,1 \cdot 1,7 = 0,0097 \text{ кВт.}$$

$$N_{\text{ИН}} = 1,7 + 0,0097 = 1,7097 \text{ кВт.}$$

Требуемая мощность привода интенсификаторов сепарации:

$$N_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{ИН}}}{\eta_{\text{ИН}}}, \quad (18)$$

где  $\eta_{\text{ИН}}$  – общий КПД привода интенсификаторов сепарации.

$$\eta_{\text{ИН}} = \eta_{\text{ЭЛ}} \eta_{\text{ПОД}}^2, \quad (19)$$

где  $\eta_{\text{ЭЛ}}$  – КПД электродвигателя,  $\eta_{\text{ЭЛ}} = 0,96$ ;  $\eta_{\text{ПОД}}$  – КПД подшипников качения,  $\eta_{\text{ПОД}} = 0,99$ .

$$\eta_{\text{ИН}} = 0,96 \cdot 0,99^2 = 0,94.$$

Мощность, затрачиваемая на привод интенсификатора сепарации – одного активного встряхивателя пруткового элеватора, составляет:

$$N_{\text{тр}} = \frac{1,7097}{0,94} = 1,81 \text{ кВт.}$$

Так как, согласно конструктивно-технологической схеме автоматизированной сепарирующей системы машины для уборки лука (см. рис. 5) имеем, что под каждой стороной пруткового элеватора расположен один встряхиватель, то мощность  $N_{\text{СП}}$ , затрачиваемая на привод интенсификаторов сепарации разрабатываемой автоматизированной сепарирующей системы составляет:

$$N_{\text{СП}} = 2N_{\text{тр}}. \quad (20)$$

$$N_{\text{СП}} = 2 \cdot 1,81 = 3,62 \text{ кВт.}$$

Для обеспечения автоматической системы регулирования режимных и технологических параметров машины для уборки лука разработан алгоритм работы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна и частотой вращения интенсификаторов сепарации (рис. 6).

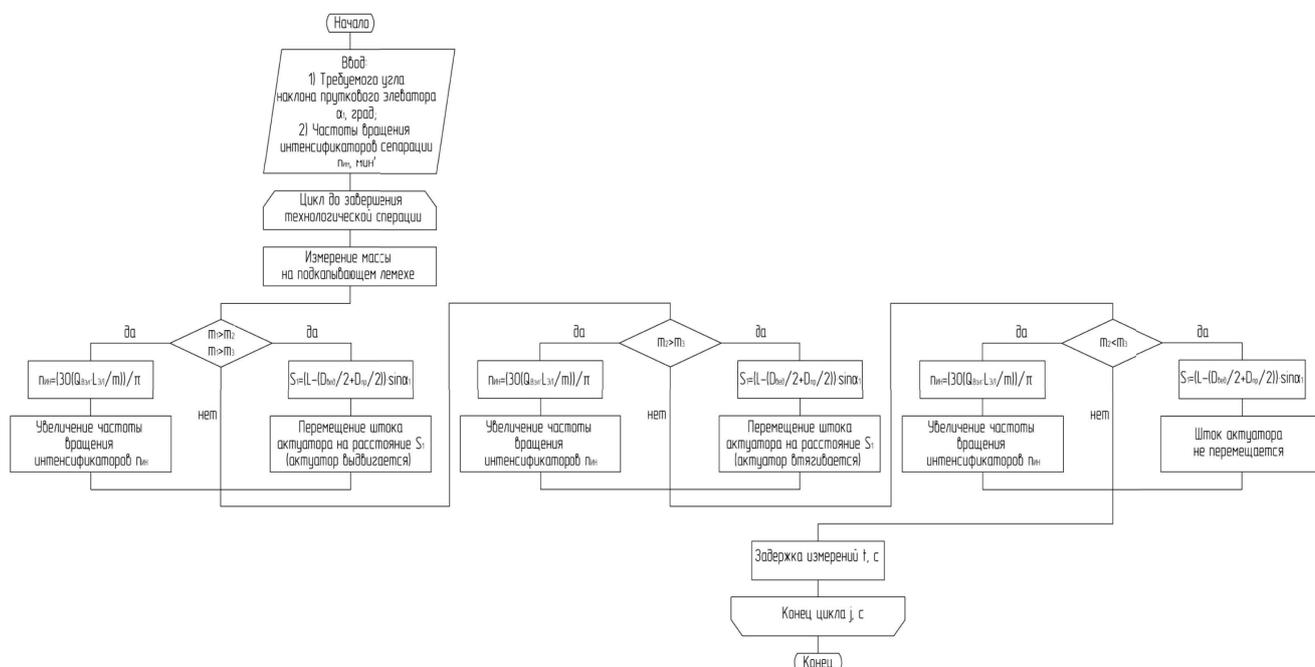


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна и частотой вращения интенсификаторов сепарации

Для проверки разработанных алгоритмов функционирования системы автоматического контроля регулирования глубины хода рабочих органов машины для предпосевной обработки почвы необходимо проведение экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.





**Заключение.** Выполнены аналитические исследования по разработке и обоснованию системы автоматического контроля режимных и технологических параметров сепарирующей системы машины для уборки лука, разработаны структурная схема и алгоритм линейной системы позиционного управления, а также расчетная схема к формированию алгоритма управления.

Определены математическая модель объекта управления регулирования глубины режимных параметров сепарирующей системы, условие идеального отслеживания траектории точки перемещения подвижных частей приводных механизмов звеньев задающего устройства и штоков исполнительных актуаторов автоматической системы сепарирующей системы.

*Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации на право получения стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам – СП-1004.2021.1.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдошин Н. В. Моделирование качества выполнения механизированных работ // Горячкинские чтения: Сб. докладов 1-й Междунар. науч.-практ. конф., 2013. С. 6-13.
2. Башкирцев В. И., Алдошин Н. В. Обеспечение качества механизированных работ при эксплуатации сельскохозяйственной техники. М., 2017. 96 с.
3. Черноиванов В. И., Ежевский А. А., Федоренко В. Ф. Мировые тенденции машинно-технологического обеспечения интеллектуального сельского хозяйства. М., 2012. 284 с.
4. Ларюшин А. М. Энергосберегающие технологии и технические средства для уборки лука: дис. ... д-ра. техн. наук. Пенза, 2010. 426 с.
5. Ларюшин Н. П. Научные основы разработки комплекса машин для уборки и послеуборочной обработки лука: дис. ... д-ра. техн. наук. Рязань, 1996. 350 с.
6. Лобачевский Я. П., Емельянов П. А., Аксенов А. Г., Сибирев А. В. Машинная технология производства лука. М., 2016. 168 с.
7. Дорохов А. С., Сибирев А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А., Сазонов Н. В. *Инновационные технологии и комплекс машин для уборки лука-севка*. М., 2021. 440 с.
8. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. Обоснование конструктивной схемы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2020. № 4. С. 4–9.
9. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. Теоретические исследования технологического процесса работы пруткового элеватора с регулируемым углом наклона // Аграрная наука Евро-Северо-Востока». 2020. № 2 (27). С. 40–46.
10. Протасов А. А. Совершенствование технологических процессов и технических средств для уборки лука: дис. ... д-ра. техн. наук. Саратов, 2005. 355 с.
11. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading // Research in Agricultural Engineering. 2017. No. 2. P. 22–31.

#### REFERENCES

1. Aldoshin N. V. Modeling the quality of mechanized work. *Goryachkinskiye readings*. 2013: 6–13.
2. Bashkirtsev V. I., Aldoshin N. V. Ensuring the quality of mechanized work in the operation of agricultural machinery. Moscow, 2017. 96 p.
3. Chernoiivanov V. I., Ezhevsky A. A., Fedorenko V. F. World trends in machine-technological support of intelligent agriculture. Moscow, 2012. 284 p.
4. Laryushin A. M. Energy-saving technologies and technical means for onion harvesting. Penza, 2010. 426 p.
5. Laryushin N. P. Scientific basis for the development of a complex of machines for harvesting and post-harvest processing of onions. Ryazan, 1996. 350 p.
6. Lobachevsky Ya. P., Emelyanov P. A., Aksenov A. G., Sbirev A. V. Onion production machine technology. Moscow, 2016. 168 p.
7. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A., Sazonov N. V. Innovative technologies and a set of machines for harvesting onion sets. Moscow, 2021. 440 p.
8. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Substantiation of the design scheme of a bar elevator with an adjustable blade inclination angle. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin*. 2020; 4: 4–9.
9. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Theoretical studies of the technological process of operation of a rod elevator with an adjustable blade inclination. *Agrarian science of the Euro-North-East*. 2020; 2 (27): 40–46.
10. Protasov A. A. Improving technological processes and technical means for harvesting onions. Saratov, 2005. 355 p.
11. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2017;2:22–31.

*Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 25.10.2021; принята к публикации 05.11.2022.  
The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 25.10.2021; accepted for publication 05.11.2022.*