



Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями

А. В. Сибирёв*, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

*sibirev2011@yandex.ru

Введение. Существующие машины для уборки корнеплодов и лука не обеспечивают качественных показателей сепарации вороха корнеплодов, что приводит к нарушению агротехнических требований в процессе уборки. Необходим поиск новых решений по улучшению качественных показателей сепарации корнеплодов, а именно повышению полноты сепарации и снижению количества повреждений.

Материалы и методы. В статье представлена конструкция лабораторной установки по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом. Описана методика проведения и результаты лабораторных исследований по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на экспериментальном прутковом элеваторе.

Результаты исследования. Приведены результаты лабораторных исследований пруткового элеватора по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка. Определено, что максимальная полнота сепарации вороха лука-севка составляет 98 % при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55-1,68$ м/с, подаче вороха лука-севка $Q_{вп} = 19,7-27,1$ кг/с и межсеевом расстоянии между пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом $S = 0,29-0,42$ м.

Обсуждение и заключение. Применение пруткового элеватора с асимметричным расположением эллиптического встряхивателя и поддерживающего ролика позволяет повысить полноту сепарации луковиц лука-севка на 20 %, а повреждения луковиц снизить на 11 % по сравнению с симметричным расположением встряхивателей.

Ключевые слова: экспериментальный прутковый элеватор, подача вороха, поступательная скорость движения, качество сепарации, лук-севок, повреждение

Для цитирования: Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А. Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 91–107. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>

Благодарности: Исследование проведено при государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК – 4002.2018.8.



The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners

A. V. Sibirev*, A. G. Aksenov, M. A. Mosyakov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*sibirev2011@yandex.ru

Introduction. Existing machines for harvesting root crops and onions do not have efficient indicators describing separation of root crops that leads to incompliance with agrotechnical requirements to harvesting root crops. New methods should be found to increase quality of root crop separation, including the qualitative indicators, and to cut losses.

Materials and Methods. The article describes the design of a laboratory unit for determining qualitative indicators of the seed onion heap separation using a rod elevator with the asymmetric passive elliptical shaker and supporting roller. The authors describe the method and results of laboratory studies to determine qualitative indicators of seed onion heap separation at an experimental rod elevator.

Results. The results of the laboratory study of the rod elevator are cited and qualitative indices of seed onion heap separation are defined. The maximum completeness of separation of the seed onion heap is 98 %, when the forward speed of the web of the rod elevator is $v_{el} = 1.55\text{--}1.68$ m/s, the supply of heap of onion-seeding $Q_B = 19.7\text{--}27.1$ kg/s and the interaxial distance between the passive elliptical shaker and the supporting roller is within the range of $S = 0.29\text{--}0.42$ m.

Discussion and Conclusion. The use of a rod elevator with the asymmetric elliptical shakers and supporting roller allows increasing the completeness of separation of seed onions by 20 % and to cut the bulb damage by 11 %, compared to symmetrical arrangement of the shakers.

Keywords: experimental rod elevator, heap feed, forward speed, separation quality, onions, losses

For citation: Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):91-107. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>

Acknowledgements: The study was conducted with the state support of young Russian scientists – candidates of sciences MK – 4002.2018.8.

Введение

Качество работы машины для уборки корнеплодов и лука определяется в первую очередь работой выкапывающего рабочего органа, т. к. от его типа и технологических параметров зависят конструктивно-технологические параметры сепарирующих устройств [1].

Теоретическим и экспериментальным обоснованием технологического процесса сепарации корнеклубнеплодов и луковиц в разное время занимались С. Н. Борычев, Н. В. Бышов, Н. И. Верещагин, Н. Ф. Диденко, Н. Н. Колчин, Р. Р. Камалетдинов, К. З. Кухмазов, Н. П. Ларю-

шин, А. М. Ларюшин, Л. М. Максимов, А. А. Протасов, Э. С. Рейнгарт, Г. К. Рембалович, А. А. Сорокин, М. Б. Угланов, И. А. Успенский, Н. В. Фирсов, В. А. Хвостов, В. М. Цециновский, В. И. Шляхетский и другие ученые.

Известно, что качество сепарации корнеплодов, лука и картофеля зависит прежде всего от условий возделывания. Как правило, данные культуры возделываются на легких по механическому составу почвах с целью повышения качества сепарации и снижения тягового сопротивления уборочной машины при извлечении корнеплодов из почвы.

При уборке корнеплодов для повышения качества сепарации очень важно поддерживать почву в рыхлом (вспушенном) состоянии.

При подкапывании корнеплодов происходит совместное поступление на сепарирующие рабочие органы прочных почвенных комков, которые являются трудноотделимыми с щелевых рабочих органов уборочных машин и способствуют повреждению корнеплодов при взаимодействии с комками почвы [2], что приводит к ухудшению товарных качеств производимой продукции.

Наиболее распространенными корнеизвлекающими рабочими органами машин для уборки корнеплодов и лука являются подкапывающие лемехи.

Основным недостатком данных рабочих органов является повышенный забор почвенного пласта совместно с корнеплодами, что приводит к снижению качественных показателей сепарации товарной продукции на очистительных рабочих органах [3].

Альтернативой подкапывающим рабочим органам являются теребильные рабочие органы. Технологический процесс их работы характеризуется сниженным извлечением почвенных комков совместно с корнеплодами; однако данные рабочие органы обладают повышенными потерями извлекаемой продукции, т. к. при уборке некоторых видов овощных корнеплодов и луковец происходит отмирание ботвы и, как следствие, объект захвата теребильным рабочим органом отсутствует.

Предпосылкой для разрешения возникшей противоречивой ситуации является оснащение сепарирующих поверхностей уборочных машин различными видами интенсификаторов сепарации, которые при увеличении полноты отделения корнеплодов от почвенно-растительных примесей также повышают степень повреждения сепарируемой продукции.

Целью работы является повышение качества сепарации корнеплодов, луко-

виц и картофеля на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями.

Обзор литературы

Анализ конструкций существующих машин для уборки корнеплодов и лука и изучение патентно-технической литературы позволили выявить недостатки в конструкции сепарирующих рабочих органов машин для уборки корнеплодов и луковец [4], которые не позволяют обеспечить качественное выполнение технологического процесса сепарации товарной продукции.

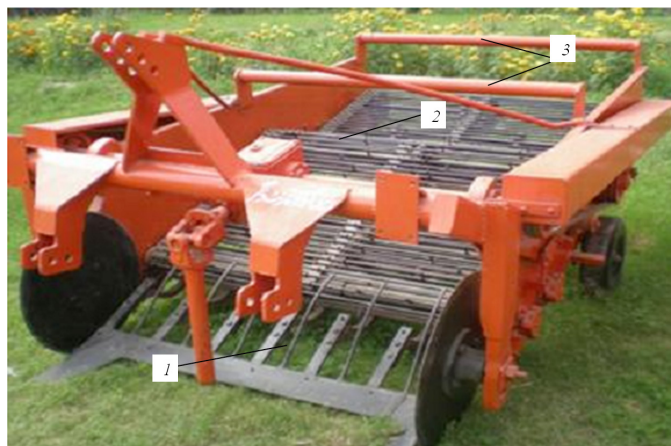
Существует машина для уборки картофеля [5], состоящая из основных элементов, а именно подкапывающего лемеха 1, сепарирующего пруткового элеватора 2 и поддерживающих стержней 3 (рис. 1).

Основной отличительной особенностью представленной выше уборочной машины является исполнение подкапывающего рабочего органа 1 (рис. 2) и сепарирующего пруткового элеватора 3 (рис. 3).

Подкапывающий рабочий орган представляет собой комбинацию рыхлительного (1) и подкапывающего (2) элементов с щелевыми отверстиями предварительной сепарации 3, образованными рабочей поверхностью подкапывающего элемента 2.

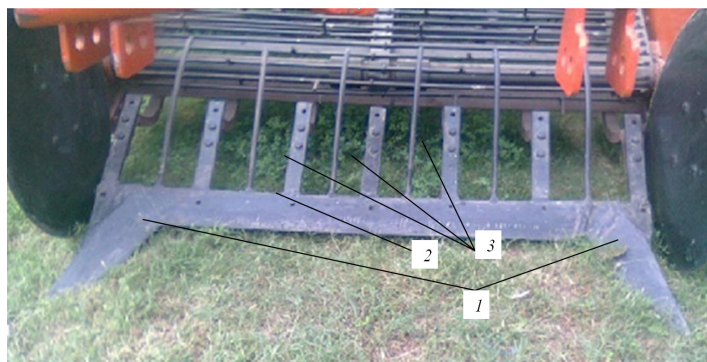
Рыхлительный элемент (1) подкапывающего рабочего органа осуществляет предварительное рыхление подкапываемого почвенного пласта с целью сокращения поступления почвенных комков на сепарирующие рабочие органы, интенсифицируя процесс очистки корнеплодов от соизмеримых почвенных комков, а также снижая величину поврежденной товарной продукции от соударений с почвенными комками на прутковом элеваторе уборочной машины.

Подкапывающий элемент 2 осуществляет извлечение корнеплодов из почвы с предварительной сепарацией через щелевые отверстия предварительной сепарации 3.



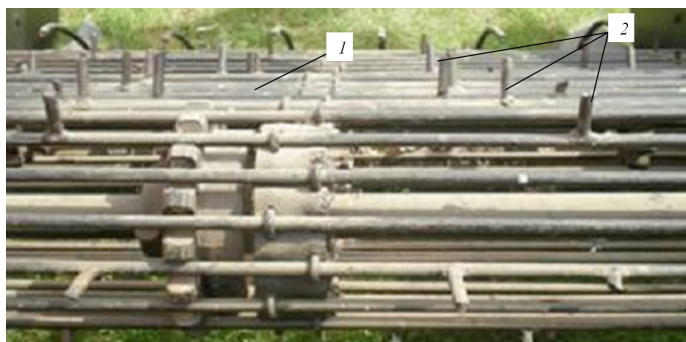
Р и с. 1. Общий вид машины для уборки корнеплодов: 1 – подкапывающий орган; 2 – сепарирующий прутковый элеватор; 3 – поддерживающие стержни

F i g. 1. General view of a machine for harvesting root crops: 1 – scrounging; 2 – separating rod elevator; 3 – supporting rods



Р и с. 2. Общий вид подкапывающего органа: 1 – рыхлительный элемент; 2 – подкапывающий элемент; 3 – щелевые отверстия предварительной сепарации

F i g. 2. General view of the digging body: 1 – ripping element; 2 – digging element; 3 – slotted pre-separation apertures



Р и с. 3. Общий вид сепарирующего пруткового элеватора: 1 – пруток; 2 – стержень

F i g. 3. General view of the separating rod elevator: 1 – bar; 2 – kernel

К недостаткам данного подкапывающего органа следует отнести повышенные потери корнеплодов через щелевые отверстия 3 подкапывающего элемента 2; кроме того, данное конструктивное исполнение подкапывающего рабочего органа не снижает величину повреждений сепарируемой продукции на прутковом элеваторе ввиду недостаточного рыхления почвенного слоя расположения корнеплодов.

Для интенсификации процесса сепарации вороха корнеплодов сепарирующая поверхность пруткового элеватора выполнена с расположенными на прутках 1 стержнями 2 (рис. 3).

Основным назначением стержней является разрушение почвенных комков, поступающих с подкапывающего рабочего органа уборочной машины. Однако, кроме процесса разрушения непосредственно почвенных комков, происходит интенсивное силовое воздействие стержней 2 на корнеплоды, что повышает степень повреждения сепарируемой продукции.

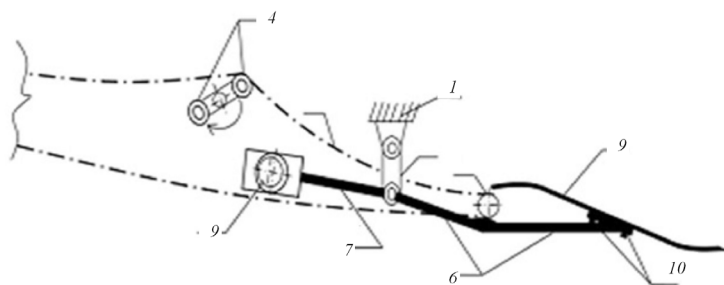
Известна конструкция сепарирующего пруткового элеватора (рис. 4), интенсификатором сепарации в котором является пассивный двухплечико-

вый встряхиватель 4, расположенный под верхней ветвью полотна пруткового элеватора 3 [6].

Кроме того, передняя часть полотна пруткового элеватора со стороны подкапывающего лемеха 9 совершает колебания в вертикальной плоскости при воздействии кронштейна крепления 6 подкапывающего лемеха 9 на поддерживающий ролик 5, что обеспечивает дополнительное силовое воздействие на почвенный пласт и тем самым интенсифицирует процесс сепарации почвенно-растительных примесей.

К недостаткам данной конструкции пруткового элеватора следует отнести повышенное повреждение корнеплодов при переходе с одного каскада на другой, а также невозможность рассредоточения вороха корнеплодов по всей ширине транспортера.

Анализ технических средств механизированной уборки корнеплодов позволяет сделать вывод о том, что функционирующие элементы уборочной машины с различными типами интенсификаторов сепарации не обеспечивают качественные показатели уборки корнеплодов по таким показателям, как полнота сепарации и повреждение корнеплодов.



Р и с. 4. Схема сепарирующего пруткового элеватора:

- 1 – рама; 2 – тяга; 3 – прутковый элеватор; 4 – двухплечиковый встряхиватель;
5 – поддерживающий ролик; 6 – кронштейн крепления;
7 – промежуточный кронштейн; 8 – эксцентриковый вал; 9 – подкапывающий лемех;
10 – крепление лемеха

- F i g. 4. The scheme of separating bar elevators: 1 – frame; 2 – thrust; 3 – bar elevator;
4 – double-shoulder shaker; 5 – support roller; 6 – mounting bracket;
7 – intermediate bracket; 8 – eccentric shaft; 9 – scrounging; 10 – bracing

Материалы и методы

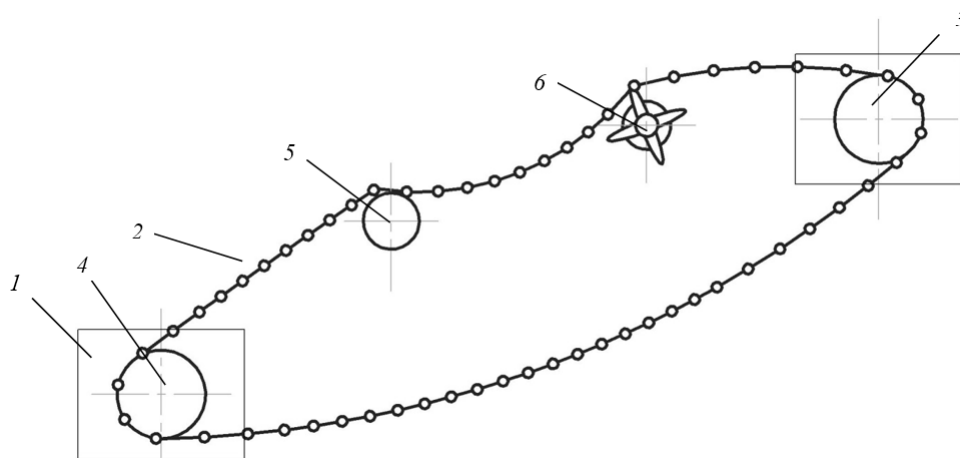
Исследования проведены в соответствии с методикой СТО АИСТ 8.7-2013 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей»¹.

Для обеспечения качественных показателей сепарации корнеплодов и луковиц разработан сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины (патент РФ на изобретение № 2638190 [7–9]), изображенный на рис. 5.

Сепарирующий транспортер машины для уборки корнеплодов и лука содержит раму 1 с прутковым элеватором 2, под верхней ветвью которого установлены ведущие 3, ведомые 4 и поддерживающие 5 ролики и встряхиватели 6. Встряхиватели 6 и поддерживающие ролики 5 расположены по обеим сторонам пруткового элевато-

ра с чередованием по длине и ширине и несовпадением фаз их подъема и опускания противоположных сторон пруткового элеватора 2.

При данном расположении встряхивателей 6 и поддерживающих роликов 5 на сепарирующем транспортере обеспечивается шадящий режим сепарации корнеплодов при повышении качества сепарации в результате увеличения пути и времени взаимодействия корнеплодов с поверхностью пруткового элеватора 2 за счет бокового перемещения сепарируемого продукта при минимальном повреждении. Данное обстоятельство обеспечивается режимом работы встряхивателей 6, расположенных под противоположными сторонами пруткового элеватора 2 в противофазе. При этом ворох корнеплодов и луковиц совершает перемещение с противоположных сторон расположения встряхивателей 6 под прутковым элеватором 2 к стороне



Р и с. 5. Схема сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей: 1 – рама; 2 – прутковый элеватор; 3 – ведущий ролик; 4 – ведомый ролик; 5 – поддерживающий ролик; 6 – встряхиватель

Fig. 5. The scheme of a separating rod elevator with asymmetrical arrangement of shakers: 1 – frame; 2 – bar elevator; 3 – driving roller; 4 – driven roller; 5 – support roller; 6 – shaker

¹ СТО АИСТ 8.7-2013. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей. М., 2014. III, 81 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/555625983>

расположения поддерживающих роликов 5 (рис. 6).

Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины работает следующим образом. Ворох корнеплодов с подающего транспортера или с подкапывающего рабочего органа поступает на прутковый элеватор 2. По мере продвижения вороха по прутковому элеватору 2 происходит подъем стороны 7 пруткового элеватора 2 встряхивателем 6. Подъем и дальнейшее перемещение вороха достигается в результате приобретения ускорения, сообщаемого встряхивателем 6 прутковому элеватору 2, которое больше ускорения свободного падения. В результате подъема встряхивателем 6 стороны пруткового элеватора 2 и опускания противоположной стороны ворох корнеплодов совершает перемещение от стороны расположения встряхивателей 6 к стороне расположения поддерживающих роликов 5, что обеспечивает смещение вороха к центру пруткового элеватора 2 под углом α к горизонту и приводит к деформации почвенного пласта путем его излома и разрыхления, а также равномерному распределению вороха по всей ширине рабочей поверхности пруткового элеватора 2 и улучшению процесса сепарации. Для определения качественных показателей сепарации вороха корнеплодов, а именно луковок

лука-севка сорта «Штутгартер Ризен», на прутковом элеваторе с установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом была изготовлена лабораторная установка, общий вид которой представлен на рис. 7.

Определены следующие качественные показатели сепарации:

- повреждения луковок лука-севка (формула 1);
- полнота сепарации вороха лука-севка [10].

Повреждения луковок определялись по формуле:

$$\Pi = \frac{G_{\text{пов}}}{G_{\text{ст}} - G_{\text{пов}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

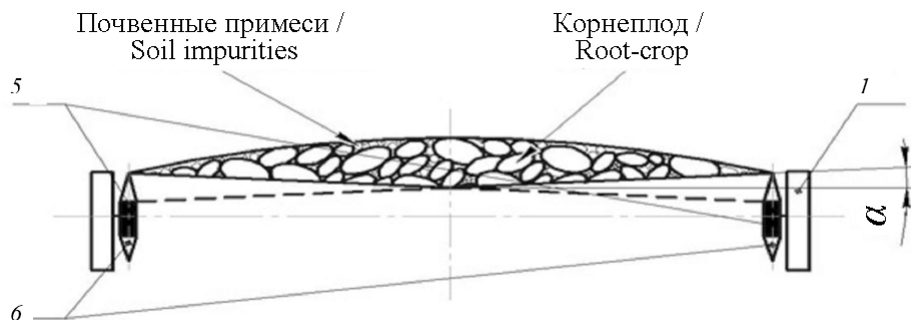
где $G_{\text{пов}}$ – масса поврежденных стандартных луковок в ворохе, кг; $G_{\text{ст}}$ – масса сепарируемых луковок в ворохе, кг.

Полноту сепарации вороха лука-севка определяли по формуле:

$$v = \frac{v_{\text{п}}^{\text{и}} - v_{\text{п}}^{\text{к}}}{v_{\text{п}}^{\text{и}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

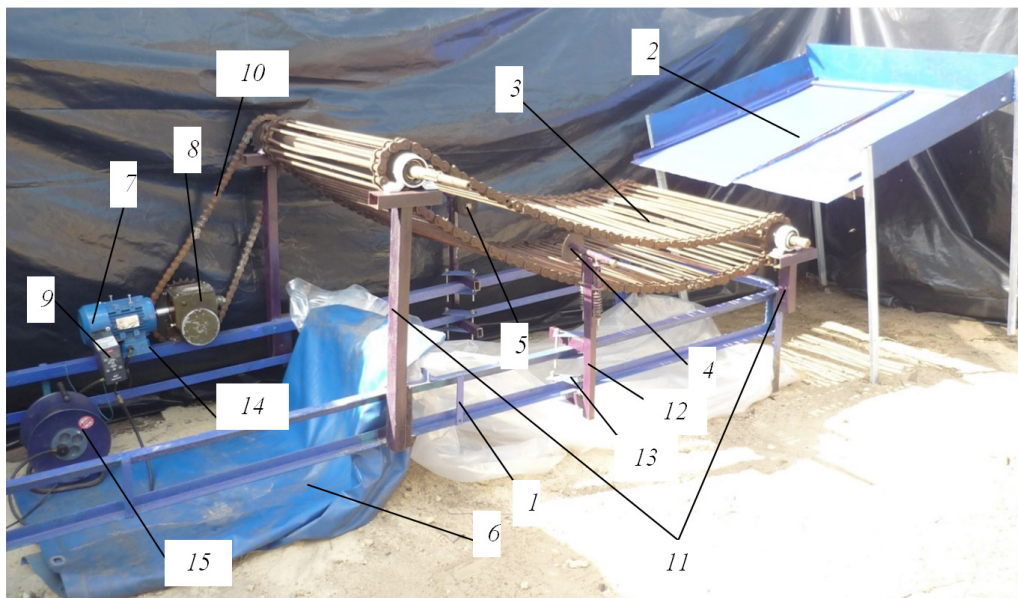
где $v_{\text{п}}^{\text{и}}$ – масса почвенных примесей в исходном ворохе, кг; $v_{\text{п}}^{\text{к}}$ – масса почвенных примесей в контейнере (невыведенные примеси), кг.

Состав вороха и основные физико-механические свойства его компонен-



Р и с. 6. Технологический процесс работы сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей

F i g. 6. Technological process of work scheme of a separating rod elevator with asymmetrical arrangement of shakers



Р и с. 7. Общий вид лабораторной установки для определения влияния технологических параметров сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей на качественные показатели сепарации вороха лука-севка: 1 – рама; 2 – емкость для предварительного размещения вороха; 3 – сепарирующий прутковый элеватор; 4 – эллиптический встряхиватель; 5 – цилиндрический ролик; 6 – брезент сепарированной продукции; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор одноступенчатый; 9 – преобразователь частотный; 10 – передача цепная; 11 – стойки опорные; 12 – стойки встряхивателей; 13 – кронштейн соединительный; 14 – плита опорная; 15 – фильтр сетевой

F i g. 7. General view of the laboratory installation for determining the influence of the technological parameters of a separating rod elevator with the asymmetric arrangement of the shakers on the qualitative indicators of heap separation: 1 – frame; 2 – container for preliminary placement of heaps; 3 – separating rod elevator; 4 – elliptical shaker; 5 – cylindrical roller; 6 – canvas of separated products; 7 – electric motor; 8 – single-stage reducer; 9 – frequency converter; 10 – transmission chain; 11 – support pillars; 12 – shaker stands; 13 – bracket connecting; 14 – support plate; 15 – network filter

тов были выбраны с учетом результатов полевых исследований, проведенных в 2015–2016 гг. в АО «Озеры» (Московская область) при влажности почвы 18 %: луковицы лука-севка – 65 %; примеси – 35 %, в т. ч.:

- растительные примеси – 5 %;
- мелкие почвенные примеси – 15 %;
- комки почвы, сравнимые по размерам со стандартной фракцией луковиц лука-севка (поперечный размер) – 10 %;
- комки почвы, имеющие больший поперечный размер – 5 %.

С целью определения уровня значимости каждого фактора, оказывающего влияние на выбранный критерий оптимизации – полноту сепарации вороха лука-севка – проводился отсеивающий эксперимент.

Выявление небольшого количества наиболее значимых факторов позволило облегчить дальнейшее изучение и описание процесса сепарации экспериментальным прутковым элеватором, которые могут быть проведены с применением методов математической теории планирования эксперимента.

После проведения отсеивающего эксперимента были поставлены поисковые опыты по определению наиболее перспективного вида встряхивающего устройства, обеспечивающего высокие качественные показатели сепарации. С этой целью под полотном пруткового элеватора установлены исследуемые встряхиватели, а именно трехкулачковые и эллиптические, и проведены исследования в соответствии с планом эксперимента.

Результаты исследования

Анализ результатов отсеивающих экспериментов проведен путем построения диаграмм рассеяния. Результаты проведения отсеивающего эксперимента после внесения корректировок представлены на рис. 8.

Все факторы с уровнями их варьирования нанесены по оси абсцисс, опытные значения критерия оптимизации – по оси ординат. Визуальным наблюдением по количеству выделяющихся точек на диаграмме рассеяния оценивался уровень влияния фактора на критерий оптимизации, по результатам проведения которого были выбраны три основных значимых фактора: x_1 – поступательная скорость движения прут-

кового элеватора, м/с; x_2 – подача вороха лука-севка, кг/с; x_3 – межосевое расстояние между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом, м.

Результаты проведенных поисковых исследований представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 9.

Анализ проведенных поисковых исследований позволяет заключить, что с увеличением поступательной скорости движения пруткового элеватора происходит повышение полноты сепарации и повреждений луковиц вне зависимости от подачи вороха лука-севка и используемого вида встряхивателя.

Однако качественные показатели сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с эллиптическими встряхивателями выше, чем у элеватора, оснащенного трехкулачковыми встряхивателями.

Данная тенденция наблюдается как при увеличении скорости движения пруткового элеватора в интервале от 1,4 до 1,8 м/с, так и при увеличении подачи вороха от 15 до 40 кг/с по полноте сепарации вороха до 3,5 % и повреждениям луковиц до 3,8 %.

Результаты проведенных поисковых исследований отражают перспектив-

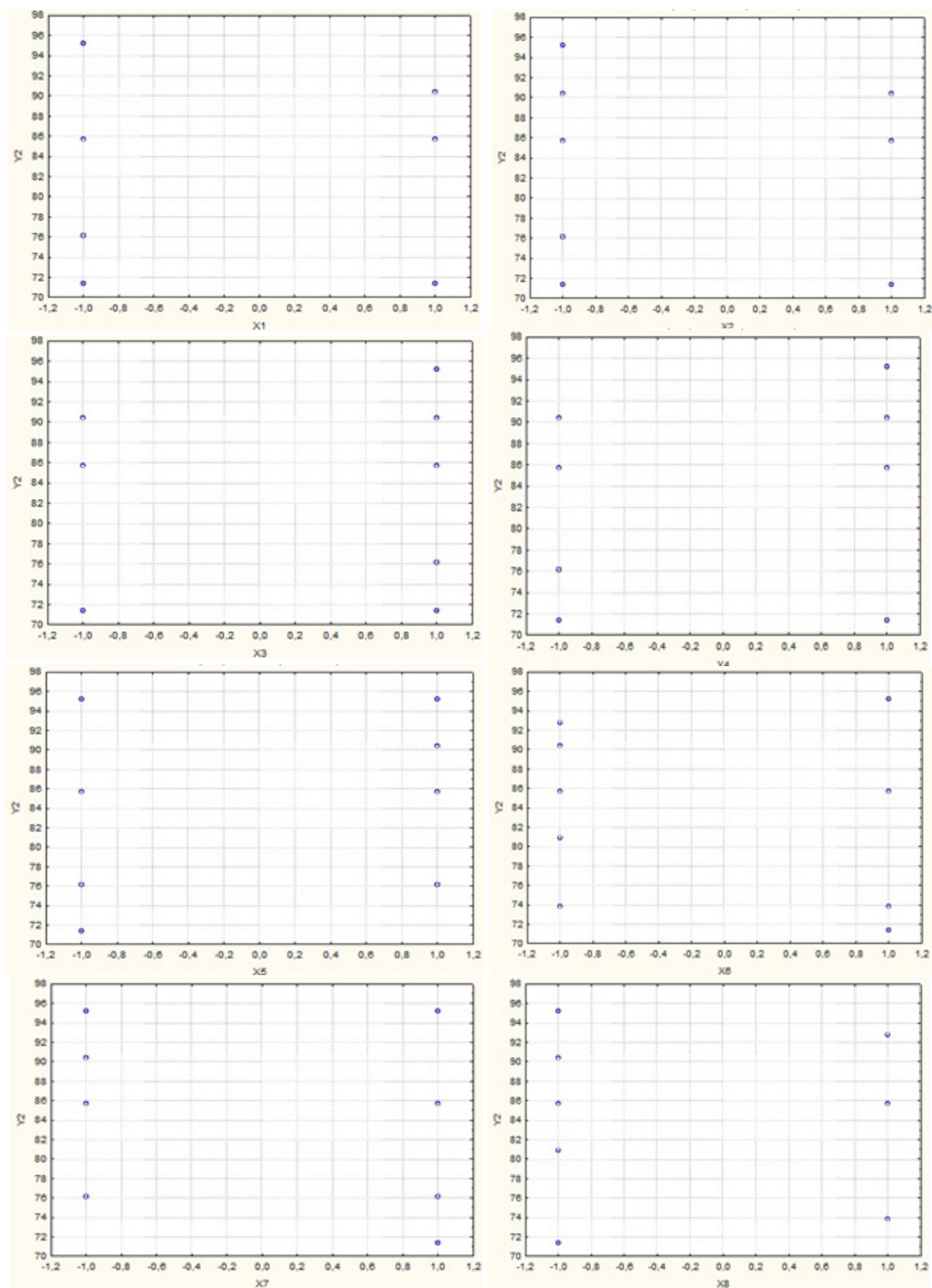
Таблица 1

Table 1

Результаты поисковых исследований по определению повреждений луковиц лука-севка в зависимости от типа встряхивателя, расположенного под прутковым элеватором

The results of exploratory studies to determine the damage of onions, depending on the type of shaker, located under the bar elevator

Подача вороха лука-севка, кг/с / Giving of lots of onions, kg/s	Сепарирующий прутковый элеватор / Separating bar elevator					
	Эллиптический встряхиватель / Elliptical shaker			Трехкулачковый встряхиватель / Three-cam shaker		
	Поступательная скорость движения пруткового элеватора, м/с / The progressive speed of the movement of the rod elevator, m/s					
	1,4	1,6	1,8	1,4	1,6	1,8
15	1,7	3,0	3,3	2,6	3,3	3,3
20	1,3	2,8	3,0	2,2	2,7	3,0
25	1,2	2,8	3,0	2,0	2,4	3,0
30	1,5	2,7	2,4	1,7	1,8	2,4
35	1,5	2,2	2,3	1,4	1,3	2,3
40	1,2	2,2	2,2	1,2	1,2	2,2



Р и с. 8. Диаграммы рассеяния результатов наблюдений после корректировок
 F i g. 8. The diagrams of scattering of observation results after adjustments

Результаты поисковых исследований по определению полноты сепарации вороха лука-севка в зависимости от типа встряхивателя, расположенного под прутковым элеватором

The results of exploratory studies to determine the completeness of separation of seed onion heap, depending on the type of a shaker, located under the bar elevator

Подача вороха лука-севка, кг/с / Giving of lots of onions, kg/s	Сепарирующий прутковый элеватор / Separating bar elevator					
	Эллиптический встряхиватель / Elliptical shaker			Трехкулачковый встряхиватель / Three-cam shaker		
	Поступательная скорость движения пруткового элеватора, м/с / The progressive speed of the movement of the rod elevator, m/s					
	1,4	1,6	1,8	1,4	1,6	1,8
15	96,4	96,7	97,4	94,3	95,8	96,2
20	96,0	96,3	97,4	94,0	94,6	96,0
25	95,7	96,0	97,3	93,5	94,7	95,0
30	95,3	96,2	96,7	93,2	93,4	94,6
35	95,0	96,0	96,4	93,2	93,0	94,6
40	95,0	95,5	96,1	92,6	92,5	94,5

ность дальнейшего изучения эллиптических встряхивателей по повышенному показателю качества сепарации вороха лука-севка и минимальным повреждениям луковиц.

Результаты многофакторного эксперимента обрабатывались в компьютерной программе «STATISTICA 6.0»; были получены значения функций отклика – полнота сепарации вороха лука-севка при варьировании факторов – и адекватная математическая модель (формула 3), описывающая зависимость качества сепарации вороха лука-севка $v = f(v_{\text{эл}}, Q_{\text{Бп}}, S)$ в закодированном виде от выбранных факторов:

$$Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,26x_2 - 0,35x_3 - 0,81x_1^2 - 0,71x_2^2 - 0,38x_3^2 + 0,02x_1x_2 + 0,29x_1x_3 - 0,5x_2x_3. \quad (3)$$

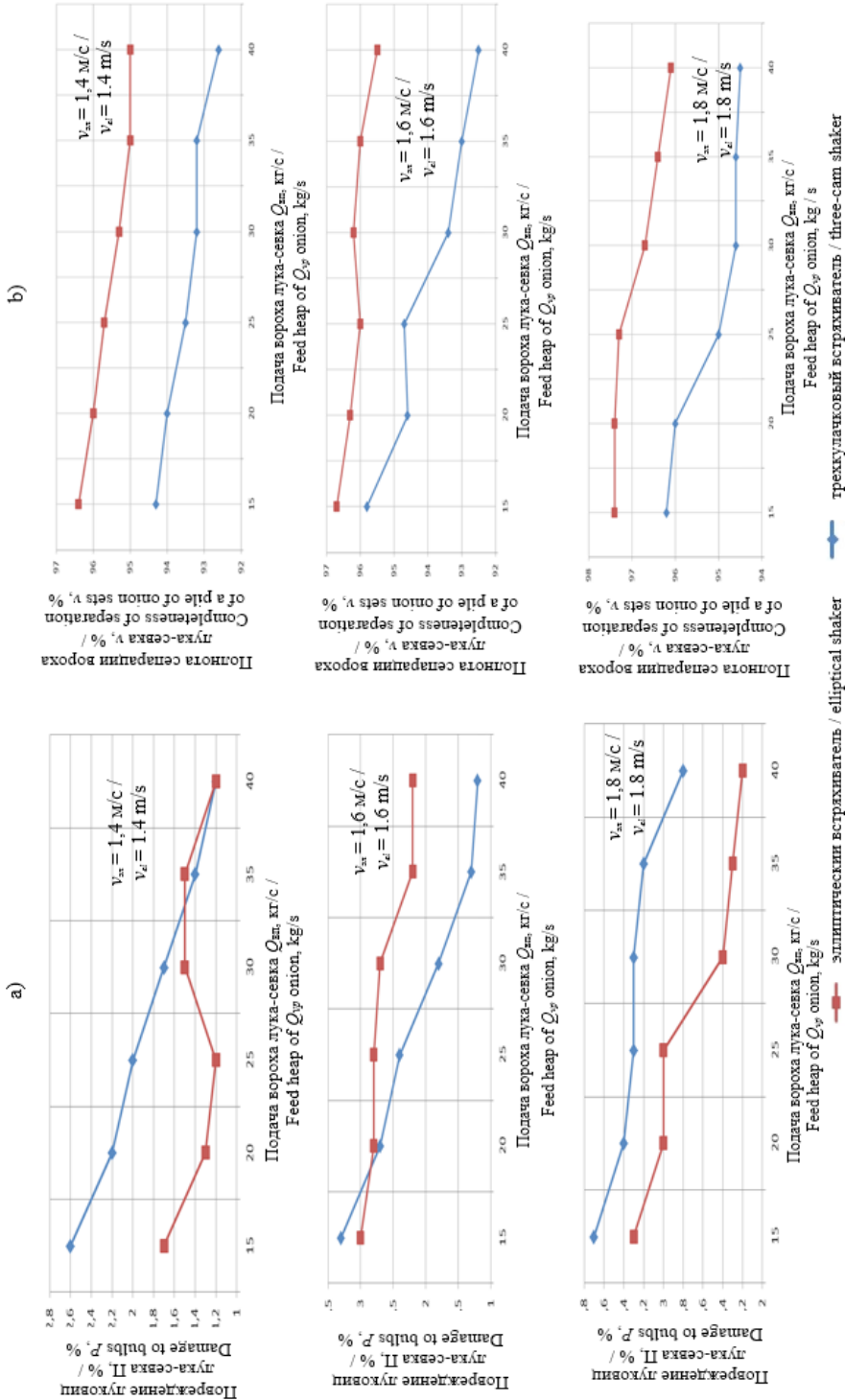
Подставляя попеременно значения $x_1, x_2, x_3 = 0$ в уравнение (3), получаем двумерные сечения поверхности отклика, характеризующего показатель качества сепарации вороха лука-севка в зависимости от выбранных факторов, представленный системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = 0 : Y = 98,59 - 0,26x_2 - 0,35x_3 - 0,71x_2^2 - 0,38x_3^2 - 0,5x_2x_3, \\ x_2 = 0 : Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,35x_3 - 0,81x_1^2 - 0,38x_3^2 + 0,29x_1x_3, \\ x_3 = 0 : Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,26x_2 - 0,81x_1^2 - 0,71x_2^2 + 0,02x_1x_2. \end{cases} \quad (4)$$

При дифференцировании системы уравнений (4) определяем координаты центра поверхности отклика в зависимости от выбранных факторов в закодированном и раскодированном видах (табл. 3), после подстановки которых получаем значения функции отклика в центре поверхности. Двухмерные сечения поверхности отклика строились на основании данных из табл. 1 и представлены на рис. 10–12.

Уравнение (4) с учетом значимости коэффициентов регрессии можно представить в следующем виде:

$$Y = 17,387 + 60,43v_{\text{эл}} + 2,77Q_{\text{Бп}} + 40,75S - 20,31v_{\text{эл}}^2 - 0,02Q_{\text{Бп}}^2 - 38,75S^2 - 0,02v_{\text{эл}}Q_{\text{Бп}} + 15,2v_{\text{эл}}S - 1,32Q_{\text{Бп}}S. \quad (5)$$

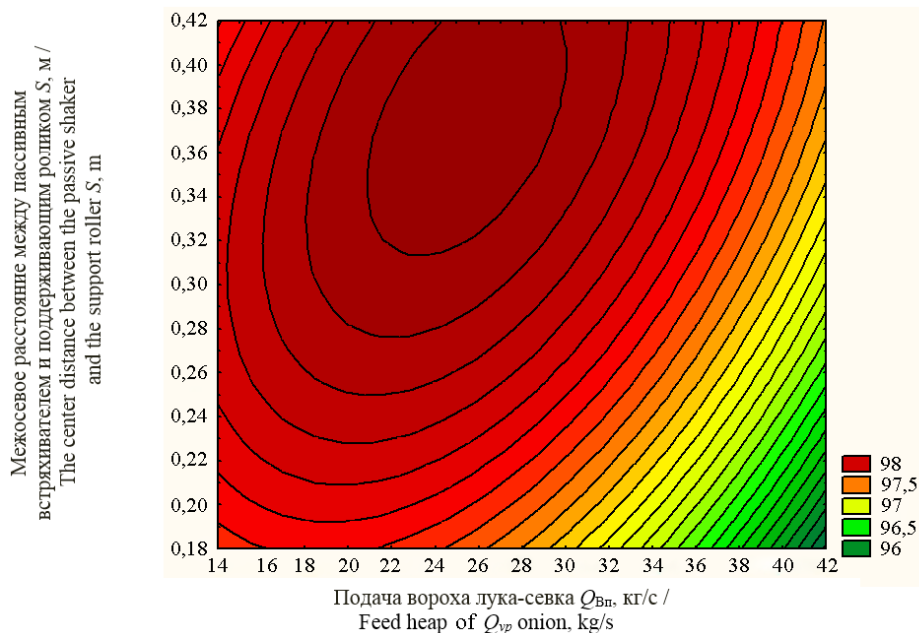


Р и с. 9. Зависимость качественных показателей сепарации вороха лука-севка почвой от типа встряхивателя:

а) повреждение луковиц лука-севка; б) полнота сепарации вороха луковиц лука-севка
 Fig. 9. Dependence of quality indicators of separation of a pile of onions by soil on the type of shaker:
 а) damage to onions; б) completeness of separation of seed onion heap

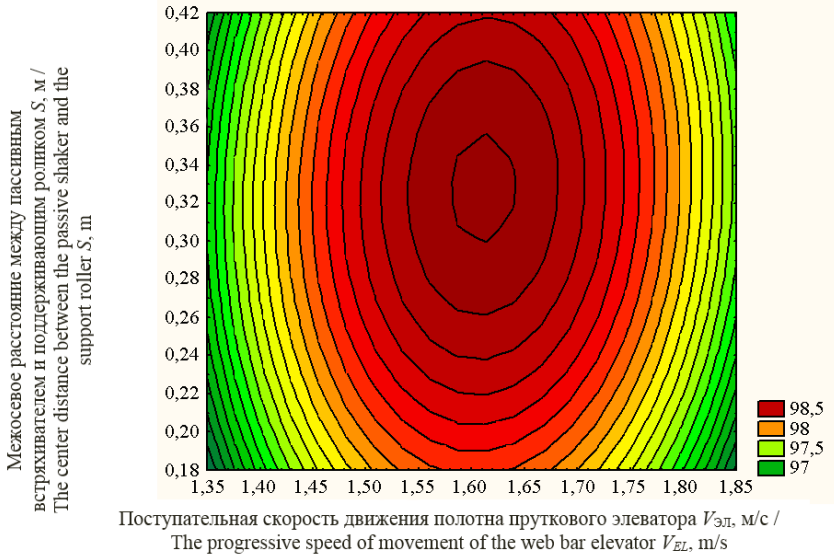
Координаты центра поверхности отклика
The center coordinates of the response surface

Координаты центра поверхности отклика / Coordinates of the response surface center		Функции отклика в центре поверхности / Response functions in the center of the surface
Закодированный вид / Encoded view	Раскодированный вид / Decoded view	
$x_2 = 0,349$	$Q_{\text{Вн}} = 21,69 \text{ кг/с} / Q_{\text{вп}} = 21.69 \text{ kg/s}$	$Y_s = 98,55$
$x_3 = 0,472$	$S = 0,37 \text{ м} / S = 0.37 \text{ m}$	
$x_1 = 0,05$	$v_{\text{эл}} = 1,63 \text{ м/с} / v_{\text{EL}} = 1.63 \text{ m/s}$	$Y_s = 98,68$
$x_3 = 0,445$	$S = 0,33 \text{ м} / S = 0.33 \text{ m}$	
$x_1 = 0,13$	$v_{\text{эл}} = 1,62 \text{ м/с} / v_{\text{EL}} = 1.62 \text{ m/s}$	$Y_s = 98,51$
$x_2 = 0,18$	$Q_{\text{Вн}} = 23,8 \text{ кг/с} / Q_{\text{вп}} = 23.8 \text{ kg/s}$	



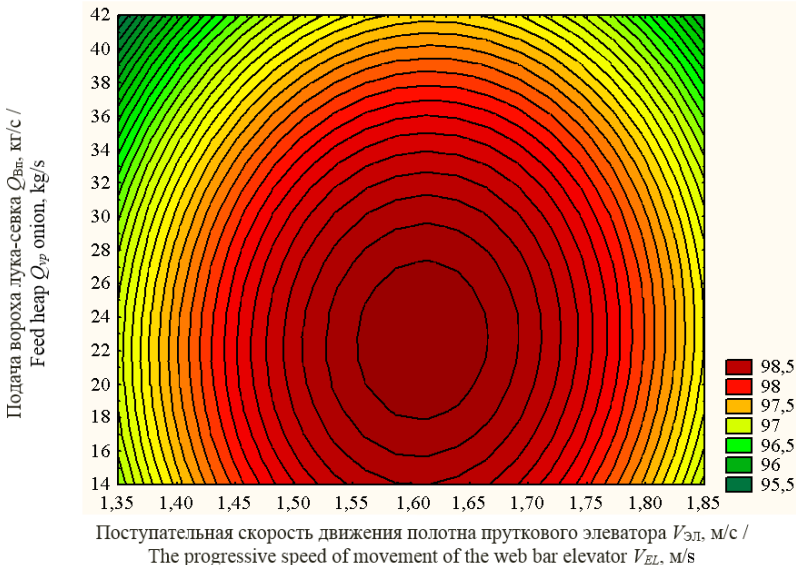
Р и с. 10. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от подачи вороха лука-севка (кг/с) и межосевого расстояния между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом (м)

Fig. 10. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the onion-seed separation from the feed of the onion-seed heap (kg/s) and the interaxial distance between the passive shaker and the supporting roller (m)



Р и с. 11. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и межосевого расстояния между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом (м)

Fig. 11. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the seed onion heap separation from the translational velocity of the web of the rod elevator (m/s) and the interaxial distance between the passive shaker and supporting roller (m)



Р и с. 12. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и подачи вороха лука-севка (кг/с)

Fig. 12. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the onion-shear separation from the translational velocity of the web of the rod elevator (m/s) and the feeding of the onion-seed heap (kg/s)

Обсуждение и заключение

Результаты экспериментальных лабораторных исследований сепарирующего пруткового элеватора с асимметрично установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим ролик позволяют сделать выводы о том, что максимальная полнота

сепарации вороха лука-севка составляет 98 % при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55-1,68$ м/с, подаче вороха лука-севка $Q_{вп} = 19,7-27,1$ кг/с и межжосевом расстоянии между пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим ролик в пределах $S = 0,29-0,42$ м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Haverkort A. J., Struik P. C.** Potato in progress: science meets practice. Wageningen : Wageningen Academic Publishers, 2005. 366 p.
2. **Mayer V., Vejchar D., Pastorková L.** Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading // Research in Agricultural Engineering. 2008. Vol. 54, Issue 1. P. 22–31. URL: <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/00885.pdf>
3. Development of potato harvesting model / A. U. Dongre [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017. Vol. 4, Issue 10. P. 1567–1570. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
4. **Farhadi R., Sakenian N., Azizi P.** Design and construction of rotary potato grader (Part I) // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2012. Vol. 18, no. 2. P. 304–314. URL: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf>
5. Design modification and field testing of groundnut digger / M. Tauseef Asghar [et al.] // Asian Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 5, Issue 7. P. 389–394. URL: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER
6. **Natenadze N.** The design and theoretical justification of a vibratory digger shovel // Mechanization in Agriculture. 2016. Vol. 62, Issue 1. P. 9–11. URL: <http://stumejournals.com/journals/am/2016/1/9/pdf>
7. Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины : пат. 2638190 Рос. Федерация : МПК А01 С11/02 / Сибирёв А. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. № 2544631 ; заявл. 10.03.2017; опубл. 12.12.2017. Бюл. № 35. 8 с. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html
8. **Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А.** Обоснование конструктивных и технологических параметров сепарирующего пруткового транспортера с асимметричным расположением встряхивателей // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 4. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-15-20>
9. **Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Дорохов А. С.** Уточненный расчет сепарирующей поверхности машины для уборки лука // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 3. С. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-28-31>
10. **Ларюшин А. М.** Качественные показатели выкапывающего устройства лукоуборочной машины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 3. С. 46–47.

Поступила 09.01.2018; принята к публикации 23.07.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Сибирёв Алексей Викторович, старший научный сотрудник, отдел технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Аксенов Александр Геннадьевич, заведующий, отдел технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Мосяков Максим Александрович, младший научный сотрудник, лаборатория разработки технологий и машин для обработки почвы, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ResearcherID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, mosyak88maks67@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Сибирёв – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формулирование выводов; А. Г. Аксенов – проведение критического анализа экспериментальных и теоретических исследований; М. А. Мосяков – литературный и патентный анализ, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Haverkort A.J., Struik P.C. Potato in progress: science meets practice. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005.
2. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54(1):22-31. Available at: <http://www.agriculture-journals.cz/publicFiles/00885.pdf>
3. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of potato harvesting model. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017; 4(10):1567-1570. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
4. Farhadi R., Sakenian N., Azizi P. Design and construction of rotary potato grader. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2012; 18(2):304-314. Available at: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf>
5. Asghar M.T., Ghafoor A., Munir A., Iqbal M., Ahmad M. Design modification and field testing of groundnut digger. *Asian Journal of Science and Technology*. 2014; 5(7):389-394. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER
6. Natenadze N. The design and theoretical justification of a vibratory digger shovel. *Mechanization in Agriculture*. 2016; 62(1):9-11. Available at: <http://stumejournals.com/journals/am/2016/1/9/pdf>
7. Sibiriyov A.V., Aksenov A.G., Kolchin N.N., Ponomarev A.G., inventors. Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, assignee. Separating conveyor of the harvesting machine. RU Patent 2638190. 2017 Dec 12. Available at: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html (In Russ.)
8. Sibiriyov A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Determining design and technological parameters of the separating rod conveyor with asymmetrical shakers. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina»* = Vestnik of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”. 2018; 4:15-20. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-15-20> (In Russ.)
9. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Dorokhov A.S. Proximate design of onion harvester separating surface. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(3):28-31. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-28-31> (In Russ.)

10. Laryushin A.M. Qualitative indicators of the digging device of an onion harvesting machine. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2008; 3:46-47. (In Russ.)

Received 09.01.2018; revised 23.07.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Alexey V. Sibirev, Senior Researcher, Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Aleksandr G. Aksenov, Head, Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Maxim A. Mosyakov, Junior Researcher, Laboratory of Technology Development and Machines for Tillage, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), ResearcherID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, mosyak88maks67@mail.ru

Contribution of the authors:

A. V. Sibirev – scientific management, formulation of the basic research concept, preparation of the initial text version and drawing conclusions; A. G. Aksenov – critical analysis of experimental and theoretical studies; M. A. Mosyakov – literary and patent analysis, word processing and text editing.

All authors have read and approved the final version of the paper.