

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ СЕПАРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАШИНЫ ДЛЯ УБОРКИ КОРНЕПЛОДОВ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИЕЙ СИСТЕМЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

А.С. Дорохов, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирёв, М.А. Мосяков, Н.В. Сазонов

**Реферат.** Для улучшения качественных показателей уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности предлагается монтировать на комбайн сепарирующее устройство, обеспечивающее отделение корнеплодов от почвенных и растительных примесей с одновременным обдуванием их поверхности горячими выхлопными газами силовой установки уборочной машины. Потери теплоты с отработавшими газами ( $Q_G = 51960$  Дж/с), превышают ее количество эквивалентное полезной работе ( $Q_A = 50900$  Дж/с), следовательно, необходимо обеспечить эффективное использование теплоты, выделяемой в атмосферу, для повышения КПД энергетической составляющей уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы. Цель исследования – теоретическое обоснование повышения качества сепарации корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности с использованием в сепарирующей системе уборочной машины обдува рабочей поверхности очистительных устройств отработавшими газами силовой установки самоходного уборочного комбайна. Предмет исследования – сепарирующая система уборочного комбайна, представленная очистительной звездой с установленными дефлекторами обдува рабочей поверхности. Определено условие равномерного распределения вороха товарной продукции по сепарирующей рабочей поверхности и получены теоретические зависимости угловой скорости  $v$  и частоты вращения  $n_{СП}$  сепарирующей звезды от поступательной скорости движения уборочной машины и радиуса сепарирующей звезды при равномерном обдуве отработавшими газами рабочей поверхности.

**Ключевые слова:** теоретические исследования, корнеплоды, сахарная свекла, отработавшие газы, система сепарации.

**Введение.** В последние несколько лет уборка картофеля, моркови, столовой и сахарной свеклы происходит в условиях повышенной влажности, так как их созревание приходится на временной период с максимальным количеством осадков, что обуславливает залипание просветов решет сепарирующих устройств частицами увлажненной почвы [1, 2, 3]. С повышением влажности почвы с 18 до 27 % происходит резкое ухудшение сепарации на рабочей поверхности сепарирующих устройств уборочных машин.

Для устранения основной причины, которая приводит к снижению качества уборки, а именно забивания сепарирующих устройств почвенными примесями известен ряд способов повышения сепарирующей способности целевых устройств для очистки корнеплодов от почвенных примесей (рис. 1).

Однако большинство из них не лишены недостатков. Например, механическая очистка просветов между прутками сепарирующего устройства приводит к повышенному повреждению товарной продукции, так как интенсификаторы сепарации взаимодействуют не только с рабочей поверхностью очистительных устройств, но и с корнеплодами.

Перспективным решением повышения сепарирующей способности решет грохота с гидроприводом может быть обогрев сепарирующей поверхности рабочей жидкостью гидравлической системы уборочной машины [2, 4].

Известен принципиально новый способ повышения сепарирующей способности очистительных рабочих органов уборочных машин, который заключается в передаче тепловой энергии охлаждающей жидкости силовой

установки функционирующим элементам очистительного грохота – прутковому полотну, что способствует подсушиванию увлажненных механических примесей и их удалению с рабочей поверхности очистительного устройства. Существенный недостаток такого технического решения можно – отсутствие независимой гидравлической системы уборочной машины. В современных условиях овощные корнеплоды возделывают на небольших площадях крестьянских (фермерских) и личных подсобных хозяйств, а для уборки товарной продукции используют так называемые копалки, то есть машины без независимых систем управления технологическим процессом уборки товарной продукции [5, 6, 7].

На основании изложенного сформулирована научная гипотеза, главное положение которой заключается в том, что повысить энергетическую эффективность уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы возможно путем одновременного выполнения операций подкапывания, сепарации от почвенных и растительных примесей с обдуванием сепарирующей поверхности горячими выхлопными газами силовой установки уборочной машины.

Цель исследования – теоретическое обоснование возможности повышения качества уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности.

**Условия, материалы и методы исследований.** Для подтверждения сформулированной научной гипотезы необходимо более подробно рассмотреть потери теплоты  $Q_G$ , отводимой от двигателя с отработавшими газами с использованием методологии системного анализа и синтеза, численных методов решения

аналитических зависимостей и классической механики.

Для сбора достоверной информации о возможностях совершенствования использования тепловой энергии отработавших газов, а также способах снижения потерь в режиме частичной нагрузки силовой установки (20...80 % от номинальной мощности) по различным оригинальным характеристикам при испытаниях двигателя использовали лабораторный комплекс, состоящий из очистительной звезды, вращающейся в вертикальной плоскости вокруг оси, дефлекторов, системы воздухопроводов для подсушивания частиц почвы обдувающими их отработавшими газами, а также приводной станции.

**Анализ и обсуждение результатов.** В качестве наиболее перспективного направления повышения сепарирующей способности щелевых устройств для очистки корнеплодов [8, 9, 10] выделено совершенствование способа обогрева сепарирующей поверхности горячими выхлопными газами энергетической установки уборочной машины или привода машины.

Результаты анализа теплового баланса  $Q_i$  на примере двигателя комбайна Holmer Terra Dos T3 свидетельствуют, что наибольшей его составляющей, относящейся к потерям теплоты можно считать теплоту  $Q_G$ , выделяемую с отработавшими газами (табл. 1). Ее размеры, превышают количество теплоты  $Q_A$ , эквивалентной эффективной работе, следовательно, необходимо обеспечить рациональное использование теплоты, выделяемой в атмосферу [11].

Уравнение теплового баланса в абсолютных единицах имеет вид:

$$Q = Q_E + Q_{Oxл} + Q_G + Q_M + Q_{HC} + Q_{OCT}, \quad (1)$$

где  $Q_E$  – теплота, эквивалентная эффективной работе, Дж/с;

$Q_{Oxл}$  – теплота, отводимая от деталей двигателя в систему охлаждения, Дж/с;

$Q_G$  – теплота, отводимая от двигателя с отработавшими газами, Дж/с;

$Q_M$  – теплота, передаваемая смазочному маслу от трущихся и охлаждаемых деталей, Дж/с;

$Q_{HC}$  – теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания, Дж/с;

$Q_{HC}$  – потери теплоты в окружающую среду лучистым и конвективным теплообменом с поверхности двигателя, а также из-за неполноты сгорания топлива, Дж/с.

Для подтверждения выше сформулированной научной гипотезы необходимо более тщательно рассмотреть потери теплоты  $Q_G$ , отводимой от двигателя с отработавшими газами. Согласно теории двигателей внутреннего сгорания, количество теплоты, выделяемое с отработавшими газами, определяется по выражению [11]:

$$Q_G = \frac{V_T}{3,6 \cdot 2,4} \cdot [M_2 \cdot (\mu \cdot c_p)^{t_r} \cdot t_r - M_1 \cdot (\mu \cdot c_p)^{t_0} \cdot t_0], \quad (2)$$

где  $V_T$  – часовой расход жидкого топлива, кг;

$M_2, M_1$  – количество продуктов сгорания и свежего заряда, кмоль/кг топл;

$\mu \cdot c_p$  – мольная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кмоль °С;

$t_k = t_{rp}$  – температура остаточных газов, °С;

$t_0$  – температура свежего заряда на впуске, °С.

Средние давления  $p_T, p_K$  (давление воздуха на входе и выходе из компрессора соответственно) и температуры  $T_T, T_K$  (температура воздуха на входе и выходе из компрессора соответственно) в проводной арматуре заборного воздуха определяются согласно цикловых расчетов закономерных процессов расходной характеристики двигателя и универсальной характеристики компрессора.

Объем проводящей воздушной арматуры рассчитываются согласно аналитическим зависимостям по количеству цилиндропоршневых групп, при наличии общей системы отработавших газов и рабочего объема цилиндра:

$$V_{TP} = K_B \cdot V_H, \quad (3)$$

где  $K_B$  – коэффициент двигателя;

$V_H$  – объем цилиндра, м<sup>3</sup>.

Принимая во внимание результаты исследований В.А. Хвостова и Э.С. Рейнгарта, обоснование параметров оборудования для вентиляции с учетом подвода теплоты в ворохе обдуваемого материала характеризуется толщиной слоя вороха и скоростью движения воздуха по эмпирической зависимости Рамзина [2]:

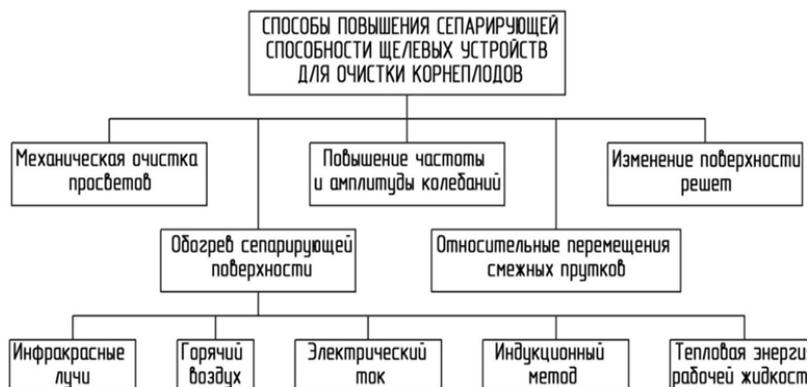


Рис. 1 – Классификация способов повышения сепарирующей способности щелевых устройств для очистки корнеплодов

Таблица 1 – Показатели теплового баланса [11]

Составляющие баланса	Составляющая теплового баланса $Q_i$ , Дж/с	Процентное соотношение составляющей теплового баланса $q_i$ , %
Теплота, эквивалентная эффективной работе	50900	29,2
Потери теплоты:		
в систему охлаждения	53601	30,8
с отработавшими газами	51960	29,8
из-за неполноты сгорания	9334	5,4
Остаточный член	8372	4,8
Общее количество теплоты	174167	100

$$\Delta P = a \cdot h \cdot v^b, \quad (4)$$

где  $h$  – толщина высушиваемого слоя, м;  
 $v$  – скорость прохождения теплоносителя, м/с;  
 $a, b$  – эмпирические коэффициенты, определяемые составом исходного высушиваемого материала.

В связи с тем, что на силовой установке энергетического средства предполагается монтаж только выпускного воздуховода, коэффициент сопротивления выпускной системы  $\xi_{\text{вып}}$  можно принять равным 1,05. Тогда остаточное давление на выходе из воздуховода:

$$P_r = \xi_{\text{вып}} \cdot p_0 = 1,05 \cdot 0,1 = 0,1050 \text{ МПа} \quad (5)$$

где  $p_0$  – давление на входе в воздуховод, МПа.

Температуру остаточных газов принимаем по среднему значению, то есть  $T_r = 850 \text{ К}$ .

При выполнении технологического процесса уборки корнеклубнеплодов [12, 13, 14] воздушный поток отработавших газов от силовой установки воздействует на сепарирующую звезду, что способствует повышению ее температуры, следовательно, необходимо выполнить термодинамический расчет теплоемкости сепарирующей звезды, изготовленной из стали 08Х13. Она определяется материалоемкостью сепарирующей звезды, а также технологическими параметрами воздуховода и процессами его физического состояния. Таким образом, при сепарации корнеклубнеплодов:

$$c_x = \frac{Q_i}{(t_2 - t_1)}, \quad (6)$$

где  $Q_i$  – составляющая теплового баланса, Дж/с;

$t_2$  – температура, сообщаемая сепарирующей звезде посредством передачи через систему воздухопроводов и дефлекторов от силовой установки, °С;

$t_1$  – температура сепарирующей звезды до воздействия воздушного потока отработавших газов от силовой установки, °С.

Температура, сообщаемая сепарирующей звезде посредством передачи через систему воздухопроводов и дефлекторов от силовой установки будет равна:

$$t_2 = (Q_i + t_1). \quad (7)$$

Обоснование расстояния  $S_d$  между сепарирующей звездой и дефлектором определяется

исходя из обеспечения максимальной полноты обдува и температуры рабочей поверхности в сечениях воздуховода в области нахождения дефлекторов при различных значениях температурных полей определенного дефлектора и геометрии воздуховода.

Анализ упрощенной схемы распределения тепловых потоков отработавших газов турбинного двигателя с жидкостным охлаждением комбайна Holmer Terra Dos T3 (рис. 2) показывает, что обеспечение равномерности распределения воздуха с максимальной идентичной температурой на входе и выходе по каждому воздуховоду не предоставляется возможным ввиду различной траектории движения тепловых потоков.

Принимая во внимание известные аналитические зависимости [11], для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_B$  от выхлопных газов взаимодействующей поверхности необходимо воспользоваться формулой Вошни:

$$\alpha_B = K_1 \cdot D^{-0,214} \cdot (p_r \cdot C_m)^{0,786} \cdot (T_r^{-0,525} + B_1), \quad (8)$$

где  $K_1$  – постоянная для конкретного двигателя;

$D$  – диаметр цилиндра, м;

$p_r$  – текущее значение давления, кг/см<sup>2</sup>;

$T_r$  – текущее значение температуры, К;

$C_m$  – средняя скорость в поршне, м/с;

$B_1$  – коэффициент, учитывающий вид сгорания.

$$B_1 = \frac{(K_2 \cdot T_Z)}{T_C}, \quad (9)$$

где  $K_2$  – коэффициент, учитывающий вид топлива;

$T_Z$  и  $T_C$  – температуры газов в конце горения и сжатия соответственно, К.

Используя зависимость Юргенса определим коэффициент теплоотдачи  $\alpha_B$ :

$$\alpha_B = 4,19 V_B, \quad (10)$$

где  $V_B$  – скорость движения наружного воздуха, м/с.

Исходя из представленных аналитических зависимостей, определим теплопередачу  $q$ :

$$\begin{cases} q_1 = \alpha_B \cdot (T_{\text{ИСТ1}} - T^K), \\ q_2 = \alpha_B \cdot (T_{\text{ИСТ2}} - T^K), \\ q_n = \alpha_B \cdot (T_{\text{ИСТn}} - T^K), \end{cases} \quad (11)$$

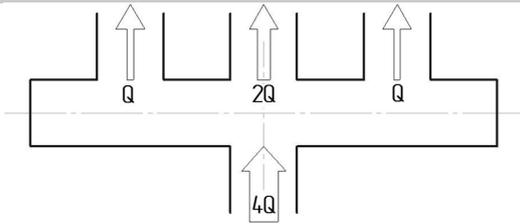


Рис. 2 – Схема распределения тепловых потоков отработавших газов

где  $T_{НСТn}$  – температура наружной стенки воздуховода в области дефлектора, К;

$T^k$  – индекс тепловой нагрузки среды, К.

При отсутствии асимметрии тепловых потоков имеем:

$$q_1 = q_2. \quad (12)$$

Теплопередача внутреннего участка:

$$q = \alpha_B \cdot (T_{ср} - T_{ВНСТ}), \quad (13)$$

где  $T_{ср}$  – средняя температура выпускных газов, К;

$T_{ВНСТ}$  – температура внутренней стенки воздуховода в области дефлектора, К.

Теплопередача через воздуховод задана граничными условиями:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{ВНСТ} - T_{НСТ}), \quad (14)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м град;

$\delta$  – толщина стенки воздуховода, м.

Для достижения требуемой температуры  $t_2$  сепарирующей поверхности очистительной звезды необходимо, чтобы частота  $n_{СП}$  ее вращения обеспечивала равномерный обдув рабочей поверхности, при постоянной частоте вращения  $n_{СВ}$  коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме и максимальной передаче теплоты  $Q_T = \max$  через систему выброса отработавших газов:

$$n_{СП} = n_{СВ} \cdot k_{П}, \quad (15)$$

где  $n_{СВ}$  – частота вращения коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме, мин<sup>-1</sup>;

$k_{П}$  – коэффициент передачи мощности,  $k_{П} = 0,006$ .

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что увеличение коэффициента сепарации  $\varepsilon$  пропорционально росту скорости  $v_{ЭЛ}$  движения элеватора до определенного критического значения, после достижения которого происходит ухудшение процесса очистки [11, 14, 15].

Для обеспечения равномерного распределения вороха товарной продукции по сепарирующей рабочей поверхности необходимо соблюдение условия:

$$v_{ЭЛ} = v_K \cdot A, \quad (16)$$

где  $v_K$  – поступательная скорость движения уборочной машины, м/с;

$A$  – коэффициент ( $A=1,3$ ).

Угловая скорость  $v_{ЭЛ}$  сепарирующей звезды определяется по выражению:

$$v_{ЭЛ} = \frac{\pi \cdot n_{СП}}{30} \cdot R_{СП}, \quad (17)$$

где  $R_{СП}$  – радиус сепарирующей звезды, м.

Согласно выражениям (16) и (17) частота вращения сепарирующей звезды:

$$n_{СП} = \frac{30A \cdot v_K}{\pi \cdot R_{СП}}. \quad (18)$$

Для достижения требуемой температуры сепарирующей поверхности очистительной звезды необходимо, чтобы частота  $n_{СП}$  ее вращения обеспечивала равномерный обдув рабочей поверхности, при постоянной частоте вращения коленчатого вала двигателя силовой установки в номинальном режиме при максимальной передаче теплоты  $Q_T = \max$  через систему выброса отработавших газов. Это способствует повышению температуры сепарирующей звезды исходя из ее материалоемкости, а также технологических свойств воздуховода и теплоемкости сепарирующей звезды, изготовленной из стали 08Х13, что подтверждают результаты термодинамического расчета, представленные выражениями (1...15).

**Выводы.** Результаты проведенных теоретических исследований сепарирующей системы с использованием тепловой энергии для очистки корнеклубнеплодов в условиях уборки при повышенной влажности почвы свидетельствуют о перспективности разрабатываемой системы. Это подтверждают результаты расчета теплового баланса двигателя, согласно которому потеря теплоты  $Q_T = 51960$  Дж/с с отработавшими газами, превышает количество теплоты  $Q_A = 50900$  Дж/с, эквивалентной полезной работе, что свидетельствует о необходимости ее рационального использования при уборке корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы.

Для достижения требуемой температуры сепарирующей поверхности очистительной звезды необходимо, чтобы при номинальной частоте  $n_{СП}$  вращения сепарирующей звезды выполнялся равномерный обдув ее рабочей поверхности, при постоянной частоте вращения коленчатого вала двигателя силовой установки в номинальном режиме и максимальной передаче теплоты  $Q_T = \max$  через систему выброса отработавших газов рабочей поверхности сепарирующей звезды.

**Сведения об источнике финансирования.** 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.

Литература

1. Машинная технология производства лука / Я. П. Лобачевский, П. А. Емельянов, А. Г. Аксенов и др. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2016. 168 с.
2. Хвостов В.А., Рейнгарт Э.С. Машины для уборки корнеплодов и лука (теория, конструкция, расчет). М.: ВИМ, 1995. 391 с.
3. Калинин А. Б., Теплинский И. З., Кудрявцев П. П. Почвенное состояние в интенсивной технологии // Картофель и овощи. 2016. № 2. С. 35–36.
4. Haverkort A. J., Struik P. C. Potato in progress (science meets practice). Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2005. 366 p.
5. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading. // Research in Agricultural Engineering. 2017. Vol. 1. P. 22–31.
6. Development of Potato Harvesting Model / Aniket U. Dongre, Rahul Battase, Sarthak Dudhale, Vipul R. Patil, et al. // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017. Vol. 4. No. 2. P. 1567–1570.
7. Farhadi R., Sakenian N., Azizi P. Design and construction of rotary potato grader // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2012. Vol. 2. P. 304–314.
8. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition / J. Q. Lü, H. Sun, H. Dui, et al. // Transactions of the CSAM. 2017. Vol. 48. No. 11. P. 146–155.
9. Sun, H. Dui, et al. // Transactions of the CSAM. 2016. Vol. 47. No. 5. P. 106–114.
10. Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield / R. E. Sojka, D. J. Horne, C. W. Ross, et al. // Soil and Tillage Research. 1997. Vol. 40. No. 3-4. P. 25–144.
11. Гаврилов А. А., Игнатов М. С., Эфрос В. В. Расчет поршневых двигателей внутреннего сгорания: Ч.1. Расчет циклов и нагрузок, действующих в кривошипно-шатунном механизме: Учебное пособие. Владимир: Владимирский государственный университет, 2002. 142 с.
12. Ларюшин Н. П., Кухарев О. Н., Кирюхина Т. А. Исходные положения при проектировании машин для уборки лука // Наука в центральной России. 2015. № 6(18). С. 48–58.
13. Выбор и обоснование параметров экологического состояния агроэкосистемы для мониторинга технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур / А. Б. Калинин, В. А. Смелик, И. З. Теплинский и др. // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 39. С. 315–319.
14. Ларюшин А. М. Качественные показатели выкапывающего устройства лукоуборочной машины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 3. С. 46–47.
15. 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). С. 37–43.
16. Ларюшин Н. П., Ларюшин А. М. Энергосберегающая технология уборки лука // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 1. С. 55–56.

Сведения об авторах:

Дорохов Алексей Семенович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научно-организационной работе, e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru  
 Аксенов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, e-mail: 1053vim@mail.ru  
 Сибирёв Алексей Викторович – доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, e-mail: sibirev2011@yandex.ru  
 Мосяков Максим Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru  
 Сазонов Николай Викторович – аспирант, младший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, e-mail: sazonov\_nikolay@mail.ru  
 Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

THEORETICAL BACKGROUND OF INCREASING THE SEPARATING SYSTEM OF A ROOT HARVESTING MACHINE WITH THERMAL ENERGY OF THE EXHAUST GAS SYSTEM  
 A.S. Dorokhov, A.G. Aksekov, A.V. Sibiryov, M.A. Mosyakov, N.V. Sazonov

**Abstract.** To improve the quality indicators of harvesting root crops in conditions of high humidity, it is proposed to mount a separating device on the combine, which ensures the separation of root crops from soil and plant impurities with simultaneous blowing of their surface with hot exhaust gases from the power plant of the harvesting machine. Heat losses with exhaust gases ( $Q_G = 51960$  J/s) exceed its amount equivalent to useful work ( $Q_A = 50900$  J/s), therefore, it is necessary to ensure efficient use of the heat released into the atmosphere to increase the efficiency of the energy component of harvesting root crops and potatoes in conditions of high soil moisture. The aim of the study is to theoretically substantiate the improvement of the quality of separation of sugar beet root crops in conditions of high humidity with the use of blowing the working surface of the cleaning devices with exhaust gases from the power plant of the self-propelled harvester in the separation system of the harvester. The subject of research is the separation system of a combine harvester, represented by a cleaning star with installed deflectors for blowing the working surface. The condition for the uniform distribution of a heap of commercial products over the separating working surface is determined and theoretical dependences of the angular velocity  $v_{EL}$  and the rotational speed  $n_{SP}$  of the separating star on the forward speed of the sweeper and the radius of the separating star with uniform blowing of exhaust gases on the working surface are obtained.

**Key words:** theoretical research, root crops, sugar beet, exhaust gases, separation system.

References

1. Lobachevskii YaP, Emel'yanov PA, Aksekov AG. Mashinnaya tekhnologiya proizvodstva luka. [Machine technolo-

- gy of onion production]. Moscow: FGBNU FNATs VIM. 2016; 168 p.
2. Khvostov VA, Reingart ES. Mashiny dlya uborki korneplodov i luka (teoriya, konstruktziya, raschet). [Machines for harvesting root crops and onions (theory, design, calculation)]. Moscow: VIM. 1995; 391 p.
  3. Kalinin AB, Teplinskii IZ, Kudryavtsev PP. [Soil state in intensive technology]. *Kartofel' i ovoshchi*. 2016. (2): 35-36 p.
  4. Haverkort AJ, Struik PC. Potato in progress (science meets practice). Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 2005; 366 p.
  5. Mayer V, Vejchar D, Pastorková L. [Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading]. *Research in Agricultural Engineering*. 2017. 1: 22-31 p.
  6. Aniket U, Dongre, Rahul Battase, Sarthak Dudhale, Vipul R. Patil. [Development of potato harvesting model]. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017; 4 (2): 1567-1570 p.
  7. Farhadi R, Sakenian N, Azizi P. [Design and construction of rotary potato grader]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2012; 2: 304-314 p.
  8. Lü JQ, Sun H, Dui H. [Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition]. *Transactions of the CSAM*. 2017; 48 (11): 146-155 p.
  9. Lü JQ, Shang QQ, Yang Y. [Design optimization and experiment on potato haulm cutter]. *Transactions of the CSAM*. 2016; 47 (5): 106-114 p.
  10. Sojka RE, Horne DJ, Ross CW. [Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield]. *Soil and tillage research*. 1997; 40 (3-4): 25-144 p.
  11. Gavrillov AA, Ignatov MS, Efros VV. Raschet porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: Ch.1. Raschet tsiklov i nagruzok, deistvuyushchikh v krivoshipno-shatunnom mekhanizme: Uchebnoe posobie. [Calculation of internal combustion piston engines: Part 1. Calculation of cycles and loads acting in the crank mechanism: Textbook]. Vladimir: Vladimirskaia gosudarstvennyi universitet. 2002; 142 p.
  12. Laryushin NP, Kukharev ON, Kiryukhina TA. [Initial provisions in the design of machines for harvesting onions]. *Nauka v tsentral'noi Rossii*. 2015; 6 (18): 48-58 p.
  13. Kalinin AB, Smelik VA, Teplinskii IZ. [The choice and substantiation of the parameters of the ecological state of the agroecosystem for monitoring the technological processes of the cultivation of agricultural crops]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015; (39): 315-319 p.
  14. Laryushin AM. [Qualitative indicators of the digging device of the onion harvester]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennye mashiny*. 2008; (3): 46-47 p.
  15. Protasov AA. [Functional approach to the creation of onion harvesters]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet im. V.P. Goryachkina*. 2011; 2 (47): 37-43 p.
  16. Laryushin NP, Laryushin AM. [Energy saving technology for harvesting onions]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2009; (1): 55-56 p.

**Authors:**

Dorokhov Alexey Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for scientific and organizational work, e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru  
 Aksenov Alexander Gennadievich – Ph.D. of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of technologies and machines in vegetable growing, e-mail: 1053vim@mail.ru  
 Sibiryov Aleksey Viktorovich - Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of technologies and machines in vegetable growing, e-mail: sibirev2011@yandex.ru  
 Mosyakov Maxim Alexandrovich - Ph.D. of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of technologies and machines in vegetable growing, e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru.  
 Sazonov Nikolay Viktorovich - post-graduate student, junior researcher of the department of technology logies and machines in vegetable growing, e-mail: sazonov\_nikolay@mail.ru  
 Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.