

Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна

Алексей Семенович Дорохов,
доктор технических наук,
член-корреспондент Российской академии наук,
главный научный сотрудник;
Александр Геннадьевич Аксенов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;

Алексей Викторович Сибирев,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник;
Максим Александрович Мосяков,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник;
Николай Викторович Сазонов,
младший научный сотрудник,
e-mail: Sazonov_Nikolay@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что повышенная влажность почвы ухудшает качество уборки корнеплодов из-за снижения полноты сепарации. Чтобы повысить сепарирующую способность щелевых устройств для очистки корнеплодов, предложили усовершенствовать обогрев сепарирующей поверхности горячим выхлопным газом. (*Цель исследований*) Оптимизировать конструктивно-технологические параметры сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы. (*Материалы и методы*) В Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ разработали сепарирующую систему машины для уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности с использованием теплоты отработавших газов силовой установки. Качество очистки сепарирующей системы самоходного комбайна для уборки сахарной свеклы определяли при последовательном нагружении двигателя от 0 до 100 процентов номинальной мощности. Измеряли температуру отработавших газов с учетом изменения нагрузки двигателя и его эффективной мощности. (*Результаты и обсуждение*) Выявили повышение полноты сепарации вороха корнеплодов с 96,0 до 98,8 процентов при 26-32-процентной влажности почвы благодаря сепарирующей системе в виде очистительной звезды, где используется теплота отработавших газов двигателя. Установили оптимальные значения рассматриваемых факторов: частота вращения сепарирующей звезды 21,8 оборота в минуту, расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором – 128,4 миллиметра. (*Выводы*) Определили, что качественное выполнение технологического процесса уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности почвы с полнотой сепарации 97 процентов возможно при оптимизации конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства: при частоте вращения сепарирующей звезды 20-22 оборотов в минуту и расстоянии между сепарирующей звездой и дефлектором 120-140 миллиметров. Отметим перспективность разработки данной системы и необходимость теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию конструкции и технологического процесса работы сепарирующей системы уборочных машин.

Ключевые слова: уборка корнеплодов, свеклоуборочный комбайн, сепарирующая система, сепарирующая звезда, отработавшие газы.

Для цитирования: Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 19-26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.

Study of an Exhaust Gas Heat Separation System for the Beet Harvester

Alexey S. Dorokhov,
Dr.Sc.(Eng), corresponding member of Russian Academy
of Sciences, chief researcher;
Alexander G. Aksenov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
Alexey V. Sibirev,
Dr.Sc.(Eng), senior researcher;

Maksim A. Mosyakov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher;
Nikolay V. Sazonov,
junior researcher,
e-mail: Sazonov_Nikolay@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. It was noted that increased soil moisture worsens the quality of harvesting root crops due to a decrease in the completeness of separation. To increase the separating capacity of a slotted cleaner for root crops, it was proposed to improve the heating of the separating surface with hot exhaust gas. (*Research purpose*) To optimize the design and technological parameters of an exhaust gas heat separation system of the sugar beet harvester power plant. (*Materials and methods*) Federal Scientific Agroengineering Center VIM developed an exhaust gas heat separation system for harvesting root crops and potatoes in high moisture conditions using the heat of the harvester power plant exhaust gases. The cleaning quality of the separating system of a self-propelled sugar beet harvester was determined under the gradual engine load from 0 to 100 percent of the nominal rated power. The temperature of the exhaust gases was measured with the assumption of changes in the engine load and its effective power. (*Results and discussion*) The experiment revealed an increase in the completeness of the separation of a root crops heap from 96.0 to 98.8 percent at 26-32 percent soil moisture due to the separation system in the form of a cleaning star, which uses the heat of the engine exhaust gases. The established optimal values of the factors under consideration are as follows: the separating star rotation rate is 21.8 revolutions per minute, the distance between the separating star and the deflector is 128.4 millimeters. (*Conclusions*) It was determined that the high quality of the technological process of root crops harvesting in high soil moisture conditions ensuring a 97-percent separation efficiency is possible if optimize the separating device design and technological parameters and maintain the separating star rotation rate at 20-22 revolutions per minute and the distance between the separating star and the deflector within 120-140 millimeters. The authors noted the prospects of developing this system and the need for theoretical and experimental studies to improve the design and technological process of the harvester separating system.

Keywords: root crops harvesting, beet harvester, separating system, separating star, exhaust gases.

For citation: Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Issledovanie separiruyushchey sistemy s ispol'zovaniem teploty otrabotavshikh gazov dvigatelya sveklouborochnogo kombayna [Study of an exhaust gas heat separation system for the beet harvester]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 19-26 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.

От качественной уборки корнеплодов и картофеля зависят их товарные свойства [1-3]. В большинстве регионов России осенние уборочные работы сопровождаются большим количеством осадков [4-7]. Повышенная влажность почвы затрудняет работу уборочной машины при извлечении корнеплодов и последующей очистке от механических примесей [8-11]. Механическая очистка просветов между прутками сепарирующего устройства повышает повреждение товарной продукции, так как интенсификаторы сепарации взаимодействуют не только с рабочей поверхностью очистительных устройств, но и с корнеплодами [1-3].

Эффективность машин повышается благодаря более интенсивному использованию в их конструкции электронной техники и полимерных материалов, а также совмещению ряда технологических операций с максимально возможным использованием полезной мощности энергетических средств [5]. Несмотря на значительное количество научных изысканий, посвященных проблеме энерго-, ресурсосбережения при возделывании и уборке сельхозкультур и разработке средств механизации, обеспечивающих качественное выполнение технологических операций, остаются вопросы, которые до настоящего времени решены не полностью.

Для повышения интенсивности сепарации щелевых рабочих органов в условиях повышенной влажности почвы определяющее значение имеют тепло-

вое воздействие на рабочую поверхность сепарирующего устройства, теплотворная способность охлаждающей жидкости гидравлической системы машинно-технологического комплекса [4, 8].

Разработано конструктивное исполнение функционирующего элемента уборочной машины, обеспечивающего сепарацию товарной продукции совместно с отводом теплоты рабочей жидкости из гидравлической системы. Такое решение исключает потери теплоты в атмосферу и направляет полезную работу на обогрев рабочей поверхности очистительного устройства [12]. Однако существенным недостатком стало отсутствие независимой гидравлической системы в уборочных машинах, широко применяемых на небольших площадях крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйств [13].

Наиболее перспективное направление повышения сепарирующей способности щелевых устройств для очистки корнеплодов – совершенствование способа обогрева сепарирующей поверхности горячим выхлопным газом энергетической установки уборочной машины или привода [4].

Цель исследования – совершенствование технологического процесса очистки корнеплодов в условиях повышенной влажности в ходе оптимизации конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Потери теплоты в атмосферу дизельного двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* составляют 51960 Дж/с, что на 1100 Дж/с превышает количество теплоты, эквивалентной эффективной работе [2].

Для снижения травмирования и повышения качества очистки корнеплодов сахарной свеклы от механических и растительных примесей разработана сепарирующая система с использованием теплоты отработавших газов двигателя самоходной уборочной машины (рис. 1) [11, 14-17].

Для определения технологических параметров сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* проведены экспериментальные исследования в производственных условиях ООО «Красная Горка» Пензенской области (рис. 2).

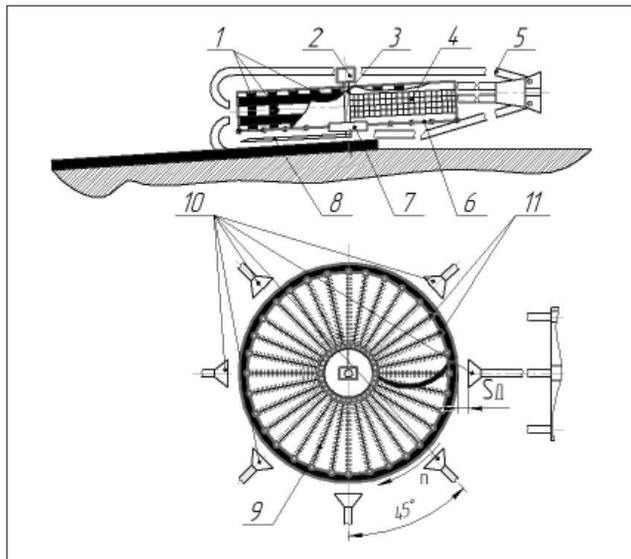


Рис. 1. Сепарирующая система с использованием теплоты отработавших газов двигателя: 1 – ограждение; 2 – гидронасос; 3 – ступица; 4 – щиток решетчатый; 5 – система воздухопроводов; 6 – ограждение резиботехническое; 7 – ступица; 8 – чистик; 9 – стипы счесывающие; 10 – дефлекторы; 11 – шарнирное сочленение; $S_{д}$ – расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором; n – частота вращения

Fig. 1. Exhaust gas heat separation system: 1 – fence; 2 – hydraulic pump; 3 – hub; 4 – lattice flap; 5 – air duct system; 6 – rubber fence; 7 – hub; 8 – guillemot; 9 – combing needles; 10 – deflector; 11 – articulated joint; $S_{д}$ – the distance between the separating star and the deflector; n – rotation rate

Экспериментальная очистительная система представляет собой комплексное оборудование, состоящее из взаимосвязанных между собой сепарирующей системы и системы отработавших газов двигателя внутреннего сгорания самоходного свеклоуборочного комбайна [11]. Воздуховоды выполнены из армированного материала, что позволяет обеспечить их перемещение в вертикальной и горизонтальной пло-

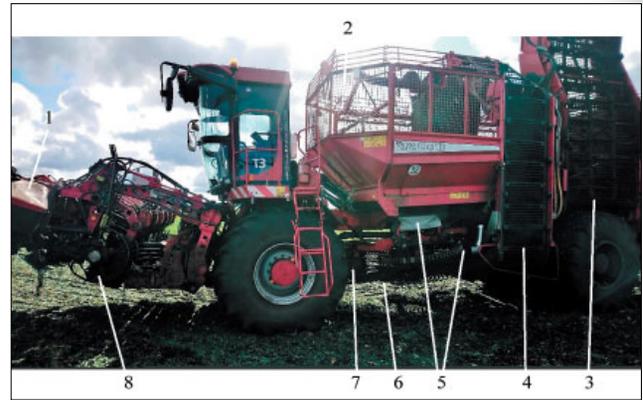


Рис. 2. Общий вид свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* и сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя: 1 – ботвоудалитель; 2 – бункер; 3 – транспортер выгрузной; 4 – прутковый транспортер загрузки; 5 – дефлектор; 6 – воздуховод; 7 – звезды сепарирующие; 8 – корчеватель

Fig. 2. General view of *Holmer Terra Dos T3* beet harvester and exhaust gas heat separation system: 1 – haulm remover; 2 – tanker; 3 – unloading conveyor; 4 – rattle chain; 5 – deflector; 6 – air duct; 7 – separating stars; 8 – grubber

скостях по всему диаметру очистителя [18]. Кроме того, для равномерного обдува теплым воздухом сепарирующей поверхности дефлекторы расположены равноудаленно по диаметру сепарирующей звезды под углом 45° относительно воздухопроводов (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3*: 1 – звезда сепарирующая; 2 – дефлектор; 3 – воздуховод

Fig. 3 – General view of the exhaust gas heat separation system of *Holmer Terra Dos T3* beet harvester: 1 – separating star; 2 – deflector; 3 – air duct

Методика проведения исследований при различных соотношениях тепловой подачи воздуха заключалась в следующем.

Требуемую влажность почвы при проведении экспериментальных исследований обеспечивали гидравлическим воздействием на почву неьютоновской жидкости на всей площади учетной делянки (длина 100 м) до фиксируемого значения необходимого соот-

ветствия интервалу в абсолютных значениях $W=26-32\%$.

Далее прогревали двигатель самоходного комбайна *Holmer Terra Dos T3* до рабочей температуры 90°C с последовательным включением функционирующих элементов – от приемно-подкапывающей части до последних ступеней очистки комбайна – с установленными значениями технологических параметров: частоты вращения сепарирующей звезды в соответствии с планом проведения эксперимента при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Подачу сепарируемой массы сахарной свеклы (4-6 кг/с) регулировали, изменяя рабочую скорость комбайна в пределах 5-9 км/ч.

При проведении экспериментальных исследований определяли влияние частоты вращения сепарирующей звезды и расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором на полноту сепарации корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы (табл. 1) [12].

Составили матрицу планирования 2-факторного эксперимента (табл. 2).

Далее осуществляли последовательное нагружение двигателя от 0 до 100% номинальной мощности и определяли температуру отработавших газов в зависимости от нагрузки двигателя при номинальном тепловом режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Провели теоретические исследования, определяющие остаточное давление отработавших газов на выходе из воздуховода, температуру и частоту вращения сепарирующей звезды.

В связи с тем, что на силовой установке энергетического средства предполагается монтаж только выпускного воздуховода, коэффициент сопротивления выпускной системы $\zeta_{\text{вып}}$ можно принять равным 1,05. Тогда остаточное давление на выходе из воздуховода составит [11]:

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

Уровни и интервалы варьирования факторов при сепарации вороха корнеплодов сепарирующей системой с использованием теплоты отработавших газов двигателя		LEVELS AND INTERVALS OF FACTORS VARIATION WHEN SEPARATING A HEAP OF ROOT CROPS BY AN EXHAUST GAS HEAT SEPARATION SYSTEM	
Уровни варьирования Levels of variation	Варьируемые факторы / Variables		Критерий оптимизации Optimization criteria
	расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором, S_d , мм Distance between separating star and deflector, S_d , mm	частота вращения сепарирующей звезды, $n_{\text{сн}}$, мин ⁻¹ Separating star rotation rate, $n_{\text{сн}}$, min ⁻¹	
	Интервал варьирования, Δ / Variation interval, Δ		
	30	5,0	
верхний (+1) upper	160	25	Y
нижний (-1) lower	100	15	
основной (0) fundamental	130	20	
кодовые обозначения reference designations	X_1	X_2	

МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ 2-ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / MATRIX FOR PLANNING A 2-FACTOR EXPERIMENT		
Номер опыта Experiment number	Факторы / Factors	
	расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором, S_d , мм Distance between separating star and deflector, S_d , mm	частота вращения сепарирующей звезды, $n_{\text{сн}}$, мин ⁻¹ Separating star rotation rate, $n_{\text{сн}}$, min ⁻¹
	X_1	X_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	1	0
6	-1	0
7	0	1
8	0	-1



где p_0 – давление на входе в воздуховод, МПа.

Температуру остаточных газов принимаем по среднему значению, то есть $T_r = 850$ К. Температура, сообщаемая сепарирующей звезде посредством передачи через систему воздуховодов и дефлекторов от силовой установки, будет равна [11]:

$$t_2 = (Q_i + t_1), \tag{2}$$

где Q_i – составляющая теплового баланса, Дж/с;

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

Для достижения требуемой температуры сепарирующей поверхности очистительной звезды необходимо, чтобы частота ее вращения обеспечивала равномерный обдув рабочей поверхности, при постоянной частоте вращения n_{cy} коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме и максимальной передаче теплоты $Q_r = max$ через систему выброса отработавших газов [11]:

$$n_{СП} = n_{cy} \cdot k_{П}, \tag{3}$$

где $n_{СП}$ – частота вращения сепарирующей звезды, $мин^{-1}$;

n_{cy} – частота вращения коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме, $мин^{-1}$;

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

Для обеспечения равномерного распределения вихря товарной продукции по сепарирующей рабочей поверхности необходимо соблюдение условия [12]:

$$v_{ЭЛ} = v_{К} \cdot A, \tag{4}$$

где $v_{ЭЛ}$ – угловая скорость сепарирующей звезды, м/с;

$v_{К}$ – скорость движения уборочной машины, м/с;
 A – коэффициент, $A=1,3$.

Угловую скорость сепарирующей звезды определяют по выражению [12]:

$$v_{ЭЛ} = \frac{\pi \cdot n_{СП}}{30} \cdot R_{СП}, \tag{5}$$

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

Согласно выражениям (4) и (5) частота вращения сепарирующей звезды равна [12]:

$$n_{СП} = \frac{30A \cdot v_{К}}{\pi \cdot R_{СП}}. \tag{6}$$

Расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором определяли исходя из обеспечения максимальной полноты обдува и температуры рабочей поверхности в сечениях воздуховода в области нахождения дефлекторов при различных значениях их температурных полей и геометрии воздуховода.

Критерием оптимизации выбран показатель качества уборки корнеплодов сахарной свеклы – полнота сепарации. При этом были учтены критерии, определяющие производительность и энергоёмкость про-

цесса уборки.

После обработки результатов экспериментальных исследований получили математическую модель, интерпретирующую влияние выбранных параметров на качество сепарации:

$$Y = 125,72 - 0,15x_1 - 2,08x_2 + 0,002x_1^2 + 0,043x_2^2 + 0,02x_1x_2. \tag{7}$$

Ее адекватность подтвердили в ходе статистического анализа (табл. 3).

Таблица 3		Table 3						
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОШИБКИ ОПЫТА								
STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE EXPERIMENT ERROR								
№	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}_u	Y_u	S_y^2	S_{LF}^2	$(Y_u - Y_u)^2$
1	98,6	98,9	98,3	98,6	98,43	0,7	0,381	1,413
2	96,3	95,1	95,7	95,7	93,77	1,06	0,581	2,131
3	97,8	96,9	97,2	97,3	96,68	1,08	0,589	2,162
4	95,6	94,9	96,9	95,8	96,93	0,04	0,021	0,081
5	98,7	97,4	99,2	98,5	95,48	0,03	0,016	0,063
6	93,3	92,2	92,3	92,6	95,54	0,06	0,033	0,124
7	95,8	98,2	96,4	96,8	96,78	1,48	0,807	2,961
8	95,5	95,7	95,9	95,7	93,65	1,24	0,675	2,475
Σ	–	–	–	771,0	–	5,691	3,103	11,412

Значение критерия Фишера F_r при 5%-ном уровне значимости для полученного уравнения составляет:

$$F_{РАСЧ} = \frac{5,691}{2,625} = 2,168 < F_{ТАБЛ} = F_{0,05} = 7,71. \tag{8}$$

Для определения оптимальных параметров сепарирующей системы необходимо выполнить дифференцирование уравнения (7) с определением координат центра поверхности отклика:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,15 + 0,004x_1 + 0,02x_2 = 0, \\ \frac{dy}{dx_2} = -2,08 + 0,86x_2 + 0,032x_1 = 0. \end{cases} \tag{9}$$

Решая систему уравнений (9), нашли координаты центра поверхности выбранного критерия оптимизации в закодированном и декодированном видах соответственно: $x_1 = -56,15$; $x_2 = 3,72$; $S_d = 128,4$ мм; $n_{СП} = 21,8$ $мин^{-1}$.

Подстановкой полученных значений в закодированном виде определили критерий оптимизации в центре полученных графических зависимостей:

$$Y_s = 96,86.$$

Результаты полученных канонических преобразований уравнения (7) и угол поворота осей представлены в выражениях:

$$Y - 96,86 = 0,0015x_1^2 - 0,471x_2^2; \tag{10}$$

$$tg 2\alpha_2 = \frac{0,005}{0,11 - 0,005} = 0,047. \tag{11}$$

Угол $\alpha_1 = -1,26^\circ$.

Корреляционная зависимость между исследуемыми факторами ($S_{Д}$, $n_{СП}$), влияющими на полноту очистки корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы, выражается уравнением параболических функций:

$$v = 125,72 - 0,1564 n_{СП} - 2,0805 S_{Д} + 0,05 n_{СП}^2 + 0,23 n_{СП} S_{Д} + 0,044 S_{Д}^2. \quad (12)$$

Полнота сепарации вороха корнеплодов зависит от частоты вращения сепарирующей звезды и удаленности от нее дефлектора (рис. 4).

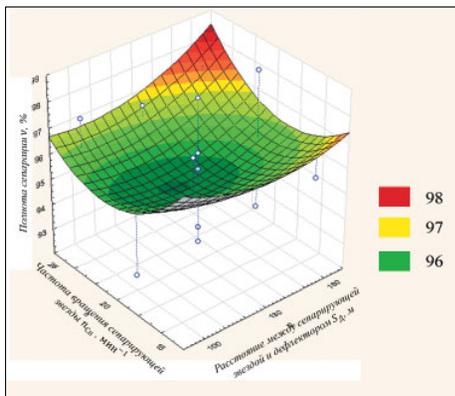


Рис. 4. Зависимость полноты сепарации вороха корнеплодов от частоты вращения сепарирующей звезды и расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором

Fig. 4. Dependence of the completeness of separation of a root crops heap on the separating star rotation rate and the distance between the separating star and the deflector

Этот показатель достигает 98,8% при оптимальных значениях рассматриваемых факторов: частота вращения сепарирующей звезды $n_{СП} = 21,8 \text{ мин}^{-1}$ и расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором $S_{Д} = 128,4 \text{ мм}$. Увеличение частоты вращения сепарирующей звезды от 15 до 20 мин^{-1} ухудшает качество сепарации на 1,0-1,5% в сравнении с предыдущим интервалом частоты вращения. Сокращение времени на обдуд рабочей поверхности сепарирующей

звезды при интервале значений 20-25 мин^{-1} снижает полноту сепарации до 96%.

Установлено, что содержание почвенных примесей на сходе с рабочей поверхности очистительной звезды более 20% не в полной мере отвечает требованиям полноты очистки корнеплодов (менее 8%) [6]. Это объясняется тем, что процесс сепарации на первом этапе трехступенчатой системы очистки происходит при влажности почвы 23-25%. Качество очистки улучшается при переходе на каждую последующую ступень сепарирующей системы.

Выводы. Оптимизация конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы обеспечила повышение полноты сепарации корнеплодов более 97% при соблюдении расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором 120-140 мм и частоте вращения сепарирующей звезды 20-22 мин^{-1} .

Для качественного выполнения технологического процесса уборки корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию конструкции и технологического процесса работы сепарирующей системы уборочных машин, в том числе по исследованию влияния выхлопных газов двигателя свеклоуборочного комбайна на качество корнеплодов сахарной свеклы, которые будут выполнены при финансировании Российского научного фонда при реализации проекта «Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля с цифровой системой экологической оценки качества товарной продукции» конкурса 2021 г. «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

Работа выполнена в рамках стипендии Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых СП-1004.2021.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протасов А.А. Функциональный подход к созданию лущоуборочной машины // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2011. N2 (47). С. 37-43.
2. Колпаков, В. Е., Шкорлаков Р. В. Исследования зависимости температуры выпускных газов от мощностных режимов автотракторных дизелей // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. N35. С. 289-294.
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.
4. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин: Монография. М.: ВИМ. 2006. 159 с.
5. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Сибирев А.В., Крючков В.А., Сазонов Н.В. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019 // Тракторы и сельхозмашины. 2020. N6. С. 28-40.
6. Костенко М.Ю., Костенко Н.А. Вероятностная оценка сепарирующей способности элеватора картофелеубо-



- рочной машины // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2009. N2. С. 4.
7. Краснощек Н.В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации // *Тракторы и сельхозмашины*. 2010. N8. С. 5–7.
 8. Камалетдинов Р.Р. Объектно-ориентированное имитационное моделирование в среде теории информации (информационное моделирование) // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2012. Т. 1. N14. С. 186-194.
 9. Рейнгарт Э.С., Сорокин А.А., Пономарев А.Г. Унифицированные картофелеуборочные машины нового поколения // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. N10. С. 3-5.
 10. 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.
 11. Дорохов А.С. Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Теоретические предпосылки повышения сепарирующей системы машины для уборки корнеплодов тепловой энергией системы отработавших газов // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. N1(61). С. 71-77.
 12. Уханов А.П., Уханов Д.А., Адгамов И.Ф. Теоретический анализ энергозатрат машинно-тракторного агрегата при работе на дизельном смесевом топливе // *Нива Поволжья*. 2015. N1(34). С. 66-71.
 13. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 150-156.
 14. Калинин А.Б. Теплинский И.З., Кудрявцев П.П. Оценка параметров почвенного состояния при выполнении технологических процессов возделывания картофеля по интенсивной технологии // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. N38. С. 288-293.
 15. Пахомов В.И., Каун В.Д., Красюков К.В. Теоретические основы сушки сельскохозяйственных материалов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. N8. С. 2-4.
 16. Зыкин Е.С., Курдюмов В.И., Субаева А.К. Перспективы развития парка сельскохозяйственной техники в современных условиях // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. N1-1. С. 772.
 17. Евтехов Д.В., Безносюк Р.В., Кодиров С.Т. и др. Исследование эксплуатационных показателей картофелеуборочных машин с модернизированными рабочими органами // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2021. N1(49). С. 112-119.
 18. Овчинников Е.В., Федоткин Р.С., Уютов С.Ю., Крючков В.А. Комбинированная силовая установка с улучшенными экологическими показателями // *Экология промышленного производства*. 2021. N2(114). С. 44-47.

REFERENCES

1. Protasov A.A. Funktsional'nyy podkhod k sozdaniyu luko-uborochnoy mashiny [Functional approach to onion harvester designing]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina*. 2011. N2 (47). 37-43 (In Russian).
2. Kolpakov V.E., Shkorlakov R.V. Issledovaniya zavisimosti temperatury vypusknykh gazov ot moshchnostnykh rezhimov avtotraktornykh dizeley [Studies of the exhaust gases temperature dependence on the power modes of autotractor diesel engines]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. N35. 289-294 (In Russian).
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 (In English).
4. Sorokin A.A. Teoriya i raschet kartofeleuborochnykh mashin. Monografiya. [Theory and calculation of potato harvesters: Monograph]. Moscow; VIM. 2006. 159 (In Russian).
5. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Kryuchkov V.A., Sazonov N.V. Sovremennyye tekhnologii i tekhnika dlya sel'skogo hozyaystva – tendentsii vystavki Agritechnika 2019 [Modern agriculture technologies and equipment – trends of an agritechnika 2019 exhibition]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. N6. 28-40 (In Russian).
6. Kostenko M.Yu., Kostenko N.A. Veroyatnostnaya otsenka separiruyushchey sposobnosti elevatora kartofeleuborochnoy mashiny [Probabilistic assessment of the potato harvester elevator's separating capacity]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyaystva*. 2009. N2. 4 (In Russian).
7. Krasnoshchekov N.V. Agroinzhenernaya strategiya: ot mekhanizatsii sel'skogo hozyaystva k ego intellektualizatsii [Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010. N8. 5-7 (In Russian).
8. Kamal'dinov R.R. Obektno-orientirovannoe imitatsionnoe modelirovanie v srede teorii informatsii (informatsionnoe modelirovanie) [Object-oriented imitating modeling in the environment of the information theory (information modeling)]. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2012. Vol. 1. N14. 186-194 (In Russian).
9. Reyngart E.S., Sorokin A.A., Ponomarev A.G. Unifitsirovannyye kartofeleuborochnyye mashiny novogo pokoleniya [New generation unified potato harvesters]. *Traktory i sel'skoy hozyaystvennyye mashiny*. 2006. N10. 3-5 (In Russian).
10. 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 (In English).
11. Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Teoreticheskie predposylki povysheniya separiruyushchey sistemy mashiny dlya uborki korneplodov teplovoy energiyey sistemy otrabotavshikh gazov [Theoretical background of increasing the separating system of a root harvesting machine with thermal energy of the exhaust gas system]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2021. N1(61). 71-77 (In Russian).
 12. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Adgamov I.F. Teoreticheskiy analiz energozatrat mashinno-traktornogo agregata pri rabote na dizel'nom smesevom toplive [Theoretical analysis of energy consumption of machine-tractor unit when running on diesel-mixed fuel]. *Niva Povolzh'ya*. 2015. N1(34). 66-71 (In Russian).
 13. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., et al. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologii i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).
 14. Kalinin A.B. Teplinskiy I.Z., Kudryavtsev P.P. Otsenki parametrov pochvennogo sostoyaniya pri vypolnenii tekhnologicheskikh protsessov vozdeleyvaniya kartofelya po intensivnoy tekhnologii [Parameter estimation of soil state in the implementation of technological processes in the cultivation of potatoes on intensive technology]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. N38. 288-293 (In Russian).
 15. Pakhomov V.I., Kaun V.D., Krasuykov K.V. Teoreticheskie osnovy sushki sel'skokhozyaystvennykh materialov [Theoretical foundations of drying agricultural materials]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011. N8. 2-4 (In Russian).
 16. Zykin E.S., Kurdyumov V.I., Subaeva A.K. Perspektivy razvitiya parka sel'skokhozyaystvennoy tekhniki v sovremennykh usloviyakh [Prospects of development of agricultural equipment in modern conditions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. N1-1. 772 (In Russian).
 17. Evtekhov D.V., Beznosyuk R.V., Kodirov S.T., et al. Issledovanie ekspluatatsionnykh pokazateley kartofeleuborochnykh mashin s modernizirovannymi rabochimi organami [Study of performance indicators of potato harvesting machines with modernized working bodies]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2021. N1(49). 112-119 (In Russian).
 18. Ovchinnikov E.V., Fedotkin R.S., Uyutov S.Yu., Kryuchkov V.A. Kombinirovannaya silovaya ustanovka s uluchshennymi ekologicheskimi pokazatelyami [Combined power plant with improved environmental performance]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2021. N2(114). 44-47 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных целей и задач экспериментальных исследований, доработка текста, формирование общих выводов.
 Аксенов А.Г. – разработка методики эксперимента, анализ существующих технологических решений и машин для уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности почвы.
 Сибирев А.В. – разработка конструктивных схем и устройства для очистки корнеплодов при помощи обогрева separирующей поверхности горячим выхлопным газом энергетической установки уборочной машины или привода машины, проведение экспериментальных исследований, разработка теоретических предпосылок.
 Мосяков М.А. – обработка полученных результатов экспериментальных исследований.
 Сазонов Н.В. – построение графиков, редактирование и оформление материалов
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Dorokhov A.S. – scientific supervision, formulation of the experimental research goals and objectives, the manuscript revision, general conclusions.
 Aksenov A.G. – development of experimental methods, analysis of existing technological solutions and machines for root crops harvesting in high soil moisture conditions.
 Sibirev A.V. – development of structural schemes and devices for cleaning root crops by heating the separating surface with hot exhaust gas of the harvester power plant or drive, conducting experimental research, developing theoretical premises.
 Mosyakov M.A. – processing of the experimental studies results.
 Sazonov N.V. – construction of graphs, materials proofreading and design.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

12.01.2022
 01.02.2022

Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия

Алексей Иванович Дерепаскин¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Антон Николаевич Куваев²,
докторант, e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Иван Владимирович Токарев¹,
научный сотрудник, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Костанайский филиал Научно-производственного центра агроинженерии, г. Костанай, Республика Казахстан;

²Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

Реферат. Показали, что удельная конструктивная масса почвообрабатывающего орудия влияет на ширину захвата и заглубляющую способность. Отметим, что для улучшения производительности и экономической эффективности предпочтительно минимизировать этот показатель до определенной величины, чтобы обеспечить заглубляющую способность. Приняли во внимание зависимость от фактического количества рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата. (*Цель исследований*) Разработать математическую модель для определения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы в зависимости от условий эксплуатации почвообрабатывающего орудия и его конструктивно-технологической схемы. (*Материалы и методы*) Использовали математическое моделирование, абстрагирование, анализ, синтез, положения классической механики. (*Результаты и обсуждение*) Разработали математическую модель для нахождения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы, которая учитывает физико-механические характеристики обрабатываемой почвы, количество рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата почвообрабатывающего орудия. Установили, что увеличение ширины захвата рабочего органа позволяет уменьшить фактическую удельную конструктивную массу орудия при прочих равных условиях. Предложили использовать математическую модель при проектировании почвообрабатывающих орудий, проведении силовых расчетов и сравнительной оценки металлоемкости в зависимости от установки и расположения рабочих органов различной ширины захвата. (*Выводы*) Установили, что при пределе прочности почвы сжатия 100 000 паскалей для обеспечения заглубления плоскорежущего орудия на заданную глубину минимально допустимая конструктивная масса орудия должна составлять 334 килограмма на метр. Фактическая удельная конструктивная масса орудия в рассматриваемых условиях будет иметь минимальное значение при ширине захвата рабочего органа 0,7 и 0,8 метра – 375 и 335 килограмма на метр соответственно.

Ключевые слова: почвообрабатывающее орудие, удельная конструктивная масса, математическая модель, плоскорежущие рабочие органы, ширина захвата, заглубляющая способность.

Для цитирования: Дерепаскин А.И., Куваев А.Н., Токарев И.В. Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 27-33. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.

A Mathematical Model for Determining the Specific Structural Weight of a Tillage Implement

Aleksey I. Derepaskin¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Anton N. Kuvaev²,
Ph.D. student (Eng.), e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Ivan V. Tokarev¹,
research associate, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Kostanay branch Scientific production center of agricultural engineering, Kostanay, Republic of Kazakhstan;
Kostanay Regional University named after Ahmet Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Abstract. The authors have shown that the tillage specific constructive weight affects the working width and penetration ability. In order to increase the working width of the tillage implement, and therefore its performance and economic efficiency as well as its penetration ability, it is preferable to minimize the value of this indicator. It is taken into account that the implement specific