

УДК 62-522.2

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПОРНОЙ РЕАКЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ КОПИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛЯ НАВЕСНЫМ УСТРОЙСТВОМ КОРМОУБОРОЧНОГО КОМПЛЕКСА

А.А. Ананчиков,

мл. науч. сотр. лаборатории электрогидравлических систем управления НИЦ «Бортовые системы управления мобильных машин» Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, магистр техн. наук, аспирант

Рассмотрен подход к построению системы копирования с учетом изменения коэффициента передачи навесного устройства. Составлено математическое описание функционирования указанной системы при наличии кинематических возмущений со стороны поверхности поля. Приведены вычислительные реализации процесса функционирования системы с использованием компьютерного моделирования, выполнены обработка и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: контактное копирование, активная система, навесное устройство, адаптер, опорное колесо, поверхность поля, кинематическое возмущение, математическое описание, датчик давления, задающее воздействие.

The approach to the construction of a copying system taking into account the change in the transmission coefficient of the mounted device is considered. A mathematical description of the functioning of this system in the presence of kinematic perturbations from the side of the field surface has been compiled. The computational implementations using computer simulation of the system operation process are presented and the processing and analysis of the obtained results are carried out.

Keywords: contact copying, active system, mounted device, adapter, support wheel, field surface, kinematic perturbation, mathematical description, pressure sensor, setting the effect.

Введение

Копирование поверхности поля при работе кормоуборочной техники происходит контактным способом. В этом случае на опорные элементы адаптера действует реакция со стороны почвы в зависимости от его веса. Качественное копирование поверхности поля рабочими органами позволяет стабилизировать высоту расположения рабочего органа кормоуборочного комплекса над поверхностью поля путем уменьшения реакции на опорные колеса, что позволяет предотвратить разрушение стерни многолетних трав.

Зерноуборочные комбайны оснащаются системами копирования, которые исключают контакт рабочего органа над поверхностью поля, а измерение высоты его расположения реализуется при помощи подпружиненного шупа, кинематически связанного с регулятором [1].

В состав копирующих устройств входят опорные элементы, шарнирно-рычажные звенья и уравновешивающие системы, которые по принципу действия можно разделить на механические, гидравлические и электрогидравлические.

Механическая система с шарнирно-рычажными звеньями и блоком уравновешивающих пружин представлена в работе [2]. Ее преимуществами является надежность и простота обслуживания, а недостатком – возникновение эффекта галопирования, т. е. отрыв опорных элементов подборщика от поверхности поч-

вы и их периодического ударного взаимодействия с гребнями поля. Гидравлическая пассивная система, описанная в работе [3], использует в качестве уравновешивающего упругого элемента гидроцилиндра с присоединенными к нему пневмогидроаккумуляторами (ПГА). Преимуществом системы является нелинейная жесткость гидравлической пружины, полученной за счет различной зарядки блока ПГА, сообщенного с гидроцилиндром, что позволяет подбирать необходимую характеристику изменения реакции на опорных элементах. Недостатком указанного способа является неудовлетворительное качество копирования при больших кинематических возмущениях.

В работе [4] авторы рассмотрели вопросы разработки научно-методических положений построения электрогидравлической системы контактного копирования кормоуборочного комбайна. Указанная активная система снижает заданное контактное усилие в большом диапазоне возмущающих воздействий. Следует заметить, что в приведенных литературных источниках при построении активных систем контактного копирования поверхности поля не учитывалось изменение кинематических параметров навесного устройства при его взаимодействиях с поверхностью поля.

Целью работы является повышение качества копирования поверхности поля за счет стабилизации опорной реакции с учетом изменения коэффициента передачи навесного устройства при его движении.

Основная часть

Объектом исследования является система копирования поверхности поля кормоуборочного комплекса. На рисунке 1 показана кинематическая схема

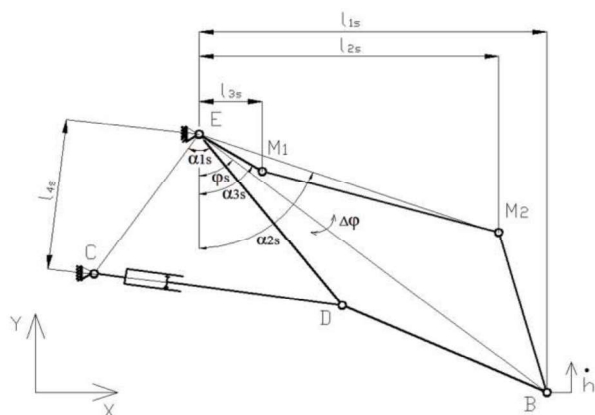


Рис. 1. Кинематическая схема навесного устройства

навесного устройства привода рабочих органов подборщика с опорным колесом и указанием кинематических связей, весовых нагрузок и конструктивных параметров, а также перемещений характерных точек остова при его смещении из статического положения (индекс «s»). Указанная схема является наиболее распространенной схемой системы уравновешивания, питающе-измельчающего аппарата (ПИА) и адаптера, с применением ПГА на кормоуборочных машинах [6], и отражает принцип контактного копирования поверхности поля рабочими органами, имеющими опорное колесо. Такая схема получила широкое распространение вследствие того, что качание ПИА с адаптером вокруг оси вращения измельчающего аппарата позволяет иметь постоянный зазор между подающими вальцами и ножами ротора-измельчителя, а жесткое соединение адаптера с ПИА создает зону перехода технологической массы из адаптера в питающий аппарат [3].

Согласно приведенному рисунку, точка касания опорного элемента адаптера с почвой, центры масс ПИА и адаптера обозначены соответственно B , M_1 и M_2 . Указанные массы совершают поворот на угол $\Delta\varphi$ относительно оси качания ПИА и адаптера E . Шарниры C и D размещены соответственно на раме и адаптере. При этом опорное колесо в точке B взаимодействует с поверхностью поля $h(t)$, м, отражающим неровность поверхности. Кинематические параметры l_1 , l_2 , l_3 и l_4 , м, навесного устройства определены геометрически из треугольников, стороны которых обозначены следующим образом: $EB=L_1$, $EM_2=L_2$, $EM_1=L_3$, $CD=L_4$, $EC=L_5$ и $ED=L_6$, м, а начальное значение их углов φ_s , α_{1s} , α_{2s} , и α_{3s} , радиан.

Математическое описание процесса функционирования системы копирования представлено в виде дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение сосредоточенных масс, а также уравнений баланса расходов в узлах гидросистемы, отражающих неразрывность потоков циркулирующей

рабочей жидкости [4]. Для определения начальных и граничных условий, а также коэффициентов дифференциальных уравнений выполнен кинестатический анализ механизма вывешивания (рис. 1). При составлении математического описания также принято допущение, что компрессия или расширение газа протекает достаточно быстро при отсутствии теплообмена с окружающей средой в адиабатном режиме. Определим качество функционирования агрегата при изменении высоты неровности поверхности поля, которая соответствует экспоненциальной функции

$$h = A_h \left(1 - e^{-\frac{t}{T_h}}\right),$$

где A_h – амплитуда неровности, м;

t – время, с;

T_h – период возмущающего воздействия, с.

Изменение угла поворота адаптера при воздействии возмущения соответствует выражению

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{L_1 \cos(\varphi_s) - h}{L_1}\right) - \varphi_s.$$

Кинематические параметры l_1 , l_2 и l_3 определяются из соответствующих треугольников:

$$l_1 = L_1 \sin(\varphi_s + \Delta\varphi);$$

$$l_2 = L_2 \sin(\alpha_{2s} + \Delta\varphi);$$

$$l_3 = L_3 \sin(\alpha_{3s} + \Delta\varphi).$$

Согласно теореме косинусов, сторона L_4 треугольника CED определяется формулой:

$$L_4 = \sqrt{L_5^2 + L_6^2 - 2 L_5 L_6 \cos(\alpha_{1s} + \Delta\varphi)},$$

а кинематический параметр l_4 соответствует выражению:

$$l_4 = \frac{2\sqrt{p(p-L_4)(p-L_5)(p-L_6)}}{L_4},$$

где полупериметр равен

$$p = \frac{1}{2}(L_4 + L_5 + L_6).$$

Скорость перемещения \dot{x}_A , м/с, штока гидроцилиндра под воздействием внешнего возмущения определяется согласно равенству

$$\dot{x}_A = \frac{L_4 - L_{40}}{\Delta t}, \tag{1}$$

где Δt – квант времени, с.

Потоки рабочей жидкости, циркулирующие в гидросистеме с постоянным давлением питания p , Па, при регулировании давления p_A , Па, в гидроцилиндрах, показаны на рисунке 2.

При расширении газа в объемах v_1 и v_2 , м³, гидропневмоаккумуляторы 1, 2 и 3, 4 образуют потоки рабочей жидкости q_1 и q_2 , м³/с в объемах V_1 и V_2 , м³, которые суммируются в узлах гидросистемы с потоками q_a и q_b , м³/с обратного клапана 5 и входного дросселя 6 с давлением p_a , Па на выходе. Потоки рабочей жидкости q_A и q_s , м³/с соответствуют перемещению поршня гидроцилиндров 7 и 8 с рабочими объемами $V_A/2$, м³ при подъеме и опускании навесного устройства посредством управляемого клапана 9 (линия Y).

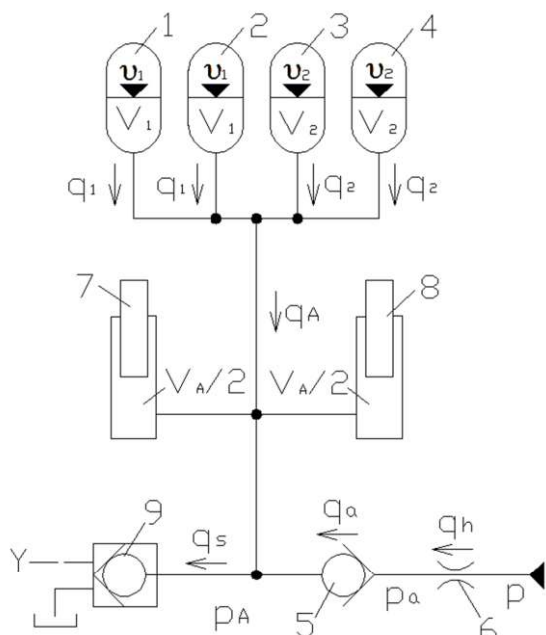


Рис. 2. Схема распределения потоков рабочей жидкости в узлах гидросистемы

Сжимаемость рабочей жидкости в общем для гидроцилиндра и ПГА узле гидросистемы характеризуется приведенным коэффициентом

$$K_E = \frac{E}{1,2(2V_1 + 2V_2 + V_A)}$$

где E – модуль упругости рабочей жидкости, Па.

Из баланса потоков рабочей жидкости в общем для гидроцилиндра и ПГА узле гидросистемы можно вычислить производную давления в цилиндре

$$\dot{p}_A = K_E(2q_1 + 2q_2 - q_A + q_a)$$

с начальными $p_{AS} = 54,33 \cdot 10^5$ Па, и граничными $p_{Amax} = 250 \cdot 10^5$ Па и $p_{Amin} = 0$ Па, условиями.

Масса ПИА с подборщиком, приведенная к поршню гидроцилиндра, определяется суммой

$$M = M_1 k_{G1}^2 + M_2 k_{G2}^2$$

где k_{G1} и k_{G2} – коэффициенты передачи навесного устройства.

Усилие F_D в шарнире навесного устройства определяется взаимодействием поршня гидроцилиндра с ПИА при кинематических возмущениях со стороны поверхности поля или при активном управляющем воздействии от регулятора путем подачи потока рабочей жидкости в указанный гидроцилиндр согласно величине рассогласования в системе

$$F_D = p_A A - \lambda_A \dot{x}_A - M \ddot{x}_A$$

где λ_A – коэффициент вязкого трения, кг/с,

A – площадь гидроцилиндра, м².

Уравнения, описывающие движение разделителей сред ПГА, имеют вид

$$\begin{aligned} m_r \ddot{x}_1 &= A_a(p_1 - p_A) - \lambda_r \dot{x}_1, \\ m_r \ddot{x}_2 &= A_a(p_2 - p_A) - \lambda_r \dot{x}_2, \end{aligned}$$

где m_r , λ_r и A_a – масса, кг, коэффициент вязкого трения, кг/с и площадь, м², разделителя сред ПГА, а также начальные и граничные условия $\dot{x}_1 = 0$ м/с, $\dot{x}_2 = 0$ м/с, $x_1 = 0,08$ м, $x_2 = 0,01317$ м, $x_{1,2min} = 0$ м, $x_{1,2max} = 0,01398$ м.

Давление газа в полостях ПГА согласно уравнению его состояния:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{1(t=t-\Delta t)} \left(\frac{x_{1(t=t-\Delta t)}}{x_1} \right)^\xi; \\ p_2 &= p_{2(t=t-\Delta t)} \left(\frac{x_{2(t=t-\Delta t)}}{x_2} \right)^\xi, \end{aligned}$$

где ξ – показатель адиабатного процесса.

Потоки рабочей жидкости в соответствующих узлах гидросистемы определяются согласно выражениям:

$$\begin{aligned} q_A &= \dot{x}_A A; \\ q_1 &= \dot{x}_1 A_a; \\ q_2 &= \dot{x}_2 A_a. \end{aligned}$$

При контактном копировании поверхности поля в случае изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, величина которого определяется выходным сигналом датчика, со стороны регулятора формируются управляющие воздействия.

Формулы для определения указанных воздействий в зависимости от рассогласования в виде потоков рабочей жидкости со стороны регулятора имеют вид

$$q_h = k_h i_h; \quad (2)$$

$$q_s = k_s i_s, \quad (3)$$

где k_h и k_s – коэффициенты передачи электромагнитов подъема и опускания; i_h и i_s – токи управления, А.

Равенство потоков рабочей жидкости q_a и q_h позволяет записать следующее выражение:

$$p_a = \frac{q_h^2 p + k_a^2 x_a^2 p_A}{k_a^2 x_a^2 + q_h^2}$$

где k_a и x_a – параметр гидравлической проводимости и перемещение обратного клапана, м.

Поток рабочей жидкости, протекающий через обратный клапан, равен произведению

$$q_a = k_a x_a \sqrt{p_a - p_A}.$$

Под действием разности давлений затвор обратного клапана перемещается, сжимая возвратную пружину, в условиях следующего баланса сил:

$$m_a \ddot{x}_a = \frac{\pi d_a^2}{4} (p_a - p_A) - \lambda_a \dot{x}_a - c_a x_a - N_a,$$

где m_a и d_a – масса, кг, и диаметр, м², седла обратного клапана;

λ_a – коэффициент вязкого трения, кг/с;

c_a и N_a – жесткость, Н/м, и предварительное поджатие пружины, Н, с начальными и граничными условиями $\dot{x}_a = 0$, м/с, $x_1 = 0$, м, $x_{amin} = 0$, м, $x_{amax} = 3 \cdot 10^{-3}$, м.

Реакцию на опорном колесе можно определить по уравнению равенства моментов сил, действующих на навесное устройство

$$R_B = \frac{G_1 l_3 + G_2 l_2 - F_D(p_A) l_4}{l_1},$$

где G_1 , и G_2 – вес ПИА и адаптера кормоуборочного комбайна, Н.

Анализ вышеприведенного выражения показывает, что для стабилизации заданной реакции на опорное колесо при изменении кинематических параметров навесного устройства необходимо регулировать давление в силовых гидроцилиндрах, формируя величину задающего воздействия $W(h)$ (рис. 3).

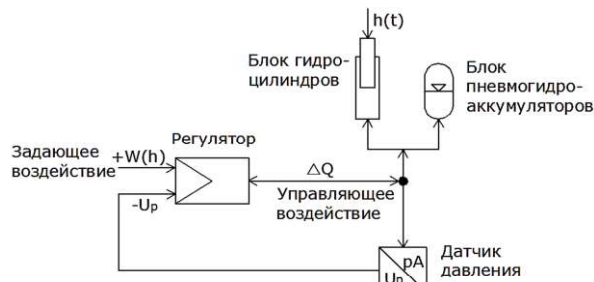


Рис. 3. Структурная схема системы копирования кормоуборочного комплекса

Путем графо-аналитического анализа кинематических и конструктивных параметров электрогидравлического привода навесного устройства получена статическая характеристика в виде полинома, отражающего зависимость давления в гидроцилиндре от высоты неровности

$$p_A = 3182000 \cdot h + 5424000, \text{ Па.}$$

На основе математического описания составлена компьютерная модель в среде *MATLAB*. Ниже приведены исходные данные, использованные в вычислениях: $\varphi_s = 0.9076$; $\alpha_{1s} = 1.2989$; $\alpha_{2s} = 1.239$; $\alpha_{3s} = 1.0123$; $L_1 = 1.565$, м; $L_2 = 1.125$, м; $L_3 = 0.261$, м; $L_4 = 0.9311$, м; $L_5 = 0.8144$, м; $L_6 = 0.634$, м; $v_1 = 0.0011$, м³; $v_2 = 0.0019$, м³; $V_1 = 8.8 \cdot 10^{-4}$, м³; $V_2 = 1.15 \cdot 10^{-4}$, м³; $G_1 = 14504$, Н; $G_2 = 19600$, Н; $E = 0.7 \cdot 10^9$, Па; $A = 0.0077$, м²; $A_a = 0.0143$, м²; $V_{AS} = 0.0014$, м³; $\lambda_A = 200000$, кг/с; $\lambda_a = 300$, кг/с; $\lambda_r = 100$, кг/с; $m_r = 0.1$, кг; $\xi = 0.7143$, $k_h = 3.3 \cdot 10^{-4}$, $k_i = 3.3 \cdot 10^{-4}$, $k_a = 0.0011$, $m_a = 0.05$, кг; $d_a = 0.012$, м²; $c_a = 2000$, Н/м; $N_a = 5$, Н; $k_{G1} = 3.2$, $k_{G2} = 2.4$, $\Delta t = 10^{-5}$, с.

Рассмотрим сравнительные вычислительные реализации процесса функционирования системы копирования, отражающие эффективность автоматической настройки задающего воздействия.

На рисунке 4 представлены графики изменения давления рабочей жидкости в силовых гидроцилиндрах.

На рисунке 5 представлены графики изменения реакции на опорное колесо со стороны поверхности поля.

Результаты теоретических исследований, согласно рисунку 4, при экспоненциальном возмущающем воздействии (высота неровности $A_h = 0.1$, м; периодом $T_h = 1$, с) приведены в таблице. Таблица отражает влияние структуры системы копирования на эффективность стабилизации реакции на опорное колесо со стороны поверхности поля, где желаемому значению реакции R_{BS} , Н, соответствуют отклики по ее среднему \bar{R}_B и максимальному R_{Bmax} значениям.

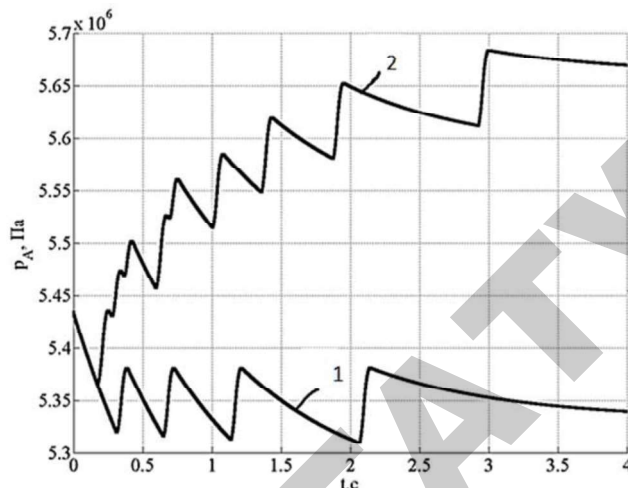


Рис. 4. Давление рабочей жидкости в полости гидроцилиндра: 1 и 2 – процессы, соответствующие задающим воздействиям $W=const$ и $W(h)$

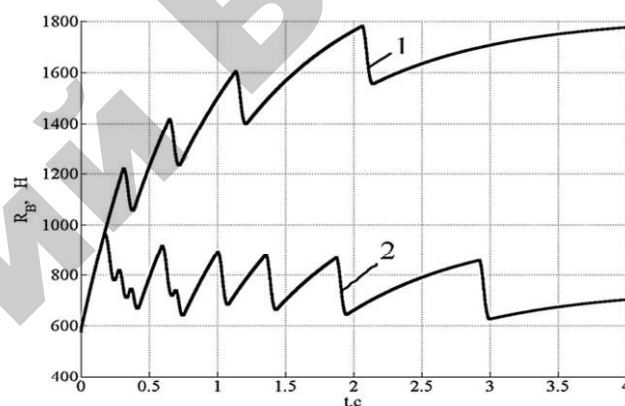


Рис. 5. Реакция на опорное колесо со стороны поверхности поля: 1 и 2 – процессы, соответствующие задающим воздействиям $W=const$ и $W(h)$

Таблица. Сравнительный анализ результатов теоретических исследований

Структура системы	R_{BS} , Н	\bar{R}_B , Н	R_{Bmax} , Н
$W=const$	500	1540	1800
$W(h)$		746	900

Система копирования с автоматической настройкой задающего воздействия позволяет более точно поддерживать небольшую величину реакции на опорное колесо, что обеспечивает качественное выполнение технологических операций кормоуборочным комплексом.

Заключение

Математическое описание процесса функционирования электрогидравлического привода навесного устройства кормоуборочного комплекса устанавливает взаимосвязь между реакцией на опорное колесо со стороны поверхности поля и давлением рабочей жид-

кости в гидроцилиндрах указанного привода при кинематических возмущениях.

Сравнительные теоретические исследования показывают, что система копирования с автоматической настройкой задающего воздействия позволяет более точно поддерживать небольшую по величине величину реакции на опорном колесе, что обеспечивает качественное выполнение технологических операций кормоуборочным комплексом. При этом максимальное изменение реакции на опорное колесо со стороны поверхности поля и ее среднее значение уменьшаются в 2 раза, что позволяет избежать поломки опорных колес и предотвратить разрушение стерни многолетних трав.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство для автоматического копирования рельефа поля: а. с. SU 1904564/15 / И.С. Нагорский, Л.Ф. Ханко. – Опубл. 13.01.1977.

2. Шуринов, В.А. Выбор рациональных параметров механизмов уравнивания жатки зерноуборочного

комбайна КЗС-7, обеспечивающих копирование его рельефа почвы без галопирования / В.А. Шуринов [и др.] // Вестник БНТУ. – 2006. – № 6. – С. 21-26.

3. Рехлицкий, О.В. Математическое описание системы уравнивания адаптеров мобильной кормоуборочной машины с применением пневмогидроаккумуляторов / О.В. Рехлицкий, Ю.В. Чупрынин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 1. – С. 40-48.

4. Строк, Е.Я. Построение активной системы контактного копирования рельефа поля / Е.Я. Строк [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2018. – С. 115-120.

5. Пантелеев, А.В. Теория управления в примерах и задачах: учеб. пос. / А.В. Пантелеев, А.С. Бортакровский. – М.: Высш. шк., 2003. – 583 с.

6. Комплекс кормоуборочный высокопроизводительный КВК-800 «Палессе FS80-8»: Инструкция по эксплуатации. – Гомель: Гомсельмаш, 2018. – 219 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.03.2019

УДК 631.353

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛЮЩЕНИЯ ЗЕРНА

В.А. Казаков,

ст. науч. сотр. лаборатории механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (г. Киров, Россия), канд. техн. наук

Разработан пневмосепаратор СП-2У-Р, позволяющий выделять воздушным потоком из поступающего после обмолота зерна в поле различные примеси. Приведены результаты теоретических исследований ротационно-поперечно-поточного пылеуловителя по определению его рациональных конструктивно-технологических параметров.

Ключевые слова: зерно, корм, примеси, пыль, ротор, фильтр, плющение, движение.

Pneumoseparator SP-2U-R was developed, with the help of the air flow it allows to sort out various impurities from the threshed grain in the field. The results of theoretical studies of the rotary-transverse-flow dust collector are presented to determine its rational design and technological parameters.

Keywords: grain, feed, impurities, dust, rotor, filter, flattening, movement.

Введение

Для решения проблемы очистки зернового материала от примесей перед его переработкой, например плющением [1-4], разработана машина СП-2У-Р, позволяющая выделять воздушным потоком из поступающего после обмолота в поле зерна различные засорители – соломистые примеси, семена сорных растений, и др., с новым исполнением пылеуловителя [5, 6].

Анализ научно-технической и патентной литературы показывает, что проблема обеспыливания воздуха [7, 8] при послеуборочной обработке и переработке зерна решается путем применения различных устройств, улавливающих примеси из проходящего через них пылевоздушного потока с различной степе-

нью эффективности, таких как циклоны [9], тканевые фильтры [10], но несмотря на высокую степень очистки, они имеют существенный недостаток – высокое гидравлическое сопротивление и большие габаритные размеры, что увеличивает стоимость очистки воздуха. Использование пылесадительных камер и жалюзийных пылеуловителей возможно в процессах, не требующих высокой степени очистки воздуха. Перспективным направлением развития пылеулавливающего оборудования является разработка ротационных пылеуловителей, обладающих достаточно высокой степенью очистки, сравнимой с циклонами и тканевыми фильтрами (90...95%), невысоким удельным расходом энергии (до 1 кВт·ч/1000 м³) и хоро-