DOI УДК 631.354.2

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА НА УБОРКЕ ПОДСОЛНЕЧНИКА

СТАРЦЕВ Александр Сергеевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

В статье приведен анализ работы технических систем зерноуборочного комбайна на уборке подсолнечника. Представлены математические выражения, описывающие технологические процессы взаимодействия систем комбайна с ворохом подсолнечника или его обработки. Обосновано влияние жатки, молотильно-сепарирующего устройства и очистки на потери маслосемян. Предложена система уравнений, позволяющая дать оценку работы зерноуборочного комбайна с учетом параметров технических систем.

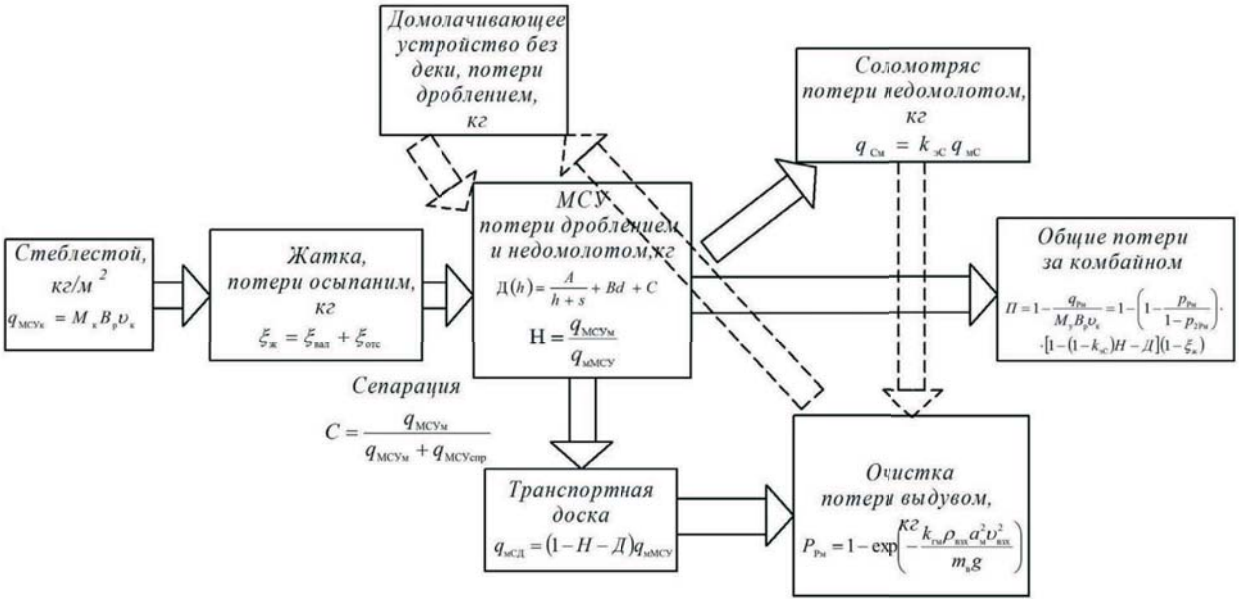
Введение. Основным критерием, характеризующим работу зерноуборочного комбайна (ЗК), является пропускная способность молотильно-сепарирующего устройства (МСУ). Этот параметр определяет ширину захвата жаткой стеблестоя, скорость движения комбайна, площадь сепарации и соломотряса. Оценку работы ЗК на уборке подсолнечника дают, руководствуясь техническим заданием, которое определяет следующие показатели: потери маслосемян за жаткой – не более 2,5% от фактической урожайности [4]; потери маслосемян за молотильно-сепарирующим устройством (МСУ) – 0,14–1,45 %; повреждение маслосемян при обмолоте МСУ – не более 3 %; содержание сорной примеси в бункерном ворохе – не более 5 %.

Цель исследования – следуя критериям оценки работы зерноуборочного комбайна на уборке подсолнечника, теоретически определить влияние технических систем ЗК с жаткой, оснащенной шнеком-мотовилом, МСУ с бичами из полиуретана твердостью 87 по шкале Шора и дополнительным третьим решетом с регулируемыми отверстиями, потери маслосемян [5]. Определить степень влияния технических средств ЗК на изменение потерь маслосемян при уборке. Получить систему уравнений для потерь маслосемян при уборке подсолнечника.

Методика исследований. Примем, что урожайность подсолнечника равномерна по всему убираемому участку (загону). Поэтому поток массы стеблестоя, захватываемый жаткой и подаваемый посредством наклонной камеры в МСУ, постоянен при его дальнейшем распределении. После подачи скошенного стеблестоя в МСУ происходят его разделение на несколько потоков и обработка посредством соответствующих технологических процессов: обмолот корзинок, транспортирование сепарируемого вороха по стрясной доске, очистка на решетных станах, движение корзинок по соломотрясу, транспортирование вороха маслосемян в бункер (см. рисунок).

Результаты исследований. При анализе работы ЗК следует выделить семь основных технологических этапов движения маслосемян подсолнечника с момента захвата стеблестоя рабочими элементами жатки до транспортирования маслосемян в бункер зерновым шнеком. Предположим, что в какой-то условный момент времени ЗК работает стационарно. В этом случае значения всех констант и скоростей потоков масс постоянны для всех процессов во всех технических системах. Описывая движения потоков скошенной массы подсолнечника, целесообразно разделить физические понятия и связывающие их уравнения. Одни описывают потоки движения массы подсолнечника, другие характеризуют работу систем ЗК без поступающей в них массы (по крайней мере, в некоторых пределах входных параметров). Разница между первыми и вторыми процессами может колебаться в некоторых пределах. Первые определяются урожайностью, физико-механическими свойствами массы корзинок, биометрическими и геометрическими параметрами маслосемян, вторые – режимом работы рассматриваемой системы.

1. Стеблестой. Фактором, характеризующим стеблестой является урожайность маслосемян $M_у$, кг/м^2. С учетом специфики работы ЗК следует учитывать массу корзинок на единицу площади $M_к$, кг/м^2, поскольку они поступают в МСУ вместе с маслосеменами и до момента взаимодействия с бичами и подбарабаньем представляют собой единое и целое. Параметры $M_у$ и $M_к$ в некоторой степени не могут являться независимыми, поскольку соотношение $M_у/M_к$ определяется видом,



Алгоритм определения потерь маслосемян зерноуборочным комбайном, переоборудованным на уборку подсолнечника

тем или иным сортом или гибридом подсолнечника, условиями произрастания и другими факторами [3]. Вследствие этого данное соотношение будет приемлемо на отдельно взятом участке поля (загоне).

Соответственно, указанные характеристики не относятся к работе ЗК и составляют первую группу.

2. Жатка. Жатка шнеком-мотовилом захватывает стебли подсолнечника, срезает их режущим аппаратом, и при помощи шнека передает в наклонную камеру, в результате чего формируется поток массы корзинок (подача) q, кг/с [6].

Взаимосвязанными параметрами ЗК в данной системе является $\upsilon_к$ – скорость движения комбайна, $B_р$ – рабочая ширина захвата жатки и соотношение потерь за ней $\xi_ж$, выраженное в долях или процентах от фактической урожайности подсолнечника.

Поток $q_м$ маслосемян в общей массе скошенного подсолнечника описывается следующим выражением:

$$q_м = (1-\xi_ж)M_у B_р \upsilon_к, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где $\xi_ж$ – потери за жаткой, выраженные в долях [6]; $M_у$ – урожайность подсолнечника, кг/м^2; $B_р$ – рабочая ширина захвата жатки, м; $\upsilon_к$ – скорость движения комбайна, м/с.

Подача скошенной массы в молотилку:

$$q_{МСУ} = q_{МСУм} + q_{МСУк} + q_{МСУспр}, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

где $q_{МСУм}$ – подача маслосемян, кг/с; $q_{МСУк}$ – подача корзинок без учета маслосемян, кг/с; $q_{МСУспр}$ – подача сорных примесей, кг/с.

Аналогично выражению (1) для $q_к$ можем записать:

$$q_{МСУк} = M_к B_р \upsilon_к, \text{ кг/с}. \quad (3)$$

В данной категории системы три параметра относятся ко второй группе $B_р$, $\upsilon_к$ и $\xi_ж$. В некоторой степени $q_{МСУспр}$ также зависит от работы жатки [6].

3. Молотильно-сепарирующее устройство (МСУ) с бичами из полиуретана с твердостью по Шору 70 единиц, с шириной канавки 10 мм.

Работу МСУ принято описывать такими параметрами, как недомолот H, сепарация С и дробление маслосемян Д [1].

$$q_{мСД} = (1-H-Д)q_{мМСУ}, \text{ кг/с}, \quad (4)$$

где $q_{мСД}$ – выход маслосемян с МСУ через подбарабанье на стрясную доску, кг/с; $q_{мМСУ}$ – подача маслосемян в МСУ, кг/с.

4. Соломотряс. Эта система позволяет частично уменьшить потери недомолотом при работе МСУ. Поскольку в процессах обмолота подсолнечника соломотряс способен оказывать незначительное влияние на потери, то принцип работы соломотряса рассматривать подробно не имеет смысла. В этом случае ограничимся только коэффициентом эффективности соломотряса $k_{эС}$, который показывает отношение выходного потока маслосемян к входному в этом устройстве.

$$q_{См} = k_{эС} q_{мС}, \text{ кг/с}, \quad (5)$$

где $q_{См}$ – проход маслосемян с соломотряса на стрясную доску, кг/с; $q_{мС}$ – подача маслосемян в корзинках на соломотряс, кг/с.

5. Транспортная доска, очистка, повторный цикл. Решетные станы очистки отделяют маслосемена от сорных примесей. С точки зрения потоков массы, описание работы решет станов можно свести к четырем переменным: $p_{Рм}$ – вероятность потерь маслосемян в результате работы системы очистки; $p_{Рспр}$ – вероятность прохождения сорных примесей через решета; $p_{2Рм}$ – вероятность отсеивания маслосемян на повторный цикл очистки с решет; $p_{2Рспр}$ – вероятность отсеивания сорных примесей на повторный цикл очистки. Размерность всех вероятностей выражена в долях единиц.

Входной поток массы формируется работой МСУ, соломотряса и повторным циклом домолота частей корзинок и очистки маслосемян.

$$q_{2мР} = p_{2мР} q_{Рм}, \text{ кг/с}; \quad (6)$$

$$q_{2спрР} = p_{2спрР} q_{Рспр}, \text{ кг/с}; \quad (7)$$

$$q_{мР} = q_{МСУм} + q_{См} + q_{2м}, \text{ кг/с}; \quad (8)$$

$$q_{спрР} = q_{МСУспр} + q_{Сспр} + q_{2спр}, \text{ кг/с}, \quad (9)$$

где $q_{2мР}$, $q_{2спрР}$ – подача маслосемян и сорных примесей на повторный цикл очистки (с решет), кг/с; $q_{мР}$, $q_{спрР}$ – подача маслосемян и сорных примесей на решета очистки, кг/с; $q_{МСУм}$, $q_{См}$, $q_{2м}$ – подача маслосемян после МСУ, соломотряса, и повторного цикла очистки на решета очистки, кг/с; $q_{МСУспр}$, $q_{Сспр}$, $q_{2спр}$ – подача сорных примесей после МСУ, соломотряса, и повторного цикла очистки на решета очистки, кг/с.

Приведем выражения (6–9) к соотношениям

$$q_{мР} = \frac{q_{МСУм} + q_{См}}{1 - p_{2мР}}, \text{ кг/с}; \quad (10)$$

$$q_{спрР} = \frac{q_{МСУспр} + q_{Сспр}}{1 - p_{2спрР}}, \text{ кг/с}. \quad (11)$$

Поток вороха подсолнечника после прохождения системы очистки можно описать выражениями (12–13):

$$q_{Рм} = (1 - p_{Рм} - p_{2Рм}) q_{мР}, \text{ кг/с}; \quad (12)$$

$$q_{Рспр} = p_{Рспр} q_{спрР}, \text{ кг/с}. \quad (13)$$

После подстановки всех выражений можно получить массу сепарированных маслосемян (прошедших решета) $q_{Рм}$ и сорных примесей $q_{Рспр}$ в зерновом шнеке и соответственно в бункере $q_{Бм}$.

$$q_{Бм} = \left(1 - \frac{p_{Рм}}{1 - p_{2Рм}}\right) q_{мС} [1 - (1 - k_{эС})H - Д](1 - \xi_ж) M_у B_р \upsilon_к, \text{ кг/с}. \quad (14)$$

На основе приведенных выше математических выражений можно представить систему уравнений, описывающих зависимость потерь маслосемян при уборке подсолнечника:

$$\begin{cases} \xi_ж = \xi_{вал} + \xi_{отс} \\ \xi_{вал} = L\left(\int\limits_{H_{0-р.а}+H_{р.а}-\frac{D_{вал}}{2}}^{H_{0-р.а}+H_{р.а}+\frac{D_{вал}}{2}} \Phi\left(\frac{h_{стеб}-\mu}{\sigma}\right) W_{стеб} \Delta Y \xi_{корз}^{удар} dh_{стеб} + \int\limits_{H_{0-р.а}+H_{р.а}+\frac{D_{вал}}{2}}^{+\infty} \Phi\left(\frac{h_{стеб}-\mu}{\sigma}\right) W \Delta Y \xi_{стеб,}^{удар} dh_{стеб} \right) \\ \xi_{отс} = L\left(\int\limits_{H_{0-р.а}+H_{р.а}-\frac{D_{вал}}{2}-\Delta h_ф}^{H_{0-р.а}+H_{р.а}+\frac{D_{вал}}{2}-\Delta h_ф} \Phi\left(\frac{h_{стеб}-\mu}{\sigma}\right) \delta \Delta Y \xi_{корз}^{удар} dh_{стеб} + \int\limits_{H_{0-р.а}+H_{р.а}+\frac{D_{вал}}{2}-\Delta h_ф}^{+\infty} \Phi\left(\frac{h_{стеб}-\mu}{\sigma}\right) \delta \Delta Y \xi_{стеб,}^{удар} dh_{стеб} \right) \\ Д(h) = \frac{A}{h+s} + Bd + C \\ P_{Рм} = 1 - \exp\left(-\frac{k_{гм} \rho_{взх} a_м^2 \upsilon_{взх}^2}{m_в g}\right) \end{cases}, \quad (15)$$

где $\xi_ж$ – потери маслосемян за жаткой; Д(h) – функция дробления маслосемян в МСУ; A – эмпирический коэффициент, учитывающие геометрию рифов бича молотильного барабана; B – эмпирический коэффициент, учитывающий геометрию канавок бича молотильного барабана; C – эмпирический коэффициент, учитывающий геометрию малосемян; h – ширина канавки бича, мм; s – ширина рифа бича, мм; $\xi_{вал}$ – потери маслосемян от взаимодействия корзинки в трубным валом шнека-мотовила, шт. [6]; $\xi_{отс}$ – потери маслосемян от взаимодействия с отсекателями шнека-мотовила, шт.; $H_{0-р.а}$ – расстояние от плоскости режущего аппарата жатки до центра шнека-мотовила, м; $H_{р.а}$ – расстояние от поверхности почвы до плоскости режущего аппарата, м; $D_{вал}$ – диаметр трубного вала шнека-мотовила, м [6]; Ф(x) – функция Лапласа; $h_{стеб}$ – высота стеблестоя подсолнечника, м [2]; μ, σ – математическое ожидание и дисперсия распределения стеблестоя по высоте; $W_{стеб}$ – густота стеблестоя подсолнечника, м [2]; ΔY – длина участка стеблестоя, попавшего на мотовило без взаимодействия с отсекателями, м [7]; $\xi_{корз}^{удар}$ – потери маслосемян при ударе корзинки о трубный вал в зависимости от линейной скорости соударения, в долях от целого [6]; $dh_{стеб}$ – переменная высота стеблестоя подсолнечника, м [2]; $\xi_{стеб}^{удар}$ – потери маслосемян при ударе стебля о трубный вал в зависимости от линейной скорости соударения, шт. [6]; $dh_ф$ – высота подъема или опускания отсекателем стеблестоя в зависимости от направления вектора скорости и конечной точки отсекателя, м; s – ширина рифа бича молотильного барабана, м; d – ширина канавки бича молотильного барабана, м; $P_м$ – потери маслосемян на решетах очистки выдуванием воздушным потоком, шт.; $\rho_{взх}$ – плотность воздушного потока на решетах, м^3; $a_м$ – средние линейные размеры маслосемян, м; $\upsilon_{взх}$ – скорость воздушного потока, м/с; $m_в$ – масса вороха подсолнечника, подаваемого на решета очистки, кг; $k_{гм}$ – коэффициент, зависящий от геометрии маслосемян.

Полученная система уравнений (15) отражает формирование потерь маслосемян из потерь за жаткой, дробления маслосемян в МСУ и потерь в решетах.

Преобразовав систему (15), можно получить упрощенное выражение для потерь (16):

$$П = 1 - \frac{q_{Рм}}{M_у B_р \upsilon_к} =$$

$$= 1 - \left(1 - \frac{p_{Рм}}{1 - p_{2Рм}}\right)\left[1 - (1 - k_{эс})H - Д\right](1 - \xi_ж), \quad (16)$$

где $k_{эс}$ – коэффициент эффективности соломотряса; $k_{эс}$ = 0,5–0,55.

Произведение величин $M_у B_р \upsilon_к$ отражает общее поступление маслосемян при захвате стеблестоя жаткой.

Потери в выражении выражены в долях потерь от технических систем ЗК.

В случае, если рассматриваемые коэффициенты в выражении (16) достаточно малы (условно эти величины составляют 4–7%), то можно записать приближенное значение для потерь.

$$П \approx \xi_ж + Д + (1 - k_{эс})H + \frac{p_{Рм}}{1 - p_{2Рм}}, \quad (17)$$

Суммарные относительные потери при работе ЗК складываются как сумма относительных потерь в его отдельных технических системах. При произведении полученных значений потерь на подачу вороха подсолнечника $q_в$ получаем величину потерь, выражаемую в кг/с.

Заключение. Техническими системами, определяющими потери маслосемян, зерноуборочного комбайна являются: жатка, молотильно-сепарирующее устройство и очистка.

Полученные математические выражения позволяют описать работу технических систем зерноуборочного комбайна на уборке подсолнечника с анализом их параметров.

На основании полученных выражений, описывающих технологические процессы уборки стеблестоя, обмолота корзинок, транспортирования маслосемян и их последующей очистки, представлено системное уравнение определения общих потерь маслосемян, и общее выражение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Липкович Э.И.* Процессы обмолота и сепарации в молотильных аппаратах зерноуборочных комбайнов (пособие для конструкторов зерноуборочных машин) / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1973. – 168 с.

2. Результаты исследований физико-механических свойств стеблестоя подсолнечника / А.С. Старцев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2017. – №3. – С. 59–64.

3. Состав и геометрические параметры вороха подсолнечника в комбайне при подаче на решета очистки / А.С. Старцев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 10. – С. 66–70.

4. *Старцев А.С., Куньшин А.А.* Технические условия на уборку подсолнечника зерноуборочным комбайном // Фундаментальные и прикладные исследования в высшей аграрной школе: сб. науч. трудов. – Саратов, 2014. – С. 36–39.

5. *Старцев А.С., Протасов А.А.* Теория технологического процесса сепарации вороха подсолнечника решетом с регулируемыми отверстиями // Аграрный научный журнал. – 2015. – №10. – С. 52–54.

6. *Старцев А.С.* Экспериментально-теоретическое обоснование конструкции и диаметра трубного вала шнека-мотовила жатки для уборки подсолнечника // Известия Оренбургского ГАУ. – 2016. – №1 (63). – С. 70–74.

Старцев Александр Сергеевич, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*
410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.
Тел.: (8452) 74-96-56.

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн; стеблестой; подсолнечник; жатка; потери; маслосемена; молотильно-сепарирующее устройство; соломотряс; сепарация.*

SYSTEM ANALYSIS OF COMBINED HARVESTER WORK AT SUNFLOWER HARVESTING

Startsev Aleksander Sergeevich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support of AIC", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Keywords: *combined harvester; stalks; sunflower; reaper; loss; oilseeds; threshing-separating device; straw walker; separation.*

The article presents an analysis of the technical systems of combined harvester at sunflower harvesting. The mathematical expressions describing technological processes of interaction of systems of the combine with a heap of sunflower, or its processing are resulted. The influence of a reaper, threshing-separating device and cleaning on the loss of oil seeds is substantiated. The system of the equations that makes it possible to access work of the combined harvester taking into account the parameters of the given technical systems is offered.