

## Математическое выражение для определения потерь маслосемян подсолнечника от воздушного потока при использовании решета с регулируемым отверстиями

*А.С. Старцев, к.т.н., ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ*

Одним из агротехнических требований, предъявляемых к уборке подсолнечника, является содержание сорных примесей в бункерном ворохе, которое не должно превышать 5% от основной массы. Максимальное содержание основных маслосемян в ворохе достигается путём настроек зазоров жалюзийных решёт в очистке и регулировкой скорости воздушного потока вентилятора [1].

При уборке подсолнечника не всегда удаётся достичь требуемого значения сорности. Согласно протоколам испытаний зерноуборочных комбайнов содержание сорных примесей в бункерном ворохе может достигать 10,78% при обмолоте бильными молотильно-сепарирующими устройствами и 15,74% – при обмолоте аксиально-роторными системами. Однако кроме регулировок жатки или приспособления молотильных аппаратов и систем очистки комбайна на сорность бункерного вороха оказывает влияние и ряд факторов, характеризующих климатические условия, состояние стеблестоя подсолнечника, физико-механические свойства корзинок и маслосемян [2].

Для сельхозпроизводителя послеуборочная доочистка бункерного вороха до норм содержания основных маслосемян – достаточно затратное мероприятие, влияющее на показатель себестоимости производства маслосемян в целом. Поэтому важно достигать минимального содержания сорных примесей в ворохе на первичном этапе очистки – уборке зерноуборочным комбайном [3, 4].

Анализ конструктивных решений по повышению качества очистки вороха показывает, что наиболее распространённым является установка дополнительных ступеней очистки в виде решёт с круглыми отверстиями или отверстиями с фор-

мой, ориентированной на геометрические параметры зёрен сепарируемого вороха. Это приводит к улучшению показателей чистоты вороха на небольшой процент по причине того, что не всегда геометрические размеры отверстий позволяют охватить весь спектр размеров зёрен с учётом сортов или гибридов. По этой причине наиболее крупные зёрна злаковых культур выдуваются воздушным потоком вентилятора очистки либо за пределы комбайна, либо направляются на домолачивающее устройство.

Практическое использование систем с дополнительными ступенями очистки показывает, что снижение числа оборотов вентилятора способствует забиванию решёт или повышению содержания сора в ворохе. Техническим решением, позволяющим снизить содержание сорных примесей в бункерном ворохе подсолнечника до 2,3 – 1,6% в зависимости от сорта или гибрида, является решето с регулируемым отверстиями для очистки зернового вороха различных культур (рис. 1) [5].

**Материал и методы исследования.** Для снижения содержания сорных примесей в ворохе подсолнечника решето рекомендуется устанавливать дополнительной ступенью очистки [5], в конструкциях комбайнов «Нива-Эффект» – третьим решето под нижним решётным станом. В этом случае монтаж решета производят непосредственно к раме нижнего решета посредством болтовых соединений. В очистке комбайнов серии «ACROS» и «Дон» ввиду малого расстояния между нижним решето и задним днищем (5 см) решето с регулируемым отверстиями устанавливают под верхним решето.

Решето с регулируемым отверстиями представляет собой раму 1 (рис. 2), оснащённую направляющими 2, кронштейнами 3 для крепления к боковине нижнего решётного стана. В направ-

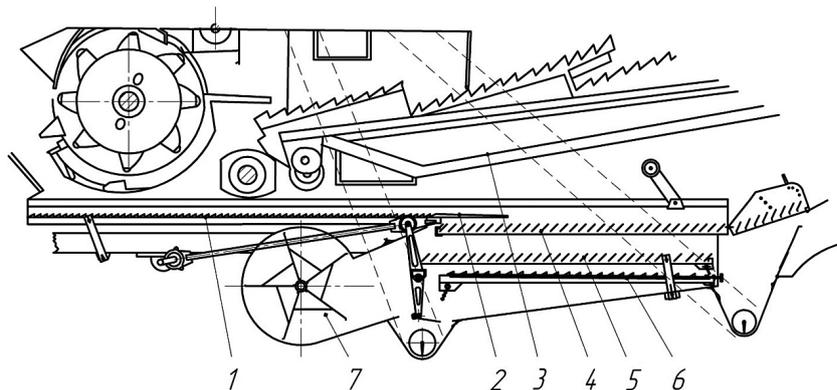


Рис. 1 – Воздушно-решётная очистка «Нива-Эффект»:  
1 – скатная доска; 2 – пальцевая гребёнка; 3 – клавиши соломотряса; 4 – верхний решётный стан; 5 – нижний решётный стан; 6 – решето с регулируемыми отверстиями; 7 – вентилятор

ляющих 2 неподвижно установлено верхнее решето 4 с отверстиями, ряды которых разделены поперечными перегородками – гофрами 5, а также подвижное нижнее решето 6. Механизм регулировки решета представляет собой Г-образную пластину 7, закреплённую в торцевой части подвижного решета 6 регулировочной гайкой 8 [6].

Принцип работы решета основан на смещении круглых отверстий подвижного и неподвижного листов с образованием регулируемых отверстий с формой, копирующей форму продольного сечения маслосемян. Смещением одного листа с круглыми отверстиями относительно другого можно добиться размера регулируемого отверстия, соответствующего виду, сорту или гибриду.

Теоретически при увеличении скорости воздушного потока вентилятора и максимальном уменьшении размеров регулируемого отверстия можно обеспечить снижение сорных примесей до минимального количества – менее 1%. Но в этом случае вероятны потери маслосемян выдувом воздушным потоком вместе с сорными примесями.

Проведём анализ сил в воздушном потоке при очистке вороха подсолнечника.

Примем, что движение вороха подсолнечника по решету формируется под воздействием четырёх сил:

1. Сила лобового сопротивления со стороны воздуха.
2. Сила реакции опоры (отсутствует в случае падения после прохождения решёт).
3. Сила трения со стороны опоры (отсутствует в случае падения после прохождения решёт).
4. Сила тяжести.

Рассмотрим падение под действием сил тяжести и лобового сопротивления.

Сила лобового сопротивления  $F_{лс}$  пропорциональна площади поперечного сечения тела, плотности воздуха и квадрату скорости тела относительно воздуха. Площадь поперечного сечения в свою очередь зависит от линейных размеров как квадрат, таким образом можно записать:

$$F_{лс} = k_{гм} \rho_{взх} \alpha^2 v_{отн}^2, \quad (1)$$

где  $k_{гм}$  – коэффициент, учитывающий геометрию маслосемян;

- $\rho_{взх}$  – плотность воздушного потока;
- $\alpha$  – средние размеры семянки подсолнечника;
- $v_{отн}$  – относительная скорость движения маслосемян по решётам.

Направление силы  $F_{лс}$  совпадает с направлением величины  $v_{отн}$ . Относительная скорость движения маслосемян состоит из скорости движения относительно комбайна  $v_k$  и скорости движения потока воздуха  $v_{взх}$  [7].

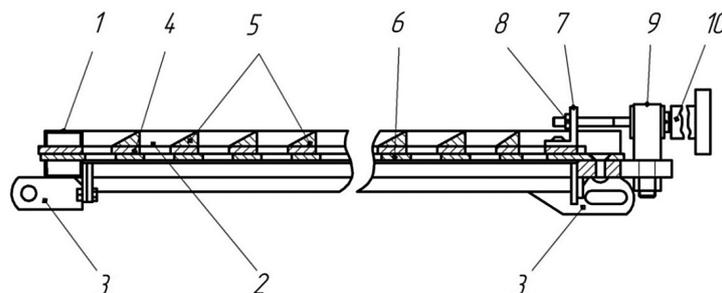


Рис. 2 – Решето с регулируемыми отверстиями:  
1 – рама решета; 2 – направляющие; 3 – кронштейны крепления; 4 – верхнее неподвижное решето; 5 – гофры; 6 – нижнее подвижное решето; 7 – Г-образная пластина; 8 – регулировочная гайка; 9 – опора регулировочного винта; 10 – регулировочный винт

$$v_{\text{отн}} = v_{\text{к}} - v_{\text{взх}} \quad (2)$$

Проекции сил на оси  $x$  и  $y$  опишем выражениями:

$$F_{\text{лс.Х}} = -k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{отн}}^2 (v_{\text{к.Х}} - v_{\text{взх.Х}}), \quad (3)$$

$$F_{\text{лс.У}} = -k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{отн}}^2 (v_{\text{к.У}} - v_{\text{взх.У}}). \quad (4)$$

Вследствие вертикальности силы тяжести маслосемян её проекцию запишем следующим образом:

$$F_{\text{тяж.Х}} = 0, \quad (5)$$

$$F_{\text{тяж.У}} = m_{\text{в}} g. \quad (6)$$

При рассмотрении массы маслосемян  $m_{\text{с}}$  и массы сорных примесей  $m_{\text{ср}}$  запишем приближённые соотношения от линейных размеров:

$$m_{\text{спп}} = z_{\text{спр}} \rho_{\text{спр}} a_{\text{спр}}^3, \quad (7)$$

где  $z_{\text{спр}}$  – коэффициент, учитывающий объём сорных примесей;

$\rho_{\text{спр}}$  – плотность сорных примесей;

$a_{\text{спр}}$  – средние размеры сорной частицы.

Для маслосемян следует учесть, что значительную часть их объёма занимает оболочка, поэтому в приведённом выражении учтём её плотность  $\rho_{\text{o}}$  и средние размеры  $a_{\text{o}}$ :

$$m_{\text{с}} = z_{\text{с}} \rho_{\text{с}} a_{\text{o}}^3 + s_{\text{o}} \rho_{\text{o}} a_{\text{o}}^3, \quad (8)$$

где  $z_{\text{с}}$ ,  $s_{\text{o}}$  – коэффициент, учитывающий объём маслосемян и оболочки;

$\rho_{\text{с}}$ ,  $\rho_{\text{o}}$  – плотность маслосемян и оболочки;

$a_{\text{с}}$ ,  $a_{\text{o}}$  – средние размеры семянки и оболочки.

Будем считать воздушный поток однородным в области падения маслосемян и сорных примесей на решёта, поэтому проекции скорости воздушного потока выразим через угол наклона его направляющих  $\theta$ :

$$v_{\text{взх.Х}} = v_{\text{взх}} \cos\theta, \quad (9)$$

$$v_{\text{взх.У}} = -v_{\text{взх}} \sin\theta. \quad (10)$$

На основании вышеизложенного запишем систему дифференциальных уравнений, описывающих падение маслосемян:

$$m \frac{dv_{\text{взх.Х}}}{dt} = -k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{отн}}^2 (v_{\text{взх.Х}} - v_{\text{взх}} \cos\theta), \quad (11)$$

$$m \frac{dv_{\text{взх.У}}}{dt} = -k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{отн}}^2 (v_{\text{взх.У}} - v_{\text{взх}} \sin\theta) + m_{\text{с}} g. \quad (12)$$

Для данной системы уравнений выразим параметр времени  $T$ :

$$T = \frac{m_{\text{с}}}{k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{взх}}}. \quad (13)$$

Параметр, определяющий степень воздействия силы воздушного потока в сравнении с гравитационной  $\psi$ :

$$\psi = \frac{k_{\text{ГМ}} \rho_{\text{взх}} a^2 v_{\text{взх}}}{m_{\text{с}} g}. \quad (14)$$

Очевидно, что с увеличением  $\psi$  воздушного потока он будет оказывать доминирующее воздействие на движение потока маслосемян, поэтому вероятность выдувания маслосемян и сорных примесей будет определяться приведённой величиной  $\psi$ . В случае  $\psi=0$  потери, связанные с воздействием воздушного потока, будут отсутствовать, в случае  $\psi \rightarrow \infty$  потери маслосемян от воздушного потока будут близки к 100% (т.е. к 1).

В связи с этим, введём выражение потерь маслосемян  $\Pi_{\text{в}}$  аналогично выражению прочности при усталости:

$$\Pi_{\text{в}} = 1 - \exp(-f\psi). \quad (15)$$

Следует отметить, что величина  $f$  является параметром, который не зависит от типа вороха. В зависимости от того, маслосемена это или сорные примеси,  $f$  характеризует конструкцию и геометрию решёт и воздействие воздушного потока.

Зависимость площади регулируемого отверстия  $S_{\text{отв}}$  от величины коэффициента регулируемых отверстий  $\tau$  характеризуется выражением [7]:

$$S_{\tau} = \frac{S_{\text{отв}}(\tau)}{\pi R^2} = \frac{2}{\pi} \left( \arcsin\left(\frac{2\tau}{\tau^2 + 1}\right) - \frac{2\tau(\tau^2 - 1)}{(\tau^2 + 1)^2} \right). \quad (16)$$

**Результаты исследования.** Маслосемена и сорные примеси при прохождении через решёта можно охарактеризовать критическими величинами площадей регулируемых отверстий, при которых они начинают существенно сепарировать сквозь себя маслосемена или сорные примеси –  $S_{\text{с}}$  и  $S_{\text{спп}}$ . Поскольку эти параметры различны между собой ввиду разных геометрических размеров, то это позволяет более точно осуществлять настройку регулируемых отверстий на тот или иной сорт или гибрид.

Пусть сепарация маслосемян и сорных примесей через решето с регулируемыми отверстиями описывается функцией вида:

$$P_{\text{с}} = 1 - \exp\left(-r_{\text{отв}} \frac{S_{\text{отв}}(\tau)}{S_{\text{с}}}\right), \quad (17)$$

где  $r_{\text{отв}}$  – радиус регулируемого отверстия;  
 $\tau$  – коэффициент смещения отверстий (рис. 3).

При различных положениях смещения отверстий коэффициент  $\tau$  будет иметь следующие значения:

- 1)  $\tau = \frac{12}{12} = 1$ ; 2)  $\tau = \frac{10}{11,83} = 0,85$ ;
- 3)  $\tau = \frac{8}{11,31} = 0,70$ ; 4)  $\tau = \frac{6}{10,39} = 0,58$ .

С уменьшением коэффициента  $\tau$  снижается площадь регулируемого отверстия:

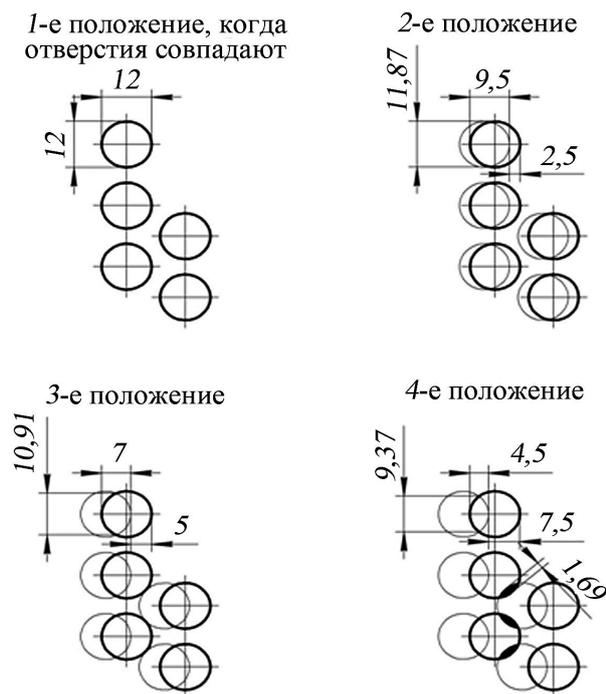


Рис. 3 – Смещение отверстий решета

$$P_{сп} = 1 - \exp\left(-r_{отв} \frac{S_{отв}(\tau)}{S_{сп}}\right). \quad (18)$$

Эффективность воздушного потока с увеличением подачи вороха подсолнечника на решето очистки снижается за счёт лобового столкновения о маслосемена и сорные примеси. Для учёта этой особенности процесса очистки введём величину, характеризующую эффективность воздушного потока:

$$v_{эфф} = v_{взх} - \mu q_B, \quad (19)$$

где  $q_B$  – подача вороха подсолнечника на решёта очистки,

$\mu$  – коэффициент сепарации.

Запишем итоговое выражение для потерь маслосемян, включающее в себя геометрические параметры площади регулируемых отверстий и скорости воздушного потока:

$$P_B = 1 - \left(1 - \exp\left(-r_{отв} \frac{S_{отв}(\tau)}{S_{сп}}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-f \frac{k_{ГМ} \rho_{взх} a^2 (v_{взх} - \mu q_B)^2}{m_c g}\right)\right) \cong$$

$$\cong \exp\left(-r_{отв} \frac{S_{отв}(\tau)}{S_c}\right) + \exp\left(-f \frac{k_{ГМ} \rho_{взх} a^2 (v_{взх} - \mu q_B)^2}{m_c g}\right). \quad (20)$$

**Выводы.** Полученное выражение позволяет охарактеризовать технологический процесс очистки вороха подсолнечника при использовании дополнительного решета с регулируемыми отверстиями с точки зрения потерь маслосемян от воздействия воздушного потока, подобрать рациональное значение коэффициента смещения регулируемых отверстий  $\tau$  с учётом геометрических размеров маслосемян того или иного сорта или гибрида. Как показала экспериментальная проверка, рекомендуемое содержание сорных примесей в проходе вороха подсолнечника сорта Саратовский-20  $C_{ПР} = 2,3\%$  достигается при величине подачи  $q_B = 1,5$  кг/с, скорости воздушного потока  $v_{взх} = 3$  м/с и коэффициенте смещения отверстий  $\tau = 0,7$ ; сорта Лакомка  $C_{ПР} = 2,43\%$  – при  $q_B = 1,5$  кг/с,  $v_{взх} = 3$  м/с,  $\tau = 0,85$ ; сорта Донской  $C_{ПР} = 1,6\%$  – при  $q_B = 1,5$  кг/с,  $v_{взх} = 3$  м/с,  $\tau = 0,58$ .

### Литература

1. Глушков И. Н., Пашинин С. С., Константинов М. М. Агротехнические показатели валков хлебной массы и способы их формирования // Проектирование и организация эффективного процесса уборки зерновых культур / под ред. М. М. Константинова. Екатеринбург, 2011. С. 13–37.
2. Константинов М. М. Рекомендации по снижению потерь и механических повреждений зерна при уборке урожая / М. М. Константинов, А. П. Ловчиков, Б. Н. Нуралин [и др.]. Уральск: Издательский центр ЗГКУ им. М. Утемисова, 2012. 43 с.
3. Ловчиков А. П. Рекомендации по снижению потерь и механических повреждений зерна при уборке урожая. Челябинск, 2012. 40 с.
4. Механизированная технология возделывания и уборки сельскохозяйственной культуры: методич. указан. /сост. А. С. Старцев, Д. Г. Горбань, Н. А. Щербакова; Саратовский ГАУ. Саратов, 2009. 56 с.
5. Пат. 73805 Российская Федерация, МПК В02В 1/02. Решето с регулируемыми отверстиями для очистки зерна различных культур / Попов Ю. И., Попов И. Ю., Попов М. Ю., Старцев А. С. № 2008101299/22; заявл. 09.01.2008; опубл. 10.06.2008. Бюл. № 16. 2 с.
6. Попов И. Ю. Повышение качества очистки вороха подсолнечника при уборке за счёт применения решета с регулируемыми отверстиями: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. / ФГБОУ ВО СГАУ имени Н. И. Вавилова. Саратов, 2013. 299 с.
7. Старцев А. С., Попов И. Ю. Математическое выражение для определения оптимального значения коэффициента смещения отверстий универсального решета с регулируемыми отверстиями при очистке зернового вороха подсолнечника // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2012. № 3. С. 49–51.