

МОДЕЛЬ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ КРЕНЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

С.Ф. Сороченко

В статье представлена модель сепарации зерна в системе очистки зерноуборочного комбайна, работающего на склонах с поперечным креном молотилки. Математическая модель имеет вид показательной зависимости. Неравномерность распределения зернового вороха на решетке оценивается с помощью коэффициента вариации толщины зернового вороха. Предложена методика расчёта коэффициента вариации. Представлены результаты сравнения потерь зерна за системой очистки, полученные экспериментально и по разработанной математической модели.

Ключевые слова: модель сепарации, система очистки, зерноуборочный комбайн, склоны, коэффициент вариации толщины зернового вороха.

Введение

Система очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах, вследствие неравномерного распределения зернового вороха на верхнем решете, является лимитирующим рабочим органом, ограничивающим производительность комбайна.

Различают крутосклонные и косогорные модификации базовой конструкции комбайна. Система очистки в косогорных модификациях комбайна содержит устройства, предназначенные для выравнивания толщины зернового вороха по поверхности верхнего решета.

Модели сепарации зерна, позволяющие оценивать новые конструкции системы очистки косогорных модификаций, должны, в этом случае, учитывать неравномерность распределения зернового вороха по поверхности верхнего решета.

Н.И. Косилов и М.Р. Думанский сход зерна P с решета очистки при неравномерном распределении зернового вороха определяли по зависимости [1]:

$$P = q_Z \cdot \exp(-L_P \mu_P e^{-a_1 \sigma_q^2}), \quad (1)$$

где q_Z - подача зерна на верхнее решето; L_P - длина решета; μ_P - коэффициент сепарации зерна; a_1 - опытный коэффициент, зависящий от подачи и состава вороха; σ_q^2 - дисперсия подачи зернового вороха.

Экспериментальное определение значения параметра σ_q^2 уменьшает область применения формулы (1).

Целью работы является создание математической модели сепарации зерна в системе очистки при поперечном крене молотилки комбайна.

Математическое моделирование

Предположим, что поверхность зернового вороха, находящегося на транспортной доске и верхнем решете, горизонтальна при любом поперечном крене молотилки.

Оценку неравномерности зернового вороха по ширине очистки выполним с помощью относительного параметра - коэффициента вариации

$$V = \frac{\sigma_q}{\bar{q}_B}, \quad (2)$$

где σ_q - среднеквадратическое отклонение подачи зернового вороха по ширине очистки; \bar{q}_B - средняя подача зернового вороха на очистку.

Толщина зернового вороха, поступающего на верхнее решето с транспортной доски, прямо пропорциональна подаче q_B [2]:

$$h_B = \frac{q_B}{V_B \cdot B_T \cdot \gamma}, \quad (3)$$

где V_B - средняя скорость зернового вороха на транспортной доске; B_T - ширина транспортной доски; γ - объемная масса зернового вороха.

В соответствии с формулой (3), значение коэффициента вариации неизменно при его расчёте, как по подаче зернового вороха, так и по его толщине, т.е.

**МОДЕЛЬ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ КРЕНЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

$$V = V_q = V_h,$$

где V_q , V_h - соответственно коэффициенты вариации подачи и толщины зернового вороха по ширине системы очистки.

Коэффициент вариации толщины вороха равен

$$V_h = \frac{\sigma_h}{h_B}, \quad (4)$$

где σ_h - среднеквадратическое отклонение толщины слоя зернового вороха,

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_B)^2}{n-1}}, \quad (5)$$

здесь h_i - толщина зернового вороха на i -ом участке; n - количество участков по ширине рабочего органа (транспортной доски или верхнего решета), на которых определяется толщина слоя вороха.

С учётом изложенных положений, формула (1) примет следующий вид:

$$P = 100 \cdot \exp(-L_P \mu_P e^{-k_1 V_h^{k_2}}), \% \quad (6)$$

где k_1, k_2 - опытные коэффициенты, определяемые для системы очистки базового комбайна.

При отсутствии поперечного крена молотилки зерновой ворох равномерно распределяется по всей ширине транспортной доски - $\sigma_h = 0$, $V_h = 0$ (рисунок 1).

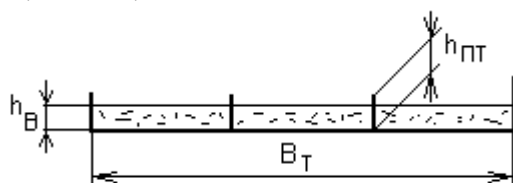


Рисунок 1 – Поперечное сечение транспортной доски ($h_{ПТ}$ - высота продольных гребёнок, установленных на транспортной доске)

Параметры зернового вороха в конце транспортной доски равны [3]:

- площадь поперечного сечения

$$F = h_B \cdot B_T; \quad (7)$$

- площадь поперечного сечения в секции

$$F_C = \frac{F}{k} = B_C \cdot h_B. \quad (8)$$

где k - количество секций транспортной доски, $k = m + 1$ (здесь m - количество продольных гребёнок); B_C - ширина одной секции

$$B_C = \frac{B_T}{k}. \quad (9)$$

При поперечном крене молотилки на угол α возможны следующие варианты распределения зернового вороха в одной секции:

1 вариант - весь зерновой ворох остаётся в секции, а поперечное сечение имеет вид: а) трапеции; б) треугольника;

2 вариант - часть зернового вороха переваливается через продольную гребёнку, при этом поперечное сечение вороха также имеет вид или трапеции (а), или треугольника (б).

Рассмотрим 1 вариант. Параметры зернового вороха в конце транспортной доски в этом случае равны:

а) при распределении зернового вороха по трапеции:

$$F_C = \frac{h_{MAX} + h_{MIN}}{2} \cdot B_C, \quad (10)$$

где h_{MAX} , h_{MIN} - соответственно максимальная и минимальная толщины слоя вороха в секции;

- максимальная толщина вороха

$$h_{MAX} = \frac{F_C}{B_C} + 0,5 \cdot B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (11)$$

- минимальная толщина вороха

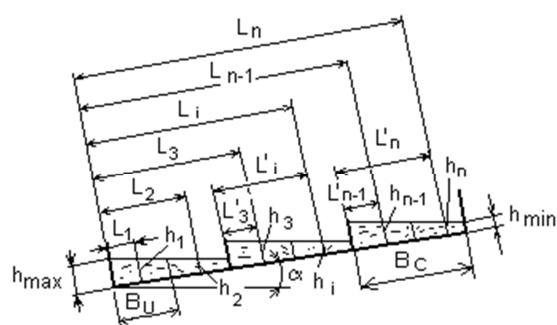
$$h_{MIN} = h_{MAX} - B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (12)$$

- предельный угол, при котором ворох не перемещается в другую секцию (выполняется условие $h_{MAX} = h_{ПТ}$)

$$\alpha_{ПА} = \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot k \cdot (h_{ПТ} - h_B)}{B_T} \right]. \quad (13)$$

Ширина участка, на котором производится расчет толщины вороха, равна:

$$B_U = \frac{B_T}{n}. \quad (14)$$

Рисунок 2 – Схема по определению h_i

Расчёт h_i для варианта 1а

($\alpha < \alpha_{II}$, $h_{MIN} > 0$,

$h_{MAX1} = h_{MAX2} = \dots = h_{MAXN} < h_{IT}$):

для различного числа секций k и при условии

$$(d-1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C,$$

где $L_i = (i-0,5) \cdot B_U$,

$$h_i = h_{MAX} -$$

$$- ((i-0,5) \cdot B_U - (d-1) \cdot B_C) \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (15)$$

при этом $d \in [1..k]$, здесь d - номер секции; h_{MAX} - определяется по формуле (11).

б) при распределении зернового вороха по треугольнику:

- площадь поперечного сечения в секции

$$F_C = \frac{h_{MAX}^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}; \quad (16)$$

- максимальная толщина вороха:

$$h_{MAX} = \sqrt{2 \cdot F_C \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (17)$$

- предельный угол, при котором ворох не перемещается в другую секцию

$$\alpha_{II} = \operatorname{arctg} \left[\frac{k \cdot h_{IT}^2}{2 \cdot h_{BT} \cdot B_T} \right]. \quad (18)$$

Условие распределения: $\alpha < \alpha_{II}$, $h_{MIN} \leq 0$.

Значения h_i определяются так же, как и в предыдущем варианте, а значение h_{MAX} -

определяется по формуле (17). Если $h_i < 0$, то следует принять $h_i = 0$.

2 вариант.

Если $\alpha > \alpha_{II}$, то часть вороха переходит в другую секцию. Параметры вороха определены, исходя из предположения, что ворох переместится в крайнюю секцию, заполнит ее, затем заполнит следующую и т.д.

Распределение зернового вороха по треугольнику в этом случае будет, когда

$$B_C' \leq B_C, \quad (19)$$

где

$$B_C' = h_{IT} / \operatorname{tg} \alpha.$$

При распределении вороха по треугольнику его площадь поперечного сечения в секции равна

$$F_C'' = \frac{h_{IT}^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (20)$$

при распределении по трапеции -

$$F_C'' = B_C \cdot h_{IT} - 0,5 B_C^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (21)$$

Площадь поперечного сечения в крайней, наиболее загруженной секции, определена как сумма площади вороха, который остался в этой секции и площади всех остатков вороха, который не вошел в остальные секции, т.е.

$$F_K = F_C + \sum_{j=1}^{k-1} (F_C - F_C''). \quad (22)$$

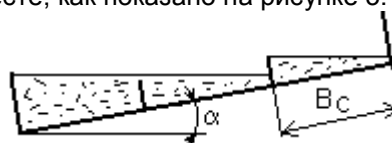
Условие полного заполнения секции имеет вид:

$$h_{MINK} \leq h_{IT}, \quad (23)$$

при этом $h_{MAXK} = h_{MINK} + B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha$,

$$h_{MINK} = \frac{F_K}{B_C} - 0,5 \cdot B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (24)$$

Если $h_{MINK} > h_{IT}$, то часть вороха остается в предпоследней секции, причем последняя и предпоследняя секции загружаются вместе, как показано на рисунке 3.

Рисунок 3 – Распределение зернового вороха при условии $\alpha > \alpha_{II}$

МОДЕЛЬ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ КРЕНЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Для этого случая

$$F_{K2} = 2 \cdot F_C + \sum_{j=1}^{k-2} (F_C - F_C''). \quad (25)$$

Вариант 2а(1) – часть вороха переходит в крайнюю секцию, которая становится более загруженной ворохом, в сравнении с остальными, в которых ворох распределен по трапеции.

Рассматриваемый вариант характеризуется следующими условиями:

а) $\alpha > \alpha_{IIA}$;

б) $h_{MIN} > 0$;

в) минимальная высота в крайней секции меньше высоты перегородок, т.е.

$$h_{MINK} \leq h_{ITT},$$

где h_{MINK} определяется по формуле (24);

г) максимальная высота вороха в крайней секции определяется по формуле:

$$h_{MAXK} = \frac{F_K}{B_C} + \frac{B_C}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (26)$$

где F_K - определяется по формуле (22);

д) значение F_C определяется по формуле (8), а F_C'' - по формуле (21);

е) значение h_{MAX} в остальных секциях равно высоте перегородок, т.е.

$$h_{MAX} = h_{ITT}.$$

В соответствии с указанными особенностями, значения h_i в первой секции при условии

$$0 < L_i \leq B_C,$$

здесь $L_i = (i - 0,5) \cdot B_U$,

равны

$$h_i = h_{MAXK} - [(i - 0,5) \cdot B_U] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (27)$$

а для остальных секций ($2 \leq d \leq k$; $(d - 1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C$; $L_i = (i - 0,5) \cdot B_U$),

$$h_i = h_{ITT} -$$

$$- [(i - 0,5) \cdot B_U - (d - 1) \cdot B_C] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (28)$$

Вариант 2а(2) – минимальная высота в крайней секции больше высоты перегородок, т.е. когда две крайние секции загружены зерновым ворохом вместе, остальные секции загружены по трапеции:

а) $\alpha > \alpha_{II}$;

б) $h_{MIN} > 0$;

в) $h_{MINK} > h_{ITT}$,

где h_{MINK} определяется по формуле (24);

г) максимальная высота в крайних секциях определяется по формуле (26);

д) значения F_C и F_C'' определяются так же, как в виде 2а(1);

е) $h_{MAX} = h_{ITT}$.

При выполнении условия

$$0 < L_i \leq 2 \cdot B_C,$$

где $L_i = (i - 0,5) \cdot B_U$,

$$h_i = h_{MAXK2} - [(i - 0,5) \cdot B_U] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (29)$$

для остальных секций, при

$$3 \leq d \leq k,$$

$$(d - 1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C,$$

$$L_i = (i - 0,5) \cdot B_U,$$

$$h_i = h_{ITT} -$$

$$- [(i - 0,5) \cdot B_U - (d - 1) \cdot B_C] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (30)$$

Вариант 2б – часть вороха переходит в крайнюю секцию, которая становится более загруженной ворохом, в остальных секциях ворох распределен по треугольнику:

а) $\alpha > \alpha_{II}$;

б) $h_{MIN} \leq 0$;

в) минимальная высота в крайней секции меньше высоты перегородок, т.е.

$$h_{MINK} \leq h_{ITT},$$

где h_{MINK} определяется по формуле (24);

г) максимальная высота вороха в крайней секции определяется по формуле (26);

д) значение F_C определяется по формуле (8), а F_C'' - по формуле (20);

е) значение h_{MAX} в остальных секциях равно высоте перегородок, т.е. $h_{MAX} = h_{ITT}$;

ж) если $h_i < 0$, то принимаем $h_i = 0$.

В соответствии с указанными условиями значения h_i в первой секции при выполнении условия:

$$0 < L_i \leq B_C, \quad \text{здесь } L_i = (i - 0,5) \cdot B_U,$$

равны

$$h_i = h_{MAXK} - [(i - 0,5) \cdot B_U] \cdot tg\alpha, \quad (31)$$

а для остальных секций при $2 \leq d \leq k$,

$$(d - 1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C,$$

$$h_i = (i - 0,5) \cdot B_U,$$

$$h_i = h_{III} -$$

$$- [(i - 0,5) \cdot B_U - (d - 1) \cdot B_C] \cdot tg\alpha, \quad (32)$$

причем если $h_i < 0$, то принимаем

$$h_i = 0.$$

Полученные результаты и их анализ

Представленная методика расчёта коэффициента вариации толщины зернового вороха, реализована в виде программы для системы объектно-ориентированного программирования Delphi. На рисунке 4 представлены графики зависимости потерь зерна за системой очистки от поперечного крена молотилки. Экспериментальные точки получены на стенде системы очистки зерноуборочного комбайна третьего класса при следующих параметрах: подаче зернового вороха - 3 кг/с; содержании соломистой фракции в ворохе - 30 %; количестве продольных гребенок $m = 2$, высоте гребенок $h_{III} = 0,05$ м. Теоретическая кривая получена по формуле (6) - модели сепарации (значения V_h рассчитаны по представленной методике; $\mu_p = 5,1 м^{-1}$; $k_1 = 1,15$; $k_2 = 1,3$).

Хорошая сходимость результатов, полученных экспериментально и теоретически, подтверждает адекватность разработанной модели сепарации.

Выводы

Предложена модель сепарации зерна, в которой для оценки неравномерности зернового вороха применён коэффициент вариации, рассчитанный теоретически.

Результаты, рассчитанные по модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает её адекватность.

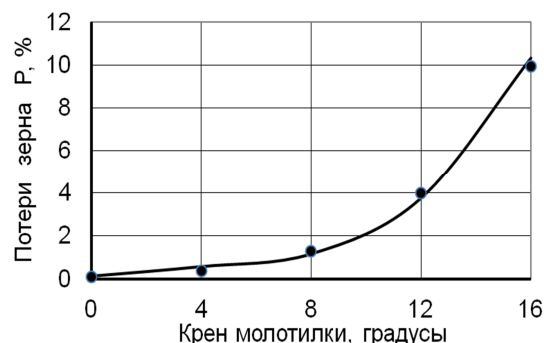


Рисунок 4 – График зависимости потерь зерна за системой очистки от поперечного крена молотилки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косилов, Н.И. О целесообразности применения устройств для разравнивания и дозирования зернового вороха при его разделении [Текст] / Н.И. Косилов, М.Р. Думанский // Совершенствование технологий и технических средств для уборки и послеуборочной обработки зерновых культур: сб. науч. трудов ЧИМЭСХ.- Челябинск, 1983. – С.57-62.
2. Алферов, С.А. Воздушно-решетные очистки зерноуборочных комбайнов [Текст] / С.А. Алферов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 160 с.
3. Сороченко, С.Ф. Влияние поперечного крена молотилки зерноуборочного комбайна на неравномерность подачи зернового вороха [Текст] / С.Ф. Сороченко // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004.-С.66-78.

Сороченко С.Ф. - к.т.н., доцент, профессор кафедры «Сельскохозяйственное машиностроение», АлтГТУ им. И.И. Ползунова,

тел. (3852) 29-09-42,

E-mail: sorochenkosf@list.ru