

## Экспериментально-теоретическое обоснование конструкции и диаметра трубного вала шнека-мотовила жатки для уборки подсолнечника

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

При проектировании и разработке современных уборочных машин необходимо ориентироваться на различные физико-механические свойства и геометрические особенности убираемых культур, которые могут варьироваться в широких пределах [1, 2].

**Материал и методы исследования.** На кафедре «Процессы и сельскохозяйственные машины в АПК» Саратовского ГАУ была разработана конструкция шнека-мотовила специализированной жатки для уборки подсолнечника [3].

Шнек-мотовило состоит из трубного вала 1, оснащённого двусторонней навивкой 2, к которому жёстко крепятся Г-образные отсекатели 3. Конструкция оснащена стеблеподъёмниками 4 (рис. 1).

Работает приспособление следующим образом. Зерноуборочный комбайн входит в стеблестой подсолнечника стеблеподъёмниками 4, разделяя его по междурядьям. Захват стеблей осуществляется

витками 2 шнека и отсекателями 3, в процессе чего происходит наклон стеблей витками к центру шнека-мотовила таким образом, чтобы корзинки оказались над днищем жатки. В результате этого снижается ускорение движения корзинок и семечки осыпаются над днищем жатки. Стебли, не захватываемые отсекателями 3, попадают под воздействие витков 2 шнека, которые также наклоняют их к центру днища жатки. Вследствие этого удаётся избежать прямого удара корзинок подсолнечника о трубный вал шнека-мотовила и, как следствие, осыпания семечек с последующим отбросом их за пределы бокового фартука 5.

Определяющим значением работы разработанной конструкции являлось определение влияния величины диаметра трубного вала и трубного вала с навивкой на осыпаемость семечек подсолнечника, а также влияния ускорения движения корзинок  $w_{\text{корз}}$  на величину потерь семечек.

Для определения зависимости ускорения движения корзинок  $w_{\text{корз}}$  от осыпаемости семечек была

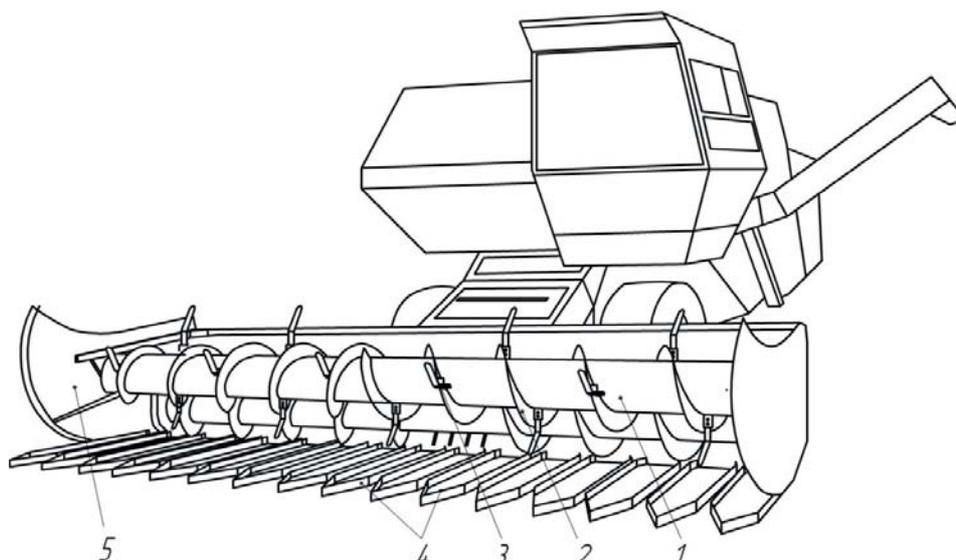


Рис. 1 – Шнек-мотовило:

1 – трубный вал; 2 – витки шнека; 3 – отсекатели; 4 – стеблеподъёмники; 5 – боковой фартук

изготовлена экспериментальная установка (рис. 2), в которой закреплялись специальные фрагменты трубного вала и трубного вала с навивкой, имеющие разные диаметры.

Лабораторная установка состояла из основания 1, к которому жёстко крепились упоры 2 основания, также жёстко сопряжённые со стойками 3. Стойки 3 верхними концами соединялись перемычкой 4, в центре которой шарнирно подвешивали трубу 5 с расширенным участком 6, в который вставляли фрагмент 7 стебля подсолнечника с корзинкой.

Стойки 3 в нижней части соединялись осью 9 с установленным на ней фрагментом 8 трубного вала мотовила. Ось 9 прикреплена к стойкам 3 с помощью хомутов 10, позволяющих перемещать фрагмент трубного вала вертикально по стойкам в зависимости от вида удара о него корзинки или стебля.

Точное обозначение отклонения подвеса обеспечивается градуированным сектором 11, установленным в верхней части стойки 3. Сбор осыпавшихся семян в результате контакта части растения с фрагментом трубного вала мотовила производился в лоток 12, в котором находилось основание 1 установки.

**Целью** лабораторных экспериментов являлось исследование зависимости осыпаемости семян от скорости движения комбайна (величина отклонения подвеса) и диаметра трубного вала шнека-мотовила.

За критерий принимали величину осыпаемости семян, которую выражали в штуках и процентном отношении ( $\nu$ ) к биологической урожайности [4]. К основным факторам относили диаметр фрагмента трубного вала мотовила  $D_{\text{вал}}$  ( $x_1$ ) и угол отклонения подвеса  $\alpha$  ( $x_2$ ).

Назначали пять уровней варьирования: 0,32 м; 0,32 м с витком шнека  $H_{\text{вит}} = 0,15$  м; 0,38; 0,44; 0,5 м.

Общая длина подвеса с фрагментом растения составляла 0,164 м, масса подвеса – 2753 г.

Предварительное исследование, которое проводили при  $D_{\text{вал}} = 0,3$  м и угле отклонения  $\alpha = 40^\circ$ , показало, что в трёх случаях из десяти наблюдался излом стебля при его контакте с фрагментом трубного вала мотовила. Поэтому исследование фрагментов трубного вала мотовила проводили начиная с  $D_{\text{вал}} = 0,32$  м.

**Результаты исследования.** Для назначения уровней варьирования угла отклонения  $\alpha(x_2)$  была разработана математическая модель перевода угла отклонения  $\alpha$  в линейную скорость движения комбайна.

Очевидно, что разработанную лабораторную установку можно рассматривать как физический маятник, нижняя точка которого ударяется о трубный вал мотовила (рис. 2).

В точке удара о трубу угол подвеса с вертикалью составит [5]:

$$\alpha_{\text{удар}} = \arcsin\left(\frac{D_{\text{вал}}}{2l_{\text{м}}}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{удар}}$  – угол подвеса с вертикалью в точке удара, рад;

$D_{\text{вал}}$  – диаметр трубного вала, о который происходит удар, м;

$l_{\text{м}}$  – приведённая длина физического маятника (длина подвеса), м.

Дифференциальные уравнения колебаний физического маятника в зависимости от силы тяжести примут вид:

$$I_{\text{м}} \frac{d^2 \alpha_{\text{удар}}}{dt^2} = mgh_{\text{м}} \sin(\alpha_{\text{удар}}); \quad (2)$$

$$l_{\text{м}} \frac{d^2 \alpha_{\text{удар}}}{dt^2} = g \sin(\alpha_{\text{удар}}), \quad (3)$$

где  $I_i$  – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса, кг·м<sup>2</sup>;

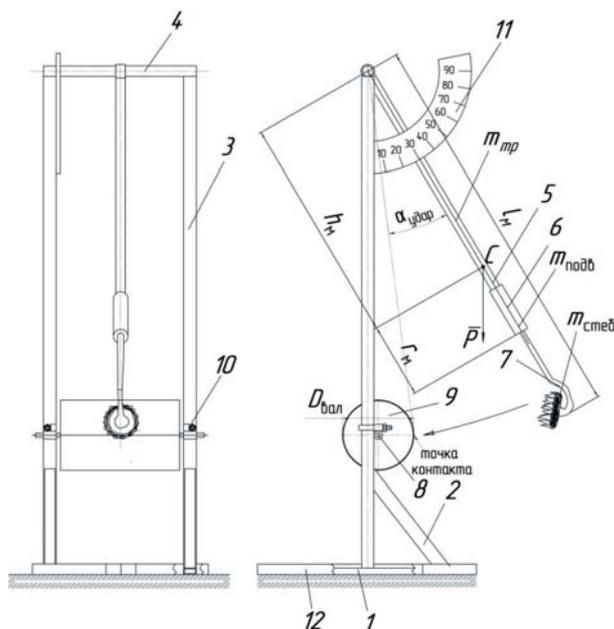


Рис. 2 – Экспериментальная установка:

1 – основание; 2 – упор основания; 3 – стойка; 4 – перемычка; 5 – труба; 6 – участок трубы; 7 – фрагмент части растения; 8 – фрагмент трубного вала мотовила; 9 – ось крепления; 10 – хомут; 11 – градуированный сектор; 12 – лоток; C – центр тяжести маятника;  $h_M$  – расстояние от точки вращения до центра тяжести маятника;  $g$  – сила тяжести маятника;  $l_M$  – приведённая длина физического маятника;  $r_M$  – радиус инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести

$m$  – суммарная масса подвеса, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h_M$  – расстояние от точки подвеса до центра тяжести маятника, м;

$l_M$  – приведённая длина подвеса, м.

Суммарная масса подвеса составит:

$$m = m_{тр} + m_{подв} + m_{стеб}, \quad (4)$$

где  $m_{тр}$  – масса подвеса 5 (рис. 2), кг;

$m_{подв}$  – масса участка 6 подвеса, кг;

$m_{стеб}$  – масса стебля с корзинкой, кг.

Массу стебля  $m_{стеб}$  для проведения испытаний принимали равной 0,730 кг с отклонением  $\pm 0,020$  кг.

Решение уравнений (2) и (3) будет иметь вид:

$$l_M = \frac{I_M}{mh_M} = \frac{m(r_M^2 + h_M^2)}{mh_M} = \frac{r_M^2}{h_M} + h_M, \quad (5)$$

где  $r_M$  – радиус инерции маятника относительно оси, проходящей через центр тяжести, м;

$$r_M = \sqrt{\frac{I_c}{m}} = \sqrt{\frac{\rho l_M I_M}{m}} = \sqrt{\frac{\rho l_M m (r_1^2 + r_2^2)}{2m}} = \sqrt{\frac{\rho l_M (r_1^2 + r_2^2)}{2}}, \quad (6)$$

$\rho$  – суммарная плотность подвеса (т.к. плотность стали, из которой изготовлен подвес, значительно превышает плотность стебля подсолнечника, считаем суммарную плотность равной плотности стали) кг/м<sup>3</sup>;  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;

$r_M = 1,588$  м;

$r_1$  и  $r_2$  – внутренний и внешний радиусы трубы, м.

Уравнения (2) и (3) аналогичны уравнению колебаний математического маятника длиной  $l_M$ . Преобразуем их к виду:

$$l_M \frac{d\alpha_{удар}}{dt} \cdot \frac{d^2\alpha_{удар}}{dt^2} = -g \sin(\alpha_{удар}) d\alpha_{удар}. \quad (9)$$

Линейная скорость равна произведению угловой скорости точки на расстояние от центра вращения до этой точки. Следовательно, в момент удара линейная скорость будет равна:

$$v_{удар} = l_M \frac{d\alpha}{dt} = 2\sqrt{gl_M} \sqrt{\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_{вал}}{2l_M}\right)^2}}{2}}. \quad (10)$$

Учитывая полученные значения углов и диаметров и задавшись технологически возможной скоростью движения комбайна при уборке подсолнечника, составили таблицу зависимости потерь семян от скорости удара [6].

По таблице видно, что максимальным углом отклонения подвеса будет являться угол  $\alpha$ , равный 90°. Очевидно, что скорость 6,39 м/с (23,06 км/ч)

Скорость удара корзинки и стебля о фрагмент трубного вала

Угол отклонения подвеса $\alpha$		Диаметр трубного вала ( $D_{вал}$ ), м				
		с навивкой	без навивки			
град.	рад	0,32	0,32	0,38	0,44	0,5
10	0,174533	0,71	0,71	0,68	0,63	0,58
20	0,349066	1,54	1,54	1,52	1,50	1,48
30	0,523599	2,32	2,32	2,31	2,30	2,29
40	0,698132	3,08	3,08	3,08	3,07	3,06
50	0,872665	3,82	3,82	3,81	3,80	3,80
60	1,047198	4,52	4,52	4,52	4,51	4,50
70	1,22173	5,19	5,19	5,19	5,18	5,18
80	1,396263	5,82	5,82	5,82	5,81	5,81
90	1,570796	6,41	6,41	6,40	6,40	6,39

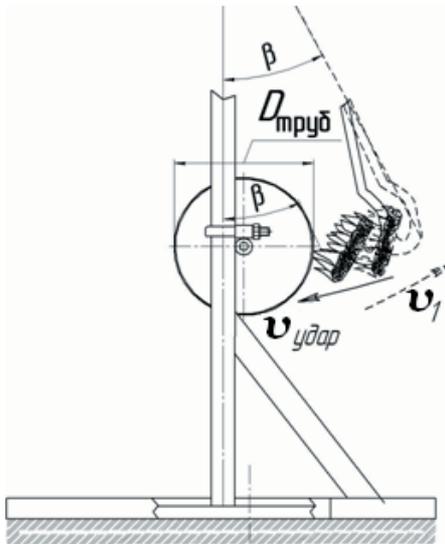


Рис. 3 – Определение скорости отбрасывания корзинки от трубного вала мотвила



Рис. 4 – Проведение экспериментальных опытов по исследованию осыпаемости семян подсолнечника

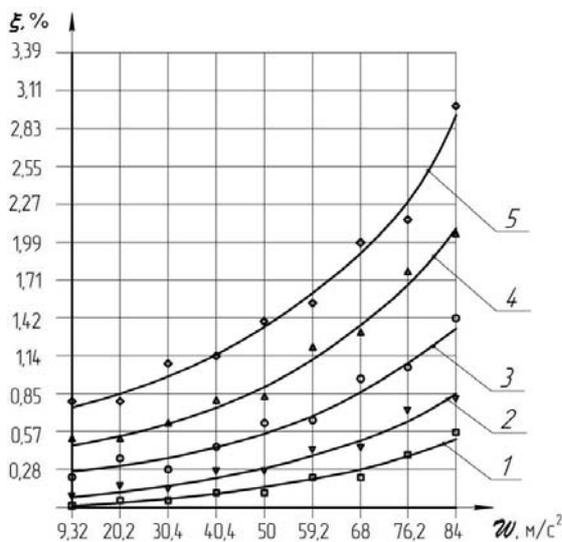


Рис. 5 – Зависимость потерь семян подсолнечника на 1 м<sup>2</sup> ξ,%, от ускорения движения корзинки w<sub>корз</sub>, м/с<sup>2</sup>, при ударе её о трубный вал мотвила

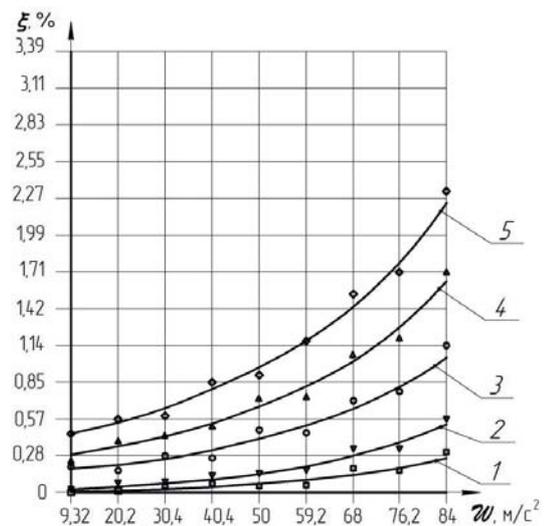


Рис. 6 – Зависимость потерь семян подсолнечника на 1 м<sup>2</sup> ξ,%, от ускорения движения корзинки w<sub>корз</sub>, м/с<sup>2</sup>, при ударе стебля о трубный вал мотвила

технологически невозможна для уборки подсолнечника, но для полноценности эксперимента можно оставить данный уровень варьирования. Таким образом, уровни варьирования отклонения угла подвеса α (x<sub>2</sub>) составят от 10 до 90 град.

В ходе эксперимента были получены данные о потерях семян в результате удара стебля и корзинки подсолнечника о трубный вал и времени отбрасывания корзинки t<sub>отбр</sub>.

Ускорение движения корзинки w<sub>корз</sub> зависит от скорости отбрасывания её v<sub>1</sub> от трубного вала мотвила после удара (рис. 3), которую определяли при угле β.

Скорость отбрасывания корзинки (v<sub>1</sub>) рассчитываем по формуле [5]:

$$v_{1м} = 2\sqrt{gl} \sqrt{\sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) - \frac{1 - \sqrt{\left(\frac{D_{вал}}{2l_m}\right)^2}}{2}}, \quad (11)$$

где β – угол, на который происходит отбрасывание корзинки, рад.;

коэффициент восстановления – по формуле:

$$k = \frac{v_1}{v_{удар}}; \quad (12)$$

ускорение движения корзинки – по формуле:

$$w_{корз} = \frac{v_1 + v_{удар}}{t_{отбр}} = \frac{v_{удар}(1+k)}{t_{отбр}}, \quad (13)$$

где t<sub>отбр</sub> – момент времени, за который происходит отбрасывание корзинки, с.

Эксперимент проводили следующим образом. Фрагмент 7 стебля подсолнечника (рис. 2) плотно вводили в расширенный участок 6 подвеса с таким расчётом, чтобы в момент контакта (удара) корзинка или часть стебля соприкасалась с центральной точкой фрагмента 8 трубного вала мотовила. Подвес отклоняли на определённый градуированным сектором угол, фиксировали в заданном положении и отпускали (рис. 4).

Определяли угол отбрасывания корзинки  $\beta$  от поверхности трубного вала мотовила за момент времени  $t_{отбр}$ , который фиксировался секундомером.

Исследование проводили в двух возможных положениях корзинки и стебля при контакте с рабочими органами мотовила: соприкосновение с трубным валом мотовила выпуклой частью и контакт трубного вала мотовила с верхней частью стебля.

Снижение потерь семян подсолнечника  $\xi_{корз}$  удар,  $\xi_{стеб}$  при контакте корзинки или стебля с витком шнека-мотовила объясняется тем, что наличие навивки позволяет уменьшить ускорение движения корзинки  $w_{корз}$ , вследствие чего происходит смягчение удара о поверхность трубного вала.

По данным таблицы методом наименьших квадратов были получены уравнения полиномов зависимости потерь семян от ускорения столкновения корзинки и стебля подсолнечника с рабочими органами мотовила с навивкой и без навивки. На основании уравнений построили графические зависимости потерь семян  $\xi$  от ускорения движения корзинки  $w_{корз}$  (рис. 5, 6). Штучные потери семян переводили в процентные значения от биологической урожайности [4].

Зависимости были построены в графическом редакторе Advanced Grapher путём внесения в программу данных о потерях семян подсолнечника в зависимости от диаметра фрагмента трубного вала мотовила и угла отклонения подвеса.

На рисунках 5 и 6 цифрой 1 обозначен трубный вал мотовила  $\varnothing 0,32$  м с витком шнека шириной  $H_{вит} = 0,15$  м; 2 – трубный вал мотовила  $\varnothing 0,32$  м без навивки; 3 – трубный вал мотовила  $\varnothing 0,38$  м без навивки; 4 – трубный вал мотовила  $\varnothing 0,44$  м без навивки; 5 – трубный вал шнека-мотовила  $\varnothing 0,5$  м без навивки. Данные экспериментальные зависимости описываются соответствующими уравнениями регрессии.

При ударе корзинки о трубный вал мотовила уравнения имеют вид:

$$1. Y(x) = 0,2375592 \exp^{0,0033576x}. \quad (14)$$

$$2. Y(x) = 0,2017583 \exp^{0,0023895x}. \quad (15)$$

$$3. Y(x) = 3,4465902 \exp^{0,00175x}. \quad (16)$$

$$4. Y(x) = 6,6306162 \exp^{0,0014904x}. \quad (17)$$

$$5. Y(x) = 10,9661856 \exp^{0,0012996x}. \quad (18)$$

Как показывают зависимости, с уменьшением диаметра трубного вала  $D_{вал}$  потери семян подсолнечника снижаются. При его уменьшении с 0,5 до 0,32 м потери семян снижаются с 1,12 до 0,28% при  $\alpha_{откл} = 30^\circ$ . Кроме того, уменьшение потерь семян наблюдается и при контакте корзинки с навивкой шнека-мотовила. В сравнении с фрагментом трубного вала  $D_{вал} = 0,32$  м эти потери ниже в среднем на 15% [4].

Снижение потерь от контакта с навивкой наблюдается при каждом шаге варьирования угла отклонения.

При ударе стебля о трубу уравнения примут вид:

$$1. Y(x) = 0,5765151 \exp^{0,0017647x}. \quad (19)$$

$$2. Y(x) = 0,7457632 \exp^{0,0022760x}. \quad (20)$$

$$3. Y(x) = 2,1644206 \exp^{0,0019454x}. \quad (21)$$

$$4. Y(x) = 3,9368855 \exp^{0,0017623x}. \quad (22)$$

$$5. Y(x) = 6,4074361 \exp^{0,0015819x}. \quad (23)$$

Однако с увеличением ускорения движения корзинки  $w_{корз}$  потери семян при контакте с навивкой шнека-мотовила увеличиваются. Максимальные составляют 0,57% при ускорении движения корзинки до 84 м/с<sup>2</sup>, что в реальных производственных условиях недопустимо.

**Вывод.** Для снижения потерь семян подсолнечника при уборке необходимо придерживаться технологической скорости движения комбайна и целесообразно оснащение жатки шнеком-мотовилом.

### Литература

1. Пат. 2523847 РФ, МПК А01D34/00 Валковая жатка / М.М. Константинов, С.С. Пашинин, И.Н. Глушков, А.Н. Кондрашов Заявл. 04.05.2012; опубл. 27. 07. 2014. Бюл. № 21.
2. Пат. 2362293 РФ, МПК А 01 D 45/02. Кукурузоуборочный комбайн / Е.В. Труфляк, В.С. Кравченко, Е.И. Трубилин. Заявл. 19.11.2008; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 21.
3. Пат. 72115 РФ, МПК А 01 D 34/00 / Ю.И. Попов, И.Ю. Попов, М.Ю. Попов, А.С. Старцев. Заявл. 10.12.2007; опубл. 10.04.2008. Бюл. № 10.
4. Константинов М.М., Глушков И.Н. Оценка уровня потери зерна за порционной жаткой, оснащённой устройством для образования стерневых кулис // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (59). С. 86–89.
5. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Астрель, 2006. 509 с.
6. Константинов М.М., Глушков И.Н., Пашинин С.С. Обоснование соотношения скоростей накопительного транспортера и энергосредства порционной жатки // Научное обозрение. 2015. № 11. С. 24–30.