

Научная статья

УДК 631.354.2

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-77-85

## Характеристики движения частиц зернового вороха при его обработке на конвейерной очистке в зерноуборочном комбайне

Аламахад Дошаевич Бекаров<sup>1</sup>, Владислав Хасенович Мишхожев<sup>2</sup>,  
Алий Халисович Габаев<sup>✉3</sup>

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

<sup>1</sup>alamahad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2484-1747>

<sup>2</sup>mvkxxx@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-3771>

<sup>3</sup>alii\_gabaev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-9804>

**Аннотация.** Конвейерная очистка представляет собой инновационный механизм для отделения зернового вороха в зерноуборочных комбайнах. Этот механизм оснащен вибратором, который вызывает малоамплитудные локальные колебания различных участков верхней рабочей ветви конвейерного решета. Эти вибрации значительно ускоряют процесс сепарации вороха. Вибратор оборудован пассивными роликами, установленными под несущими цепями верхней рабочей ветви решета к левой и правой боковым панелям комбайна. В процессе движения решета ролики несущей цепи сталкиваются с роликами вибратора, вызывая их подпрыгивание. Поскольку на вибраторе установлено несколько роликов с каждой стороны (5–7 штук), а расстояние между роликами несущей цепи составляет 19,05 мм, практически вся длина решета подвергается местным вибрациям. Это способствует интенсификации процесса сепарации. В статье рассматриваются различные варианты расположения конвейерного решета в комбайне: горизонтально или под углом к горизонтальной плоскости (наклонно), а также при движении комбайна по ровному полю без уклонов и по полю с уклонами (продольными или поперечными относительно направления движения комбайна); предлагаются аналитические выражения для определения ключевых параметров перемещения частиц зернового вороха, подброшенных с решета при срабатывании вибратора, в зависимости от вышеуказанных условий. Эти параметры включают максимальную дальность и высоту перемещения, среднюю скорость и продолжительность перемещения относительно решета. Аналитические выражения показывают, что основные параметры зависят от скорости движения решета, а также от углов, характеризующих момент соударения роликов несущей цепи и вибратора. Величина этих углов определяется размерами контактирующих роликов и положением решета в комбайне – горизонтально или под углом.

**Ключевые слова:** комбайн, очистка, ворох, примеси, зерно, полнота, выделение, секция, поток, содержание, чистота, потери

**Для цитирования:** Бекаров А. Д., Мишхожев В. Х., Габаев А. Х. Характеристики движения частиц зернового вороха при его обработке на конвейерной очистке в зерноуборочном комбайне // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 4(50). С. 77–85. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-77-85

Original article

## Characteristics of grain particle movement during its processing on a conveyor cleaning system in a grain harvester

Alamakhad D. Bekarov<sup>1</sup>, Vladislav Kh. Mishkhozhev<sup>2</sup>, Aliy Kh. Gabaev<sup>✉3</sup>

Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue,  
Nalchik, Russia, 360030

<sup>1</sup>alamahad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2484-1747>

<sup>2</sup>mvkkkk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-3771>

<sup>3</sup>alii\_gabaev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-9804>

**Abstract.** The conveyor cleaning system is an innovative mechanism for separating grain heap in combine harvesters. This mechanism is equipped with a vibrator, which causes low-amplitude localized vibrations in various sections of the upper working branch of the conveyor sieve. These vibrations significantly accelerate the heap separation process. The vibrator is equipped with passive rollers mounted under the carrier chains of the upper working branch of the sieve, located on the left and right side panels of the combine. As the sieve moves, the carrier chain rollers collide with the vibrator rollers, causing them to bounce. Since the vibrator has several rollers on each side (5–7) and the distance between the carrier chain rollers is 19.05 mm, virtually the entire length of the sieve is subject to localized vibrations. This intensifies the separation process. This article examines various options for the conveyor sieve position in a combine harvester: horizontally or at an angle to the horizontal plane (inclined), as well as when the combine is moving on a flat field and on a field with slopes (longitudinal or transverse relative to the combine's direction of travel). The authors propose analytical expressions for determining the key parameters of grain particle movement, ejected from the sieve when the vibrator is activated, depending on the above conditions. These parameters include the maximum distance and height of movement, the average speed, and the duration of movement relative to the sieve. The analytical expressions show that the key parameters depend on the sieve speed, as well as the angles characterizing the moment of impact of the rollers of the carrier chain and the vibrator. The magnitude of these angles is determined by the size of the contacting rollers and the position of the sieve in the combine harvester – horizontal or at an angle.

**Keywords:** combine, cleaning, heap, impurities, grain, completeness, separation, section, flow, content, purity, losses

**For citation:** Bekarov A.D., Mishkhozhev V.Kh., Gabaev A.Kh. Characteristics of grain particle movement during its processing on a conveyor cleaning system in a grain harves. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;4(50):77–85. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-77-85

**Введение.** Конвейерная очистка – перспективный рабочий орган зерноуборочного комбайна, обладающий рядом преимуществ по сравнению с ветро-решетной очисткой, широко используемой уже много лет на зерноуборочных комбайнах (как отечественного, так и зарубежного производства) для очистки зернового вороха. В числе этих преимуществ можно привести следующие: безинерционность, более высокая производительность, мизерное количество потерь (десятые – сотые доли процента в зависимости от характеристик поступившего на очистку вороха).

Конвейерная очистка состоит из решетчатого конвейера с вибратором и вентилятором, на который поступает очищаемый ворох. Для интенсификации процесса сепарации вороха под верхними ветвями контуров цепи решетчатого конвейера установлен вибратор, создающий во время работы очистки малоамплитудные местные колебания (вибрации)

почти по всей длине верхней рабочей ветви конвейерного решета [1–3].

Вибратор состоит из двух отрезков стандартных профилей – уголков 30×40 мм, закрепляемых к боковым панелям комбайна под верхними ветвями несущей цепи решетчатого конвейера. К этим уголкам на определенном расстоянии друг от друга приварены короткие оси, на которые надеты бочкообразные по форме ролики [4, 5].

При движении конвейерного решета ролики его цепи, встречая на своем пути ролики вибратора, соударяются и подскакивают на небольшую высоту. Аналогичное движение происходит на всем участке решета. Высота, на которую подскакивает участок решета мала, поэтому происходят малоамплитудные колебания решета (вибрация), что интенсифицирует процесс сепарации обрабатываемого вороха. Ролики вибратора пассивные, они могут проворачиваться каждый на своей оси

только при встрече с роликами несущих двух цепей конвейерного решета [6, 7].

**Цель исследования.** Материал, изложенный в данной статье, является составной частью теоретических предпосылок в исследовании конвейерной очистки (сепаратора зернового вороха комбайна), установлении рациональных параметров и режимов работы этого рабочего органа зерноуборочного комбайна теоретически, а затем и экспериментально. Данная статья является одним из этапов в достижении этой цели.

**Материалы, методы и объекты исследования.** В определении параметров движения частиц зернового вороха, обрабатываемого конвейерной очисткой зерноуборочного комбайна, использованы методы физики, теоретической механики и математики.

**Результаты исследования.** Ранее [8, 9] было установлено, что при контакте друг с другом роликов несущей цепи решета и вибратора происходит удар, в результате которого возникает импульс силы, действующий на частицу вороха, находящуюся на решете в этом месте, где произошел удар:

$$S = mV_{\pi}\sqrt{\sin^2\alpha + K^2\cos^2\alpha}, \quad (1)$$

где

$m$  – масса частицы, г;

$V_{\pi}$  – скорость конвейерного решета, м/с;

$\alpha$  – угол между горизонталью и прямой, проведенной через центры контактирующих роликов в момент контакта (удара);

$K$  – коэффициент восстановления, определяемый опытным путем и для стали равный  $K=5/9$ . Значение  $K$  берем для стали, так как контактирующие ролики стальные.

Для определения параметров движения вороха на решете рассмотрим два случая:

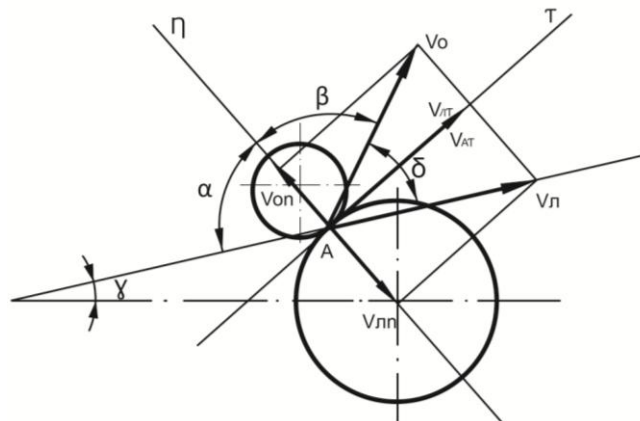
– при горизонтальном расположении конвейерного решета;

– при наклонном расположении решета.

**Случай 1.** В данном случае целесообразно рассматривать движение частицы вороха, подброшенной в результате соударения роликов решета и вибратора, как движение тела, брошенного под углом  $\sigma$  к горизонту (рис. 1).

Модуль скорости частицы в момент отрыва от поверхности решета и её направление определены ранее [1–4] и представлены выражениями:

$$V_0 = V_{\pi}\sqrt{\sin^2\alpha + K^2\cos^2\alpha}, \quad (2)$$



**Рисунок 1.** Схема скоростей, возникающих при соударении роликов решета и вибратора  
**Figure 1.** Diagram of the speeds arising from the collision of the rollers of the sieve and the vibrator

$$tg\beta = \frac{1}{K}tg\alpha = 1,8tg\alpha. \quad (3)$$

Проведя через точки отрыва частицы от поверхности решета координатные оси и разложив вектор скорости  $V_0$  по этим осям, получим:

$$V_x = V_0\cos\sigma;$$

$$V_y = V_0\sin\sigma. \quad (4)$$

Максимальная дальность полета составляет:

$$X_{max} = V_0\cos\sigma \frac{2V_0\sin\sigma}{g} = \frac{V_0^2 2\sin\sigma \cdot \cos\sigma}{g},$$

или

$$X_{max} = \frac{V_0^2 \sin 2\sigma}{g}, \quad (5)$$

а максимальная высота подъема частицы:

$$Y_{max} = \frac{V_0^2 \sin^2\sigma}{2g}. \quad (6)$$

Уравнение траектории полета частицы примет вид:

$$Y = xt g\sigma - \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2\sigma}, \quad (7)$$

где

$x$  – текущее значение координаты по оси  $x$ .

Время полета частицы вороха определяется по выражению:

$$t = \frac{2V_0\sin\sigma}{g}. \quad (8)$$

Согласно выражению (2)  $V_0$  есть скорость, приобретаемая частицей в момент соударения упомянутых роликов. Вводя её значение в выражения (5–8), имеем:

$$X_{max} = \frac{V_0^2 \sin 2\sigma (\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha)}{g}; \quad (9)$$

$$Y_{max} = \frac{V_0^2 \sin^2 \sigma (\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha)}{2g}; \quad (10)$$

$$Y = Xtg\sigma - \frac{gX^2}{[2V_0^2 \cos^2 \sigma (\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha)]}; \quad (11)$$

$$t = \frac{2V_0 \sin \sigma \sqrt{\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha}}{g}. \quad (12)$$

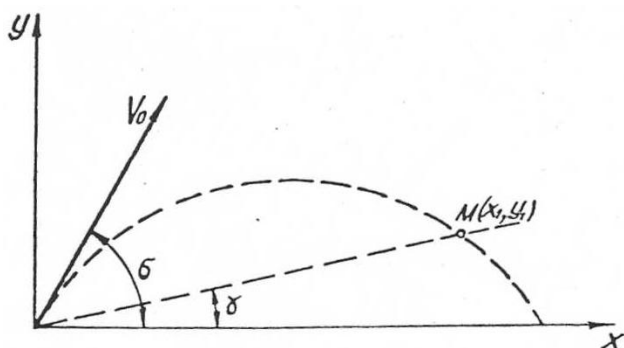
Проанализировав выражения (9–12), приходим к выводу, что все определяемые этими уравнениями параметры находятся в непосредственной зависимости от скорости конвейерного решета и углов  $\alpha, \beta, \sigma$ .

**Случай 2.** При расположении конвейерного решета под некоторым углом  $\gamma$  к горизонту уравнение прямой, условно изображающей ветвь конвейерного решета, может быть представлено в виде:

$$Y = Xtg\gamma. \quad (13)$$

Совместно решая уравнения (7) и (13), получим координаты точки  $M$  падения частицы вороха на поверхность решета (рис. 2). Далее, приравняв правые части уравнений (7) и (13), получим:

$$Xtg\gamma = Xtg\sigma - \frac{gX^2}{(2V_0^2 \cos^2 \sigma)}. \quad (14)$$



**Рисунок 2.** Схема характеристики траектории частицы вороха при расположении конвейерного решета под углом к горизонту

**Figure 2.** Diagram of the characteristic trajectory of a particle of a heap when the conveyor screen is positioned at an angle to the horizon

После преобразования выражения (14) имеем:

$$X(2V_0^2 tgy \cos^2 \sigma - 2V_0^2 \cos^2 \sigma tg\sigma + gX) = 0. \quad (15)$$

Ветвь конвейерного решета и кривая траектории полета частицы имеют две общие точки пересечения: начало координат (точку  $O$ ) и точку  $M$ . Таким образом, решая уравнение (15), получаем координаты  $X=0, Y=0$ .

Приравняв нулю сомножитель, находящийся в скобках в выражении (15), и решая полученное таким образом уравнение, получим координаты точки  $M$ :

$$X_M = \frac{2V_0^2 \cos^2 \sigma (tg\sigma - tgy)}{g}; \quad (16)$$

$$Y_M = \frac{2V_0^2 \cos^2 \sigma tgy (tg\sigma - tgy)}{g}. \quad (17)$$

Принимая во внимание (2), равенства (16) и (17) можно представить в следующем виде:

$$X_M = \frac{2V_0 \cos^2 \sigma (\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha) (tg\sigma - tgy)}{g}; \quad (18)$$

$$Y_M = \frac{2V_0^2 \cos^2 \sigma tgy (\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha) (tg\sigma - tgy)}{g}. \quad (19)$$

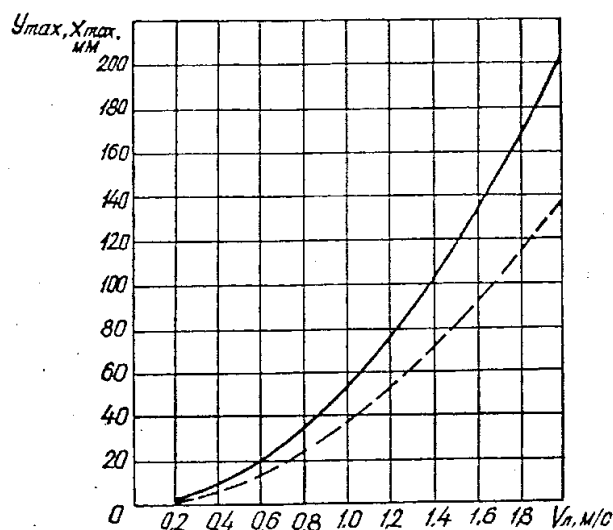
С помощью выражений (18) и (19) легко определить траекторию: дальность и высоту полета частиц вороха при наклонном расположении конвейерного решета (под углом  $\gamma$  к горизонту). Из выражений (18) и (19) видно, в какой зависимости находятся определяемые величины от скорости конвейерного решета  $V_0$ , угла  $\gamma$  наклона его к горизонту и других конструктивных параметров рабочего органа, рассмотренных выше (рис. 3).

Имея в виду, что согласно тригонометрии  $tg\sigma - tgy = \frac{\sin(\sigma - \gamma)}{\cos \sigma \cdot \cos \gamma}$  и  $\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha = 1 - 0,69 \cos^2 \alpha$ , выражения (18) и (19) можно записать в следующем виде:

$$X_M = [2V_0^2 \cos \sigma \sin(\sigma - \gamma) (1 - 0,69 \cos^2 \alpha)] (g \cos \gamma)^{-1}; \quad (20)$$

$$Y_M = [2V_0^2 \cos \sigma tgy \cdot \sin(\sigma - \gamma) (1 - 0,69 \cos^2 \alpha)] (g \cos \gamma)^{-1}. \quad (21)$$

Полученные теоретически параметры движения частиц вороха, подброшенных конвейерным решетом, справедливы для случая, когда зерноуборочный комбайн движется по горизонтальной поверхности (без уклонов).



**Рисунок 3.** График изменения дальности  $X_{max}$  (сплошная линия) и высоты  $Y_{max}$  (пунктирная линия) полета частицы вороха в зависимости от линейной скорости конвейерного решета ( $V_n$ ) при использовании вибратора с роликами  $D=20$  мм

**Figure 3.** Graph of the change in the theoretical range  $X_{max}$  (solid line) and height  $Y_{max}$  (dashed line) of a heap particle flight depending on the linear speed of the conveyor sieve ( $V_n$ ) when using a vibrator with rollers  $D=20$  mm

К сожалению, это идеальный случай, который в реальности труднореализуем. В большинстве случаев поверхность поля так или иначе имеет различные уклоны (продольные, поперечные и т. п.). Соответственно, комбайн в таких ситуациях движется под уклон, вверх по склону или поперек уклона. Таким образом, характеристики движения частиц вороха, сепарируемого конвейерным решетом, должны учитывать следующие возможные частные случаи движения комбайна в реальных условиях:

а) движение комбайна вниз по склону с уклоном  $\Delta\gamma$ ;

б) движение комбайна вверх по склону;

в) движение комбайна поперек склона на поле с уклоном  $\Delta\gamma_0$ .

В случае движения комбайна вниз по склону с уклоном  $\Delta\gamma$  координаты точки, в которой упадет частица, подброшенная конвейерным решетом, могут быть определены по следующим выражениям:

– при горизонтальном (относительно комбайна) расположении решета:

$$X_M = \frac{[2 V_n^2 \cos \sigma \sin(\sigma - \Delta\gamma) (1 - 0.69 \cos^2 \alpha)]}{(g \cos \Delta\gamma)^{-1}}; \quad (22)$$

$$Y_M = \frac{[2 V_n^2 \cos \sigma \operatorname{tg} \Delta\gamma \cdot \sin(\sigma - \Delta\gamma) (1 - 0.69 \cos^2 \alpha)]}{(g \cos \Delta\gamma)^{-1}}, \quad (23)$$

где

$\Delta\gamma$  – угол уклона поля, град.;

– при наклонном под углом  $\gamma$  (относительно комбайна) расположении конвейерного решета:

$$X_M = \frac{[2 V_n^2 \cos \sigma \sin [\sigma - (\gamma + \Delta\gamma)] (1 - 0.69 \cos^2 \alpha)]}{[g \cos(\gamma + \Delta\gamma)]}; \quad (24)$$

$$Y_M = \frac{2 V_n^2 \cos \sigma \operatorname{tg}(\sigma + \Delta\gamma) \sin [\sigma - (\gamma + \Delta\gamma)] (1 - 0.69 \cos^2 \alpha)}{[g \cos(\gamma + \Delta\gamma)]}. \quad (25)$$

При движении комбайна вверх по полю с уклоном  $\Delta\gamma$  искомые координаты точки падения подброшенной решетом частицы вороха можно определить из уравнений:

– при горизонтальном в комбайне расположении решета:

$$X_M = 2 V_n^2 \cos \sigma \sin(\sigma - \Delta\gamma) \times \\ \times (1 - 0.69 \cos^2 \alpha) (g \cos \Delta\gamma)^{-1}; \quad (26)$$

$$Y_M = -2 V_n^2 \cos \sigma \operatorname{tg} \Delta\gamma \cdot \sin(\sigma - \Delta\gamma) \times \\ \times (1 - 0.69 \cos^2 \alpha) (g \cos \Delta\gamma)^{-1}; \quad (27)$$

– при наклонном в комбайне под углом  $\gamma$  расположении решета:

$$X_M = 2 V_n^2 \cos \sigma \sin[(\sigma - (\gamma - \Delta\gamma))] \times \\ \times (1 - 0.69 \cos^2 \alpha) (g \cos(\gamma - \Delta\gamma))^{-1}; \quad (28)$$

$$Y_M = - \frac{2 V_n^2 \cos \sigma \operatorname{tg}(\gamma - \Delta\gamma) \cdot \sin[(\sigma - (\gamma - \Delta\gamma))] (1 - 0.69 \cos^2 \alpha)}{g \cos(\gamma - \Delta\gamma)}. \quad (29)$$

Придавая в выражении (28)  $\Delta\gamma$  значение от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ , определяли дальность ( $X_M$ ) перемещения частиц вороха при соударении роликов цепи и вибратора. Больше, чем  $15^\circ$ , значение  $\Delta\gamma$  не рассматривали, так как комбайны на полях с такими уклонами не работают из соображений обеспечения безопасности труда. А расчетные значения  $X_M$  при значениях  $\Delta\gamma$

до  $15^\circ$  очень мало отличаются от значения, полученного для случая работы комбайна на поле с ровной горизонтальной поверхностью (разница не превышает 15%).

Полагаем, что чем дальше летит частица вороха, тем дольше она находится в полете. А если иметь в виду всю массу находящегося на решетке вороха, то в этой массе частицы будут находиться в полете в более изреженном состоянии, создающем предпосылки для прохода зерна сквозь пространственную решетку к конвейерному решету, что способствует определению параметров конвейерного решета. Рассмотрим два случая.

**Случай 1.** Для горизонтального расположения рабочей ветви конвейерного решета в комбайне справедливо выражение:

$$\sigma = \pi - (\alpha + \beta). \quad (30)$$

При  $\sigma=45^\circ$  можно записать  $\alpha + \beta = 135^\circ$  и  $\beta = 135^\circ - \alpha$ .

Подставив это значение в выражение  $tg\beta=1,8tg\alpha$ , получаем:

$$tg \frac{(135^\circ - \alpha)}{tg\alpha} = 1,8,$$

или

$$\frac{tg135^\circ - tg\alpha}{[tg\alpha(1 + tg135^\circ tg\beta)]} = 1,8. \quad (31)$$

Выражение (31) после преобразований приобретает вид:

$$-1,8tg^2\alpha + 2,8tg\alpha + 1 = 0. \quad (32)$$

Положительный корень этого уравнения будет:

$$tg\alpha = 1,885, \text{ или } \alpha = arctg1,885 = 61^\circ 50',$$

а угол  $\beta$ , соответственно,  $\beta=73^\circ 10'$ .

**Случай 2.** При положении решета в комбайне под углом  $\gamma$  уравнения траектории движения частицы вороха и прямой, условно изображающей рабочую ветвь решета (рис. 2), представлены выражениями (7) и (13). Приравняв правые части этих выражений, имеем:

$$xtg\gamma = \frac{xtg\sigma - gx^2}{(2V_0^2 \cos^2 \sigma)}.$$

Выделим отсюда  $x$ :

$$\begin{aligned} x &= (tg\sigma - tg\gamma) \frac{2V_0^2}{g} \cos^2 \sigma = \\ &= \frac{V_0^2 (\sin 2\alpha - 2\cos^2 \alpha \cdot tg\sigma)}{g}. \end{aligned}$$

Наибольшую дальность полета частиц вороха в зависимости от угла  $\sigma$  можно определить в данном случае, взяв производную от  $x$  по  $\sigma$  и приравняв ее нулю:

$$\frac{dx}{d\sigma} = \frac{V_0^2}{g} (2\cos 2\sigma + 2\sin 2\sigma tg\gamma) = 0,$$

откуда

$$ctg 2\sigma = -tg\gamma,$$

или

$$2\sigma = \frac{\pi}{2} + \gamma,$$

$$\sigma = \frac{(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2},$$

что при  $\gamma=12^\circ$  дает  $\sigma=51^\circ$ .

С учетом этого из полученного ранее выражения  $\sigma=\pi-(\alpha+\beta-\gamma)$  имеем:

$$51^\circ = \pi - (\alpha + \beta - \gamma),$$

откуда  $\alpha+\beta=117^\circ$ , или  $\beta=117^\circ-\alpha$ .

Подставив эти значения в выражение  $tg\beta=1,8tg\alpha$ , использованное выше при получении уравнения (31), можно записать:

$$\frac{tg(117^\circ - \alpha)}{tg\alpha} = 1,8.$$

Это выражение после преобразований приводится к виду:

$$3,533tg^2\alpha - 2,8tg\alpha - 1,963 = 0. \quad (33)$$

Решение уравнения (33) дает положительный корень:

$$tg\alpha = 1,2403 \text{ или } \alpha = 51^\circ 07'.$$

Как известно, скорость тела, подброшенного под углом к горизонту, переменна, и в каждой точке траектории полета скорость тела различна как по величине, так и по направлению. В нашем случае нет необходимости знать скорость частицы вороха в каждой точке её полёта. Достаточно знать среднюю скорость частицы вороха, которая может быть определена с помощью выражений (5) и (8):

$$V_{\text{ср}} = \frac{x_{\text{max}}}{t} = \left( V_0^2 \sin 2 \frac{\sigma}{g} \right) (2 V_0 \sin \frac{\sigma}{g})^{-1} = V_0 \cos \sigma.$$

Подставив вместо  $V_0$  ее значение из (8), имеем:

$$V_{\text{ср}} = V_{\text{л}} \cos \sigma \sqrt{\sin^2 \alpha + K^2 \cos^2 \alpha},$$

или

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{л}} \cos \sigma \sqrt{1 - 0,69 \cos^2 \alpha}. \quad (34)$$

Как видно из выражения (34), средняя скорость полета частицы, подброшенной вибратором конвейерного решета, зависит от скорости этого решета, наклона его к горизонту, а также от диаметров роликов цепи решета и вибратора, так как от этих параметров зависят углы  $\sigma$  и  $\alpha$ .

При приемлемых (с точки зрения работоспособности системы) значениях углов  $\sigma$  и  $\alpha$  сомножитель, входящий в выражение (34), меньше единицы, то есть:

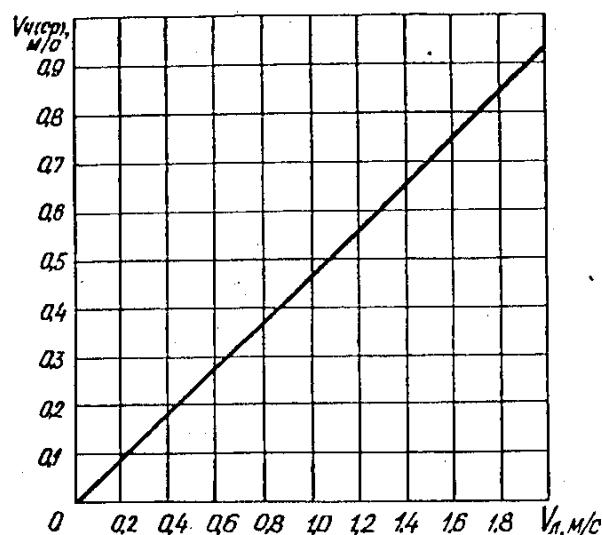
$$\cos \sigma \sqrt{1 - 0,69 \cos^2 \alpha} < 1.$$

Исходя из этого можно заключить, что средняя скорость частицы в полете всегда меньше скорости конвейерного решета ( $V_{\text{ч}} < V_{\text{л}}$ ). График, представленный на рисунке 4, достаточно наглядно это иллюстрирует.

**Вывод.** Получены аналитические выражения, позволяющие установить параметры перемещения частиц вороха, подброшенных вибратором конвейерной очистки зерноуборочного комбайна при различных вариантах расположения конвейерного решета в комбайне:

- горизонтально;
- под углом к горизонтальной плоскости (наклонно);
- при движении комбайна по ровному полю без уклонов;
- при движении комбайна по полю с уклонами (продольными или поперечными относительно направления движения комбайна).

В настоящем исследовании предложены аналитические зависимости для определения ключевых параметров перемещения частиц зернового вороха, подброшенного с решета при срабатывании вибратора. Эти параметры включают максимальную дальность и высоту перемещения, среднюю скорость и продолжительность перемещения относительно решета.



**Рисунок 4.** Средняя скорость  $V_{\text{ч(ср)}}$  полета частицы вороха, подброшенной конвейерным решетом, в зависимости от его линейной скорости ( $V_{\text{л}}$ ).

В данном случае взяты: диаметр ролика  $D=20$  мм,  $\gamma=12^\circ$ ,  $\alpha=59^\circ 09'$  и  $\sigma=59^\circ 01'$

**Figure 4.** Average theoretical velocity  $V_{\text{ч(ср)}}$  of a particle of waste thrown by a conveyor screen, depending on its linear velocity ( $V_{\text{л}}$ ). In this case, the following parameters were used: roller diameter  $D = 20$  mm,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\alpha = 59^\circ 09'$ , and  $\sigma = 59^\circ 01'$

## Список литературы

1. Бердышев В. Е. Обоснование параметров рабочих органов молотилки зерноуборочного комбайна с аксиально-ротаторной молотильно-сепарирующей системой: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 2014. 480 с. EDN: FUZXGX
2. Мартыненко Д. С. Повышение эффективности системы очистки зерноуборочного комбайна путем применения рекуперативного привода решет и транспортной доски: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2015. 170 с. EDN: RNXOXQ
3. Сороченко С. Ф. Конкурентоспособность зерноуборочных комбайнов, предназначенных для работы на склонах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 9(143). С. 158–164. EDN: WVQKYL
4. Сороченко С. Ф. Математическая модель движения зернового вороха по решету 3D очистки зерноуборочного комбайна // Научная жизнь. 2017. № 8. С. 6–14. EDN: ZHTTJZ
5. Сороченко С. Ф. Система очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах: монография. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2023. 148 с. ISBN: 978-5-7568-1451-4

6. Липовский М. И., Перекопский А. Н. Зерноуборочный комбайн: из прошлого к новому поколению. Санкт-Петербург: ИФЭП, 2015. 316 с. EDN: TXDWWP
7. Липовский М. И., Перекопский А. Н. Перспективные молотильные аппараты зерноуборочных комбайнов: монография. Санкт-Петербург: ИФЭП, 2023. 174 с. EDN: SOLQIG
8. Удаление семян сорняков при уборке зерновых культур комбайном с конвейерной очисткой / А. Д. Бекаров, В. Х. Мишхожев, Г. А. Бекаров, А.Х. Габаев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 2(40). С. 84–90. DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-84-90. EDN: WCDVVC
9. Бекаров А. Д., Габаев А. Х. Конвейерная очистка для комбайна с традиционной компоновкой рабочих органов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 3(95). С. 113–116. EDN: KAORLW

## References

1. Berdyshev V.E. *Obosnovanie parametrov rabochih organov molotilki zernouborochnogo kombajna s aksial'no-rotornoj molotil'no-separiruyushchej sistemoy: dis. ... d-ra. tekhn. nauk* [Justification of the parameters of the working bodies of a grain harvester threshing machine with an axial-rotor threshing and separating system: dis. ... Doctor of Technical Sciences]. Moscow, 2014, 480 p. (In Russ.). EDN: FUZXGX
2. Martynenko D.S. Improving the efficiency of a grain harvester cleaning system by using a regenerative drive for sieves and a transport board: dis. ... Cand. of Technical Sciences. Barnaul, 2015. 170 p. (In Russ.). EDN: RNXOXQ
3. Sorochenko S.F. Competitiveness of hillside combine harvesters. *Bulletin of Altai state agricultural university*. 2016;9(143):158–164. EDN: WVQKYL
4. Sorochenko S.F. Mathematical model of the movement of a grain heap along the grid of 3d cleaning of a combine harvester. *Scientific life*. 2017;(8):6–14. (In Russ.). EDN: ZHTTJZ
5. Sorochenko S.F. *Sistema ochistki zernouborochnogo kombajna dlya raboty na sklonah: monografiya* [Grain Harvester Cleaning System for Slope Operation: Monograph]. Barnaul: Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. I.I. Polzunova, 2023. 148 p. ISBN: 978-5-7568-1451-4. (In Russ.).
6. Lipovsky M.I., Perekopsky A.N. *Zernouborochnyj kombajn: iz proshlogo k novomu pokoleniyu* [Grain Harvester: From the Past to the New Generation]. Saint Petersburg: IFEP, 2015. 316 p. (In Russ.). EDN: TXDWWP
7. Lipovsky M.I., Perekopsky A.N. *Perspektivnye molotil'nye apparaty zernouborochnyh kombajnov: monografiya* [Promising threshing devices for grain harvesters: monograph]. Saint Petersburg: IFEP, 2023. 174 p. EDN: SOLQIG
8. Bekarov A.D., Mishxozhev V.X., Bekarov G.A., Gabaev A.X. Removal of weed seeds when harvesting grain crops with a combine harvester with conveyor cleaning. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2023;2(40):84–90. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-84-90. EDN: WCDVVC
9. Bekarov A.D., Gabaev A.X. Conveyor cleaning for a combine with a traditional piece of working bodies. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;3(95):113–116. (In Russ.). EDN: KAORLW

## Сведения об авторах

**Бекаров Аламахад Дошаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 9046-0656

**Мишхожев Владислав Хасенович** – кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 9119-3664

**Габаев Алий Халисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 1264-0376



---

**Information about the authors**

**Alamakhad D. Bekarov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 9046-0656

**Vladislav Kh. Mishkhozhev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Agricultural Engineering, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 9119-3664

**Aliy Kh. Gabaev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Agricultural Engineering, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 1264-0376

---

**Авторский вклад.** Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

**Author's contribution.** All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

---

*Статья поступила в редакцию 13.11.2025;  
одобрена после рецензирования 27.11.2025;  
принята к публикации 05.12.2025.*

*The article was submitted 13.11.2025;  
approved after reviewing 27.11.2025;  
accepted for publication 05.12.2025.*