

noi tekhniki APK / Trudy GOSNITI. – M., 2011. – T. 109. – Ch. 1. – S. 90-93.

8. Nestyak V.S., Mambetalin K.T. Mekhaniko-tekhnologicheskie aspekty energetiki obrabotki pochvy // Nestyak V.S., Mambetalin K.T. // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 11 (85). – S. 106-110.

9. Nestyak V.S., Mambetalin K.T. K osnovam snizheniya energoemkosti obrabotki pochvy // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – T. 3. – № 3. – S. 95-99.

10. Yakovlev N.S. Issledovanie vliyaniya parametrov kul'tivatornykh lap i skorosti dvizheniya mashiny na protsess razbrosa pochvy // Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. – 2011. – № 3. – S. 30.

11. Yakovlev N.S. Primenenie kol'tsevoi borony pri razbrosnom poseve semyan // Sib. vestnik s-kh. nauki. – 2016. – № 2. – S. 67-74.

12. Ivanov N.M. Mashinno-tekhnologicheskoe obespechenie uborki i posleuborochnoi obrabotki zerna i semyan v usloviyakh Sibiri // Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. – 2012. – № 6. – S. 23-27.



УДК 631.354.2.027

С.Ф. Сороченко
S.F. Sorochenko

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ЗЕРНОВОГО ВОРОХА ПО РЕШЕТУ
ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА
ПРИ УБОРКЕ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА СКЛОНАХ**

**STUDYING THE MOVEMENT OF THRESHED HEAP COMPONENTS
ON THE SIEVE OF A COMBINE HARVESTER WHEN HARVESTING
GRAIN CROPS ON SLOPES**

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, уборка зерновых на склонах, движение компонентов зернового вороха, потери зерна, математическая модель.

Качественные показатели работы системы очистки зерноуборочного комбайна, работающего на склонах, ухудшаются. Причиной ухудшения качественных показателей работы системы очистки при поперечном и продольном наклоне зерноуборочного комбайна является изменение параметров движения зернового вороха на верхнем решете. Целью работы является уточнение математической модели движения компонентов зернового вороха по решету зерноуборочного комбайна с учётом поперечных и продольных наклонов молотилки. В предлагаемой математической модели учтены наклоны корпуса зерноуборочного комбайна, продольный наклон решета и угол открытия жалюзи. Воздействие на частицу воздушного потока определено с учетом колебаний решета и движения частицы по лепестку жалюзи. Предложена методика расчёта средней скорости частицы по лепестку жалюзи. Среднюю скорость частицы рассчитывали как среднее значение скоростей частицы в положительном и отрицательном направлениях оси X. Исследовано движение компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи за время одного колебания решета. Определена рациональная скорость воздушного потока для прохода зерна и схода соломистой частицы с

лепестка жалюзи. Рациональная скорость воздушного потока находится в интервале от 3,5 до 5,5 м/с в зависимости от продольного наклона решета и угла открытия жалюзи. Определены рациональные углы открытия решета при работе зерноуборочного комбайна с продольным наклоном.

Keywords: grain combine harvester, cleaning system, harvesting grain crops on slopes, movement of threshed heap components, grain loss, mathematical model.

The quality indices of the cleaning system operation of a combine harvester harvesting on slopes get worse. The reason of quality indices deterioration of cleaning system operation at transversal and longitudinal inclinations of a combine harvester is the change of the threshed heap movement parameters on the top sieve. The research goal is the adjustment of the mathematical model of the threshed heap component movement on the sieve of a combine harvester taking into account transversal and longitudinal inclinations of the threshing unit. The proposed mathematical model considers the inclination angles of a combine harvester body, the longitudinal inclination of the sieve and the chaffer fin opening angle. The impact of the airflow on a particle is determined with the account of the sieve fluctuations and the movement of a particle along a fin. The calculation technique of the average speed of a

particle movement along a fin is proposed. The average speed of a particle was calculated as the mean value of speeds of a particle in the positive and negative directions of the X-axis. The movement of threshed heap components along a fin during one fluctuation of the sieve was investigated. The rational speed of the airflow for the passage of grain and

descent of chaffy particles from the chaffer fin was determined. The rational speed of the airflow is in the range from 3.5 to 5.5 m/s depending on the longitudinal inclination of the sieve and the chaffer fin opening angle. The rational angles of sieve opening in a combine harvester operating with a longitudinal inclination were determined.

Сороченко Сергей Фёдорович, к.т.н., доцент, проф. каф. «Наземные транспортно-технологические системы», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (3852) 29-09-42. E-mail: sorochenkosf@list.ru.

Sorochenko Sergey Fedorovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Prof., Chair of Surface Transportation Technological Systems, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (3852) 29-09-42. E-mail: sorochenkosf@list.ru.

Введение

При уборке зерновых культур на склонах качественные показатели работы зерноуборочного комбайна базовой модификации ухудшаются – возрастают потери зерна и содержание соломистых примесей в бункерном зерне. Причиной ухудшения качественных показателей работы системы очистки при поперечном и продольном наклонах молотилки зерноуборочного комбайна является изменение параметров движения зернового вороха на верхнем решете.

Движение зернового вороха по лепестку и по поверхности жалюзийного решета зерноуборочного комбайна без учёта наклона молотилки описано С.А. Алфёровым [1], по поверхности наклонённого в двух плоскостях жалюзийного решета – Д.И. Уркинбаевым [2], по поверхности наклонённого решета, совершающего дополнительные поперечные колебания, [3] – в работах [4, 5]. Разработана математическая модель сепарации зерна [6], включающая коэффициент вариации толщины (или массы) зернового вороха по поверхности решета, которая позволяет определить потери зерна в зависимости от параметров транспортной доски, верхнего решета и поперечного наклона молотилки. Однако ухудшение качественных показателей работы системы очистки происходит также из-за изменения параметров движения компонентов зернового вороха по лепесткам жалюзийного решета как при поперечном, так и продольном наклонах молотилки.

Целью работы является уточнение математической модели движения компонентов зернового вороха по решету зерноуборочного комбайна с учётом поперечных и продольных наклонов молотилки.

Математическое моделирование движения компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи. Рассмотрим движение частицы зернового вороха по лепестку жалюзи. В соответствии с работами [1, 2, 4]

взаимодействием между частицами пренебрегаем, частицу рассматриваем в виде материальной точки, а колебания решета опишем гармоническим законом по линии, наклонённой относительно горизонта на угол β :

$$\begin{aligned} \xi &= r \cdot \cos \omega t, & \dot{\xi} &= -\omega \cdot r \cdot \sin \omega t, \\ \ddot{\xi} &= -\omega^2 r \cdot \cos \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – соответственно, перемещение, скорость и ускорение решета;

r – радиус кривошипа (амплитуда колебаний);

ω – круговая частота колебаний;

t – время.

Введем подвижную систему координат XYZ, связанную с решетом: ось X направлена вдоль решета; ось Y – в поперечном направлении; ось Z – перпендикулярно плоскости решета; плоскость XOY – плоскость решета. На частицу действуют следующие силы: $G = m \cdot g$ – сила тяжести (где m – масса частицы; g – ускорение свободного падения); $R = m \cdot k_p \cdot \Delta U^2$ – сила воздействия воздушного потока (где k_p – коэффициент парусности частицы; ΔU – скорость обдува частицы воздухом); $R_Y = m \cdot k_p \cdot \dot{y}^2$ – сила сопротивления воздушного потока при движении частицы в поперечном направлении (где \dot{y} – проекция относительной скорости частицы на ось Y); N – нормальная реакция поверхности решета; $F = f \cdot N$ – сила трения (где f – коэффициент трения частицы по поверхности решета; $P = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t)$ – сила инерции частицы от продольных колебаний решета. Векторы сил \bar{R} и \bar{P} находятся в плоскости XOZ.

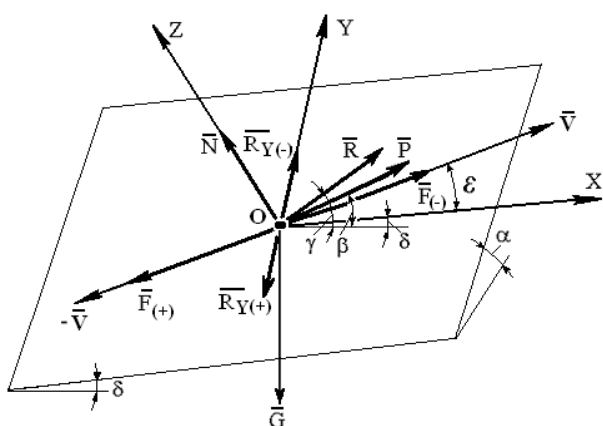


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу:
 δ – угол продольного наклона плоскости XOY относительно горизонта; α – угол поперечного наклона плоскости XOY относительно горизонта;
 γ – угол наклона воздушного потока относительно горизонта; ε – угол между направлением движения частицы и осью X

Дифференциальные уравнения движения частицы имеют следующий вид (верхние знаки применяются при движении частицы в положительных направлениях осей):

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P \cdot \cos(\beta - \delta) + R \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp \\ \mp F \cdot \cos \varepsilon - G \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ m\ddot{y} = \mp F \cdot \sin \varepsilon - \\ - G \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \mp R_Y \\ m\ddot{z} = N + P \cdot \sin(\beta - \delta) + \\ + R \cdot \sin(\gamma - \delta) - G \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) позволяет исследовать движение частицы как по лепестку жалюзи, так и по поверхности жалюзийного решета.

При движении частицы по лепестку угол δ определяет наклон лепестка относительно горизонта, коэффициент трения частицы при движении в любом направлении

одинаков. В соответствии с работами [1, 7] принимаем, что воздушный поток направлен вдоль лепестка жалюзи ($\gamma = \delta$). Скорость обдува частицы воздушным потоком определим с учётом движения решета и частицы относительно воздушного потока (относительная ошибка упрощенного рассмотрения движения частицы, учитывающей только скорость воздушного потока, превышает 12%):

$$\begin{aligned} \Delta U &= U - \dot{\xi} \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x} = \\ &= U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Угол наклона лепестка относительно горизонта δ зависит от угла открытия жалюзи δ_1 и угла наклона решета относительно молотилки δ_2 , а при работе комбайна на склонах – от угла продольного наклона молотилки δ_3 (рис. 2). В связи с этим угол δ равен:

- при движении комбайна вниз по склону

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \quad (4)$$

- при движении комбайна вверх по склону

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 - \delta_3. \quad (5)$$

Продольный наклон молотилки также оказывает влияние на значение угла β , причём при отсутствии продольного наклона молотилки $\beta = \beta_1$ (где β_1 – угол направления колебаний решета относительно продольной оси молотилки), при движении зерноуборочного комбайна вниз по склону

$$\beta = \beta_1 + \delta_3, \quad (6)$$

а при движении вверх по склону

$$\beta = \beta_1 - \delta_3. \quad (7)$$

Частица, находящаяся на лепестке жалюзи, совершает по нему движение вверх и вниз, не отрываясь от поверхности. В этом случае система уравнений (2) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_p \cdot [U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}]^2 - \\ \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \ddot{y} = \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) \mp k_p \cdot \dot{y}^2 - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (8)$$

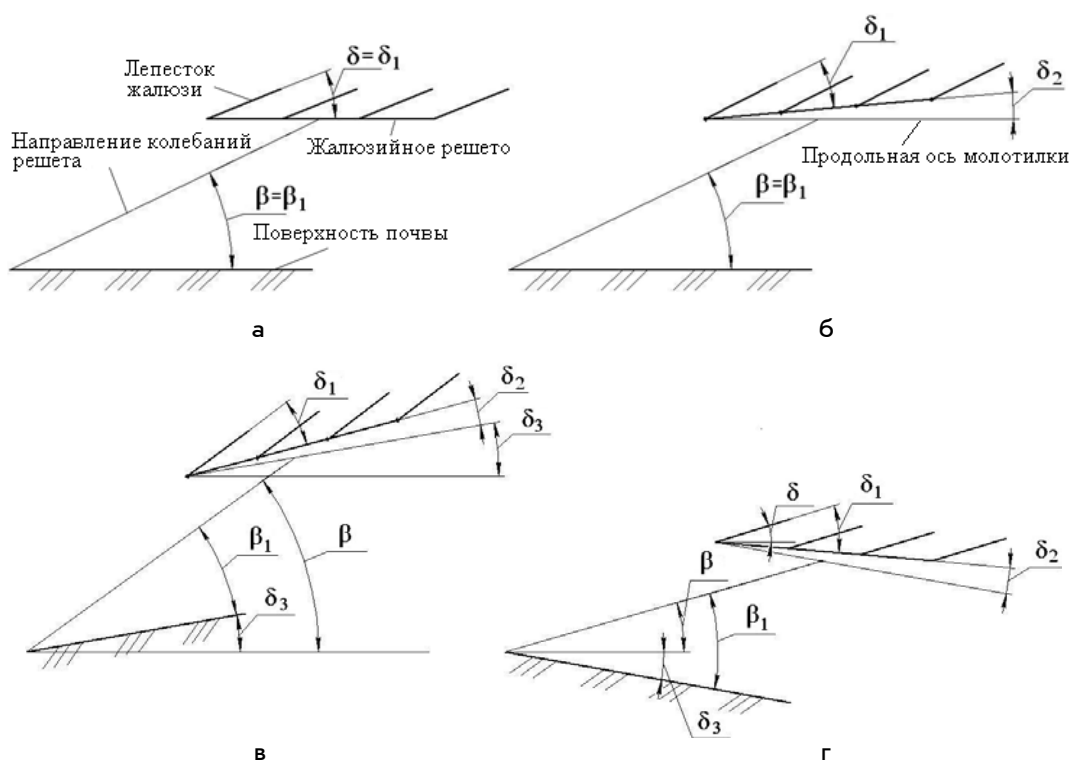


Рис. 2. Схемы к определению углов δ и β :

а – продольный наклон молотилки отсутствует, решето не наклонено относительно продольной оси комбайна; б – продольный наклон молотилки отсутствует, решето наклонено; в – зерноуборочный комбайн движется вниз по склону, решето наклонено; г – зерноуборочный комбайн движется вверх по склону, решето наклонено

Начальные условия движения частицы: в положительном направлении оси X – $t_1 = \frac{\phi_{H+}}{\omega}$, $\dot{x} = 0$, $\dot{y} = 0$, $x = 0$, $y = 0$; в отрицательном направлении оси X – $t_2 = \frac{\phi_{H-}}{\omega}$, $\dot{x} = 0$, $\dot{y} = 0$, $x = 0$, $y = 0$.

На рисунке 3 представлены результаты расчёта траекторий движения зерна ($U_s=8,5$ м/с, $f=0,32$) и сбоины ($U_s=5,0$ м/с, $f=0,4$) по лепестку жалюзи при $\alpha = 8^0$ за два колебания решета.

Исходя из графиков, представленных на рисунке 3, предположим, что движение компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи целесообразно рассматривать за время T_p одного колебания решета, а среднюю скорость движения частицы рассчитывать как среднее значение скоростей при начале движения частицы в положительном и отрицательном направлениях оси X .

В связи с этим предположением средняя скорость в продольном направлении равна

$$V_{XCP} = \frac{X_{(+)} + X_{(-)}}{2 \cdot T_p}, \quad (9)$$

где $X_{(+)}, X_{(-)}$ – проекция перемещения частицы на ось X за время одного колебания решета при начале движения в положительном и отрицательном направлениях оси X соответственно, а средняя скорость в направлении оси Y

$$V_{YCP} = \frac{Y_{(+)} + Y_{(-)}}{2 \cdot T_p}, \quad (10)$$

где $Y_{(+)}, Y_{(-)}$ – проекция перемещения частицы на ось Y за время одного колебания решета при начале движения в положительном и отрицательном направлениях оси X соответственно.

На рисунке 4 показаны графики зависимости средней скорости частиц (зерна и сбоины) от скорости воздушного потока, из которых следует, что рациональная скорость воздушного потока, обеспечивающая проход зерна сквозь жалюзийное решето (движение в отрицательном направлении оси X) и сход солоистой частицы с лепестка (движение в положительном направлении оси X) равна $4,0 \pm 0,5$ м/с, что хорошо согласуется с рекомендациями, представленными в работе [1].

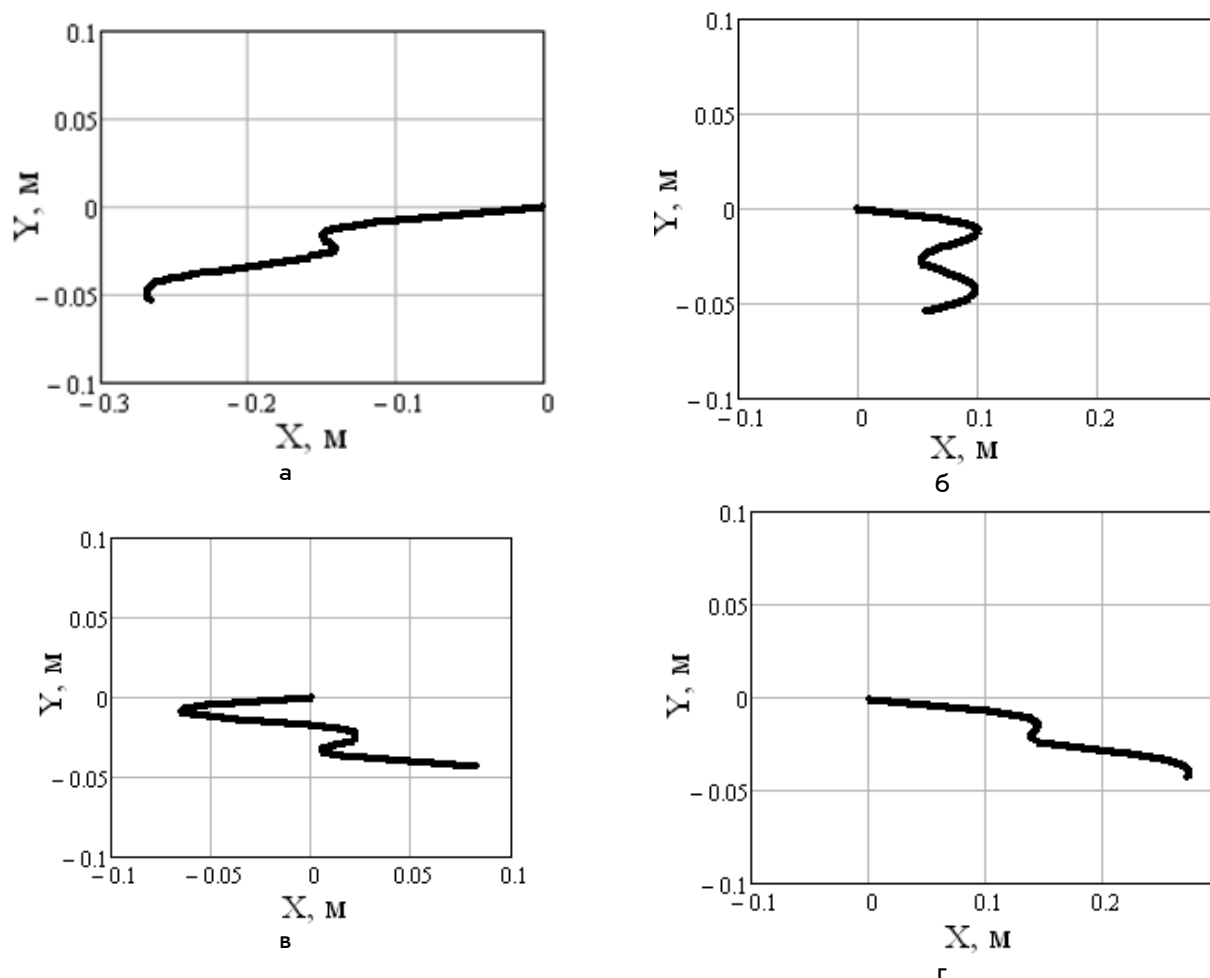


Рис. 3. Траектории движения компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи при поперечном крене молотилки ($\delta = 27^{\circ}$, $\beta = 26^{\circ}$):

а, б – начало движения зерна в отрицательном и положительном направлениях оси X соответственно; **в, г** – начало движения сбиины в отрицательном и положительном направлениях оси X соответственно

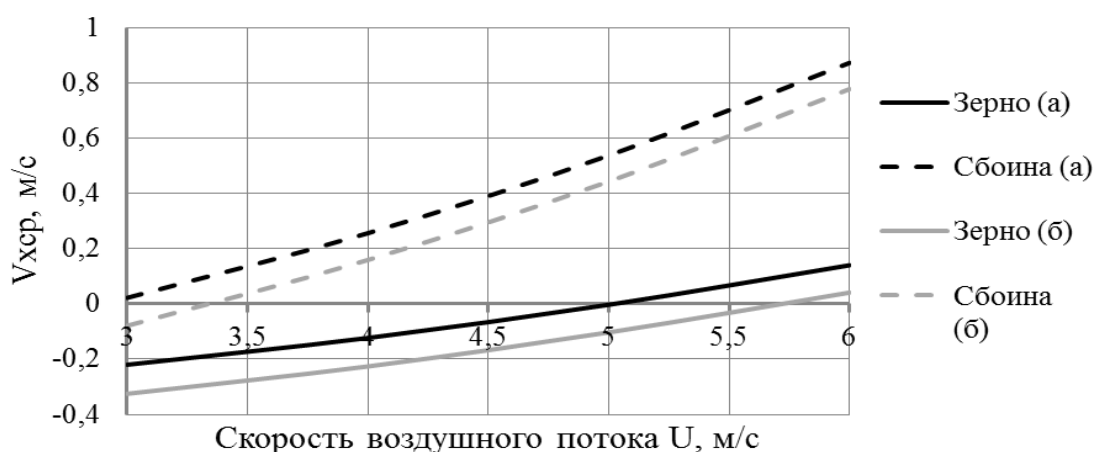


Рис. 4. Графики зависимости средней скорости зерна ($U_5=8,5$ м/с, $f=0,32$) и сбиины ($U_5=5,0$ м/с, $f=0,4$) от скорости воздушного потока:

а – $\delta = \delta_1 = 22^{\circ}$; **б** – $\delta_1 = 22^{\circ}$, $\delta_2 = 5^{\circ}$, $\delta = 27^{\circ}$

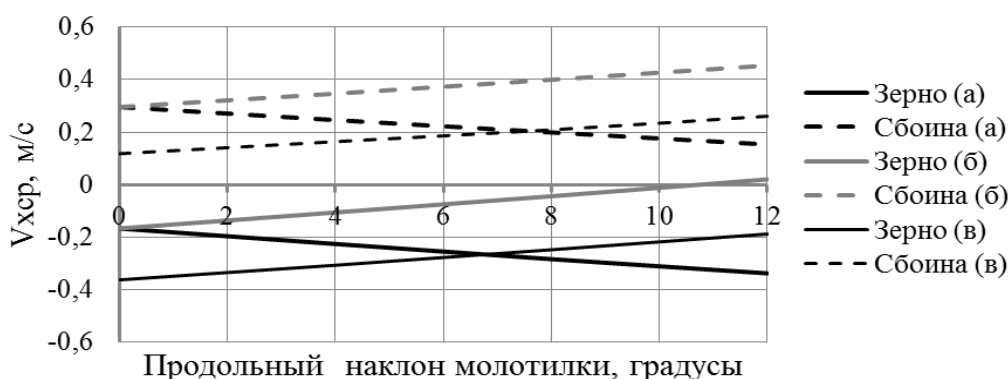


Рис. 5. Графики зависимости средней скорости зерна и сбины от продольного наклона молотилки ($U=4,5$ м/с):

а – движение комбайна вниз по склону;

б – движение комбайна вверх по склону $\delta_1 = 22^\circ, \delta_2 = 5^\circ$;

в – движение комбайна вверх по склону ($\delta_1 = 30^\circ, \delta_2 = 7^\circ$)

Установка верхнего решета под небольшим углом относительно продольной оси комбайна (угол δ_2 в современных конструкциях зерноуборочных комбайнов находится в интервале от 0 до 7°) улучшает условия прохода зерна. Это подтверждается расчётами, выполненными при установке решета относительно продольной оси комбайна на угол $\delta_2 = 5^\circ$. Рациональная скорость воздушного потока в этом случае равна $5,0 \pm 0,5$ м/с.

Результаты расчёта при движении комбайна вверх и вниз по склону представлены на рисунке 5. Движение комбайна вниз по склону не ухудшает условия прохода зерна сквозь решето. Несмотря на то, что с увеличением наклона молотилки средняя скорость сбины снижается, однако её значение даже при угле 12° достаточно велико. При движении комбайна вверх по склону условия для схода сбины с лепестка улучшаются, а условия прохода зерна сквозь решето ухудшаются. Так, при крене молотилки 11° средняя скорость зерна по лепестку равна нулю, что означает значительное увеличение схода зерна с поверхности решета.

Одним из способов снижения потерь зерна при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону является увеличение угла открытия жалюзи δ_1 и угла наклона решета δ_2 . На рисунке 5 показаны результаты расчёта при значениях: $\delta_1 = 30^\circ, \delta_2 = 7^\circ$. Условия прохода зерна улучшаются и даже при продольном крене

молотилки 12° средняя скорость зерна равна «минус» $0,19$ м/с.

Обеспечить постоянство качественных показателей работы системы очистки при продольных наклонах молотилки можно за счёт изменения углов δ_1 (открытия жалюзи решета) и δ_2 (наклона решета относительно продольной оси комбайна).

Выявлены зависимости, определяющие рациональные углы открытия жалюзи δ_1 :

- при движении комбайна вниз по склону

$$\delta_1 = \delta_{1(0)} - 0,7 \cdot \delta_3, \quad (11)$$

где $\delta_{1(0)}$ – угол открытия жалюзи при отсутствии продольного наклона молотилки;

- при движении комбайна вверх по склону

$$\delta_1 = \delta_{1(0)} + 0,7 \cdot \delta_3. \quad (12)$$

Выводы

1. Уточнена математическая модель движения компонентов зернового вороха по решету зерноуборочного комбайна при уборке зерновых культур на склонах. В предлагаемой математической модели учтены продольные и поперечные наклоны молотилки зерноуборочного комбайна, продольный наклон решета и угол открытия жалюзи, а воздействие на частицу воздушного потока определено с учетом колебаний решета и движения частицы по лепестку жалюзи. Предложена методика расчёта средней скорости частицы по лепестку жалюзи.

2. Определены зависимости, определяющие рациональные углы открытия жалюзи

решета системы очистки при движении зерноуборочного комбайна вверх и вниз по склону.

Библиографический список

1. Алферов С.А. Воздушно-решетные очистки зерноуборочных комбайнов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 160 с.
2. Уркинбаев Д.И. Обоснование параметров системы стабилизации горизонтального положения решетного стана зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993. – 23 с.
3. Решётный стан системы очистки зерноуборочного комбайна: пат. 2177683 РФ, МКИ⁷ А01F12/44 / Сороченко С.Ф., Дрюк В.А. – Оpubl. 10.01.2002, Бюл. № 1.
4. Дрюк В.А. Параметры выравнивателя вороха на решетках очистки зерноуборочного комбайна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2006. – 27 с.
5. Дрюк В.А., Сороченко С.Ф. Математическое моделирование движения зернового вороха с динамическим разравниванием по решетку системы очистки зерноуборочного комбайна // Вестник ДГТУ. – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 113-119.
6. Сороченко С.Ф. Модель сепарации зерна в системе очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4/2. – С. 64-69.
7. Муратов Д.К. Интенсификация процесса сепарации мелкого зернового вороха в воздушно-решётной очистке зерноуборочного комбайна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 2012. – 20 с.

References

1. Alferov S.A. *Vozdushno-reshetnye ochistki zernouborochnykh kombainov.* – M.: Agropromizdat, 1987. – 160 s.
2. Urkinbaev D.I. *Obosnovanie parametrov sistemy stabilizatsii gorizontal'nogo polozheniya reshetnogo stana zernouborochnogo kombaina, prednaznachennogo dlya raboty na sklonakh: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* – M., 1993. – 23 s.
3. *Reshetnyi stan sistemy ochistki zernouborochnogo kombaina: pat. 2177683 RF, MKI7 A01F12/44 / Sorochenko S.F., Dryuk V.A.* – Opubl. 10.01.2002, Byul. № 1.
4. Dryuk V.A. *Parametry vyravnivatelya vorokha na reshetakh ochistki zernouborochnogo kombaina: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* – Barnaul, 2006. – 27 s.
5. Dryuk V.A., Sorochenko S.F. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya zernovogo vorokha s dinamicheskim razravnivaniem po reshetu sistemy ochistki zernokombaina // Vestnik DGTU.* – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 113-119.
6. Sorochenko S.F. *Model' separatsii zerna v sisteme ochistki pri poperechnom krene zernouborochnogo kombaina // Polzunovskii vestnik.* – 2014. – № 4/2. – С. 64-69.
7. Muratov D.K. *Intensifikatsiya protsessa separatsii melkogo zernovogo vorokha v vozdushno-reshetnoi ochistke zernouborochnogo kombaina: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* – Rostov-na-Donu, 2012. – 20 s.

