

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПЛОСКОГО РЕШЕТА, СОВЕРШАЮЩЕГО КОЛЕБАНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

ANALYSIS OF THE OPERATION OF A FLAT SIEVE THAT VIBRATES IN A HORIZONTAL PLANE

А.Ю. ГОЛОВИН, К.Т.Н.
У.К. САБИЕВ, Д.Т.Н.
П.В. ЧУПИН, К.Т.Н.
А.С. СОЮНОВ
С.П. ПРОКОПОВ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный аграрный университет имени
П.А. Столыпина», Омск, Россия, ayu.golovin@omgau.org

A.YU. GOLOVIN, PhD in Engineering
U.K. SABIYEV, DSc in Engineering
P.V. CHUPIN, PhD in Engineering
A.S. SOYUNOV,
S.P. PROKOPOV

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education "Omsk State Agrarian University named
after P.A. Stolypin", Omsk, Russia, ayu.golovin@omgau.org

В соответствии с положениями Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации необходимо увеличение удельного веса зерна отечественного производства на мировом рынке до уровня не менее 95 %. Этому способствует наличие в Российской Федерации 9 % посевных мировых площадей, из которых 40 % составляет чернозем. Однако послеуборочная обработка всего зернового вороха, привозимого с полей выполняется поточными линиями, где на полноту разделения оказывают влияние показатели засоренности и влажности свежесобранного зерна. Так, повышение влажности на 1 % от базисных показателей снижает производительность зерноочистительной техники на 2 %, а повышение влажности на 1 % снижает производительность на 3 %. Поэтому зернотоковым хозяйствам страны нужны прогрессивные технологии для послеуборочной обработки зерна, из которых можно выделить основные способы увеличения производительности машин: равномерное распределения семян по площади решета, более качественное попадания частицы в отверстие решета, увеличение скорости движения зерна на поверхности решета, усложнение закона колебаний решетных станков. Согласно выполненным исследованиям, полнота разделения на поверхности решета зависит от показателей относительного движения частицы, а также угла наклона отверстий к направлению схода, скорость и перемещение зерновки при взаимодействии с длинной кромкой отверстия решета, совершающего гармонические колебания. На основании этого можно заключить следующее: процесс сепарации улучшается при угле наклона отверстий решета $\beta = 45^\circ$, частоте колебаний решета $n = 110 \text{ мин}^{-1}$, амплитуде колебаний решета $A = 0,09 \text{ м}$, угле поперечного наклона решета $\alpha_n = 1,5^\circ \dots 2,5^\circ$. На этом режиме работы очистка зерновой смеси проводится качественно и в соответствии с агротехническими требованиями.

Ключевые слова: зерновой ворох, сепарация, полнота разделения, продольное колебание, решето, параметры вибрации.

In accordance with the provisions of the Food security Doctrine of the Russian Federation, it is required to increase the share of domestically produced grain in the world market at least to 95 %. This is facilitated by the presence of 9 % of the world's cultivated areas in the Russian Federation, where black soil is 40 percent. However, post-harvest processing of the entire grain heap brought from the fields is performed by production lines, where the completeness of separation is influenced by the contamination and moisture content of freshly harvested grain. An increase in humidity by 1 % of the baseline reduces the productivity of grain cleaning equipment by 2 %, and an increase in humidity by 1 % reduces productivity by 3 %. Therefore, the country's grain-flow farms need modern technologies for post-harvest grain processing. The main methods of increasing the productivity of machinery can be distinguished. They are: a uniform distribution of seeds over the sieve area, a better particle penetration into the sieve hole, an increase in the speed of grain movement on the surface of the sieves, a complication of the law of vibrations of sieve mills. According to the performed studies the completeness of separation on the sieve surface depends on the indicators of the relative motion of the particle, as well as the angle of inclination of the holes to the direction of descent, the speed and movement of the grain when interacting with the long edge of the sieve hole, performing harmonic oscillations. The following recommendations can be made: the separation process improves at an angle of inclination of the sieve openings $\beta = 45^\circ$, the frequency of sieve vibrations $n = 110 \text{ min}^{-1}$, the amplitude of sieve vibrations $A = 0,09 \text{ m}$, the angle of the sieve transverse inclination $\alpha_n = 1,5^\circ \dots 2,5^\circ$. The cleaning of the grain mixture is carried out qualitatively in accordance with the agrotechnical requirements in this operating mode.

Keywords: grain heap, separation, separation completeness, longitudinal vibration, sieve, vibration parameters.

Введение

Послеуборочная обработка всего зернового вороха, привозимого с полей, проводится поточными линиями. На полноту разделения весьма существенно влияют показатели засоренности и влажности свежееубранного зерна. Повышение влажности на 1 % от базисных показателей снижает производительность зерноочистительной техники на 2 %, а повышение влажности на 1 %, снижает производительность на 3 %. Поэтому зернотоковым хозяйствам страны нужны прогрессивные технологии для послеуборочной обработки зерна.

Проведенный обзор и анализ литературы показывает, что в настоящее время в создании новых способов очистки зерна и разработки прогрессивных рабочих органов зерноочистительных машин не наблюдается кардинальных изменений в лучшую сторону [1, 2, 3, 4, 5].

Эффективность работы зерноочистительных машин в значительной степени зависит от соответствия режимов движения решетных станов, приближенных к оптимальным (паспортным).

Из основных способов увеличения производительности машин можно выделить следующие: равномерностью распределения семян по площади решета, попадание частицы в отверстие решета, увеличение скорости движения зерна на поверхности, усложнение закона колебаний решетных станов.

Цель исследований

Оценка влияния параметров колебаний решетных станов на процесс сепарации зернового материала и выявление зависимостей между параметрами зернового материала и равномерностью распределения семян по площади решета. Это позволит наметить пути увеличения производительности зерноочистительных машин, сократить сроки и снизить себестоимость обработки зерна.

Материалы и методы

Увеличение производительности зерноочистительных машин и улучшение качества очистки возможно за счет усложнения законов колебания решета и ориентирования зернового материала относительно сквозных отверстий решета.

В качестве основных методов исследования использовались стандартные методы математического моделирования и статистическая

обработка полученных результатов. Рассмотрены режимы работы плоского решета в горизонтальной плоскости.

1. Вероятность попадания частицы в отверстие решета при гармонических колебаниях решетного стана

Полнота разделения на поверхности решета зависят от показателей относительного движения частицы. Для теоретических определений влияния угла наклона отверстий к направлению схода, скорости и перемещения зерновки при взаимодействии с длинной кромкой отверстия решета, совершающего гармонические колебания, необходимо иметь уравнения относительного движения частицы по решету.

Для получения математической модели относительного движения зерна при взаимодействии с кромкой прямоугольного отверстия проанализируем схему сил, влияющих на частицу. За частицу принимается зерновка, размеры которой малы, имеющая физико-механические свойства. При этом зерновка рассматривается в виде материальной точки.

Кинематическая схема привода решетного стана представлена на рис. 1.

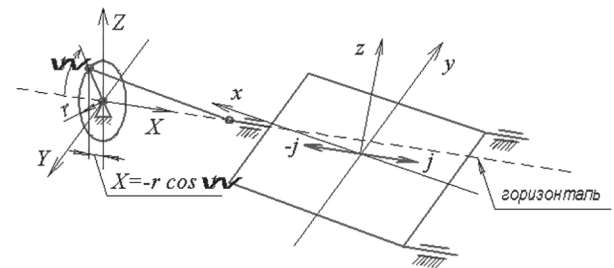


Рис. 1. Кинематическая схема привода решета

Решето совершает гармоническое колебание с амплитудой r и угловой частотой ω . Перемещение каждой, отдельно взятой точки решета за время t определяется зависимостью [6]:

$$X = -r \cdot \cos \omega t. \quad (1)$$

При этом скорость решета равна:

$$V = \frac{dX}{dt} = \omega r \sin \omega t, \quad (2)$$

а ускорение определяется зависимостью:

$$j = \frac{d^2X}{dt^2} = \omega^2 r \cos \omega t, \quad (3)$$

причем, в первой половине перемещения решета значения положительны, а во второй – они от-

рицательны, соответственно решетный стан меняет свое направление колебания (рис. 1).

Время периода колебания решета равно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (4)$$

Период времени, когда ускорение j положительно и направлено в сторону схода с поверхности решета, считается правым интервалом.

Период времени, когда ускорение j отрицательно и направлено против схода с поверхности решета, считается левым интервалом. Плоскость решета расположена под углом α по отношению к горизонтальной плоскости в продольном направлении и под углом α_{Π} – в поперечном направлении. Продолговатые отверстия решета расположены длинной стороной под углом α к продольной оси решета [6].

Колебания решета совершаются в горизонтальной плоскости.

Если решето совершает гармонические продольные колебания, то под действием ускорения решета j на частицу массой m , совершающую колебания вместе с решето, будет действовать сила инерции $U = m j$ в правом интервале и сила инерции $U = -m j$ – в левом.

Рассматривая взаимодействие частицы с длинной кромкой наклонного продолговатого отверстия, как взаимодействие с условным препятствием на пути движения частицы по сплошной (гладкой) поверхности, силу инерции можно разложить на три составляющие:

- первая – направленная перпендикулярно плоскости решета; она не вызывает перемещения частицы в плоскости решета;
- вторая – направленная перпендикулярно продольной грани отверстия решета; она уравновешивается реакцией R грани отверстия и движения частицы также не вызывает;
- третья – направленная вдоль грани отверстия; вызывает движение частицы вдоль грани отверстия [6].

При движении частицы возникает сила трения F , величина которой принимается равной:

$$F = N \cdot \text{tg}\phi, \quad (5)$$

где N – нормальная к плоскости решета реакция действующих сил на частицу; $\text{tg}\phi$ – коэффициент трения.

Направление этой силы противоположно направлению движения частицы.

Вертикальная сила тяжести G равна:

$$G = m \cdot g, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения.

Ее составляющая, направленная параллельно плоскости решета, может способствовать или препятствовать движению частицы.

Большие величины перемещения частицы вправо, чем влево, за один период колебаний решета приводят к отрицательному явлению: при работе решета зерно может сбиваться в сторону большего поперечного перемещения частицы [7].

То обстоятельство, что поперечный наклон решета влево при наклоне отверстий вправо позволит увеличить перемещение влево и уменьшить – вправо, позволяет выбрать такие значения поперечного наклона, которые могут устранить сбивание зернового материала в одну сторону [8].

Исходя из условия, что эффективность процесса сортирования пропорциональна суммарному пути, пройденному частицей за один период колебаний решета, следует считать, что углы наклона отверстий α более 20° не рациональны.

Для каждого угла наклона кромки отверстия к продольной оси решета существует свой угол поперечного наклона решета, при котором перемещения влево и вправо будут равны.

2. Определение показателей движения зерновки по решету, совершающему круговые движения

Для определения траектории движения зерновки воспользуемся Вторым законом Ньютона в дифференциальной форме (7), принимая, что зерновка движется по решету без отрыва:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} m = \sum_{i=1}^n F_{xi} \\ \frac{d^2y}{dt^2} m = \sum_{i=1}^n F_{yi} \\ \frac{d^2z}{dt^2} m = \sum_{i=1}^n F_{zi} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Силы, действующие на зерновку в системе координат $Oxyz$, проходящей осью Oz через ось электродвигателя (рис. 2):

- 1) движущая сила – $F_{дв}$;
- 2) сила тяжести зерновки – G ;
- 3) сила центробежной инерции – $F_{ин}$;
- 4) сила трения – $F_{тр}$.

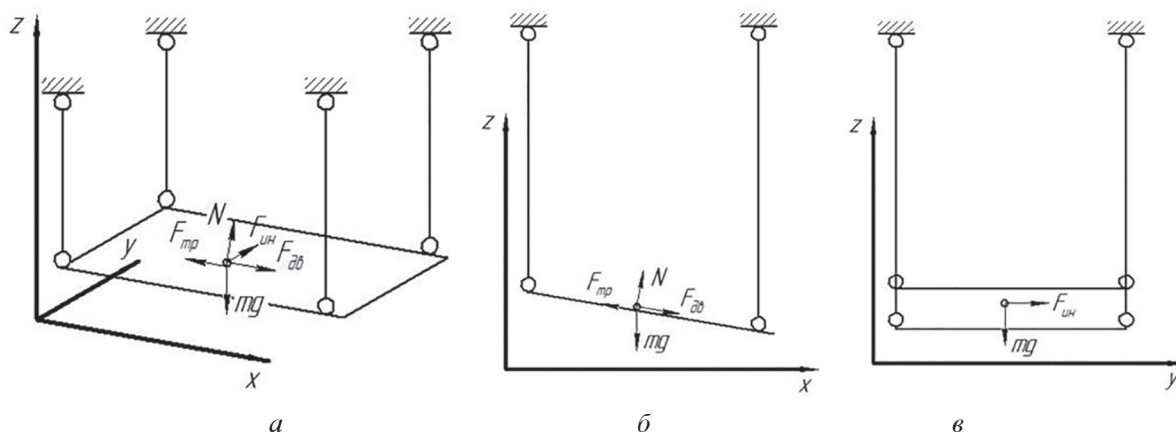


Рис. 2. Силы, действующие на зерновку:

a – в системе координат *Oxyz*; *б* – в плоскости *Xz*; *в* – в плоскости *Yz*

Рассмотрим каждую силу в отдельности.

Движущая сила. Так как вал электродвигателя имеет постоянную угловую скорость ω , то угол поворота кривошипа можно представить как $\varphi = \omega t$, следовательно, перемещение по осям координат можно записать:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos(\varphi) = r \cdot \cos(\omega t), \\ y &= r \cdot \sin(\varphi) = r \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (8)$$

Продифференцировав перемещение (8) по времени, найдем проекции переносной скорости

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{dx}{dt} = -\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t), \\ V_y &= \frac{dy}{dt} = \omega \cdot r \cdot \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (9)$$

Продифференцировав (9) еще раз получим переносные ускорения:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dV_x}{dt} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t), \\ a_y &= \frac{dV_y}{dt} = -\omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (10)$$

На основании этого можно записать уравнение движущей силы в матричной форме:

$$F_{дв} = m \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} -\omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t) \\ -\omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Сила тяжести. Действует в противоположную сторону направления оси *Oz*, что в матричной форме запишется:

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Сила центробежной инерции. Так как зерновка находится на вращающемся решетке, то на нее будет действовать сила центробежной инерции, которая определяется уравнением $F_{ин} = m \cdot a_{ц}$, где m – масса зерновки; $a_{ц}$ – центростремительное ускорение [9].

В нашем случае матричная форма записи силы центробежной инерции будет выглядеть:

$$F_{ин} = \begin{pmatrix} \omega^2 \cdot m \cdot r \cdot \cos(\alpha) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где α – угол наклона решета.

Сила трения. Согласно справочной литературе по зерноочистке, расчет ведут по углу трения зерновки о решето $\psi = \text{tg } 26^\circ$, тогда сила трения в матричной форме запишется

$$F_{тр} = \begin{pmatrix} g \cdot m \cdot \psi \cdot \sin(\omega t) \\ -g \cdot m \cdot \psi \cdot \cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Единожды проинтегрировав выражение (7) по времени с подстановкой формул (8)–(14)

$$\begin{cases} V_x(t) = \int \frac{F_{двх} + F_{инх} + G_x + F_{трх}}{m} dt \\ V_y(t) = \int \frac{F_{дву} + F_{ину} + G_y + F_{тры}}{m} dt. \end{cases} \quad (15)$$

мы получим скорость движения зерновки по решетке в системе координат *Oxyz* установки:

$$\begin{cases} V_x(t) = \int \frac{F_{двх} + F_{инх} + G_x + F_{трх}}{m} dt \\ V_y(t) = \int \frac{F_{дву} + F_{ину} + G_y + F_{тры}}{m} dt, \end{cases} \quad (16)$$

Дважды проинтегрировав выражение (7) по времени с подстановкой формул (8)–(14)

$$\begin{cases} x(t) = \iint \frac{F_{двх} + F_{инх} + G_x + F_{трх}}{m} dt dt \\ y(t) = \iint \frac{F_{дву} + F_{ину} + G_y + F_{тры}}{m} dt dt, \end{cases} \quad (17)$$

мы получим координаты траектории зерновки в системе координат $Oxzy$ установки:

$$\begin{cases} S_x(t) = \frac{2\omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t) - 2\psi \cdot g \cdot \sin(\omega t) + \omega^4 \cdot r \cdot t^2 \cdot \cos(\alpha)}{2\omega^2} \\ S_y(t) = \frac{\omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega t) + \psi \cdot g \cdot \cos(\omega t)}{\omega^2}. \end{cases} \quad (18)$$

Для определения траектории зерновки относительно решета необходимо перейти к системе координат $Ox'y'z'$. Новая система координат ориентирована следующим образом: Ox' – расположена поперек решета; Oy' – вдоль решета; Oz' – перпендикулярно решету [9].

Для перехода к новой системе координат $Ox'y'z'$ воспользуемся матрицей поворота:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

В новой системе координат силы запишутся следующим образом.

Движущая сила:

$$F_{дв}' = F_{дв} \cdot M. \quad (20)$$

Сила тяжести:

$$G' = G \cdot M. \quad (21)$$

Сила центробежной инерции:

$$F_{ин}' = F_{ин} \cdot M. \quad (22)$$

Сила трения:

$$F_{тр}' = \begin{pmatrix} G_z' \cdot \psi \cdot \sin(\omega t) \\ G_z' \cdot \psi \cdot \cos(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Проинтегрировав выражение (7) по времени с подстановкой формул (19)–(23)

$$\begin{cases} x'(t) = \int \frac{F_{двх}' + F_{инх}' + G_x' + F_{трх}'}{m} dt \\ y'(t) = \int \frac{F_{дву}' + F_{ину}' + G_y' + F_{тры}'}{m} dt, \end{cases} \quad (24)$$

мы получим скорость движения зерновки по решету в системе координат $Ox'y'z'$ установки:

$$\begin{cases} V_x(t) = \frac{\omega^3 \cdot r \cdot t \cdot \cos(\alpha) - \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega t) + \psi \cdot g \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha)}{\omega} \\ V_y(t) = -\frac{\psi \cdot g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\alpha) + \omega \cdot g \cdot t \cdot \sin(\alpha) - \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha)}{\omega}. \end{cases} \quad (25)$$

Дважды проинтегрировав выражение (7) по времени с подстановкой формул (19)–(23)

$$\begin{cases} x'(t) = \iint \frac{F_{двх}' + F_{инх}' + G_x' + F_{трх}'}{m} dt dt \\ y'(t) = \iint \frac{F_{дву}' + F_{ину}' + G_y' + F_{тры}'}{m} dt dt, \end{cases} \quad (26)$$

мы получим координаты траектории зерновки в системе координат $Ox'y'z'$ решета:

$$\begin{cases} S_x(t) = \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t) + 2 \cdot \psi \cdot g \cdot \sin(\omega t) \times \cos(\alpha) + \omega^4 \cdot r \cdot t^2 \cdot \cos(\alpha)}{2 \cdot \omega^2} \\ S_y(t) = \frac{2 \cdot \psi \cdot g \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\alpha) - \omega^2 \cdot g \cdot t^2 \times \sin(\alpha) + 2 \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\alpha)}{2 \cdot \omega^2}. \end{cases} \quad (27)$$

Результаты и обсуждение

Выполнив расчеты в системе компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования Mathcad по уравнениям (18) и (27), были получены соответственно графики, характеризующие траекторию движения зерновки [9]. Траектория движения, описываемая уравнением (18), представляет собой циклоиду. В зависимости от частоты вращения решета циклоида может быть укороченной или удлиненной. В нашем случае при заданных параметрах частоты вращения $n = 80...140 \text{ мин}^{-1}$ зерновка начинает движение по решету, совершая круговое перемещение, которое переходит в удлиненную циклоиду с последующим увеличением расстояния между витками.

Траектория движения зерновки по решету в системе координат, находящейся в его плоскости, определяется уравнением (27) и представляет собой синусоиду. В момент начала

движения зерновки по решетке она совершает перемещение по синусоиде с малым периодом, который в последующем увеличивается [9].

На основании выполненных расчетов перемещения зерновки по решетке можно сделать вывод, что при низкой частоте вращения время нахождения зернового вороха на решетке снижается, а при максимальной частоте увеличивается, о чем свидетельствует малое расстояние между витками циклоиды. Такое перемещение зерновки по решетке увеличивает вероятность ее попадания в отверстие решетки (рис. 3).

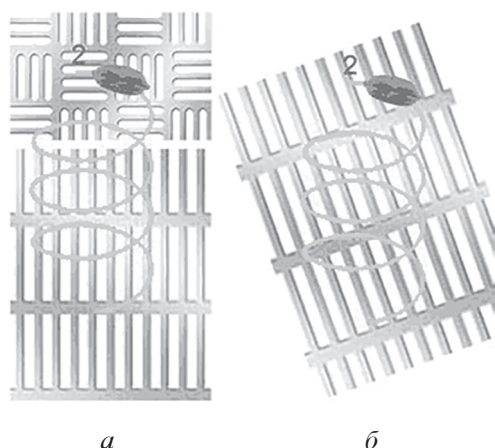


Рис. 3. Траектория движения зерновки по решеткам, совершающим круговые движения:
a – с прямыми рядами; *б* – с наклонными рядами

При этом во время кругового движения ориентация зерновки по отношению к отверстиям решетки меняется в несколько раз быстрее, чем при возвратно-поступательном движении, тем существеннее возрастает вероятность ее попадания в ячейки решетки. А изменение угла наклона отверстий относительно продольной оси решетки (рис. 3), позволяет увеличить пропускную способность и повысить качество разделения зернового материала.

Применение плоских решет с прямоугольными отверстиями, расположенными под углом к продольной оси, которые совершают круговые движения, позволит равномерно распределить зерновой материал на поверхности решетки, что увеличит вероятность попадания частицы в отверстие и повысит качество разделения зернового материала, в результате чего процесс сепарации (очистки) существенно улучшится.

На основании выполненных расчетов можно заключить следующее: процесс сепарации улучшается при угле наклона отверстий

решетки $\beta = 45^\circ$, частоте колебаний решетки $n = 110 \text{ мин}^{-1}$, амплитуде колебаний решетки $A = 0,09 \text{ м}$, угле поперечного наклона решетки $\alpha_{\text{п}} = 1,5^\circ \dots 2,5^\circ$. На этом режиме работы очистка зерновой смеси проводится качественно в соответствии с агротехническими требованиями.

Применение плоских подсевных решет с прямоугольными отверстиями, расположенными под углом к продольной оси, которые совершают круговые движения, позволит равномерно распределить зерновой материал на поверхности решетки, что увеличит вероятность попадания частицы в отверстие и повысит качество разделения зернового материала. В результате процесс сепарации (очистки) существенно улучшится.

Результаты экспериментальных исследований

В лабораторных исследованиях для определения рациональных параметров решетки применялся классический, отсеивающий и планируемый эксперименты. Для описания закономерностей качественного разделения зернового материала принят симметричный композиционный ортогональный план Плаккетта-Бермана с тремя факторами: n , β , G [10].

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Минимальная полнота разделения зернового вороха наблюдается при максимальной частоте вращения решетки и большем угле наклона кромок отверстий. Это объясняется тем, что зерновой материал не успевает задержаться на поверхности решетки и, принимая критическую скорость, соскальзывает в сход.

С целью увеличения времени нахождения зерновки на поверхности решетки необходимо использовать минимальную частоту вращения 80 мин^{-1} . При таких технологических параметрах повышается качество разделения зернового материала, однако при этом снижается его производительность, поэтому оптимальными выбраны следующие значения: частота вращения решетки 110 мин^{-1} , угол наклона длинных кромок прямоугольных отверстий решетки к его продольной оси 45° и удельная нагрузка на решетку $1,49 \text{ кг/м}^2\text{с}$ [10].

Выбранные величины позволяют качественно проводить очистку зернового вороха на фракции в соответствии с агротехническими требованиями.

Заключение

Исходя из проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Выявлено, что эффективность процесса сортирования пропорциональна суммарному пути, пройденному частицей за один период колебаний решета; следует считать, что углы наклона отверстий α' более 20° не рациональны.

2. Установлены зависимости движения зерна по решету при круговых движениях решетчатого стана. Определено, что при параметрах частоты вращения решета $n = 80...140$ мин⁻¹ зерновка начинает движение по решету, совершая круговое перемещение, которое переходит в удлиненную циклоиду с последующим увеличением расстояния между витками.

3. Выявлено, что при низкой частоте вращения время нахождения зернового вороха на решете снижается, а при максимальной частоте увеличивается, о чем свидетельствует малое расстояние между витками циклоиды. При этом во время кругового движения ориентация зерновки по отношению к отверстиям решета меняется в несколько раз быстрее, чем при возвратно-поступательном движении; тем существеннее возрастает вероятность ее попадания в ячейки решета. Изменение угла наклона отверстий относительно продольной оси решета позволяет увеличить пропускную способность и повысить качество разделения зернового материала.

Литература

1. Experimental registrations of plain sieve operation, making transverse fluctuations / U.K. Sabiev, E.V. Demchuk, A.Yu. Golovin, I.V. Skysanov. В сборнике Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2018) IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012074 doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012074.
2. Aguirre R. Continuous – flowing portable separator for cleaning and upgrading bean seeds and grains / R. Aguirre, A.E. Garay // Agr. Mech / Afr. And Lat. Amer. 1999. V. 30. № 1. P. 59–63.
3. Boumans, G. Grain Handling and Storage. Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1985. 608 p.
4. Choszcz, D. The determination of optimum parameters of various kinds of the sieve basket motion of winnowing machine on the cleaning process of mustard seeds / D. Choszcz, S. Konopka, K. Wierzbicki // Roczn. AR Poznaniu. Rol. 1996. № 49. P. 13–22.

5. Wang Guo-Xin Luoyang gongxueyuan xuebao / Wang Guo-Xin, Shi Qing-Xiang, Ni Chang-An, Liu Shi-Duo, Ji Jiang-Tao // J. Luoyang Inst. Technol. 2000. V. 21. № 1. P. 7–10.
6. Зильбернагель А.В., Сабиев У.К. Теоретическое исследование влияния траектории движения частицы на вероятность взаимодействия ее с кромками продолговатого отверстия решета // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 9 (83). С. 78–81.
7. Зюзьков Б.И. Подготовка вороха для испытания зерноочистительных машин // Науч. тр. Ом. с.-х. ин-т. Омск, 1972. Т. 94. С. 20–24.
8. Евтягин В.Ф., Черняков А.В. Граничные режимы бигармонических колебаний плоского решета // Естественные науки и экология: межвуз. сб. науч. тр. Омск, 2000. Вып. 5. С. 17–20.
9. Зильбернагель А.В. Влияние положения частицы относительно грани продолговатого отверстия решета на ее предельную скорость // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2003. № 2. С. 122.
10. Головин А.Ю. Обоснование конструктивно-режимных параметров плоского подсевного решета, совершающего круговые движения: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2018. 164 с.

References

1. Experimental registrations of plain sieve operation, making transverse fluctuations / U.K. Sabiev, E.V. Demchuk, A.Yu. Golovin, I.V. Skysanov. V sbornike Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2018) IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012074 doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012074.
2. Aguirre R. Continuous – flowing portable separator for cleaning and upgrading bean seeds and grains / R. Aguirre, A.E. Garay // Agr. Mech / Afr. And Lat. Amer. 1999. Vol. 30, No 1. P. 59–63.
3. Boumans, G. Grain Handling and Storage. Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1985. 608 p.
4. Choszcz, D. The determination of optimum parameters of various kinds of the sieve basket motion of winnowing machine on the cleaning process of mustard seeds / D. Choszcz, S. Konopka, K. Wierzbicki // Roczn. AR Poznaniu. Rol. 1996. No 49. P. 13–22.
5. Wang Guo-Xin Luoyang gongxueyuan xuebao / Wang Guo-Xin, Shi Qing-Xiang, Ni Chang-An, Liu Shi-Duo, Ji Jiang-Tao // J. Luoyang Inst. Technol. 2000. V. 21. No 1. P. 7–10.
6. Zil'bernagel' A.V., Sabiyev U.K. Theoretical study of the influence of the trajectory of a particle on

- the probability of its interaction with the edges of an oblong hole of the sieve. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. No 9 (83), pp. 78–81 (in Russ.).
7. Zyuz'kov B.I. Preparing a heap for testing grain cleaning machinery. Nauch. tr. Om. s.-kh. in-t. Omsk, 1972. Vol. 94, pp. 20–24 (in Russ.).
 8. Yevtyagin V.F., Chernyakov A.V. Boundary modes of biharmonic vibrations of a flat sieve. Yestestvenn-yye nauki i ekologiya: Mezhvuz. sb. nauch. tr. Omsk, 2000. Vyp. 5, pp. 17–20 (in Russ.).
 9. Zil'bernagel' A.V. Influence of the position of a particle relative to the plane of an oblong hole of the sieve on its limiting velocity. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2003. No 2, pp. 122 (in Russ.).
 10. Golovin A.Yu. Obosnovaniye konstruktivno-rezhimnykh parametrov ploskogo podsevnogo re-sheta, sovershayushchego krugov-yye dvizheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Justification of the design and operating parameters of a flat undersowing sieve in circular motion: Dissertation for the Degree of Dr.Eng.]. Barnaul, 2018. 164 p.