

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5703

УДК 631.3.03

Статья

Теоретический анализ кинематических параметров решетных станов зерноочистительных машин

Шацкий Владимир Павлович

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и физики
ФГБОУ ВО ВГАУ (Российская Федерация), sha.vladim@yandex.ru*

Оробинский Владимир Иванович

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин,
тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО ВГАУ (Российская Федерация), n7477@mail.ru*

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики
ФГБОУ ВО ВГАУ (Российская Федерация), dmafonichev@yandex.ru*

Аксенов Игорь Игоревич

*старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО ВГАУ
(Российская Федерация), igor-aksenov1989@ya.ru*

Корнев Андрей Сергеевич

*кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования, процессов
перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности
жизнедеятельности ФГБОУ ВО ВГАУ (Российская Федерация), kornev.andr@mail.ru*

Получена: 20 апреля 2021 / Принята: 31 мая 2021 / Опубликовано: 7 июня 2021

Аннотация: В подавляющем большинстве зерноочистительных машин в качестве основного рабочего органа используются решетчатые станы с набором плоских перфорированных полотен, перфорация которых выполнена в виде различных геометрических отверстий разных размеров и расположения. Работа подвешенного на плоских металлических подвесках корпуса с решетками осуществляется за счёт приводного механизма и представляет собой возвратно-поступательное движение заданной амплитуды и частоты. При этом детали машины испытывают серьёзные знакопеременные нагрузки, что приводит к выходу её из строя. Устранение данной проблемы имеет высокую актуальность

для разработчиков и потребителей зерноочистительной техники. Представлены уравнения, связывающие горизонтальные и вертикальные перемещения решетного стана с углом поворота эксцентрика привода, линейно зависящим от времени. Ввиду громоздкости аналитических решений этих уравнений были аппроксимированы численные значения горизонтальных и вертикальных ускорений в зависимости от времени полиномами 13-го порядка, которые поддаются дифференцированию и позволили установить зависимости горизонтальных и вертикальных скоростей и ускорений решетного стана от времени, а следовательно, и от угла поворота эксцентрика привода. Результаты расчётов показали, что особенно велики горизонтальные ускорения. Их максимальное и минимальное значения составляют соответственно 38,6 и $-35,3 \text{ м/с}^2$. Очевидно, что они создают большие силы инерции, вызывающие биения решетных станов. При изменении некоторых геометрических параметров привода эти ускорения значительно изменяются. При изменении длины шатуна и параметра установки оси вращения эксцентрика максимальное по модулю горизонтальное ускорение практически не меняется. При увеличении параметра установки оси вращения эксцентрика максимальное по модулю вертикальное ускорение увеличивается. При уменьшении значения радиуса эксцентрика максимальное по модулю горизонтальное ускорение уменьшается. При увеличении угловой скорости вращения эксцентрика как горизонтальное, так и вертикальное ускорения увеличиваются.

Ключевые слова: зерноочистительная машина, решетный стан, привод, эксцентрик привода, горизонтальное перемещение, вертикальное перемещение, горизонтальное ускорение, вертикальное ускорение, сила инерции, вибрация

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5703

Article

Theoretical analysis of kinematic parameters of sieve mills for grain cleaning machines

Shatsky Vladimir

D. Sc. in engineering, professor, head of the department of mathematics and physics of FSBEI HE VSAU (Russian Federation), sha.vladim@yandex.ru

Orobinsky Vladimir

D. Sc. in engineering, professor, head of the department of agricultural machinery, tractors and automobiles, dean of the faculty of agricultural engineering of FSBEI HE VSAU (Russian Federation), n7477@mail.ru

Afonichev Dmitry

D. Sc. in engineering, professor, head of the department of electrical engineering and automation of FSBEI HE VSAU (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru

Aksenov Igor

senior lecturer of the department of electrical engineering and automation of FSBEI HE VSAU (Russian Federation), igor-aksenov1989@ya.ru

Kornev Andrey

Ph. D. in engineering, associate professor of the department of technological equipment, processes of processing industries, agricultural mechanization and life safety of FSBEI HE VSAU (Russian Federation), kornev.andr@mail.ru

Received: 20 April 2021 / Accepted: 31 May 2021 / Published: 7 June 2021

Abstract: Sieve mills are used in the vast majority of grain cleaning machines as the main working body. They are equipped with a set of flat perforated sheets, with the perforation being made in the form of various geometric holes of different sizes and locations. The work of the body suspended on flat metal suspensions with sieves is performed by a drive mechanism and is a reciprocating motion of a given amplitude and frequency. At the same time, the machine parts experience serious alternating loads, which lead to its failure. The elimination of this problem is highly relevant for developers and consumers of grain cleaning equipment. The authors present equations connecting the horizontal and vertical displacements of the grating mill with the angle of rotation of the drive eccentric, which depends linearly on time. In view of the

cumbersome analytical solutions of these equations, the numerical values of the horizontal and vertical accelerations as a function of time were approximated by the 13th-order polynomials, which can be differentiated and allowed us to establish the dependence of the horizontal and vertical velocities and accelerations of the grating mill on time, and therefore on the angle of the drive eccentric rotation. The results of the calculations showed that the horizontal accelerations are particularly large. Their maximum and minimum values are 38.6 and -35.3 m / s², respectively. It is obvious that they create large inertia forces that cause sieve mills wobbling. When some geometrical parameters of the drive are changed, these accelerations change significantly. When changing the length of the connecting rod and the setting parameter of the axis of rotation of the eccentric, the maximum modulo horizontal acceleration practically does not change. When the setting parameter of the axis of rotation of the eccentric increases the maximum modulo vertical acceleration increases as well. As the value of the radius of the eccentric decreases, the maximum modulo horizontal acceleration also decreases. As the angular velocity of the eccentric increases, both the horizontal and vertical accelerations increase.

Keywords: grain cleaning machine, grating mill, drive, drive eccentric, horizontal displacement, vertical displacement, horizontal acceleration, vertical acceleration, inertia force, vibration

1. Введение

Количественные показатели зернового производства в нашей стране постоянно увеличиваются. Этому способствуют грамотная селекция семенного материала, использование стимулирующих рост и развитие растений химических препаратов, органических и минеральных удобрений, а также постоянное совершенствование технического оснащения технологической линии по производству зерновых культур. Немалое значение на качество убранного материала оказывает послеуборочная обработка, основой которой служат различные сепарационные машины. В подавляющем большинстве зерноочистительных машин в качестве основного рабочего органа используются решетчатые станы с набором плоских перфорированных полотен, перфорация которых выполнена в виде различных геометрических отверстий разных размеров и расположения [2], [3], [8]. Работа подвешенного на плоских металлических подвесках корпуса с решетками осуществляется за счёт приводного механизма и представляет собой возвратно-поступательное движение заданной амплитуды и частоты. При этом детали машины испытывают серьёзные знакопеременные нагрузки, что приводит к выходу её из строя. Устранение данной проблемы имеет высокую актуальность для разработчиков и потребителей зерноочистительной техники.

Цель настоящей работы заключается в установлении закономерностей изменения горизонтальных и вертикальных перемещений, скоростей и ускорений решетчатого стана в процессе его работы, которые позволят определить предельные отклонения решетчатого стана и силы инерции, возникающие при реализации технологического процесса и влияющие на вибрацию зерноочистительных машин.

2. Материалы и методы

Процесс работы зерноочистительной машины тесно связан с работой плоских решет, расположенных в решетчатом стане. Эффективность их работы зависит от большого количества факторов [3], [4], [5], [6], [7], но влияние режимных параметров на данный момент является наиболее изученным. При этом остаётся мало исследованным влияние вибрации, передающейся от решетчатого стана к машине. Такое воздействие носит только негативный характер, т. к. оно, во-первых, разрушает узлы машины, а во-вторых, передаётся через напольное покрытие в зону расположения оператора, что отрицательно сказывается на его здоровье [3], [8], [10], [11], [12], [13], [14]. Для устранения озвученной проблемы необходимо изучить механику рабочего процесса и установить природу возникновения сил, влияющих на процесс образования вредной вибрации.

Сепарационный решетчатый стан, подвешенный на двух парах упругих подвесок, совершает колебания за счёт эксцентрика радиусом R с центром в точке D (рисунок 1). При этом он совершает поступательное движение по окружности радиуса, равного длине подвесок L . При повороте эксцентрика на угол $\alpha = kt$, (k — угловая скорость вращения, c^{-1} , t — время, с)

точка С перемещается в точку М, а точка А — в точку В, тогда $|OA|=|OB|=L$, радиус эксцентрика $|DC|=|DM|=R$, длина шатуна $|AC|=|BM|=S$ [1], [2], [9].

Пусть x_1, y_1 — координаты точки М, а x, y — координаты точки В в системе координат xAy , тогда $x^2 + (L-y)^2 = L^2$, откуда:

$$\begin{aligned} y &= L - \sqrt{L^2 - x^2}; \\ x &= \sqrt{L^2 - (L-y)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

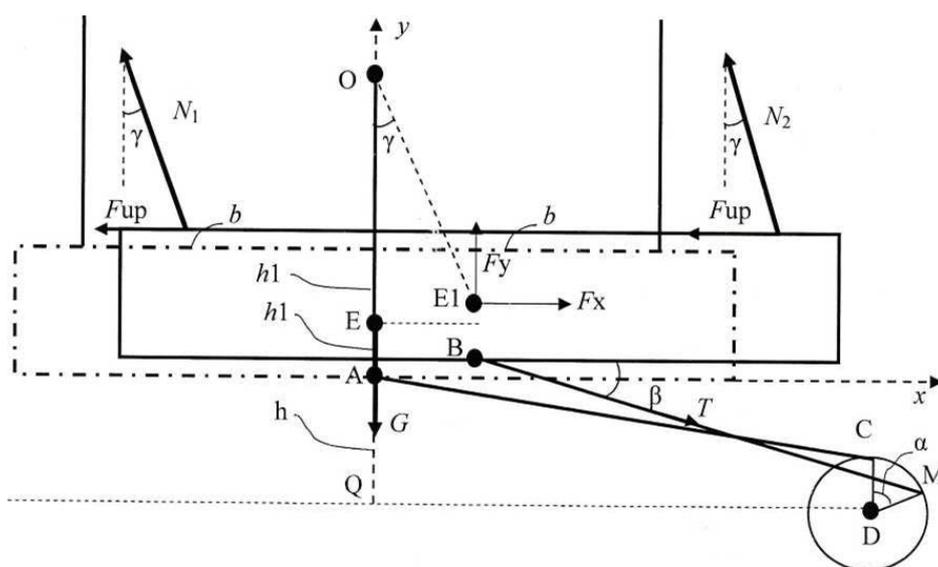


Рисунок 1. Принципиальная схема механизма привода решетчатого стана [9]

Figure 1. Schematic diagram of the drive mechanism of the grid mill [9]

3. Результаты

Координаты x_1, y_1 определяются по формулам

$$\begin{aligned} x_1 &= \sqrt{S^2 - (h-R)^2} + R \sin \alpha; \\ y_1 &= R \cos \alpha - h. \end{aligned} \quad (2)$$

Через координаты точек В и М определим длину отрезка ВМ:

$$\left(\sqrt{S^2 - (h-R)^2} + R \sin \alpha - x \right)^2 + (R \cos \alpha - h - y)^2 = S^2. \quad (3)$$

С учётом формул (2) получим:

$$\begin{aligned} & \left(\sqrt{S^2 - (h - R)^2} + R \sin \alpha - x \right)^2 + \left(R \cos \alpha - h - L + \sqrt{L^2 - x^2} \right)^2 = S^2; \\ & \left(\sqrt{S^2 - (h - R)^2} + R \sin \alpha - \sqrt{L^2 - (L - y)^2} \right)^2 + (R \cos \alpha - h - y)^2 = S^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (4) позволяют установить зависимости координат точки В (x , y) от времени t .

Решение первого из уравнений (4) очень громоздкое, что, в частности, затрудняет его дифференцирование. Нами предложена полиномиальная аппроксимация зависимости $x(t)$ при следующих значениях, входящих в решение параметров: $L = 0,7$ м, $S = 0,6$ м, $h = 0,065$ м, $R = 0,03$ м, $k = 35$ с⁻¹. Относительные погрешности аппроксимации $x(t)$ и двух её производных многочленами разных порядков показаны в таблице.

Как видно из этой таблицы, многочлен 13-го порядка даёт относительную погрешность не более 3 %. Аппроксимационный полином имеет вид:

$$\begin{aligned} x(t) = & 1,05t + 1,16t^2 - 216t^3 + 65,3t^4 + 0,228 \cdot 10^5 t^5 - 0,348 \cdot 10^6 t^6 + \\ & + 0,396 \cdot 10^7 t^7 - 0,266 \cdot 10^8 t^8 + 0,918 \cdot 10^8 t^9 - 0,133 \cdot 10^9 t^{10} + \\ & + 0,468 \cdot 10^7 t^{11} + 0,835 \cdot 10^8 t^{12} + 0,687 \cdot 10^8 t^{13}. \end{aligned} \quad (5)$$

Дифференцируя выражение (5) по времени, получим зависимость горизонтальной скорости $v_x(t)$ решетного стана от времени:

$$\begin{aligned} v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = & 1,05 + 2,32t - 647t^2 + 261t^3 + 0,114 \cdot 10^6 t^4 - 0,209 \cdot 10^7 t^5 + \\ & + 0,277 \cdot 10^8 t^6 - 0,213 \cdot 10^9 t^7 + 0,826 \cdot 10^9 t^8 - 0,133 \cdot 10^{10} t^9 + \\ & + 0,515 \cdot 10^8 t^{10} + 0,1 \cdot 10^{10} t^{11} + 0,893 \cdot 10^9 t^{12}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таблица. Относительные погрешности аппроксимации

Table. Relative approximation errors

Порядок многочлена	Погрешность, % $x(t)$	Погрешность, % $v_x(t)$	Погрешность, % $a_x(t)$
9	8,2	2,3	16,8
10	7,2	0,26	6,0
11	2,9	0,29	3,22
12	2,5	0,27	3,1
13	2,3	0,27	3,0
14	2,2	0,27	3,0

Вторая производная от $x(t)$ даёт зависимость горизонтального ускорения $a_x(t)$ решетного стана от времени:

$$\begin{aligned}
 a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = & 2,32 - 1290t + 784t^2 + 0,455 \cdot 10^6 t^3 - 0,104 \cdot 10^8 t^4 + \\
 & + 0,166 \cdot 10^9 t^5 - 0,149 \cdot 10^{10} t^6 + 0,661 \cdot 10^{10} t^7 - \\
 & - 0,12 \cdot 10^{11} t^8 + 0,515 \cdot 10^9 t^9 + 0,11 \cdot 10^{11} t^{10} + 0,107 \cdot 10^{11} t^{11}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Зависимость вертикальных перемещений от времени $y(t)$ определяется по второму уравнению (4), решение которого тоже очень громоздкое. Аппроксимация численной зависимости вертикальных перемещений от времени при указанных выше значениях параметров решетного стана даёт следующие приближённые значения для вертикальных кинематических характеристик.

$$\begin{aligned}
 y(t) = & -0,558 \cdot 10^{-5} t + 0,79t^2 + 1,73t^3 - 336t^4 + 254t^5 + 0,751 \cdot 10^5 t^6 - \\
 & - 0,145 \cdot 10^7 t^7 + 0,258 \cdot 10^8 t^8 - 0,377 \cdot 10^9 t^9 + 0,261 \cdot 10^{10} t^{10} - \\
 & - 0,114 \cdot 10^{11} t^{11} + 0,264 \cdot 10^{11} t^{12} - 0,253 \cdot 10^{11} t^{13}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

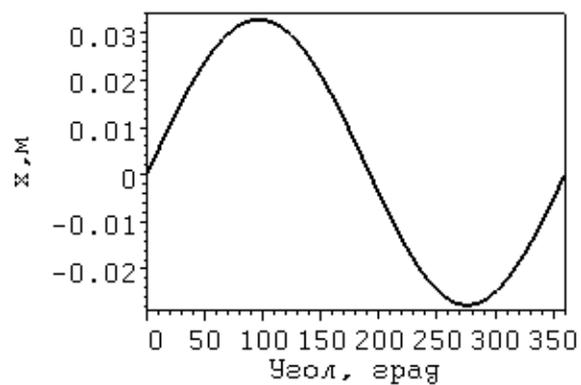
$$\begin{aligned}
 v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt} = & -0,558 \cdot 10^{-5} + 1,58t + 5,18t^2 - 0,134 \cdot 10^4 t^3 + 0,127 \cdot 10^4 t^4 + \\
 & + 0,45 \cdot 10^6 t^5 - 0,102 \cdot 10^8 t^6 + 0,206 \cdot 10^9 t^7 - \\
 & - 0,303 \cdot 10^{10} t^8 + 0,261 \cdot 10^{11} t^9 - 0,126 \cdot 10^{12} t^{10} + \\
 & + 0,317 \cdot 10^{12} t^{11} - 0,328 \cdot 10^{12} t^{12}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 a_y(t) = \frac{dv_y(t)}{dt} = & 1,58 + 10,4t - 0,403 \cdot 10^4 t^2 + 0,507 \cdot 10^4 t^3 + \\
 & + 0,225 \cdot 10^7 t^4 - 0,61 \cdot 10^8 t^5 + 0,144 \cdot 10^{10} t^6 - \\
 & - 0,243 \cdot 10^{11} t^7 + 0,235 \cdot 10^{12} t^8 - 0,126 \cdot 10^{13} t^9 + \\
 & + 0,349 \cdot 10^{13} t^{10} - 0,394 \cdot 10^{13} t^{11}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

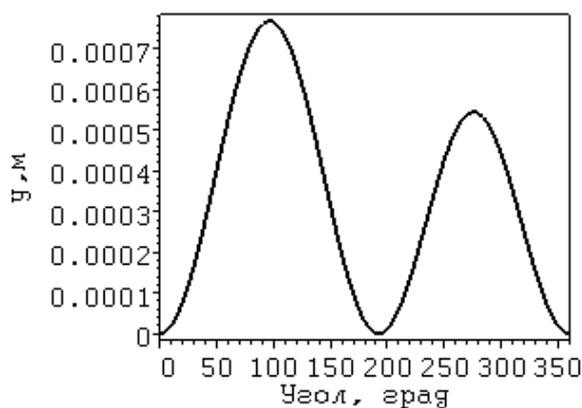
Визуализацию зависимостей кинематических и динамических характеристик движения удобнее приводить в зависимости от угла поворота эксцентрика α , выраженного в градусах, который связан с временем t формулой

$$t = \frac{\pi\alpha}{180k}. \tag{11}$$

Зависимости величин горизонтальных и вертикальных перемещений от угла поворота эксцентрика α при $L = 0,7$ м, $S = 0,6$ м, $h = 0,065$ м, $R = 0,03$ м, $k = 35$ с⁻¹ представлены на рисунке 2. Как видно из этих графиков, наблюдается асимметрия движения решетного стана.



a

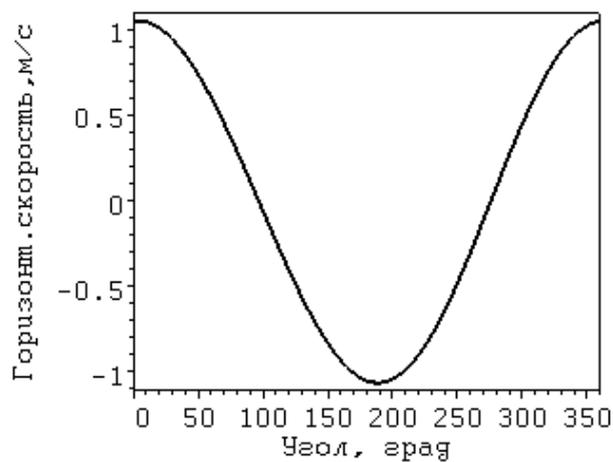


б

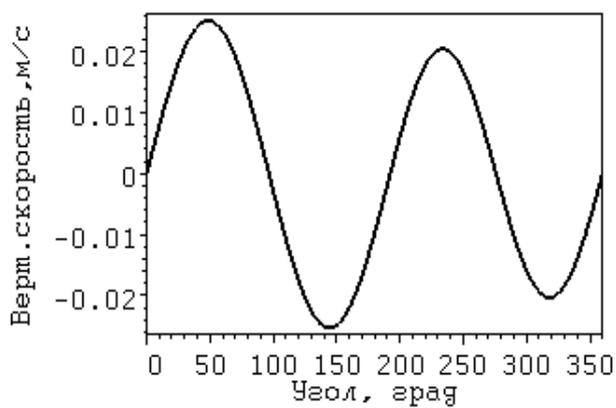
Рисунок 2. Зависимости величин горизонтальных (*a*) и вертикальных (*б*) перемещений решетного стана от угла поворота эксцентрика

Figure 2. The dependence of the values of the horizontal (*a*) and vertical (*b*) displacements of the grating mill on the eccentric rotation angle

Графики зависимостей величин скоростей v_x и v_y от угла поворота эксцентрика представлены на рисунке 3.



a



б

Рисунок 3. Зависимости величин горизонтальных (*a*) и вертикальных (*б*) скоростей решетного стана от угла поворота эксцентрика

Figure 3. The dependence of the values of the horizontal (*a*) and vertical (*b*) speeds of the grating mill on the eccentric rotation angle

Графики зависимостей величин ускорений a_x и a_y от угла поворота эксцентрика представлены на рисунке 4.

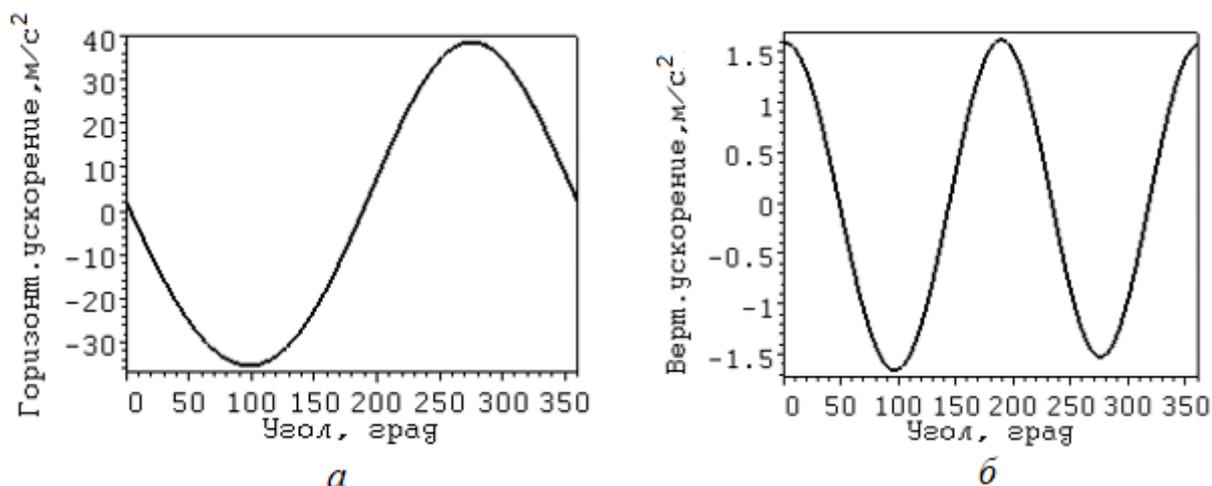


Рисунок 4. Зависимости величин горизонтальных (а) и вертикальных (б) ускорений решетного стана от угла поворота эксцентрика

Figure 4. The dependence of the values of the horizontal (a) and vertical (b) accelerations of the grating mill on the eccentric rotation angle

4. Обсуждение и заключение

Как видно из графиков, представленных на рисунке 4, особенно велики горизонтальные ускорения. Их максимальное и минимальное значения составляют соответственно 38,6 и $-35,3 \text{ м/с}^2$. Очевидно, что они создают большие силы инерции, вызывающие биения решетных станов. В силу того, что линия действия шатуна привода ВС не проходит через центр масс решетного стана E_1 , то возникающие при работе моменты вызывают и значительные вертикальные биения.

Отметим, что при изменении некоторых геометрических параметров привода эти ускорения значительно изменяются. При изменении S и h максимальное по модулю горизонтальное ускорение практически не меняется. При увеличении h максимальное по модулю вертикальное ускорение увеличивается. Так, при $h = 0,065 \text{ м}$ оно равно $1,54 \text{ м/с}^2$, при $h = 0,1 \text{ м}$ — $1,7 \text{ м/с}^2$, а при $h = 0,15 \text{ м}$ — 2 м/с^2 . При уменьшении значения радиуса эксцентрика R максимальное по модулю горизонтальное ускорение уменьшается. Так, при $R = 0,03 \text{ м}$ максимальное по модулю горизонтальное ускорение равно $38,6 \text{ м/с}^2$, а при $R = 0,02$ оно равно $25,3 \text{ м/с}^2$. При увеличении угловой скорости вращения эксцентрика k как горизонтальное, так и вертикальное ускорения увеличиваются. Так, при $k = 20 \text{ с}^{-1}$ максимальное по модулю горизонтальное ускорение равно $12,6 \text{ м/с}^2$, а при $k = 30 \text{ с}^{-1}$ оно равно $28,3 \text{ м/с}^2$.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить горизонтальные и вертикальные перемещения центра масс решетного стана, ускорения и силы инерции при любом угле поворота эксцентрика.

Список литературы

1. Аксенов И. И., Шацкий В. П. О вертикальных силах инерции решетных станов // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. научно-практич. конф., г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. Ч. II. С. 295—299.
2. Аксенов И. И., Шацкий В. П. О горизонтальных биениях решетных станов // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. научно-практич. конф., г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. Ч. II. С. 299—304.
3. Анализ влияния конструктивных и режимных параметров работы решетного стана зерноочистительной машины на уровень общей вибрации / А. С. Корнев, В. И. Оробинский, И. И. Аксенов, А. С. Майгуров // Наука вчера, сегодня, завтра: материалы научно-практич. конф., г. Воронеж, 05—09 сент. 2016 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. С. 23—28.
4. Беляев А. Н., Шередекин В. В., Шередекин П. В. Влияние жёсткости подвесок на затраты мощности на привод решетного стана зерноочистительной машины // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. научно-практич. конф., г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. Ч. II. С. 41—43.
5. Быков В. С., Кутищев Д. С. К анализу кинематики плоского решета, совершающего колебания с большими амплитудами // Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе: сб. ст. Всерос. научно-практич. конф., г. Воронеж, 19—20 июня 2017 г. Воронеж: АНО ВО «Автомобильно-транспортный институт», 2017. С. 10—16.
6. Быков В. С., Кутищев Д. С., Свиридов В. Г. Кинематические параметры качающегося решета в случае подвесок решетного стана различной длины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4, № 5-2 (25-2). С. 173—177.
7. Повышение производительности семяочистительной машины на основе анализа движения зернового вороха по сепарационному решету / В. И. Оробинский, В. П. Шацкий, Л. И. Федулова, И. В. Гриднева, К. Р. Казаров // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 4 (59). С. 92—99.
8. A comparative analysis of precision seed planters / N. Sharaby, A. Doroshenko, A. Butovchenko, A. Legkonogih // E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09—14 September 2019. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. P. 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501080.
9. Analysis of the beats of separation sieve pans / V. P. Shatsky, V. I. Orobinsky, I. I. Axonov, A. S. Kornev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. 659 (2021). P. 012106.
10. Babic M., Babic L. Influence of basic wheat grain physical properties onto hydrodinamical regimes // AgEng. Madrid 23—26 September 1996. P. 96F—067.
11. Bohnet M. Mechanische Verfahrenstechnik. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. 270 s.
12. Saitov V. E., Kurbanov R. F., Suvorov A. N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines // Procedia Engineering, Chelyabinsk, 19—20 may 2016. Chelyabinsk: Elsevier Ltd, 2016. P. 107—110.

13. Studying the design and operational parameters of the sieve module of the grain cleaning machine / M. K. Kharitonov, A. M. Gievsky, V. I. Orobinsky, A. V. Chernyshov, I. V. Baskakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. P. 012—021.
14. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A. M. Gievsky, V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko, A. V. Chernyshov, D. O. Kurilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic resource. 2018. P. 042035.

References

1. Aksenov I. I., Shatsky V. P. About vertical forces of inertia of sieve mills. *Actual directions of scientific research for the effective development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference; Voronezh, March 27, 2020*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, part II, pp. 295—299. (In Russ.)
2. Aksenov I. I., Shatsky V. P. On horizontal beats of sieve mills. *Actual directions of scientific research for the effective development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference; Voronezh, March 27, 2020*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, part II, pp. 299—304. (In Russ.)
3. Kornev A. S., Orobinsky V. I., Aksenov I. I., Maigurov A. S. Analysis of the influence of constructive and operational parameters of the grating mill of a grain cleaning machine on the level of general vibration. *Nauka yesterday, today, tomorrow: materials of the scientific and practical conference, Voronezh, 05—09 September 2016*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2016, pp. 23—28. (In Russ.)
4. Belyaev A. N., Sheredekin V. V., Sheredekin P. V. Influence of suspension stiffness on the power consumption for the drive of the grating mill of the grain cleaning machine. *Actual directions of scientific research for the effective development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, March 27, 2020*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 41—43. (In Russ.)
5. Bykov V. S., Kutischev D. S. K analizu kinematiki ploskogo sievet, makershayuschego fluctuations with large amplitudes. *Actual problems of science and education at the present stage: collection of articles of the All-Russian Scientific and practical conference, Voronezh, June 19—20, 2017*. Voronezh, ANO VO «Automobile and Transport Institute», 2017, pp. 10—16. (In Russ.)
6. Bykov V. S., Kutischev D. S., Sviridov V. G. Kinematic parameters of a swinging sieve in the case of suspensions of a lattice mill of various lengths. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2016, t. 4, no. 5-2 (25-2), pp. 173—177. (In Russ.)
7. Orobinskiy V. I., Shatsky V. P., Fedulova L. I., Gridneva I. V., Kazarian K. R. Improving the performance of seed-cleaning machine, based on analysis of the movement of grain heap separation for the sieve. *Bulletin of the Voronezh state agrarian University*, 2018, no. 4 (59), pp. 92—99. (In Russ.)
8. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A., Legkonogih A. A comparative analysis of precision seed planters. *E3S Web of Conferences : Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09—14 September 2019*. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019, pp. 01080. doi: 10.1051/e3sconf/201913501080.
9. Shatsky V. P., Orobinsky V. I., Axeonov I. I., Kornev A. S. Analysis of the beats of separation sieve pans. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 659 (2021), pp. 012106.

10. Babic M., Babic L. Influence of basic wheat grain physical properties onto hydrodinamical regimes. *AgEng. Madrid 23—26 September 1996*, pp. 96F—067.
11. Bohnet M. *Mechanische Verfahrenstechnik*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KgaA, 2004. 270 s.
12. Saitov V. E., Kurbanov R. F., Suvorov A. N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines. *Procedia Engineering, Chelyabinsk, 19—20 may 2016*. Chelyabinsk, Elsevier Ltd, 2016, pp. 107—110.
13. Kharitonov M. K., Gievsky A. M., Orobinsky V. I., Chernyshov A. V., Baskakov I. V. Studying the design and operational parameters of the sieve module of the grain cleaning machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, pp. 012—021.
14. Gievsky A. M., Orobinsky V. I., Tarasenko A. P., Chernyshov A. V., Kurilov D. O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering electronic resource*, 2018, pp. 042035.

© Шацкий В. П., Оробинский В. И., Афоничев Д. Н., Аксенов И. И., Корнев А. С., 2021