

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ГРОХОТА ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СЕПАРИРУЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

КАТУСОВ Дмитрий Николаевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

Рассматривается методика определения мощности привода плоского наклонного качающегося грохота с учетом влияния ударного воздействия сепарируемого материала. В известных общепринятых методиках определения мощности привода грохота данному вопросу не уделяется достаточного внимания, однако во многих случаях влияние ударного воздействия обрабатываемого материала на наклонную поверхность грохота является существенным фактором, влияющим на кинематические, динамические и технологические параметры его работы. Приводится методика определения силы давления потока частиц обрабатываемого материала на неподвижную и движущуюся наклонную поверхность грохота, анализируется ее влияние на расчетную мощность привода грохота.

Введение. Особенность работы плоских качающихся сепарирующих устройств (грохотов), используемых во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства, часто состоит в том, что обрабатываемый материал оказывает на поверхность грохота ударное воздействие. Поэтому при проектировании грохотов возникает задача выявления влияния ударного воздействия обрабатываемого материала на конструктивно-режимные и технологические параметры с целью их оптимизации.

Целью исследований является разработка методики определения мощности привода грохота с учетом ударного воздействия обрабатываемого материала на его рабочую поверхность.

Методика исследований. Известны некоторые методики определения мощности, затрачиваемой на привод грохотов, однако вопросу выявления влияния ударного взаимодействия с обрабатываемым материалом не уделено достаточного внимания. Между тем, во многих случаях данный вопрос является актуальным и требует к себе более пристального внимания.

Рассмотрим данный вопрос на примере работы двухъярусного грохота, входящего в состав «Линии для приготовления субстрата» [6, 7, 9, 10] при вермикультивировании. Технологическая схема работы грохота представлена на рис. 1.

Верхний ярус грохота выполнен в виде продольных колосников, он воспринимает вертикальную ударную нагрузку от обрабатываемого материала, производит отделение крупных сходовых фракций обрабатываемого материала и одновременно гасит излишнюю кинетическую энергию обрабатываемого материала, защищая нижний ярус грохота от излишних ударных нагрузок.

На нижнем ярусе грохота производится окончательное фракционирование обрабатываемого материала. Сходовые фракции с обоих ярусов удаляются поперечным ленточным транспортером, проходные фракции – продольным ленточным транспортером.

Поскольку специфика работы сепарирующего устройства такова, что происходит ударное

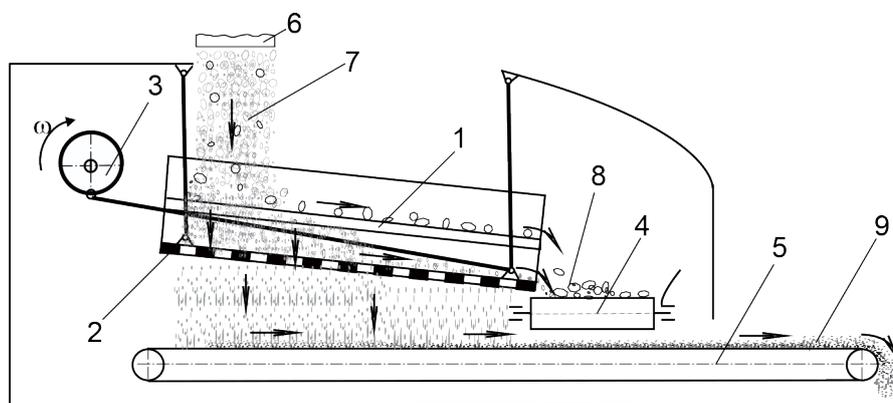


Рис. 1. Технологическая схема работы грохота:
1 – верхний ярус грохота; 2 – нижний ярус грохота; 3 – привод;
4 – поперечный транспортер; 5 – продольный транспортер;
6 – бункер-дозатор; 7 – поток обрабатываемого материала;
8 – сходовая фракция; 9 – проходная фракция



взаимодействие обрабатываемого материала, имеющего определенный запас кинетической и потенциальной энергии и колосников верхнего яруса двухъярусного грохота, то при проектировании грохота задача выявления влияния ударного воздействия обрабатываемого материала на затраты мощности актуальна и требует решения [2–5]. В лабораторных условиях с целью оптимизации технологических и конструктивных параметров сепарирующего устройства для моделирования процесса ударного воздействия материала на грохот над грохотом был установлен бункер-питатель с регулируемой подачей обрабатываемого материала (см. рис. 1). В работе исследуется процесс удара, происходящий на верхнем ярусе, а для описания процесса просеивания на нижнем ярусе грохота можно использовать стандартные методики.

Результаты исследований. В предлагаемой конструкции сепарирующего устройства выходное сечение АВ бункера-питателя имеет форму прямоугольника со сторонами a, b (рис. 2, а). Площадь выходного сечения $\Delta S = ab$ регулируется заслонкой (изменяется сторона a). Края выходного сечения (т. А и В) находятся на высоте H_0 и H_2 над наклонной рабочей поверхностью грохота, причем:

$$H_2 - H_0 = atg \alpha, \quad (1)$$

где α – угол наклона рабочей поверхности, выбираемый обычно меньше угла трения материала о поверхность

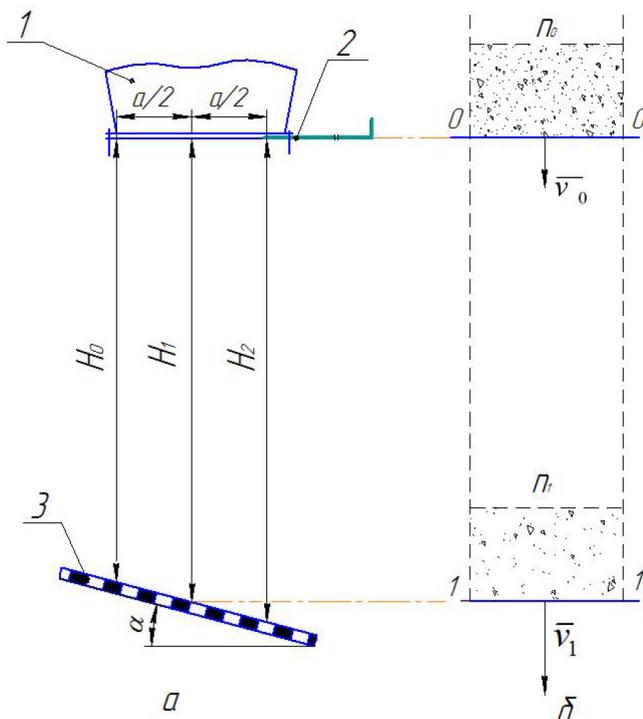


Рис. 2. Схема подачи обрабатываемого материала: а – схема расположения бункера и рабочей поверхности грохота; б – схема потока частиц сепарируемого материала; 1 – бункер-питатель; 2 – регулируемая заслонка; 3 – рабочая поверхность грохота

Примем допущение, что сепарируемый материал, поступающий из бункера-питателя, состоит из мелких частиц, которые проходят через верхнюю колосниковую решетку грохота, не взаимодействуя с ней, и из крупных частиц, ударяющихся о поверхность грохота. Пренебрегая мелкими частицами, будем рассматривать множество крупных частиц и примесей как некоторый поток, оказывающий силовое воздействие на поверхность грохота, и определим силу давления потока на поверхность. Для краткости крупные частицы, взаимодействующие с колосниками верхнего яруса, будем называть «материалом».

Частица материала, находящаяся в момент вылета из бункера в некоторой точке выходного сечения АВ на высоте H над поверхностью грохота ($H_0 \leq H \leq H_2$), перед ударом будет иметь скорость:

$$v = \sqrt{2gH + v_0^2}, \quad (2)$$

где v_0 – скорость частиц в выходном сечении бункера (рис. 2, б).

В экспериментальной установке бункер установлен на высоте $H_0 \approx 2$ м, ширина сечения $\alpha \approx 0,4$ м, угол $\alpha \approx 20^\circ$, поэтому пределы изменения высоты H для частиц в различных точках выходного сечения невелики. Будем считать, что все частицы материала перед ударом имеют среднюю по сечению скорость

$$v_1 = \sqrt{2gH_1 + v_0^2}, \quad (3)$$

где H_1 – высота средней точки выходного сечения АВ над грохотом (для данной установки $v_1 \approx 6,3$ м/с).

Объемную подачу материала Q можно определить как произведение скорости частиц в выходном сечении бункера на площадь сечения:

$$Q = v_0 \Delta S. \quad (4)$$

Обозначим среднюю массу частицы материала m_{cp} ; число частиц в единице объема n_0 . Будем рассматривать малый промежуток времени Δt истечения потока удобрения из бункера. Тогда $Q\Delta t = v_0 \Delta t \Delta S$ – объем материала, который выйдет из бункера за время Δt , и в этом объеме будет $n_0 v_0 \Delta t \Delta S$ частиц.

Так как при падении частицы движутся с ускорением $g = 9,8$ м/с², то расстояние между ними по мере удаления от бункера возрастает, поэтому в бункере число частиц в единице объема будет n_0 , а перед ударом поток частиц будет более разреженный и число частиц в единице объема будет n_1 (см. рис. 2, б). Величины $\rho_0 = n_0 m_{cp}$ и $\rho_1 = n_1 m_{cp}$ можно рассматривать как «плотность» потока частиц в сечении 0–0 и 1–1. Тогда, применяя уравнение неразрывности, известное из гидравлики $\rho v \Delta S = \text{const}$, получим: $\rho_0 v_0 \Delta S = \rho_1 v_1 \Delta S$, откуда

$$n_0 v_0 = n_1 v_1. \quad (5)$$





Количество движения одной частицы перед ударом будет равно $m_{cp} \bar{v}_1$, тогда за промежуток времени Δt суммарное количество движения частиц, ударившихся о грохот, будет составлять величину:

$$m_{cp} \bar{v}_1 (n_1 v_1 \Delta t \Delta S) = m_{cp} \bar{v}_1 (n_0 v_0 \Delta t \Delta S).$$

Обозначим символом $\Delta \bar{K}_1$ суммарный ударный импульс, передаваемый частицам материала от поверхности грохота за время Δt . Тогда по теореме [1] об изменении количества движения:

$$m_{cp} n_0 v_0 \Delta t \Delta S (\bar{v}_2 - \bar{v}_1) = \Delta \bar{K}_1, \quad (6)$$

где \bar{v}_2 – скорость частицы материала после удара (рис. 3).

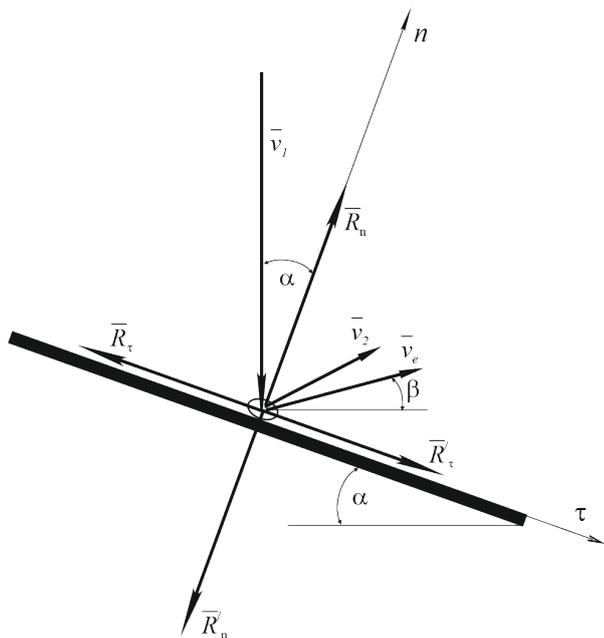


Рис. 3. Схема взаимодействия частицы обрабатываемого материала и рабочей поверхности грохота

Обозначим символами \bar{n} и $\bar{\tau}$ нормаль и касательную к поверхности грохота. Коэффициенты восстановления нормальной и касательной составляющих скорости обозначим k_n и k_τ , соответственно. Мгновенный коэффициент трения при ударе равен: $\lambda = 1 - k_\tau$. Тогда по определению коэффициентов k_n и k_τ [3]:

$$|v_{2n}| = k_n \cdot |v_{1n}|, \quad |v_{2\tau}| = k_\tau \cdot |v_{1\tau}|, \quad (7)$$

где $v_{1n}, v_{2n}, v_{1\tau}, v_{2\tau}$ – проекции скорости на нормаль и касательную до и после удара соответственно.

После элементарных преобразований получим:

$$v_{2n} - v_{1n} = v_1 \cos \alpha (k_n + 1),$$

$$v_{2\tau} - v_{1\tau} = v_1 \sin \alpha (k_\tau - 1) = -\lambda_{tp} v_1 \sin \alpha.$$

Проецируя векторное равенство (6) на нормаль и касательную к поверхности грохота, найдем проекции импульса ударных сил, действующих на частицы за время Δt :

$$\Delta K_n = m_{cp} v_1 \cos \alpha (k_n + 1) \cdot n_0 v_0 \Delta t \Delta S;$$

$$\Delta K_\tau = -\lambda_{tp} m_{cp} v_1 \sin \alpha n_0 v_0 \Delta t \Delta S.$$

Сила реакции поверхности грохота на поток частиц равна отношению $\bar{R} = \frac{\Delta \bar{K}}{\Delta t}$, отсюда найдем проекции этой силы на нормаль и касательную:

$$R_n = \frac{\Delta K_n}{\Delta t}, \quad R_\tau = \frac{\Delta K_\tau}{\Delta t}.$$

Тогда на поверхность грохота со стороны частиц действуют нормальная R'_n и касательная R'_τ составляющие силы давления:

$$R'_n = -\frac{\Delta K_n}{\Delta t}, \quad R'_\tau = -\frac{\Delta K_\tau}{\Delta t}.$$

Пусть грохот движется поступательно со скоростью v_e , тогда до момента удара абсолютная скорость частицы \bar{v}_1 складывается (рис. 4) из относительной скорости \bar{v}_r (по отношению к грохоту) и переносной скорости \bar{v}_e :

$$\bar{v}_1 = \bar{v}_r + \bar{v}_e. \quad (8)$$

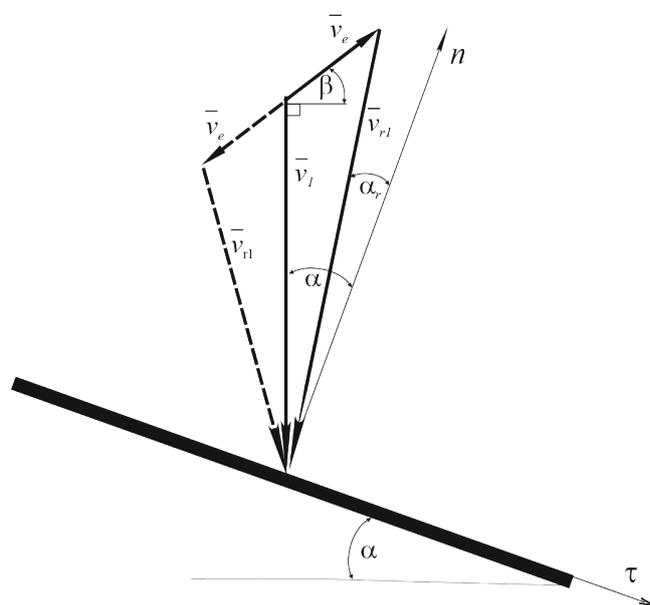


Рис. 4. Треугольник скоростей при относительном движении частицы

Число частиц, которые ударятся о грохот за время Δt , будет равно:

$$n_1 \cdot |v_{r1n}| \cdot \Delta t \Delta S',$$

где v_{r1n} – нормальная составляющая относительной скорости частиц до удара; $\Delta S'$ – площадь сечения потока частиц поверхностью грохота:

$$\Delta S' \cos \alpha = \Delta S. \quad (9)$$

Рассмотрим относительное движение частицы (по отношению к грохоту). Тогда $m_{cp} \bar{v}_{r1}$ и $m_{cp} \bar{v}_{r2}$ – количество движения одной частицы перед ударом и после него в относительном движении. За время Δt суммарное количество движения частиц, ударившихся о грохот, будет $m_{cp} v_{r1} n_1 \cdot |v_{r1n}| \cdot \Delta t \Delta S'$. В относительном движении к действующим на частицу силам надо добавить силы инерции. Но при ударе неударными силами (силами тяжести и инерции) можно пренебречь. Повторяя рассу-



ждения предыдущего пункта, находим проекции суммарного ударного импульса ΔK на нормаль и касательную к поверхности грохота:

$$\begin{aligned} \Delta K_n &= m_{cp} v_{r1} \cos \alpha_r (k_n + 1) \cdot n_1 v_{r1} \Delta t \Delta S'; \\ \Delta K_\tau &= -\lambda_{тр} m_{cp} v_{r1} \sin \alpha_r n_1 v_{r1} \cos \alpha_r \Delta S', \end{aligned} \quad (10)$$

где α_r – угол между нормалью \bar{n} и \bar{v}_{r1} .

Механизм привода грохота можно представить схемой (рис. 5).

Поверхность EF грохота является звеном параллелограмма $EFDC$. В среднем положении подвески CE и DF перпендикулярны линии качания грохота $z-z$, причем подвески наклонены к вертикали на угол β . Если не учитывать конечной длины подвесок и шатуна PF , то можно считать, что точка F и плоскость EF совершают гармонические колебания, направленные под углом β к горизонту [8].

Тогда движение любой точки поверхности грохота определяется уравнениями:

$$\begin{aligned} z &= -r \cos(\omega t), \\ v_e &= -\omega r \sin(\omega t), \end{aligned}$$

где r – амплитуда колебаний грохота; ω – круговая частота колебаний, равная угловой скорости кривошипа OP :

$$\omega = \frac{\pi n_k}{30},$$

где n_k – частота вращения кривошипа.

Для экспериментальной установки кинематические параметры имели ориентировочные значения: n_k – 300...4000 мин⁻¹, r = 0,025 м, ω = 31,4...41,9 рад/с. Тогда максимальное значение переносной скорости $v_{e \max} = r\omega = 0,78...1,05$ м/с. Так как амплитуда колебаний грохота значительно меньше высоты расположения бункера ($r < H_1$), то можно считать, что абсолютная скорость частиц перед ударом не зависит от положения грохота и имеет значение, определяемое формулой (3) ($v_1 \approx 6,26$ м/с). Тогда можно считать, что $v_{e \max} < v_1$. Из треугольника скоростей на рис. 4:

$$v_{r1}^2 = v_1^2 + v_e^2 + 2v_1 v_e \sin \beta.$$

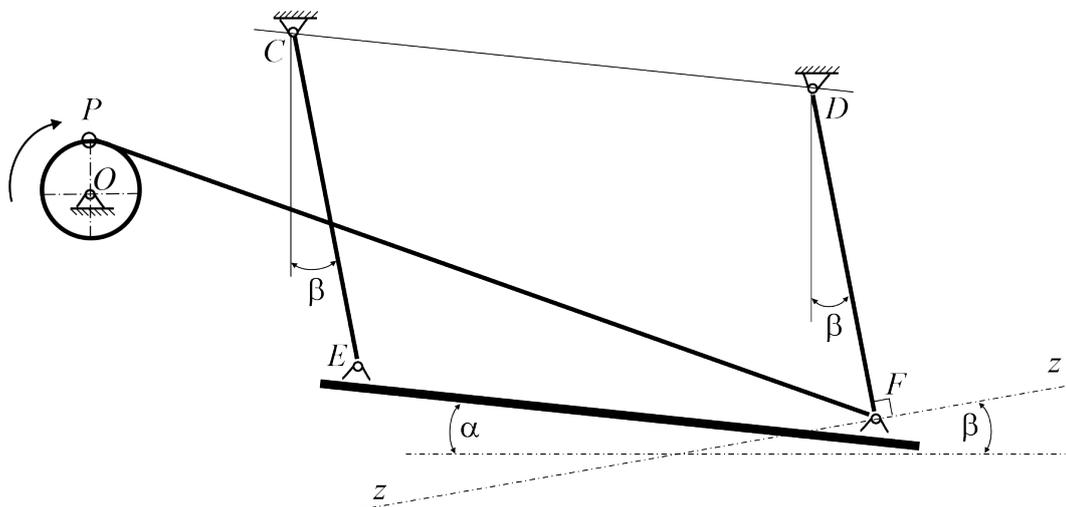


Рис. 5. Кинематическая схема механизма привода грохота

Пренебрегая малыми величинами, получаем: $v_{r1} \approx v_1$. Аналогично можно показать:

$$\cos \alpha_r \approx \cos \alpha. \quad (11)$$

Относительная скорость по величине и направлению приблизительно равна абсолютной скорости.

Поэтому выражения для проекций ударного импульса (10) можно упростить. Учитывая выражения (5), (9) и (11), получаем:

$$\begin{aligned} \Delta K_n &= m_{cp} v_1 \cos \alpha (k_n + 1) \cdot n_0 v_0 \Delta t \Delta S; \\ \Delta K_\tau &= -\lambda_{тр} m_{cp} v_1 \sin \alpha_r n_0 v_0 \Delta t \Delta S. \end{aligned}$$

Проецируя векторное равенство (8) на направление касательной τ , получим:

$$v_{r1} \sin \alpha_r = v_1 \sin \alpha - v_e \cos(\alpha + \beta).$$

Так как угол α может быть близким к нулю, то вторым слагаемым в правой части этого равенства нельзя пренебрегать, несмотря на то, что $v_{e \max} < v_1$. Тогда, окончательно, получим:

$$\Delta K_\tau = -\lambda_{тр} m_{cp} n_0 v_0 \Delta t \Delta S (v_1 \sin \alpha - v_e \cos(\alpha + \beta)).$$

Найдем нормальную R'_n и касательную R'_τ составляющие силы давления потока частиц:

$$R'_n = -\frac{\Delta K_n}{\Delta t} = -m_{cp} v_1 \cos \alpha (k_n + 1) \cdot n_0 v_0 \Delta S;$$

$$R'_\tau = -\frac{\Delta K_\tau}{\Delta t} = \lambda_{тр} m_{cp} n_0 v_0 \Delta S (v_1 \sin \alpha - v_e \cos(\alpha + \beta)).$$

Для сокращения дальнейших выкладок обозначим:

$$k' = \lambda_{тр} m_{cp} n_0 v_0 \Delta S.$$

Определим мгновенную мощность сил \bar{R}'_n и \bar{R}'_τ как произведение силы на скорость точки ее приложения и на косинус угла между ними:

$$N'_n = R'_n v_e \cos(90^\circ + \alpha + \beta);$$

$$N'_r = R'_\tau v_e \cos(\alpha + \beta) =$$

$$= k' (v_1 \sin \alpha v_e \cos(\alpha + \beta) - v_e^2 \cos^2(\alpha + \beta)).$$



Работа нормальной составляющей силы давления R'_n за период колебаний грохота $T = \frac{2\pi}{\omega}$ равна нулю:

$$A'_n = \int_0^T N'_n dt = R'_n \cos(90^\circ + \alpha + \beta) \cdot \int_0^T v_e dt = 0,$$

так как $v_e = r \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$ и интеграл за период T от $\sin(\omega t)$ по dt равен нулю.

Работа касательной составляющей силы давления R'_τ за период T равна:

$$\begin{aligned} A'_\tau &= \int_0^T N'_\tau dt = k' \cdot v_1 \cdot \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \beta) \int_0^T v_e dt - \\ &\quad - k' \cdot \cos^2(\alpha + \beta) \int_0^T v_e^2 dt = \\ &= -k' \cdot \cos^2(\alpha + \beta) \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot \frac{1}{2} T. \end{aligned}$$

Тогда средняя мощность на преодоление силы R'_τ определится по формуле:

$$N'_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \cdot A'_\tau = -\lambda_{\text{тр}} m_{\text{ср}} n_0 v_0 \Delta S \cos^2(\alpha + \beta) \frac{r^2 \omega^2}{2}.$$

Таким образом, сила R'_τ является силой сопротивления, и при расчете мощности привода необходимо учесть величину $N'_{\text{ср}}$.

Заключение. Нормальная составляющая силы давления потока частиц на поверхность грохота является то движущей, то уравновешивающей силой, а ее работа за период колебаний грохота равна нулю. При расчете мощности привода нормальную силу давления можно не учитывать. Работа касательной составляющей силы давления потока частиц на поверхность грохота за период отрицательна, поэтому при расчете мощности ее необходимо учитывать. Мощность, затрачиваемая на преодоление касательной составляющей силы давления, пропорциональна коэффициенту мгновенного трения $\lambda_{\text{тр}}$, массовой подаче потока частиц $G = m_{\text{ср}} n_0 v_0 \Delta S$, квадрату максимальной скорости колебаний грохота ($v_{e,\text{max}}^2 = r^2 \omega^2$), а также величине $\cos^2(\alpha + \beta)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Ч. 2. – М.: Наука, 1972. – 332 с.

2. Катусов Д.Н. Анализ работы сепарирующего устройства для отделения механических примесей от твердых органических удобрений // Степные просторы. – 1999. – № 7. – С. 20–21.

3. Катусов Д.Н. Влияние давления потока частиц обрабатываемого материала на мощность привода грохота сепарирующего устройства // Молодые ученые ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ» – агропромышленному комплексу Поволжского региона: сб. науч. работ. – Саратов, 2003. – С. 314–318.

4. Катусов Д.Н. Методика расчета мощности плоского сепаратора для механической классификации зернистых материалов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2006. – № 6. – С. 45–48.

5. Катусов Д.Н. Расчет мощности привода плоского сепарирующего оборудования для механического разделения зернистых материалов // Молодые ученые – агропромышленному комплексу Поволжского региона: сб. науч. работ. – Саратов, 2006. – Вып. 2. – С. 72–79.

6. Катусов Д.Н. Совершенствование технологии и оборудования производства биоудобрений / LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Saarbrücken, Germany, 2012. – 180 с.

7. Патент РФ № 2130243 МПК7 6 А 01 С 3/02, С05F3/06. Линия для приготовления субстрата. / Спесвак В.Я., Катусов Д.Н., Куделин В.В., Скотников Д.А. / № 97109555/13; заявл. 05.06.97; опубл. 20.05.99 Бюл. № 14. – 12 с.: ил.

8. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет. / Б.Г. Турбин [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1967. – 583 с.

9. Спесвак В.Я., Катусов Д.Н. Методика и результаты экспериментальных исследований сепарирующего устройства твердых органических удобрений // Молодые ученые – агропромышленному комплексу Поволжского региона: сб. науч. работ. – Саратов, 2004. – С. 77–84.

10. Технологическое оборудование для механизации процессов вермикультивирования / В.Я. Спесвак [и др.] // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2002. – № 1. – С. 78–79.

Катусов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология производства и переработки продукции животноводства», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

410005, г. Саратов, ул. Соколова, 335.

Тел.: (8452) 69-25-69.

Ключевые слова: грохот; сепарация; фракция; поверхность; мощность.

DEFINITION OF DRIVE POWER THUNDER UNDER SHOCK INTERACTION WITH THE SEPARATED PIECE OF MATERIAL

Katusov Dmitriy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technology of Production and Processing of Livestock Products", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Keywords: separator; separation; fraction; surface; power.

The technique of determination of power of the drive of a flat inclined separator taking into account influence of shock influence of the separated material is considered. In the known standard techniques of determina-

tion of power of the drive of a separator sufficient attention isn't paid to the matter, however in many cases influence of shock influence of the processed material on an inclined surface of a separator is the essential factor influencing kinematic, dynamic and technological parameters of his work. The technique of determination of pressure force of a stream of particles of the processed material on a motionless and moving inclined surface of a separator and the analysis of her influence on the settlement power of the drive of a separator is given in this work.