

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ФУРАЖНОГО ЗЕРНАTHE CALCULATION OF TECHNOLOGICAL INDICES
OF VIBRATIONAL CRUSHERS OF FODDER GRAIN

Ключевые слова: *вибрационная дробилка, кормовое зерно, удельные затраты энергии, оптимальное число качаний рабочих органов, производительность дробилки.*

Исследования, которые мы провели ранее, позволили предложить методы расчета вибрационных дробилок. Данная статья посвящена расчету удельных затрат на измельчение, обоснованию рациональных параметров исполнительных органов, а также определению производительности дробилок. Именно эти индикаторы определяют технический уровень дробильной машины. Предлагаемая формула для подсчета энергетических затрат учитывает не только прибавку новых поверхностей в зерне, но и скрытое растрескивание. Кроме того, эта формула содержит только один подгоночный коэффициент. Это выгодно отличает данную теорию от других аналогичных формул, где есть, по крайней мере, два таких коэффициента. Для того чтобы увеличить производительность дробилки, необходимо, чтобы ее рабочие поверхности захватывали слой из нескольких зерен и, сжимая их, дробили. Таким образом, условия захвата слоя значительно отличаются от известных подходов для случая захвата одного тела. Установлено, что частота колебаний оказывает двойное влияние на среднюю скорость движения слоя в измельчительной камере: первый член полученного выражения показывает обратную пропорциональную зависимость, а второй – прямую пропорциональность. Таким образом, имеет место оптимальное значение частоты, которое обеспечивает экстремальное значение средней скорости движения слоя. Была также получена формула, описывающая воздействие основных

механических факторов на производительность дробилки.

Keywords: *vibrational crusher, fodder grain, specific energy costs, optimal oscillation frequency of working tools, crusher output.*

Our previous studies suggested the methods for calculating vibrational crushers. This paper deals with calculating the unit costs of crushing, justifies the rational parameters of the executive tools as well as determining crusher performance. It is these indices that determine the technical level of a crushing machine. The proposed formula for calculating energy costs takes into account not only the addition of new surfaces in the grain but also hidden cracking. In addition, this formula contains only one adjustable factor. This distinguishes this theory from other similar theories where there are at least two such factors. In order to increase the performance of the crusher, it is necessary that its working surfaces capture a layer of several grains and crush after squeezing them. Thus, the conditions of the layer capture are significantly different from the known theories for the case of the capture of one body. It has been determined that the frequency of oscillations has a double effect on the average speed of movement of the layer in the crushing chamber: the first member of the received expression shows the reverse proportional dependence, and the second - direct proportionality. Thus, there should be an optimal frequency value that ensures the extreme value of the average movement speed of the layer. A formula describing the impact of major mechanical factors on the performance of the crusher was also obtained.

Табаев Алексей Викторович, инженер, ООО «Промышленное решение», г. Ставрополь. E-mail: Prom_resh@mail.ru.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., проф. каф. механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Левин Алексей Михайлович, к.т.н., ген. директор, ООО «Сибирская технологическая компания», г. Барнаул. E-mail: Lev-alex@mail.ru.

Tabayev Aleksey Viktorovich, Engineer, ООО "Promyshlennoye resheniye", Stavropol. E-mail: Prom_resh@mail.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Agricultural Production Mechanization and Processing, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Levin Aleksey Mikhaylovich, Cand. Tech. Sci., General Director, ООО "Sibirskaya tekhnologicheskaya kompaniya", Barnaul. E-mail: Lev-alex@mail.ru.

Введение

Сложность протекающих при вибрационном измельчении зерна процессов требует глубоких знаний как принципа действия и конструкций соответствующего оборудования, так и технологических свойств измельчаемого сырья [2-4]. Накопленных научных знаний по данной проблеме пока мало, поэтому сфера АПК отстает по разработке и использованию вибрационных измельчающих машин.

Ранее проведенные нами исследования [2-4] позволяют предложить методы расчета вибрационных измельчителей фуражного зерна, в некоторой степени восполняющие недостаток в таких материалах. В данной статье речь идет о расчете удельных затрат на измельчение, обосновании рациональных параметров рабочих органов, а также об определении производительности вибрационных измельчителей. Именно эти показатели определяют технический уровень дробильной машины.

Цель исследования – предложить методы инженерного расчета вибрационных измельчителей фуражного зерна, ориентируясь на многокритериальную оценку данного оборудования по критериям минимума энергозатрат и максимума производительности.

Объекты и методы исследования

Простейшая вибрационная дробилка содержит две металлические щеки (элемента), образующие камеру измельчения (рис. 1). Рабочие поверхности щек могут быть плоскими или криволинейными. По крайней мере, одна из щек снабжена приводом, осуществляющим ее колебательное движение. Вторая щека в данном случае является пассивной и создает, вследствие инерции, противодействие разрушаемым телам [4]. Применение ударно-вибрационного воздействия щек с высокой частотой позволяет разрушать исходный материал за несколько ударов.

Этот принцип функционирования положен в основу предложенного нами вибрационного измельчителя [5, 6].

Измельчаемым материалом является фуражное зерно (пшеница, овес, ячмень, горох и

т.д.), имеющее определенные размеры и технологические свойства.

В статье используются методы механики, дифференциальное и интегральное исчисление, а также математические методы оптимизации.

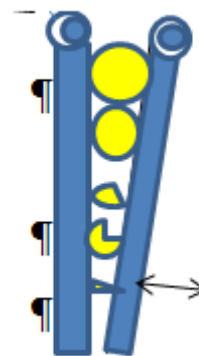


Рис. 1. Принципиальная схема вибрационной дробилки

Расчет удельных затрат на измельчение.

Тематика энергозатрат была рассмотрена в предыдущих статьях [2-4] применительно к единичной зерновке. Эти выкладки не могут быть непосредственно использованы для инженерного расчета удельных затрат на измельчение, поскольку не учитывают процессы вторичного измельчения, внешнее и внутреннее трение измельчаемого материала. Кроме того, очень трудно спрогнозировать число ударов по зерновке до ее разрушения в конкретном измельчителе. В связи с этим на основе полученных результатов была разработана упрощенная теория, ориентированная на практическое использование в технологических расчетах.

Будем рассуждать следующим образом. Если бы каждая зерновка из некоторой их совокупности объема V измельчалась за один удар, то затраты энергии непосредственно на измельчение этого объема составили [2, 3]:

$$A = \psi U_{max} = \psi \frac{\sigma_*^2 V}{2E}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент поглощения, учитывающий потери упругой энергии на трещинообразование (видимое и невидимое) при единичном разрушающем вибровоздействии.

Объем зерновок массой m можно подсчитать, используя известную формулу:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Если $m=1$ кг, то $V=1/\rho$, и формулу (1) можно переписать для удельных затрат энергии $A_{уд}$:

$$A_{уд} = \psi \frac{\sigma_*^2}{2E\rho'}, \frac{Дж}{кг}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала зерновок.

Однако в вибрационных измельчителях разрушить зерновку за одно вибровоздействие не удастся, поэтому правая часть в первом приближении должна быть домножена на n – число вибровоздействий. Установить реальное число вибровоздействий в производственном измельчителе невозможно, это остается нерешенной проблемой. Но есть объективный показатель в виде степени измельчения λ , коррелирующий с числом вибровоздействий n . Примем, что

$$n=k\lambda,$$

где k – эмпирический коэффициент.

Тогда

$$A_{уд} = k\lambda\psi \frac{\sigma_*^2}{2E\rho'}, \frac{Дж}{кг},$$

Наконец, учтем, что коэффициент поглощения ψ можно определить через посредство коэффициента восстановления скорости R [2, 3]:

$$A_{уд} = k\lambda(1 - R^2) \frac{\sigma_*^2}{2E\rho'}, \quad (3)$$

где R может принимать значения R_* или R_{**} в зависимости от наличия скрытого или видимого трещинообразования [2, 3].

При таком представлении будем также считать, что коэффициент k учитывает все другие непроизводительные затраты энергии, в том числе внешнее и внутреннее трение зерновок. Под внутренним трением здесь подразумевается трение зерновок и полученных частиц друг о друга. Затраты энергии на трение также зависят от числа вибровоздействий и, следовательно, степени измельчения λ .

Коэффициент k определяется экспериментально при испытаниях вибрационных измельчителей и используется затем при различных технологических расчетах. Все другие параметры, входящие в формулу (3), определяются также экспериментально на различных лаборатор-

ных установках. Их значения можно отыскать в технической литературе, например [7].

Проанализируем далее формулу (3) на предмет контроля некоторых граничных и экстремальных условий:

1) если $\lambda \rightarrow \infty$, то удельные затраты энергии также стремятся к бесконечности, что сообразуется со здравым смыслом;

2) если $\lambda=1$ (отсутствие измельчения в результате, например, слабого вибровоздействия), то некоторые затраты энергии имеются, что обусловлено скрытым трещинообразованием и микропластичностью;

Коэффициент k всегда больше 1 и носит безразмерную форму.

Предложенная формула учитывает не только приращение новых явных поверхностей, но и скрытое трещинообразование. Учитывается также объем переработанного материала. Кроме того, формула содержит лишь один подгочный коэффициент k , что выгодно отличает ее от других подобных теорий, где подобных коэффициентов как минимум два.

Обоснование угла захвата измельчаемого материала рабочими органами. Напомним, что углом захвата α называется угол между рабочими поверхностями полости измельчения. Этот угол при работе дробилки изменяется вследствие качаний рабочих органов (рис. 2). Будем оперировать его значением при наибольшем сближении рабочих поверхностей.

Проблема обоснования угла захвата рассматривалась ранее применительно к виброщечковым дробилкам на примере одного тела (куска) (рис. 2а) [8].

После соответствующих расчетов найдено условие дробления тела:

$$\alpha < 2\varphi, \quad (3)$$

где $\varphi = \arctg f$ – угол трения тела о рабочие поверхности измельчителя.

Предельный угол захвата равен двойному углу трения. Реальный угол захвата щековых дробилок всегда должен быть меньше двойного угла $\alpha < 2\varphi$.

Это условие верно в отношении и разрабатываемого нами измельчителя, если рассматри-

вать единичное зерно, зажатое между рабочими поверхностями.

Однако в целях повышения производительности необходимо, чтобы рабочие органы захватывали слой зерен и, сдавливая их, измельчали. Поэтому условия захвата слоя будут существенно отличаться от рассмотренного случая одного тела.

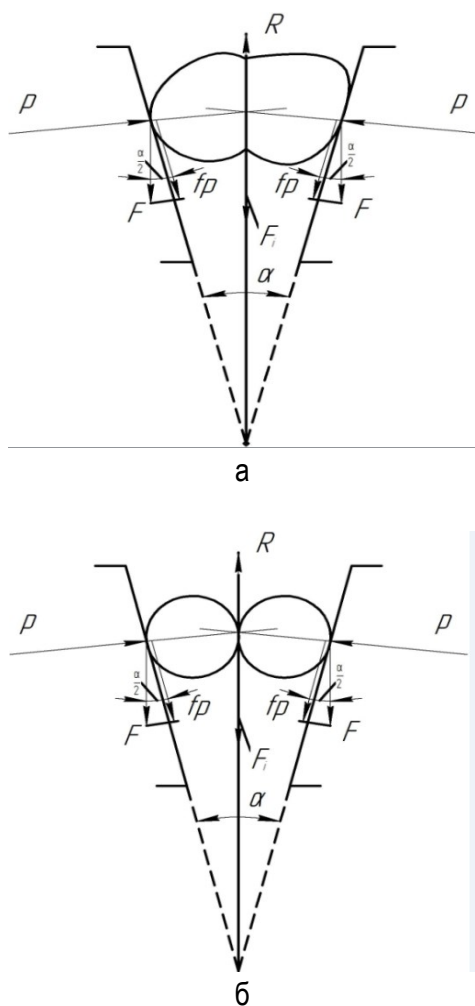


Рис. 2. Угол захвата рабочими органами вибрационного измельчителя:
а – одного тела; б – слоя в виде двух тел

Рассмотрим, для примера, слой толщиной всего в две частицы (рис. 2б). Они взаимодействуют между собой силой сдавливания, равной $P \cos(\alpha/2)$. В связи с этим между частицами возникает сила трения

$$F = f_i P \cos(\alpha/2),$$

где f_i – коэффициент внутреннего трения.

Именно данная сила трения F_i препятствует выпучиванию частиц вверх под действием силы R .

Приравнивая данные силы

$$2 P \sin(\alpha/2) = f_i P \cos(\alpha/2),$$

найдем предельный угол захвата α

$$\alpha = 2 \arctg(f_i/2). \quad (4)$$

Для нормальной работы измельчителя необходимо выполнение условия

$$\alpha < 2 \arctg(f_i/2). \quad (5)$$

Коэффициент трения скольжения f зерен фуражных культур по стали составляет 0,36-0,40 [7], что соответствует углу трения около 21-24°. Таким образом, угол захвата α может доходить, по условию (3), примерно до 42°.

Внутренний коэффициент трения f_i фуражных культур принимает значения 0,47-0,80. Ориентируясь на меньшее значение f_i из условия (5), находим $\alpha < 26^\circ$.

Таким образом, второе условие является более жестким, предполагает меньшие значения угла захвата. Именно на это условие следует ориентироваться при проектировании вибрационных измельчителей.

Определение рациональной угловой скорости дебалансных валов. При каждом отходе активного рабочего органа дробленый продукт массой m выпадает вниз из камеры дробления под действием силы тяжести и центробежной силы через выходную щель шириной b (рис. 3).

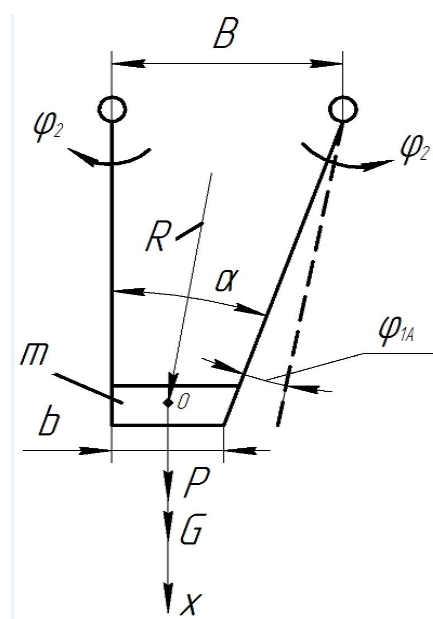


Рис. 3. К расчету рациональной частоты колебаний рабочего органа и производительности измельчителя

Центробежная сила появилась потому, что конструктивные особенности исследуемого измельчителя предполагают качание обеих рабочих плоскостей, образующих камеру измельчения. Соответственно, совершает круговые движения и измельчаемый объем материала, что и обуславливает действие указанной силы.

Выпадает материал, занимающий объем призмы, поперечное сечение которой обозначено как m на рисунке 3. Рассмотрим механику движения этой призмы. Данный элемент совершает сложное движение: качательное (переносное) вместе со щеками и поступательное относительно их же. Нас интересует относительное движение. Поэтому необходимо учесть переносную силу инерции, которую мы называли раньше центробежной. Силы трения и кориолисову силу инерции учитывать не будем, поскольку движение призмы происходит при расжатии щек, что приводит к уменьшению или исчезновению указанных сил.

Итак, на выпадающий слой массой m при прохождении нижнего положения действуют силы:

- сила тяжести

$$G = mg;$$

- переносная сила инерции

$$P = m R (\dot{\varphi}_{max}^2) = m R (\varphi_A \omega)^2,$$

где R – радиус качания выпадающего слоя;

φ – угол качания центра тяжести призмы;

φ_A – угловая амплитуда качания выпадающего слоя.

Последнюю величину можно определить как среднее арифметическое угловых амплитуд φ_{A1} и φ_{A2} качающихся рабочих поверхностей:

$$\varphi_A = (\varphi_{A1} + \varphi_{A2}) / 2.$$

Составим далее дифференциальное уравнение движения выпадающего слоя в проекции на вертикальную ось x . Последовательно имеем:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= G + P; \\ m\ddot{x} &= mg + mR(\varphi_A \omega)^2. \\ \ddot{x} &= g + R(\varphi_A \omega)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначим $\dot{x} = v$, тогда (8) примет вид

$$\frac{dv}{dt} = g + R(\varphi_A \omega)^2.$$

Решая это простейшее дифференциальное уравнение, получим

$$v = (g + R(\varphi_A \omega)^2)t + C,$$

где C – постоянная интегрирования.

Совмещая начало движения слоя с началом отчета времени имеем начальные условия: $t=0$, $v=0$. Подставляя их в последнее выражение, определим, что $C=0$.

Итак, имеем

$$v = (g + R(\varphi_A \omega)^2)t. \quad (7)$$

Этому уравнению подчиняется движение слоя примерно за полупериод колебаний рабочих органов. За предыдущий полупериод слой не двигался вниз относительно рабочих органов, поскольку был зажат последними. С учетом этого найдем среднюю скорость v_{cp} выпадающего слоя за весь период колебаний

$$v_{cp} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T (g + R(\varphi_A \omega)^2)t dt.$$

Вычисляя интеграл, получим

$$v_{cp} = (g + R(\varphi_A \omega)^2) \frac{T}{8}.$$

Учитывая, что $T=2\pi/\omega$, придем к окончательному выражению

$$v_{cp} = \frac{\pi}{4\omega} (g + R(\varphi_A \omega)^2). \quad (8)$$

Раскрывая скобки, данное выражение представим в виде

$$v_{cp} = \frac{\pi g}{4\omega} + \frac{\pi \omega}{4} R \varphi_A^2. \quad (9)$$

Из этого выражения заключаем, что частота колебаний двояко влияет на среднюю скорость движения слоя: первый член показывает обратную пропорциональную зависимость, а второй – прямую пропорциональность. Следовательно, должно существовать оптимальное значение ω , доставляющее экстремум величине v_{cp} .

Графическая иллюстрация сказанного приведена на рисунке 4, где показано поведение каждого члена правой части формулы (9), для чего введены обозначения

$$z_1(\omega) = \frac{\pi g}{4\omega}; \quad z_2(\omega) = \frac{\pi \omega}{4} R \varphi_A^2.$$

Кривая $z_1(\omega)$, представляющая первый член, является гиперболой. Второй член является прямой пропорциональной зависимостью. Потому в интересующей нас области изменения $v_{cp}(\omega)$ наблюдаем классический экстремум-минимум. Его и будем отыскивать, поскольку

вне его скорость выпуска слоя повышается, а это отрицательно сказывается на самом процессе измельчения.

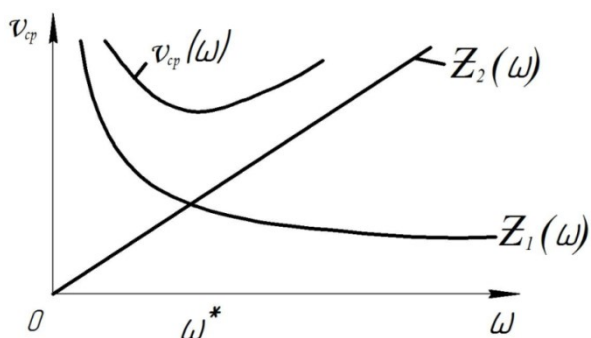


Рис. 4. Графическое нахождение экстремума функции (9)

Для аналитического отыскания экстремума дифференцируем выражение (9)

$$\frac{dv_{cp}}{d\omega} = -\frac{\pi g}{4\omega^2} + \frac{\pi}{4} R\varphi_A^2 \quad (10)$$

Оптимальное значение ω находим из уравнения

$$-\frac{g}{\omega^2} + R\varphi_A^2 = 0 \quad (11)$$

Последнее условие можно записать и так

$$\frac{g}{\omega^2 R\varphi_A^2} = 1 \quad (12)$$

Таким образом, экстремуму отвечает равенство ускорений слоя от силы тяжести и переносной силы инерции. По-иному, экстремум наступает при равенстве силы тяжести и центробежной силы. Условие (12) может быть соблюдено изменением ω , R или φ'_A . Если же принять R и φ_A постоянными, то экстремальное значение ω_* принимает значение

$$\omega_* = \sqrt{\frac{g}{R\varphi_A}} \quad (13)$$

Если же теперь подвергнуть (11) повторному дифференцированию, то получим выражение для второй производной

$$\frac{dv_{cp}^2}{d^2\omega} = \frac{2g}{\omega^3} > 0.$$

Положительность второй производной указывает на то, что в точке ω_* действительно располагается минимум.

Проверим реальность полученных результатов для ω_* . Из работы [6] для установившегося

процесса имеем: $\varphi_{A1}=0,01$ и $\varphi_{A2}=0,03$. Следовательно, расчет по формуле

$$\varphi_A = (\varphi_{A1} + \varphi_{A2})/2$$

дает результат $\varphi_A=0,02$.

Примем конструктивный параметр R , равный 0,6 м.

Подставляя эти данные в формулу (15), получим результат $\omega_* = 202 \text{ с}^{-1}$. Это весьма близко к тем рекомендациям, которые выдавались ранее по результатам экспериментальных исследований [9].

Определение производительности измельчителя. Массовая производительность дробилки Q определяется по формуле

$$Q = k_1 b L v_{cp} \rho N, \quad (14)$$

где Q – производительность дробилки, кг/с;

k_1 – эмпирический коэффициент, отражающий роль неучтенных факторов;

b – ширина выходной щели при наибольшем сближении рабочих органов;

L – длина выходной щели;

ρ – плотность материала, кг/м³;

N – число полостей измельчения (для нашего измельчителя $N=2$).

Формула позволяет представить влияние основных механических факторов, определяющих производительность дробилки. Введение же поправочного коэффициента k_1 позволяет надеяться на повышение точности инженерных расчетов в части определения производительности измельчителя.

Вывод

Исследования, которые мы провели ранее, позволили предложить методы расчета вибрационных измельчителей. Получены рабочие формулы для определения удельных затрат на измельчение, рациональных параметров исполнительных органов, а также определения производительности вибрационных дробильных машин. Именно эти показатели определяют их технический уровень.

Библиографический список

1. Вайсберг, Л. А. Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов / Л. А. Вайсберг, А. Н. Сафронов. – Текст: непо-

средственный // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 7 – С. 4-9.

2. Федоренко, И. Я. Влияние числа ударов, необходимых для разрушения зерна, на энергетику процесса измельчения / И. Я. Федоренко, С. В. Золотарев, А. А. Смышляев. – Текст: непосредственный // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 6. – С. 53-54.

3. Федоренко, И. Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин. – Текст: непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – № 11. – С. 31-32.

4. Федоренко, И. Я. Нестационарная задача о количестве вибрационных нагружений, необходимых для разрушения зерновки / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 12 (182). – С. 137-143.

5. Патент № 2688424(РФ) Измельчитель зернового материала / Федоренко И. Я., Левин А. М., Табаев А. В.; заявл. 15.02.2018; опубл. 21.05.2019, Бюл. № 15. – Текст: непосредственный.

6. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaeв, A. (2019). Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 341. 012115. 10.1088/1755-1315/341/1/012115.

7. Физико-механические, физико-химические и теплофизические свойства сырья и готовых продуктов пищевой промышленности: справочные материалы / Юж-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 28 с. – Текст: непосредственный.

8. Бауман В. А. Определение основных параметров щековых камнедробилок / В. А. Бауман. – Текст: непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1963. – № 4. – С. 25-28.

9. Левин, А. М. Обоснование конструктивно-режимных параметров вибрационно-ударного измельчителя фуражного: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Левин А. М. – Барнаул, 2005. – 19 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Vaysberg, L.A. Drobilno-izmelchitelnoe oborudovanie vibratsionnogo deystviya dlya pererabotki syrya i promyshlennykh otkhodov / L.A. Vaysberg, A.N. Safronov // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. – 2019. – Т. 23. – No. 7. – S. 4-9.

2. Fedorenko, I.Ya. Vliyanie chisla udarov, neobkhodimykh dlya razrusheniya zerna, na energetiku protsessa izmelcheniya / I.Ya. Fedorenko, S.V. Zolotarev, A.A. Smyshlyayev // *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya*. – 2001. – No. 6. – S. 53-54.

3. Fedorenko, I.Ya. Energeticheskie sootnosheniya pri udarnom izmelchenii zerna / I.Ya. Fedorenko, A.M. Levin // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel. khoz-va*. – 2002. – No. 11. – S. 31-32.

4. Fedorenko I.Ya. Nestatsionarnaya zadacha o kolichestve vibratsionnykh nagruzheniy, neobkhodimykh dlya razrusheniya zernovki / I.Ya. Fedorenko., A.M. Levin, A.V. Tabaeв // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2019. – No. 12 (182). – S. 137-143.

5. Pat. No. 2688424 (RF) Izmelchitel zernovogo materiala / I.Ya. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaeв. – Zayavl. 15.02.2018, opubl.: 21.05.2019, Byul. No. 15.

6. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaeв, A. (2019). Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 341. 012115. 10.1088/1755-1315/341/1/012115.

7. Fiziko-mekhanicheskie, fiziko-khimicheskie i teplofizicheskie svoystva syrya i gotovykh produktov pishchevoy promyshlennosti: spravochnye materialy / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI). – Novocherkassk: YuRGТУ (NPI), 2012. – 28 s.

8. Bauman V.A. Opredelenie osnovnykh parametrov shchekovykh kamnedrobilok // *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*. – 1963. – No. 4. – S. 25-28.

9. Levin A.M. Obosnovanie konstruktivno-rezhimnykh parametrov vibratsionno-udarnogo izmelchitelya furazhnogo [Rukopis]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 / Levin A. M. – Barnaul, 2005. – 19 s.