

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА О КОЛИЧЕСТВЕ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЖЕНИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНОВКИ

NONSTATIONARY PROBLEM ON THE NUMBER OF VIBRATION LOADS NEEDED TO GRIND A KERNEL

Ключевые слова: дробление кормового зерна, вибрационные рабочие органы, переменные параметры вибрационного воздействия.

Наибольшее применение в современном производстве имеют механические способы дробления. Необходимая интенсификация процесса дробления кормового зерна может быть достигнута при использовании рабочих органов вибрационного действия и только на основе глубоких знаний как принципа действия и конструкций соответствующего оборудования, так и технологических свойств измельчаемого сырья. Цель исследования – определить, исходя из энергетического критерия, рациональное число вибровоздействий, необходимых для разрушения исходной зерновки. Получены математические модели для затрат энергии на измельчение при вибрационном нагружении с переменными (нестационарными) параметрами. Установлено, что рабочие органы вибрационной дробилки должны быть выполнены по схеме, соответствующей прямолинейным рабочим органам, а зазор между ними уменьшается по мере продвижения дробимого материала вниз. Эта схема обеспечивает простое конструктивное исполнение вибрационных рабочих органов, дробление зерновки за несколько вибрационных воздействий и, как следствие, высокую производительность машины. Эти исследования положены в основу предложенной конструкции дробилки зернового материала. Динами-

ческая оценка данной конструктивной схемы показывает ее эффективность.

Keywords: feed grain crushing, vibrational working organs, variable parameters of vibrational impact

Mechanical crushing methods have the greatest use in modern production. The necessary intensification of the process of crushing feed grain can be achieved by using working organs of vibration action and only on the basis of deep knowledge of both the principle of action and the designs of the appropriate equipment, and technological properties of shredded raw materials. The goal of the study is to determine, based on the energy criterion, a rational number of vibroimpacts required for the crushing of the original kernel. Mathematical models of vibration loading of grain with variable parameters for the purpose of crushing it have been obtained. It has been found that the working organs of the vibration crusher should be made according to a scheme corresponding to direct working organs, and the gap between them decreases as the crushed material moves downwards. This scheme provides a simple constructive performance of vibration working organs, crushing the kernel for several vibration effects and, as a result, high performance of the machine. These provisions are the basis of the proposed grain crusher design. Dynamic evaluation of this design scheme shows its effectiveness.

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.

Табаев Алексей Викторович, инженер, ООО «Промышленное решение», г. Барнаул. 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.

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

Введение

Процессы измельчения зерновых кормов являются обязательными при их приготовлении к скармливанию и широко применяются в животноводстве. Однако большие энергозатраты на

измельчение требуют совершенствования дробильного оборудования, повышения его надежности и работоспособности. Кроме того, остро стоит проблема снижения себестоимости животноводческой продукции, повышения ее каче-

ства и увеличения рентабельности производства. Данная проблема может быть решена путем широкого внедрения новой техники и повышения эффективности использования действующего оборудования.

Измельчением называют процесс разрушения кусков или частиц твердого материала при критических внутренних напряжениях, создаваемых в результате какого-либо нагружения и превышающих соответствующий предел прочности. Напряжения в материале могут создаваться механическим нагружением, температурными воздействиями, ультразвуковыми колебаниями и др. Наибольшее применение в современном производстве имеют механические способы измельчения [1, 2]. Необходимая интенсификация процесса измельчения может быть достигнута при использовании рабочих органов вибрационного действия и только на основе глубоких знаний как принципа действия и конструкций соответствующего оборудования, так и технологических свойств измельчаемого сырья.

Цель исследования – определить исходя из энергетического критерия рациональное число вибровоздействий, потребных для разрушения исходной зерновки.

Объект и методы исследования

Вибрационные дробилки нашли широкое использование в горнодобывающей промышленности, производстве строительных материалов и других отраслях, где нужно измельчать хрупкое минеральное сырье. Попытки их использования при измельчении фуражного зерна были не всегда успешными. Причиной этого являются специфические механические свойства фуражного зерна, существенно отличающиеся от характеристик твердого минерального сырья.

Рассмотрим принципы воздействия вибрационных рабочих органов на дробимый материал на примере рисунка 1.

Простейшая вибрационная дробилка (рис. 1) имеет две щеки (элемента), образующие камеру измельчения. По крайней мере одна из щек снабжена виброприводом, осуществляющим ее

качательное движение. Вторая щека является пассивной и создает, вследствие инерции, противодействие разрушаемым телам. Применение ударно-вибрационного воздействия щек с высокой частотой позволяет разрушать исходный материал за несколько ударов.

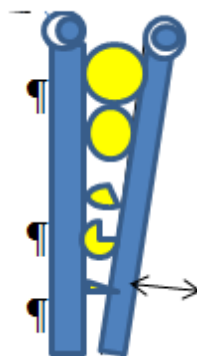


Рис. 1. Принципиальная схема вибрационной дробилки

Анализ технологического процесса измельчения фуражного зерна показывает, что разрушение отдельных зерновок происходит по типу малоциклового усталости.

Многочисленные испытания разных материалов при различных случаях циклического изменения напряжений позволили установить [2-4] следующие основные положения малоциклового усталости:

1. Материалы могут разрушаться при напряжениях значительно меньших предела прочности и даже предела текучести, если только напряжения изменяются достаточное число раз.

2. Существует такое минимальное напряжение (предельное), при котором материал выдерживает, не разрушаясь, практически неограниченно большое число перемен напряжений.

3. Разрушение наступает в момент исчерпания ресурса пластичности, вследствие пластической деформации в каждом цикле.

Малоцикловая (деформационная) прочность зависит от пластичности материала. Однако картина разрушения даже для вязкоупругих материалов в этом случае подобна хрупкому разрушению [5]. После некоторого числа циклов на поверхности тела появляется трещина (или

трещины), которая прорастает далее и далее до момента разрушения.

Фуражное зерно состоит из отдельных зерновок, которые обычно представляют собой мучнистые, а не стекловидные тела. Если учесть, что на корм скоту отправляют, чаще всего, щуплое и пораженное вредителями зерно, то зерновки следует считать не упругими, а вязкоупругопластичными телами. Следовательно, необходимо учитывать внутреннее рассеяние энергии при циклическом деформировании зерновок, хотя сам механизм разрушения подобен хрупкому типу.

Мы разделяем процесс вибрационного измельчения на три периода:

а) инкубационный (появляются и растут внутренние трещины, но это пока не приводит к разделению зерновки на части);

б) период первичного разрушения зерновки;

в) процесс доизмельчения осколков (при необходимости).

Во время инкубационного периода, состоящего из нескольких стадий сжатия – разгрузки зерновок, энергия затрачивается на преодоление неупругих сопротивлений, инициирование и рост внутренних трещин. Поэтому наиболее важен в энергетическом отношении именно инкубационный период.

Результаты исследований

Будем рассматривать энергетический баланс первичного разрушения единичной зерновки по формуле, напоминающей закон Ребиндера:

$$A = A_V + A_S, \quad (1)$$

где A_V – затраты энергии в инкубационном периоде;

A_S – затраты энергии на первичное разделение зерновки на части.

Работу A_V представим как часть максимальной потенциальной энергии U_{max} упругой деформации зерновки, запасенной во время вибрационно-ударного воздействия:

$$A_V = \chi_V U_{max},$$

где χ_V – коэффициент рассеяния энергии зерновкой.

Максимальная потенциальная энергия упругой деформации, запасенная в теле объемом V , как известно из теории упругости, равна:

$$U_{max} = \frac{\sigma^2 V}{2E},$$

где σ – максимальное напряжение в зерновке;

E – ее модуль упругости.

Таким образом, при единичном ударе, достаточном для разрушения зерновки, выражение (1) можно записать в виде:

$$A = \chi_V \frac{\sigma^2 V}{2E} + A_S, \quad (2)$$

где σ^* – критическое (достаточное для разрушения) напряжение при одиночном ударе.

Применяя пониженные напряжения, зерновку тоже можно измельчить, но для этого приходится применять несколько ударов. Встает вопрос оптимизации числа ударов, исходя из энергетического критерия, т.е.

$$A = n \chi_V \frac{\sigma_n^2 V}{2E} + A_S \rightarrow \min, \quad (3)$$

где n – число ударов;

σ_n – напряжение, необходимое для разрушения зерновки за n ударов.

При этом возможны три типа нагружения:

1) нагружения зерновки одинаковы по σ_n в каждом из n циклов (это соответствует *параллельным* движениям обеих щек) (рис. 1);

2) напряжение увеличивается от цикла к циклу нагружения по арифметической прогрессии (это в точности соответствует рисунку 1 – зазор между *прямолинейными* щеками уменьшается сверху-вниз);

3) напряжение увеличивается по геометрической прогрессии (зазор между *криволинейными* щеками уменьшается также сверху-вниз).

Последние две задачи можно характеризовать как *нестационарные*, поскольку прилагаемое к зерновке напряжение изменяется от цикла к циклу.

Тун 1. При измельчении зерновки несколькими ударами механизм разрушения, как уже говорилось, подобен малоциклового усталости,

когда при относительно небольшом числе циклов нагружения образуются и растут трещины, обуславливающие разделение тела на части. Этот случай рассматривался в работе [6] при анализе работы молотковых и центробежных измельчителей фуражного зерна. Рассмотрим эти теоретические положения применительно к вибрационной дробилке.

Очевидно, что в случае разрушения несколькими воздействиями можно применять пониженные напряжения, т.е. $\sigma_n < \sigma$. Можно заметить, что σ_n зависит от числа воздействий n , т.е. $\sigma_n = f(n)$. Данную функцию можно представить в виде кривой Вёлера [6] (рис. 2).

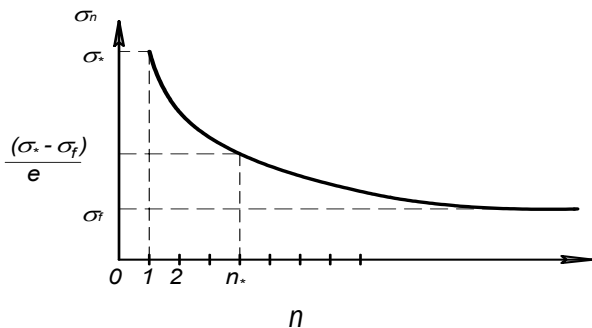


Рис. 2. Зависимость $\sigma_n = f(n)$ в виде кривой Вёлера

Ее математическая запись для нашего случая имеет вид

$$\sigma_n = \sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}, \quad (4)$$

где σ_f – предельное напряжение, при действии которого разрушения не происходит при любом числе ударов (предел выносливости);

n – характерное число ударов, при котором снижающая часть напряжений $\sigma_* - \sigma_f$ уменьшается в e раз.

Подставляя это выражение в формулу (3), получим окончательное выражение работы, затрачиваемой в инкубационном периоде за n воздействий на зерновку:

$$A = \frac{\chi_V V}{2E} n \left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right] + A_S. \quad (5)$$

Величины A_S и $(\chi_V V)/(2E)$ являются практически независимыми от числа ударов n и поэто-

му не влияют на характер изменения общих затрат энергии A . Это изменение будет полностью определяться функцией:

$$F(n) = n \left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right]^2. \quad (6)$$

Эта формула, повторимся, применима при однородных по силе воздействиях на измельчаемый материал.

Для реальных условий ($\sigma_f = 1-2$) имеем экстремумы – минимумы при $n \approx 30-50$ ударов и наименьшее значение функции $F(n)$ при левой границе при $n = 1$.

Это означает, что измельчители зерна нужно проектировать таким образом, чтобы процесс разрушения проходил за несколько вибровоздействий, или 30-50 нагружений. Игнорирование этих диапазонов ведет к увеличению энергоемкости процесса измельчения.

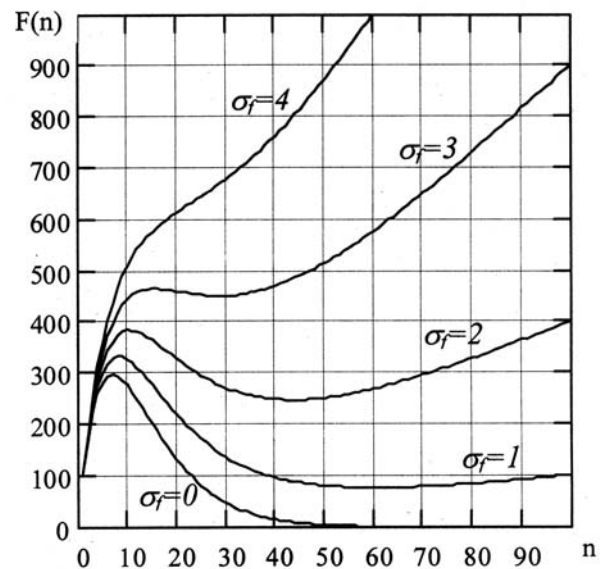


Рис. 3. Расчетный график функции $F(n)$ при $\sigma = 10$ МПа, $\sigma_f = 0-4$ МПа, $n = 15$

Первый тип нагружения с большим количеством воздействий явно не подходит для вибрационных рабочих органов вследствие получения малой производительности.

Тун 2. В вибрационных дробилках (рис. 1) воздействие обычно неоднородно и усиливается по мере продвижения материала вниз. Это из-

менение можно учесть формулой для арифметической прогрессии при линейных рабочих органах

$$\sigma_n = \sigma_1 (1 + k_1(n - 1)), \quad (7)$$

где σ_1 – максимальное напряжение в материале при первом вибровоздействии;

k – разность арифметической прогрессии.

$$F(n) = n \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1(n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right)^2 \right\}. \quad (8)$$

Функция $F(n)$ имеет сложный характер поведения (рис. 4). В зависимости от значений σ_* и n_* она может иметь один или два локальных экстремума (в точках $F'(n)=0$) или не иметь их вообще.

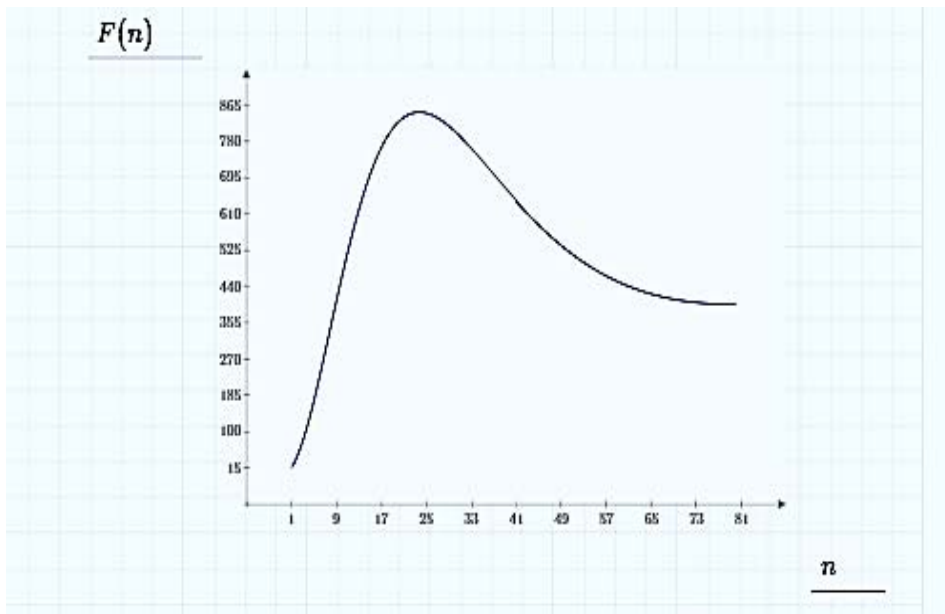


Рис. 4. Расчетный график функции $F(n)$ при $\sigma_1=4$ МПа, $\sigma_f=2$ МПа, $n_*=15$, $k_1=0,1$ (арифметическая прогрессия)

Искомая зависимость здесь имеет примерно тот же вид, что и по первому типу. Потому вариант с 70-80 вибровоздействиями также должен быть отвергнут.

Тип 3. Для криволинейных рабочих органов применима геометрическая прогрессия

$$\sigma_n = \sigma_1 (k_2^{n-1}), \quad (9)$$

где k_2 – знаменатель геометрической прогрессии.

Оптимизируемая функция имеет в данном случае вид

$$F(n) = n \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 k_2^{n-1} - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right)^2 \right\}.$$

Численные эксперименты показывают, что при любых исходных параметрах функция $F(n)$ имеет монотонно-восходящий вид (рис. 5). Имеем только граничный минимум при $n=1$.

Реально это означает, что зерновка должна быть разрушена за несколько вибровоздействий.

Эти исследования положены в основу предложенной конструкции измельчителя зернового материала [7]. Динамическая оценка данной конструктивной схемы [8] показывает ее работоспособность.

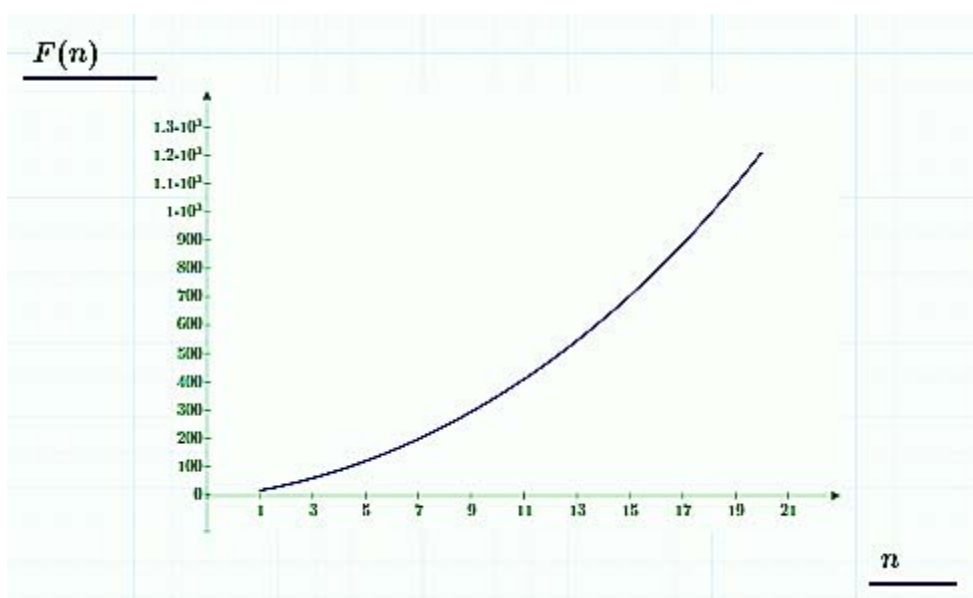


Рис 5. Расчетный график функции $F(n)$ при $\sigma_1=4$ МПа, $\sigma_2=2$ МПа, $n=15$, $k_2=1,1$ (геометрическая прогрессия)

Выводы

На основании проведенного исследования мы пришли к заключению, что рабочие органы вибрационной дробилки должны быть выполнены по схеме, соответствующей типу 2 нагружения зерновки (прямолинейные рабочие органы, зазор между ними уменьшается по мере продвижения измельчаемого материала вниз). Собственно эта схема изображена на рисунке 1. Она обеспечивает простое конструктивное исполнение вибрационных рабочих органов, измельчение зерновки за несколько вибровоздействий и, как следствие, высокую производительность дробилки.

Библиографический список

1. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов: Изд-во Тамбовского ГТУ, 2004. – 75 с. – Текст: непосредственный.
2. Вайсберг, Л. А. Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов / Л. А. Вайсберг, А. Н. Сафронов. – Текст: непосредственный // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 7. – С. 4-9.
3. Писаренко, Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1971. – 328 с. – Текст: непосредственный.
4. Пановко, Я. Г. Механика деформируемого твердого тела / Я. Г. Пановко. – Москва: Наука, 1985. – 288 с. – Текст: непосредственный.
5. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – Москва: Наука, 1988. – 712 с. – Текст: непосредственный.
6. 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.
7. 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.
8. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, 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.

References

1. Borshchev, V.Ya. Oborudovanie dlya izmelcheniya materialov: drobilki i melnitsy: uchebnoe posobie / V.Ya. Borshchev. – Tambov: Izd-vo Tambovskogo GTU, 2004. – 75 s.
2. 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. – T. 23. – No. 7. – S. 4-9.
3. Pisarenko, G.S. Vibropogloshchayushchie svoystva konstruktsionnykh materialov: spravochnik / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. – Kiev: Naukova dumka, 1971. – 328 s.
4. Panovko, Ya.G. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela / Ya.G. Panovko. – Moskva: Nauka, 1985. – 288 s.
5. Rabotnov, Yu.N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela / Yu.N. Rabotnov. – Moskva: Nauka, 1988. – 712 s.
6. Fedorenko, I.Ya. Vliyanie chisla udarov, neobkhodimyykh dlya razrusheniya zerna, na energetiku protsessa izmelcheniya // I.Ya. Fedorenko, S.V. Zolotarev, A.A. Smyshlyayev // Khraneniye i pererabotka selkhozsyrya. – 2001. – No. 6. – S. 53-54.
7. Pat. No. 2688424 (RF) Izmelchitel zernovogo materiala / I.Ya. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev; Zayavl. 15.02.2018, opubl.: 21.05.2019, Byul. No. 15.
8. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, 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.



УДК 631.362.333:633/635

В.В. Карпов
V.V. Karpov

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНО-ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГОФРОЩЕТОЧНОГО ОЧИСТИТЕЛЯ КОРМОВЫХ КОРНЕПЛОДОВ

THE RESULTS OF LABORATORY AND ECONOMIC TESTS OF THE CORRUGATED BRUSH FODDER ROOT CLEANER

Ключевые слова: лабораторные испытания, дисперсионный анализ, гофрощеточный очиститель, кормовые корнеплоды, математическая модель.

Наличие почвенных примесей в кормовой массе снижает питательность и ценность кормов, может негативно влиять на здоровье животных. Для предупреждения вредного влияния на сельскохозяйственных животных загрязненных кормовых корнеплодов проводится специальная подготовка таких кормов к скармливанию, их очистка от свободных (комки, камни, растительные остатки) и налипших примесей. Очистка кормовых корнеплодов от загрязнений является обязательной и одной из самых трудоёмких операций перед скармливанием животным. Зоотехнические требования

к качествуготавливаемых кормов не допускают наличия в корме свыше 3% почвенных примесей. Проведенные ранее исследования показали, что для улучшения качества очистки необходимо дальнейшее усовершенствование конструкций рабочих органов очистителей. Цель исследования – улучшение качества копирования неровностей кормовых корнеплодов для более тщательного счёсывания связанных с поверхностями корнеплодов примесей. Задачей исследования являются установление влияния основных режимных параметров гофрощеточного очистителя на эффективность очистки корнеплодов от примесей. Объектом исследования является процесс механической очистки кормовых корнеплодов от налипших почвенных примесей в рабочем объеме гофрощеточного очистителя. Прове-