

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.21

И.Я. Федоренко
I.Ya. Fedorenko

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

PHENOMENOLOGICAL APPROACH TO DESCRIBING THE PRCESS OF FORAGE GRAIN GRINDING

Ключевые слова: кормовое зерно, дерть, измельчение, удельные затраты энергии, степень измельчения, гипотезы измельчения, функция плотности, распределение частиц по размерам.

Процессы измельчения кормов, наряду с их прессованием, являются самыми энергоёмкими в животноводстве. Именно поэтому научные исследования по снижению энергетических затрат на измельчение остаются актуальными как в сельском хозяйстве, так и других отраслях. Цель статьи – дать альтернативное аналитическое описание основного закона измельчения, связывающего затраты энергии со степенью измельчения, а также рассмотреть смежные вопросы. Предложены феноменологические (эмпирические) зависимости, одна из которых характеризует энергозатраты процесса дробления зерна как функцию степени измельчения, а вторая представляет функцию плотности распределения частиц зерновой дерти по размерам. Установлено, что предлагаемые формулы адекватно описывают качественно и количественно экспериментальные данные по энергетике и другим показателям процесса, а также позволяют решать смежные вопросы. Предлагаемые формулы после изучения процесса измельчения в какой-либо конструкции и определения эмпирических коэффициентов могут слу-

жить в качестве исходных данных при проектировании производственных измельчителей.

Keywords: forage grain, chaff, grinding, specific energy costs, degree of grinding, grinding hypotheses, density function, particle distribution by size

The processes of feed grinding, along with their pressing, are the most energy-intensive in animal husbandry. That is why scientific research on reducing energy costs for grinding remains relevant both in agriculture and other industries. The purpose of this article is to provide an alternative analytical description of the basic law of grinding which relates energy costs to the degree of grinding as well as to consider related issues. Phenomenological (empirical) dependences are proposed, one of which characterizes the energy consumption of the grain crushing process as a function of the degree of grinding, and the second one represents the function of the density of the chaff particle distribution by size. It is determined that the proposed formulas adequately describe qualitatively and quantitatively experimental data on energy and other process indicators, and allow solving related issues. After studying the grinding process in any design and determining the empirical coefficients, the proposed formulas can serve as input data for the design of production grinders.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Введение

Измельчение различных материалов в горнодобывающей, химической, тяжелой, пищевой промышленности и сельском хозяйстве является

ся необходимым технологическим процессом во многих производствах. По некоторым оценкам до 10% вырабатываемой электроэнергии затрачивается именно на процессы измельчения [1].

В животноводстве измельчают практически все виды кормов, что требует или физиология животных, или необходимость механизированного приготовления и раздачи кормосмесей.

Процессы измельчения кормов, наряду с их прессованием, являются самыми энергоёмкими в животноводстве. Именно поэтому научные исследования по снижению энергетических затрат на измельчение остаются актуальными как в сельском хозяйстве, так и других отраслях.

В настоящее время для практических расчетов процесса измельчения фуражного зерна используют формулу профессора С.В. Мельникова [2], которую он получил при исследовании молотковой дробилки.

$$A = C_{пр} [C_v l q \lambda^3 + C_s (\lambda - 1)], \text{ Дж/кг, (1)}$$

где A – удельное энергопотребление при измельчении зерна;

λ – степень измельчения;

$C_{пр}, C_v, C_s$ – эмпирические коэффициенты.

Данные коэффициенты для некоторых культур приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов в формуле (1) [2]

Коэффициенты	$C_{пр}$	кг	$C_s, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Вид культуры			
Овес без пленок	5,00±1,5	2,34	1,96
Ячмень	1,20±0,30	8,50	7,50
Рожь	1,45±0,35	8,40	6,40

Особенно лаконичной формула становится после раскрытия квадратных скобок

$$A = C_1 l q \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1), \quad (2)$$

где $C_1 = C_{пр} \cdot C_v$; $C_2 = C_{пр} \cdot C_s$.

В таком виде формула (2) приведена практически во всех современных учебниках по механизации животноводства. Она в целом правильно интерпретирует процессы, происходящие при измельчении зерна, и дает приемлемые результаты при практических расчетах.

Единственное, что трудно объяснить – большое различие в значениях коэффициентов (табл. 1), входящих в формулу (1), хотя удельные затраты энергии, как мы увидим далее, очень близки для приведенных фуражных культур. Видимо, эти коэффициенты не в полной

мере связаны с механикой процесса и выступают в роли подгоночных.

Мы объясняем это различие коэффициентов тем, что для расчета энергии A_v использована «объемная» гипотеза Кирпичёва-Кика:

$$A_v = C_v l q \lambda^3. \quad (3)$$

Вот что пишут по этому поводу авторы книги [3]: «Трудно согласиться с объемной теорией разрушения. Во-первых, закон подобия редко когда согласуется с действительностью: при раздавливании, также и при других деформациях и их сочетаниях, кубы, шары, цилиндры из различных материалов очень редко распадаются на подобные им фигуры. Во-вторых, удельные затраты энергии на последующие измельчения частиц ... не постоянны. В-третьих, допущение о том, что деформация тел вплоть до момента разрушения подчиняется закону Гука также не согласуется с действительностью, соответственно, и «закон» пропорциональности затрат энергии на разрушение объема... не справедлив».

К подобным выводам давно пришли специалисты по измельчению из других отраслей промышленности [4].

Можно понять, почему именно гипотезу Кирпичёва-Кика использовал профессор Мельников. В 1952 г., когда была получена формула (1), в научных кругах по измельчению придерживались именно этой гипотезы, а также гипотезы академика Ребиндера.

Позже, в 1978 г. профессор Мельников приводит в своем пособии [2] формулу Бонда, а также зависимость Рундквиста-Чарльза, в которых объемная теория представлена в несколько ином виде, чем это дается гипотезой Кирпичёва-Кика. Однако никакие изменения в формулу (1) не были внесены.

Цель статьи – дать альтернативное аналитическое описание основного закона измельчения, связывающего затраты энергии со степенью измельчения, а также рассмотреть смежные вопросы.

Объекты и методы исследований

Рассмотрим далее экспериментальные и теоретические зависимости, приведенные в пособии [2], под несколько иным углом зрения.

Проанализируем один из рисунков данного пособия, который воспроизведен в данной статье (рис. 1).

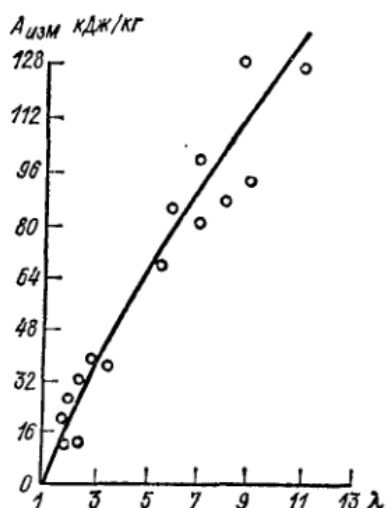


Рис. 1. Удельные затраты энергии на измельчение зерна в зависимости от степени измельчения [2]

Отвлекаясь от любых гипотез измельчения, зададимся вопросом о том, какой функцией можно аппроксимировать приведенные экспериментальные данные.

Видно, что это степенная зависимость весьма близка к линейной. Отталкиваясь от самых общих предположений, заключающихся в том, что наклон касательной к данной кривой изменяется пропорционально отношению $A/(\lambda - 1)$, будем иметь

$$\frac{dA}{d(\lambda-1)} = k \left(\frac{A}{\lambda-1} \right). \quad (4)$$

Применяя подстановку $x = \lambda - 1$ и разделяя переменные, получим

$$\int \frac{dA}{A} = k \int \frac{dx}{x}.$$

Интегрирование дает результат

$$\ln|A| = k \ln|x| + C. \quad (5)$$

Постоянную интегрирования C возьмём в виде $C = \ln A_0$.

Дальнейшее преобразование (5) приводит к степенной зависимости

$$A = A_0 x^k.$$

Наконец, возвращаясь к переменной λ , получим окончательно

$$A = A_0 (\lambda - 1)^k. \quad (6)$$

Это и есть аналитическое выражение кривой на рисунке 1, коэффициенты A_0 и k которой нужно находить экспериментально. При этом коэффициент A_0 имеет размерность удельной работы (кДж/кг) и численно равен этой работе при степени измельчения $\lambda = 2$. Коэффициент k является безразмерным.

Зависимость (6) можно назвать феноменологической, поскольку при ее выводе не использовались никакие законы природы. Известный физик – теоретик В. Гейзенберг отмечал [5]: «Для технических и прочих приложений они (т.е. феноменологические теории) часто были важнее, чем постижение связей, а с чисто прагматической точки зрения феноменологические теории могут сделать познание законов природы в значительной мере даже излишними». Феноменологические теории развиваются в тех областях, где наблюдается чрезвычайная сложность соответствующих явлений, либо из-за математических трудностей [4]. Несомненно, что такая «чрезвычайная сложность» наблюдается в теории разрушения тел и конструкций, и в теории измельчения различных материалов.

Результаты исследований

Поэтому посмотрим далее, как феноменологическая модель (6) позволит описать экспериментальные зависимости.

Используя экспериментальные точки, имеющиеся на рисунке 1, мы провели их компьютерную обработку с целью отыскания аппроксимирующей кривой с конкретными значениями коэффициентов A_0 и k .

Для этого использовали компьютерную среду *Mathcad 15* и ее встроенную функцию *genfit*. С поставленной задачей справился оптимизированный метод Левенберга-Марквардта (рис. 2). Для корректной работы программы было введено временное переобозначение параметров: $A \sim E, k = A_1$.

Удивительно, но кривая по зависимости (6) с найденными коэффициентами $A_0 = 21,42$ кДж/кг и $k = 0,76$ практически совпала с кривой на рисунке 1, которую профессор Мельников провел, скорее всего, умозрительно.

Можно переписать зависимость (6), используя соотношение

$$\lambda = \frac{D}{M},$$

где M – модуль помола, как переменная;

D – эквивалентный диаметр исходного зерна.

Искомая зависимость предстает в виде

$$A(M) = A_0 \left(\frac{D}{M} - 1 \right)^k. \quad (7)$$

График этой функции приведен на рисунке 3.

Качественно зависимость (7) подтверждают многие исследования последних лет.

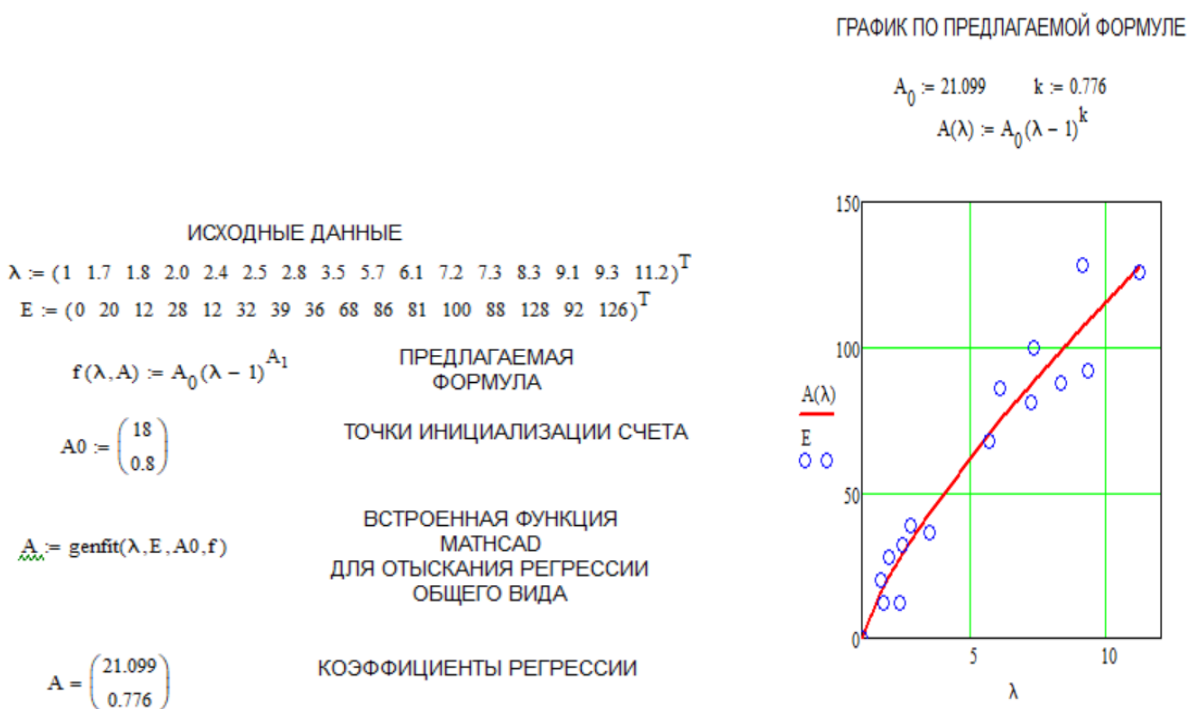


Рис. 2. Компьютерная программа для определения коэффициентов формулы (6) и график, построенный по этой зависимости

Интересно, как поведет себя кривая удельных затрат энергии с учетом достигнутой степени измельчения. Будем называть этот показатель энергоемкостью \mathcal{E} собственно процесса измельчения:

$$\mathcal{E} = A_0 \cdot \lambda^{-1}(\lambda - 1)^k. \quad (8)$$

$$A_0 := 21.099 \quad k := 0.776 \quad D := 4.2$$

$$A(M) := A_0 \left(\frac{D}{M} - 1 \right)^k$$

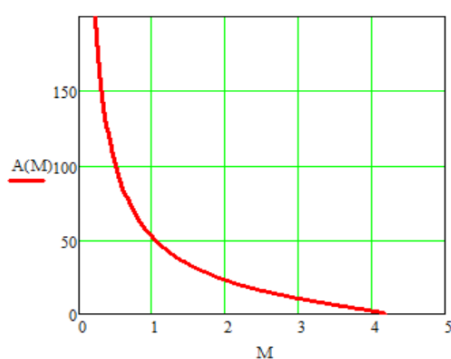


Рис. 3. Затраты энергии A на измельчение зерна как функция модули помола M

На рисунке 4 приведены все необходимые данные для расчета и оптимизации этого показателя. Видно, что величина \mathcal{E} имеет четкий максимум. Для обычной же в исследованиях по измельчению задачи минимизации $\mathcal{E} = (\lambda) \rightarrow \min$ минимум при малых значениях

λ отыскивается на левой границе функции $\mathcal{E} = f(\lambda)$. Поэтому минимизация показателя $\mathcal{E}(\lambda)$ без указания ограничений на λ имеет мало смысла. На рисунке 4 ограничение записано в виде $2 < \lambda < 13$. Компьютер для данной конкретной кривой нашел экстремальные точки: $\lambda_{min} = 2$; $\lambda_{max} = 4,464$. При значениях $\lambda > \lambda_{max}$ минимум уже отыскивается на правой границе. Например, при ограничении $5 < \lambda < 10$ компьютер выдает результат: $\lambda_{min} = 10$.

Таким образом, предложенная модель (6) позволяет решать все задачи, возникающие при исследовании и оптимизации процесса измельчения фуражного зерна.

Вернемся к таблице 1. Построим, используя эти материалы, с помощью компьютера кривые $A = f(\lambda, C_{np}, C_v, C_s)$ по формулам (1) и (6).

Результаты представлены на рисунке 5, причем на рисунках а и б задан диапазон $\lambda = 1 \dots 15$, на рисунках в и г $\lambda = 1 \dots 3$. Последние 2 рисунка больше характеризует процесс измельчения именно фуражного зерна.

Видно, что при малых и больших значениях λ функции очень близки к линейной.

Открывается и новый факт: различие между зерновыми культурами по энергоёмкости минимальные, хотя из таблицы 1 могло показаться иное.

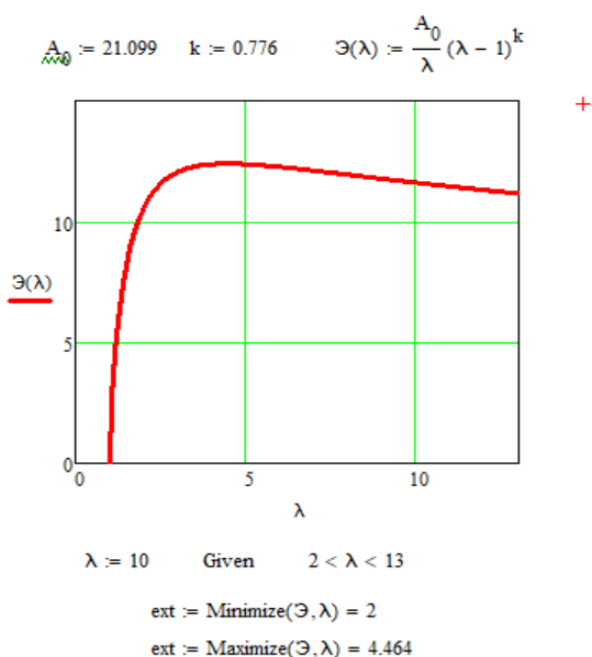


Рис. 4. Пример оптимизации процесса измельчения по критерию энергоёмкости $\Theta(\lambda)$

При построении графиков по формуле (6) предварительно были определены коэффициенты A_0 и k , для этого использована упоминавшаяся компьютерная функция *genfit*.

Сопоставляя кривые $A = f(\lambda)$ на рисунке 5а-г, видим, что они попарно идентичны как в качественном, так и количественном отношении. Таким образом, формулы (1) и (6) дают одни и те же результаты. Самые малые расхождения можно объяснить ошибками при снятии экспериментальных точек с рисунка 1.

Однако предлагаемая формула (6) не связана с какими-либо энергетическими гипотезами и поэтому мало уязвима для критики.

Впрочем, хотя мы и назвали модель (6) феноменологической, одна гипотеза в ней все-таки просматривается. Для обнаружения этого представим, что

$$k = 1 + k_1, \quad (9)$$

где k_1 – новый эмпирический коэффициент.

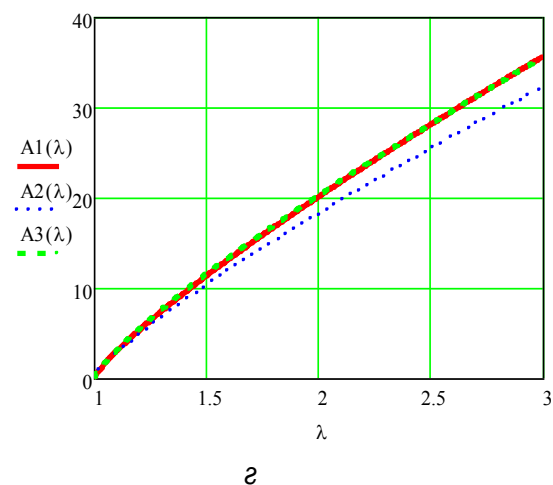
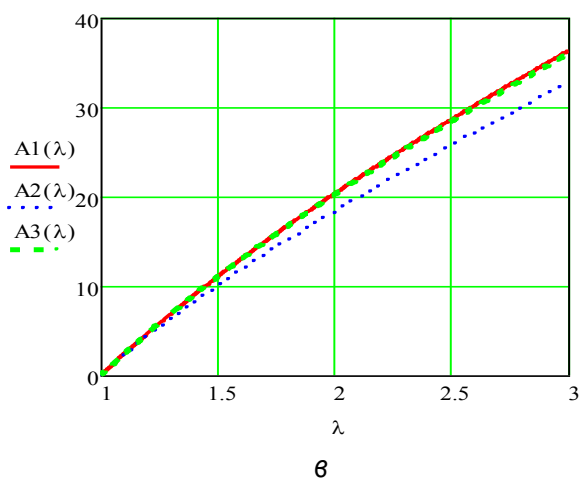
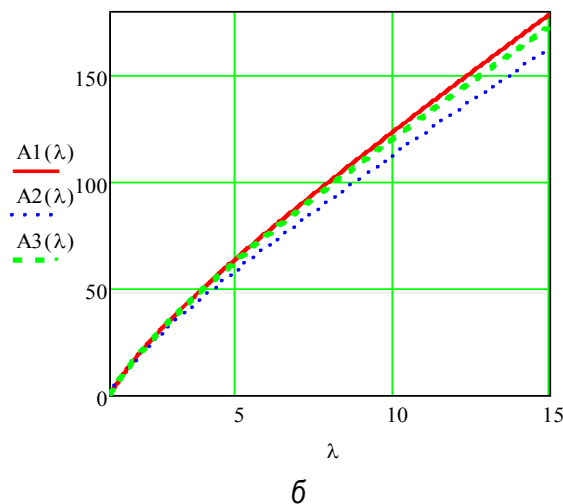
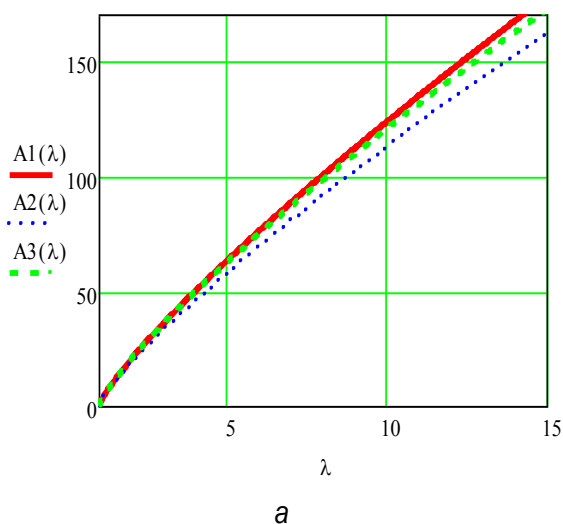


Рис. 5. Компьютерная обработка экспериментальных данных пособия [2]:
а, в – кривые, построенные по формуле (1); б, г – построенные по формуле (6);
A1(λ) – овес без пленок; A2(λ) – ячмень; A3(λ) – рожь

Коэффициенты зависимости (6)

Культура Коэффициент	Овец без пленок (A1)	Ячмень (A2)	Рожь (A3)
A_0	20,110	18,115	20,273
k	0,826	0,829	0,811
k_1	-0,174	-0,171	-0,183

В свете последнего формула (6) примет вид

$$A = A_0(\lambda - 1)^{1+k_1}. \quad (10)$$

Если $k = 0$, то формула (11) обретает форму гипотезы Риттингера $A = A_0(\lambda - 1)$, хотя эта линейная зависимость имеет новый смысл, поскольку коэффициент A_0 отражает все затраты энергии, а не только те, которые непосредственно идут на образование новых поверхностей.

Поэтому коэффициент k_1 характеризует отклонение зависимости (6) от линейного закона, а не отклонение от гипотезы Риттингера. В пользу такой трактовки говорит и то, что коэффициенты k_1 имеют отрицательные знаки (табл. 2). В противном случае, следуя гипотезам Риттингера и Ребиндера, эти знаки должны быть положительными.

Использование формулы (6) видим следующим образом. Например, исследуются новые рабочие органы, предназначенные для измельчения фуражного зерна. Определяются значения факторов, доставляющие минимум энергетическим затратам.

Затем на этих значениях факторов снимаются зависимости $A = f(\lambda)$ для 2-3 труднодробимых видов фуражного зерна.

В результате обработки этих кривых определяются коэффициенты A_0 и k .

Зависимость (6) и полученные численные значения ее коэффициентов являются исходными данными при проектировании новых или модернизированных измельчителей, в частности, при выборе мощности приводного электродвигателя.

Важнейшим вопросом при измельчении фуражного зерна является установление гранулометрического состава полученной дерти и прогнозирование закономерностей распределения частиц корма по размерам. Такая информация позволяет оценить качество измельчения и соответствие размеров частиц полученной дерти физиологическим потребностям животных. При

выявлении этой статистики размер частиц x рассматривают как одномерную случайную величину, вероятность нахождения которой в некоторой области размеров определяется функцией распределения $F(x)$ или функцией плотности распределения $f(x)$.

Известно, что дерть, полученная в молотковой дробилке, подчиняется по размерам логарифмически нормальному распределению с положительной асимметрией, т.е. с преобладанием мелких частиц [2]. Новые виды измельчителей [6, 7] показывают или нормальное распределение полученных частиц (вибрационные рабочие органы) или даже распределение с отрицательной асимметрией (режущие рабочие органы).

Вместо логарифмически нормального распределения часто применяют распределение Розина-Раммлера.

Изучение известных функций плотности распределения [1, 4, 8, 9] показывает, что очень трудно подобрать какое-либо распределение к составу дерти с отрицательной асимметрией. Кроме того, желательно, чтобы вместо применения нескольких распределений иметь одну универсальную форму распределения, изменяя параметры которой можно было бы получать различный вид асимметрии.

Нами предлагается такое универсальное распределение, плотность которого выражается формулой:

$$f(x) = P_0 \frac{x}{L} (A - \frac{x}{L})^m, \quad (11)$$

где P_0 – нормирующий коэффициент;

x – текущие значения размера частиц дерти;

L – средняя длина исходных зерновок;

A, m – эмпирические коэффициенты, подбираемые методом наименьших квадратов из экспериментальной гистограммы размеров частиц.

Предполагается, что крайними членами рассматриваемого вариационного ряда являются 0 и L .

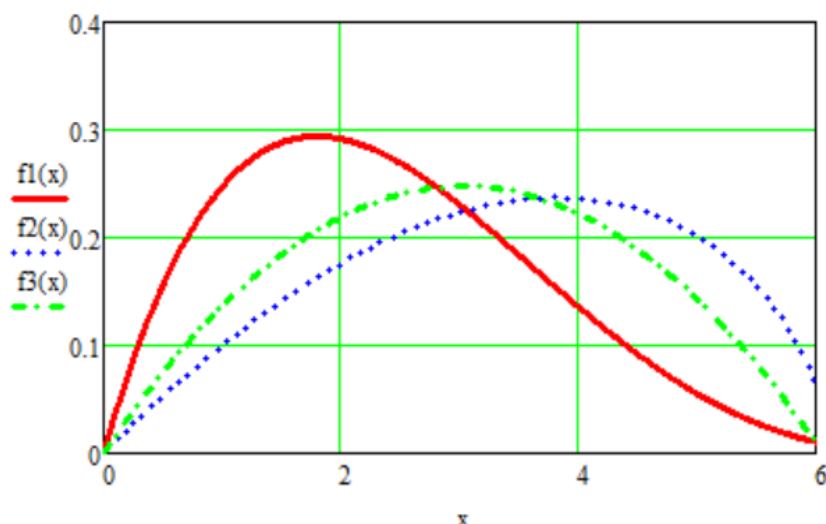


Рис. 6. Графики функций для плотности распределения частиц по размерам:
 $f_1(x)$ – правосторонняя асимметрия ($P_0 = 1,344$; $A = 1,2$; $m = 3$);
 $f_2(x)$ – левосторонняя асимметрия ($P_0 = 0,662$; $A = 1,02$; $m = 0,6$);
 $f_3(x)$ – полная симметрия ($P_0 = 0,971$; $A = 1,01$; $m = 1$)

Нормирующий коэффициент P_0 находится из условия, что

$$\int_0^L f(x) dx = 1. \quad (12)$$

Отсюда рассчитываем P_0 :

$$P_0 = \left[\int_0^L \frac{x}{L} \left(A - \frac{x}{L} \right)^m dx \right]^{-1}. \quad (13)$$

Численное решение этого интеграла, например, в программе Mathcad, не представляет никаких трудностей.

На рисунке 6 в качестве условного примера показаны функции плотности распределения для размеров частиц дерти с исходным размером зерновок $L = 6$ мм.

Таким образом, можно констатировать, что форма плотности распределения (11) позволяет описать гранулометрический состав зерновой дерти, получаемой на любых типах измельчителей. Однако качество описания симметричной характеристики оставляет желать лучшего. При выявленной неадекватности симметричного описания следует применить нормальный закон распределения.

Особенно лаконичной формула (11) становится, если ввести относительный размер частиц дерти $\xi = x/L$:

$$f(\xi) = P_0 \xi (A - \xi)^m. \quad (14)$$

Зависимости (11) и (14) также носят феноменологический характер. На их основе возможно описание и прогнозирование полидисперсной характеристики дерти, образуемой в процессе измельчения фуражного зерна.

Выводы

1. Предложены феноменологические (эмпирические) зависимости (6) и (11), одна из которых характеризует энергозатраты процесса дробления зерна, как функцию степени измельчения, а вторая представляет функцию плотности распределения частиц зерновой дерти по размерам.

2. Установлено, что предлагаемые формулы адекватно описывает качественно и количественно экспериментальные данные по энергетике и другим показателям процесса, а также позволяют решать смежные вопросы.

3. Предлагаемые формулы после изучения процесса измельчения в какой-либо конструкции и определения эмпирических коэффициентов могут служить в качестве исходных данных при проектировании производственных измельчителей.

Библиографический список

1. Ходаков, Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – Москва: Наука, 1972. – 307 с. – Текст: непосредственный.
2. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, Ленинград. отд-е, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.
3. Кормодробилки: конструкция, расчет / под редакцией Г. С. Ялпачик. – Запорожье: Коммунар, 1992. – 292 с. – Текст: непосредственный.
4. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд. пе-

пераб. – Москва: Химия, 1977. – 368 с. – Текст: непосредственный.

5. Гейзенберг, В. Роль феноменологических теорий в системе теоретической физики / В. Гейзенберг. – Текст: непосредственный // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 91, вып. 4. – С. 731-733.

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

7. Сергеев, Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Сергеев Николай Степанович. – Челябинск, 2008. – 38 с. – Текст: непосредственный.

8. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – Ленинград: Химия, 1974. – 280 с. – Текст: непосредственный.

9. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва: Физматлит, 2006. – 816 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Hodakov, G. S. Fizika izmel'cheniya / G. S. Hodakov. – Moskva: Nauka, 1972. – 307 s. – Текст: neposredstvennyj.

2. Mel'nikov, S.V. Mekhanizaciya i avtomatizaciya zhivotnovodcheskih ferm / S. V. Mel'nikov. –

Leningrad: Kolos, Leningrad. otd-e, 1978. – 560 s. – Текст: neposredstvennyj.

3. Kormodrobilki: konstrukciya, raschet / pod redakciej G. S. YAlpachik. – Zaporozh'e: Kommunar, 1992. – 292 s. – Текст: neposredstvennyj.

4. Sidenko, P. M. Izmel'chenie v himicheskoj promyshlennosti / P. M. Sidenko. – 2-e izd. pererab. – Moskva: Himiya, 1977. – 368 s. – Текст: neposredstvennyj.

5. Gejzenberg, V. Rol' fenomenologicheskikh teorij v sisteme teoreticheskoy fiziki / V. Gejzenberg. – Текст: neposredstvennyj // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 1967. – Т. 91, вып. 4. – С. 731-733.

6. Levin, A. M. Obosnovanie konstruktivno-rezhimnyh parametrov vibracionno-udarnogo izmel'chitelya furazhnogo zerna: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.20.01 / Levin Aleksej Mihajlovich. – Barnaul, 2005. – 19 s. – Текст: neposredstvennyj.

7. Sergeev, N. S. Centrobezhno-rotornye izmel'chiteli furazhnogo zerna: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.20.01 / Sergeev Nikolaj Stepanovich. – Chelyabinsk, 2008. – 38 s. – Текст: neposredstvennyj.

8. Kouzov, P. A. Ocnovy analiza dicpercного соctava ppomyshlennyh pylej i izmel'chennyh matepialov / P. A. Kouzov. – Leningrad: Himiya, 1974. – 280 с. – Текст: neposredstvennyj.

9. Kobzar', A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov / A. I. Kobzar'. – Moskva: Fizmatlit, 2006. – 816 s. – Текст: neposredstvennyj.



УДК 631.362.322

В.И. Беляев, В.Э. Буксман, Р.Е. Прокопчук
V.I. Belyaev, V.E. Buksman, R.E. Prokopchuk

МОНИТОРИНГ РАБОТЫ ПОСЕВНЫХ КОМПЛЕКСОВ CONDOR 15000 и CITAN Z В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

MONITORING CONDOR 15000 AND CITAN Z SEED DRILLS IN THE ALTAI TERRITORY

Ключевые слова: посевной агрегат, производительность, расход топлива, баланс времени смены, выработка МТА, высеваемые культуры.

Keywords: seed drill, productivity, fuel consumption, shift time balance, performance of machine-tractor units, sown crops.