

КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА В РОТОРНОЙ ДРОБИЛКЕ И ЗАТРАТЫ МОЩНОСТИ НА ЕЕ РАБОТУ

Нанка А.В., проф.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Приведено математическое описание кинематических процессов, протекающих в рабочей зоне дробилки, где процесс измельчения зерна выполняется резанием-скалыванием. На основании рассмотренной геометрии движения зерна в рабочей камере дробилки предложен расчет мощности процесса измельчения

Постановка проблемы. Одним из основных способов подготовки зерновых кормов к скармливанию есть их измельчение. При измельчении зерна, разрушается его твердая оболочка, повышается доступность питательных веществ действию желудочных соков, происходит более полное усвоение энергии корма, которое ведет к увеличению производительности животных и птицы на 10-15% [1]. Измельчение является наиболее энергоемкой операцией и занимает около 50% [2] от общих энергетических расходов при приготовлении комбикормов. Поэтому энергоемкость процесса измельчения зерновых кормов является одним из важных показателей эффективности производства продукции животноводства и птицеводства.

Повышение эффективности работы дробилок зерновых кормов, рабочие органы которых взаимодействуют с зерновым материалом, возможно путем математического моделирования общих закономерностей процессов, которые реализуются в их при измельчении резанием или скалыванием с обязательным учетом энергоемкости процессу и качества конечного продукта.

Анализ последних исследований. На животноводческих фермах, комбикормовых заводах, разных перерабатывающих предприятиях для измельчения зерновых продуктов широко используются молотковые дробилки, которые отличаются простотой конструкций, надежностью в работе и имеют широкий спектр производительности. Отмечая их достоинства нельзя не выделить ряд существенных недостатков, первыми из которых являются высокие удельные расходы энергии на процесс измельчения (15-18 кВт час/т) [3].

Повышенные расходы энергии объясняются тем, что измельченный продукт не своевременно выводится из камеры измельчения и подлежит многократному удару, в результате чего возникает второй недостаток молотковых дробилок - неоднородность гранулометрического состава готового продукта (содержание пылевидной фракции достигает до 20%) Третьим недостатком молотковых дробилок есть повышенное и неравномерное изнашивание молотков и сит.

Результаты исследований. Устройство для измельчения фуражного зерна [4] представляет собой горизонтальный цилиндр, внутри которого располагается барабан C_1 с фрезами (рис.1). Зерно через выходное отверстие бункера попадает в рабочую зону дробилки на противорежущую пластину (ПРП). Зерно, имеющее форму вытянутого эллипсоида вращения с полуосями a_3, b_3 (большой и меньшей, соответственно) ложится центральной частью на ПРП, имеющей длину $s_{ПРП}$ (рис.2). Движущиеся фрезы A срезают концевые части зерна длиной d . На рис.1 изображен вид вдоль оси барабана с расположением поперечного сечения зерна в начальный момент его захвата зубьями.

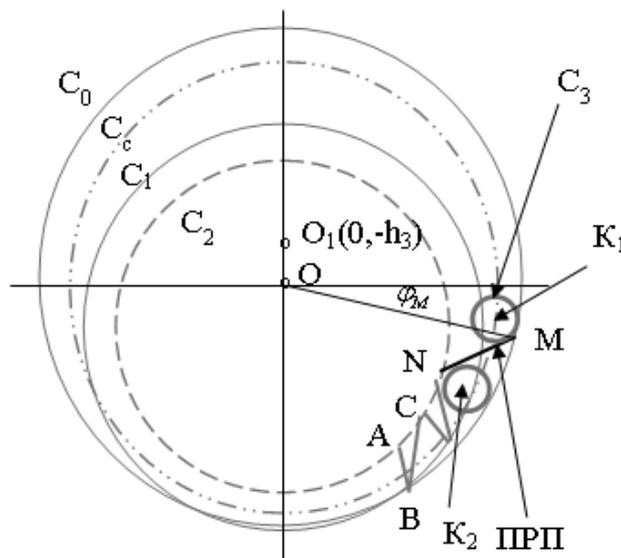


Рисунок 1 – Схема дробильной камеры роторной дробилки

где C_0 - корпус дробилки, окружность радиуса R_0 ;
 C_3 - граница поперечного сечения зерна, окружность радиуса r_3 ;
 C_c - линия центров поперечных сечений зерна C_3 , окружность радиуса R_c ;
 h_3 - высота зуба фрезы;
 C_1 - фреза, окружность радиуса R_1 ;
 C_2 - место расположения оснований зубьев фрезы, окружность радиуса $R_2 = R_1 - h_3$;
 d_3 - диаметр поперечного сечения зерна (меньшая ось эллипсоида);
 MN - противорежущая пластина (ПРП), закрепленная в точке M корпуса дробилки и наклоненная по отношению к горизонтали под углом γ ;
 φ_1, φ_2 - полярные углы для центра поперечного сечения зерна, соответствующие первому (точка K_1) и последнему (точка K_2) моментам соприкосновения зерна с ПРП;
 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

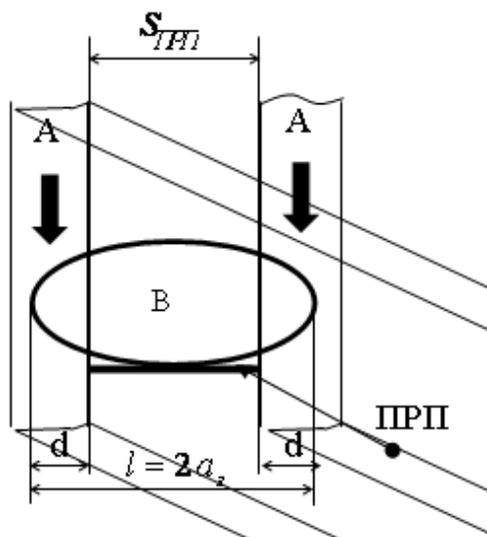


Рисунок 2 – Расположение зерна на противорежущей пластине

Найдем углы φ_1, φ_2 . Для этого запишем уравнение прямой MN проходящей через точку M под углом γ к горизонту в виде:

$$(x - x_M) \sin \gamma + (y - y_M) \cos \gamma = 0 \quad (x_M = R_0 \cos \varphi_M, y_M = R_0 \sin \varphi_M - h_3) \quad (1)$$

где x_M, y_M, φ_M - координаты и соответствующий полярный угол точки M , расположенной на правом конце ПРП;
 γ - угол наклона ПРП к горизонту.

Будем считать, что координаты центра K_1 (или K_2) временно известны. Расстояние от указанной точки K_1 до прямой MN определяется как минимальное расстояние между этой точкой и произвольной точкой $S(x, y)$ прямой (рис.3).

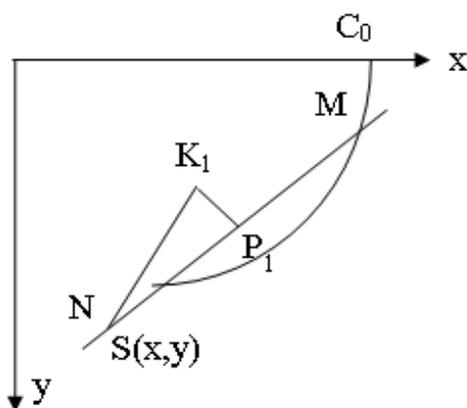


Рисунок 3 – К определению центра поперечного сечения зерна в положении K_1

Таким образом, определение расстояния от центра зерна K_1 до ПРП (рис.4) сводится к экстремальной задаче нахождения минимума функции [4].

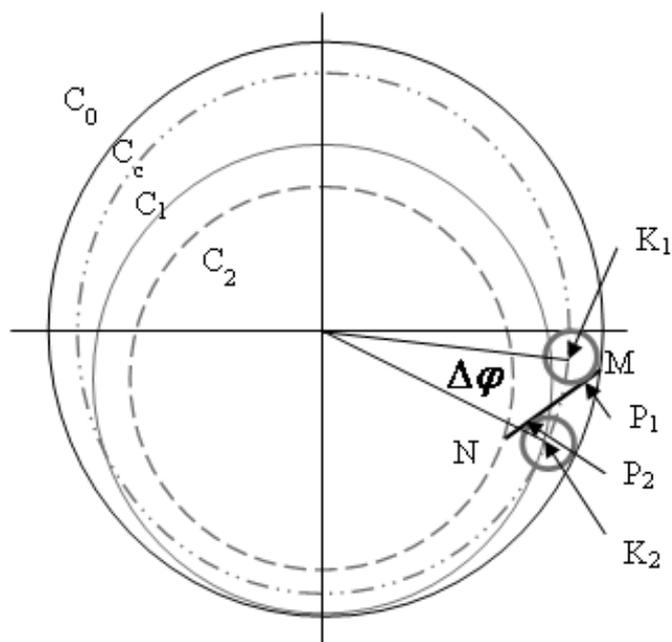


Рисунок 4 – Схема крайнего расположения зерна на противорежущей пластине

$$F(x, y) = \sqrt{(x - x_K)^2 + (y - y_K)^2}, \quad (2)$$

$$d_{K_1 P_1} = \min_{x, y} d_{K_1 S} = \min_{x, y} \sqrt{(x - x_{K_1})^2 + (y - y_{K_1})^2} \quad (3)$$

при условии

$$Ax + By + C = 0, \quad (4)$$

где

$$A = \sin \gamma, B = \cos \gamma, C = -x_M \sin \gamma - y_M \cos \gamma = -R_0 \sin(\gamma + \varphi_M) \quad (5)$$

Вместо [2] воспользуемся эквивалентной экстремальной задачей – найти минимум функции $F^2(x, y)$

$$D_{K_1 P_1} = \min_{x, y} d_{K_1 S}^2 = \min_{x, y} [(x - x_{K_1})^2 + (y - y_{K_1})^2] \quad (6)$$

с тем же ограничением [2]. Для решения экстремальной задачи воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа [1], который позволяет свести задачу [2] к задаче на безусловный экстремум функции

$$\Phi = (x - x_{K_1})^2 + (y - y_{K_1})^2 + \lambda (Ax + By + C) \quad (7)$$

$$\min_{x, y} \Phi(x, y)$$

где λ является множителем Лагранжа. Необходимое условие экстремума [2] сводится к двум линейным алгебраическим уравнениям относительно x, y, λ и дополняется условием [2]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Phi}{\partial x} &\equiv 2(x - x_{K_1}) + 2\lambda A = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} &\equiv 2(y - x_{K_1}) + 2\lambda B = 0 \\ Ax + By + C &= 0\end{aligned}\quad (8)$$

Решение системы (8) дает выражение для координат точки P_1 : x_{P_1}, y_{P_1} :

$$\begin{aligned}x_P &= \\ &= \frac{1}{2} \left[h_3 \sin(2\gamma) + (R_0 - r_3) \cos(\varphi) + R_0 \cos(\varphi_M) + \right. \\ &\quad \left. + (R_0 - r_3) \cos(2\gamma + \varphi) - R_0 \cos(2\gamma + \varphi_M) \right] \\ y_P &= \\ &= \frac{1}{2} \left[(R_0 - r_3) \sin(\varphi) + R_0 \sin(\varphi_M) - (R_0 - r_3) \sin(2\gamma + \varphi) + \right. \\ &\quad \left. + h_3 \cos(2\gamma) - h_3 + R_0 \sin(2\gamma + \varphi_M) \right]\end{aligned}\quad (9)$$

Здесь вместо φ нужно взять φ_1 для начального момента встречи зерна с ПРП, и φ_2 для конечного момента.

Уравнение для нахождения φ (соответственно φ_1, φ_2) вытекает из того, что расстояние между точками K_1, P_1 (K_2, P_2) равняется радиусу r_3 поперечного сечения зерна, и с учетом [2], может быть записано в виде

$$\begin{aligned}&(x_P - x_K)^2 + (y_P - y_K)^2 - r_3^2 \equiv \\ &\equiv \left[(R_0 - r_3) \cos \varphi - \frac{1}{2} h_3 \sin(2\gamma) - \frac{1}{2} (R_0 - r_3) \cos \varphi - \frac{1}{2} R_0 \cos \varphi_M - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} (R_0 - r_3) \cos(2\gamma + \varphi) + \frac{1}{2} R_0 \cos(2\gamma + \varphi_M) \right]^2 + \\ &\quad + \left[(R_0 - r_3) \sin \varphi - h_3 - \frac{1}{2} (R_0 - r_3) \sin \varphi - \frac{1}{2} R_0 \sin \varphi_M + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (R_0 - r_3) \sin(2\gamma + \varphi) - \frac{1}{2} h_3 \cos(2\gamma) - \frac{1}{2} R_0 \sin(2\gamma + \varphi_M) \right]^2 - r_3^2 = 0\end{aligned}\quad (10)$$

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \arctg \frac{y_{K_2}}{x_{K_2}} - \arctg \frac{y_{K_1}}{x_{K_1}}\quad (11)$$

Рассмотрим теперь произвольное положение зерна при (рис. 5) $\varphi \in [\varphi_1, \varphi_2]$.

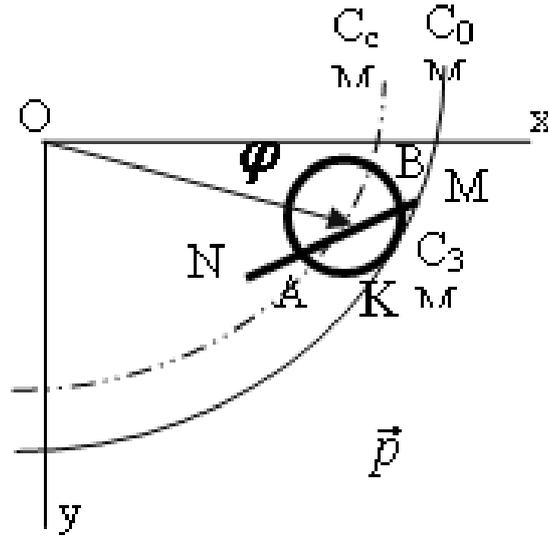


Рисунок 5 – Схема расположения зерна в области резания

Уравнение окружности C_3 поперечного сечения зерна с центром в точке K имеет вид (рис.5)

$$(x - x_K)^2 + (y - y_K)^2 = r_3^2 \quad (x_K = (R_0 - r_3) \cos \varphi, y_K = (R_0 - r_3) \sin \varphi - h_3). \quad (12)$$

Линия разреза AB зерна является частью ПРП, лежащей внутри окружности C_3 , и имеет длину L_{AB} (рис. 5). Для определения длины линии резания L_{AB} решаем совместно уравнения [2], находим координаты точек A, B пересечения окружности C_3 и прямой MN , а затем L_{AB}

$$\begin{aligned} x_A = & \cos^2 \gamma x_K - (-x_M \sin \gamma - y_M \cos \gamma) \sin \gamma - \cos \gamma \sin \gamma y_K - \\ & - \cos \gamma \left\{ (y_K - y_M + x_K)(-y_K + y_M + x_K) \cos^2 \gamma - \right. \\ & \left. - 2 \sin \gamma (y_K - y_M)(x_K - x_M) \cos \gamma + (2x_K x_M - x_M^2) \sin^2 \gamma + r_3^2 - x_K^2 \right\}^{1/2} \\ y_A = & (x_M - x_A) \operatorname{tg} \gamma + y_M \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x_B = & \cos^2 \gamma x_K - (-x_M \sin \gamma - y_M \cos \gamma) \sin \gamma - \cos \gamma \sin \gamma y_K + \\ & + \cos \gamma \left\{ (y_K - y_M + x_K)(-y_K + y_M + x_K) \cos^2 \gamma - \right. \\ & \left. - 2 \sin \gamma (y_K - y_M)(x_K - x_M) \cos \gamma + (2x_K x_M - x_M^2) \sin^2 \gamma + r_3^2 - x_K^2 \right\}^{1/2} \\ y_B = & (x_M - x_B) \operatorname{tg} \gamma + y_M \\ L_{AB} = & \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \end{aligned}$$

Следуя предположениям теории сопротивления материалов и используя

аналогию с заклепочным соединением, будем считать, что касательные напряжения τ в плоскости среза зерна являются постоянными и принимают предельные значения $\tau = \tau_s$ [5]. Тогда мощность M касательных напряжений при резании зерен с учетом малости отношения r_3 / R_c можно записать в виде:

$$M = 2\tau_s S_c \omega R_c N_z = \tau_s S_c \pi R_c N_z f / 15 \quad (14)$$

где S_c - величина площади поперечного сечения зерна, подлежащая срезу (рис.6);

ω - угловая скорость вращения фрезы;

N_z - число зубьев фрезы в одном ряду вращающегося барабана;

f - число оборотов в минуту барабана с фрезами.

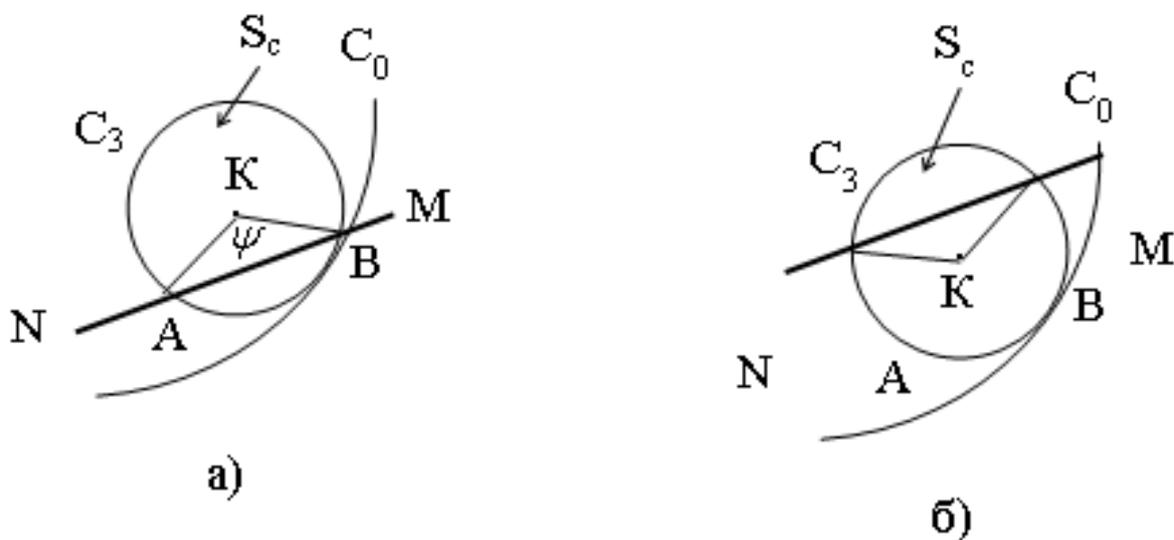


Рисунок 6 – К определению площади поперечного сечения среза зерна

Величина площади S_c поперечного сечения зерна при вращении фрезы зависит от полярного угла φ точки K (рис.5). Здесь надо различать два момента, когда K центр круга C_3 лежит над ПРП – 1-й режим, и, когда K лежит ниже ПРП – 2-й режим (рис.6). При первом режиме S_c состоит из сектора круга, отвечающего углу $\pi - \psi$, и треугольника ΔAKB (рис.6, а). Тогда имеем:

$$S_c = S_{сек} + S_{AKB} = r_3^2 (\pi - \psi / 2 + 1 / 2 \sin \psi). \quad (15)$$

Здесь угол ψ определяется как угол между векторами $\vec{KA} = (x_A - x_K, y_A - y_K)$ и $\vec{KB} = (x_B - x_K, y_B - y_K)$

$$\cos \psi = \frac{\vec{KA} \cdot \vec{KB}}{r_3^2} = \frac{(x_A - x_K)(x_B - x_K) + (y_A - y_K)(y_B - y_K)}{r_3^2}. \quad (16)$$

Граница между режимами определяется неравенствами $x_K \leq x_0$ - 1-й

режим, $x_K > x_0$ - второй режим, а x_0 представляет собой хордовую координату точки пересечения прямой MN с окружностью C_c (рис.5), а, следовательно, является решением системы уравнения [3] и уравнения окружности C_c

$$x^2 + y^2 = R_c^2 \quad (17)$$

Указанная система уравнений является нелинейной, имеет два решения, из них выбираем соответствующее точке пересечения MN и C_c

$$x_0 = -AC + \sqrt{A^2C^2 + B^2R_c^2 - C^2} . \quad (18)$$

Схема расположения зерна в рабочей области, полученная в результате расчетов для $d_3 = 0.004$ м, приведена на рис. 7.

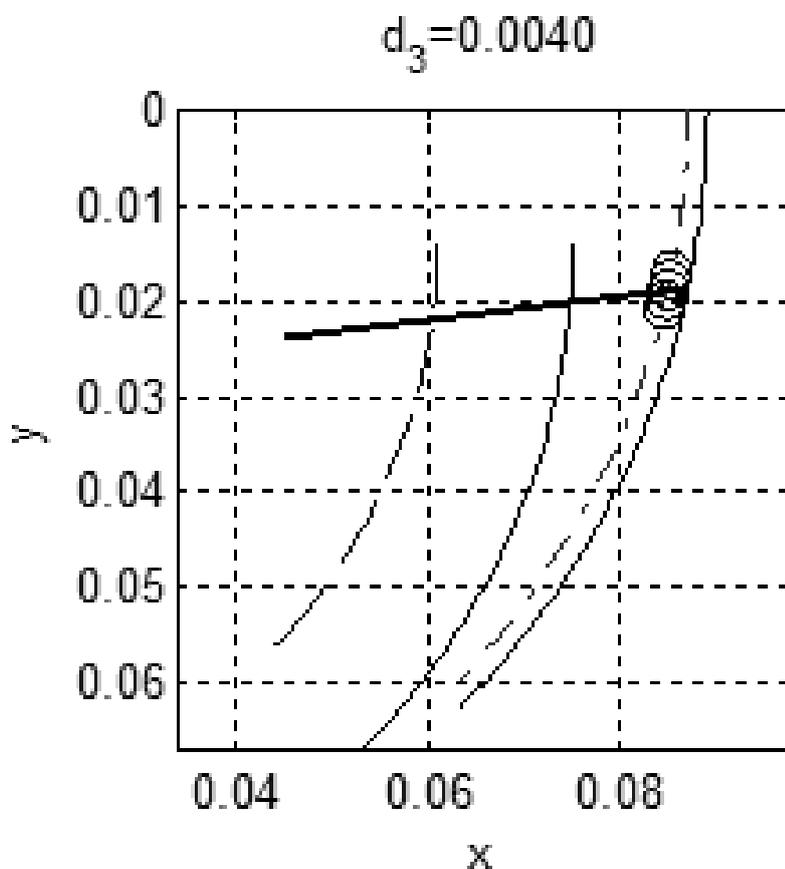


Рисунок 7 – Схема срезания зерна фрезой

В начальный момент соприкосновения зерна с ПРП срезаемая площадь максимальная и равна площади поперечного сечения зерна. Затем эта величина уменьшается до нуля.

Результаты вычислений для мощности, развиваемой фрезой, в соответствии с формулами [4] приведены на рис.8, 9 для предельного касательного напряжения $\tau_s = 2 \cdot 10^7$ н/м², $N_z = 20$, $d_3 = 0.003 \div 0.004$ м и частоты вращения фрезы $f = 1500, 2500$ об/мин, соответственно.

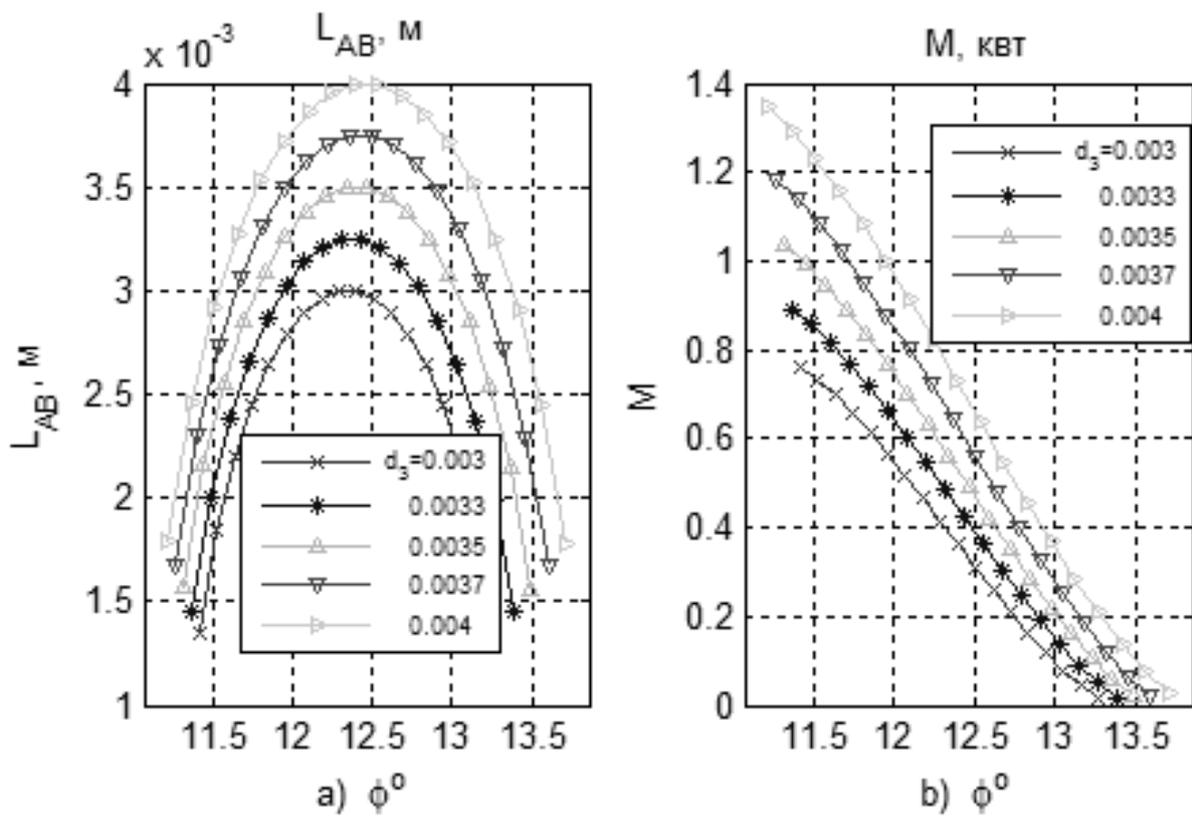


Рисунок 8 – Зависимости мощности резания зерна фрезой для различных диаметров зерна при частоте вращения фрезы равной 1500 об/мин

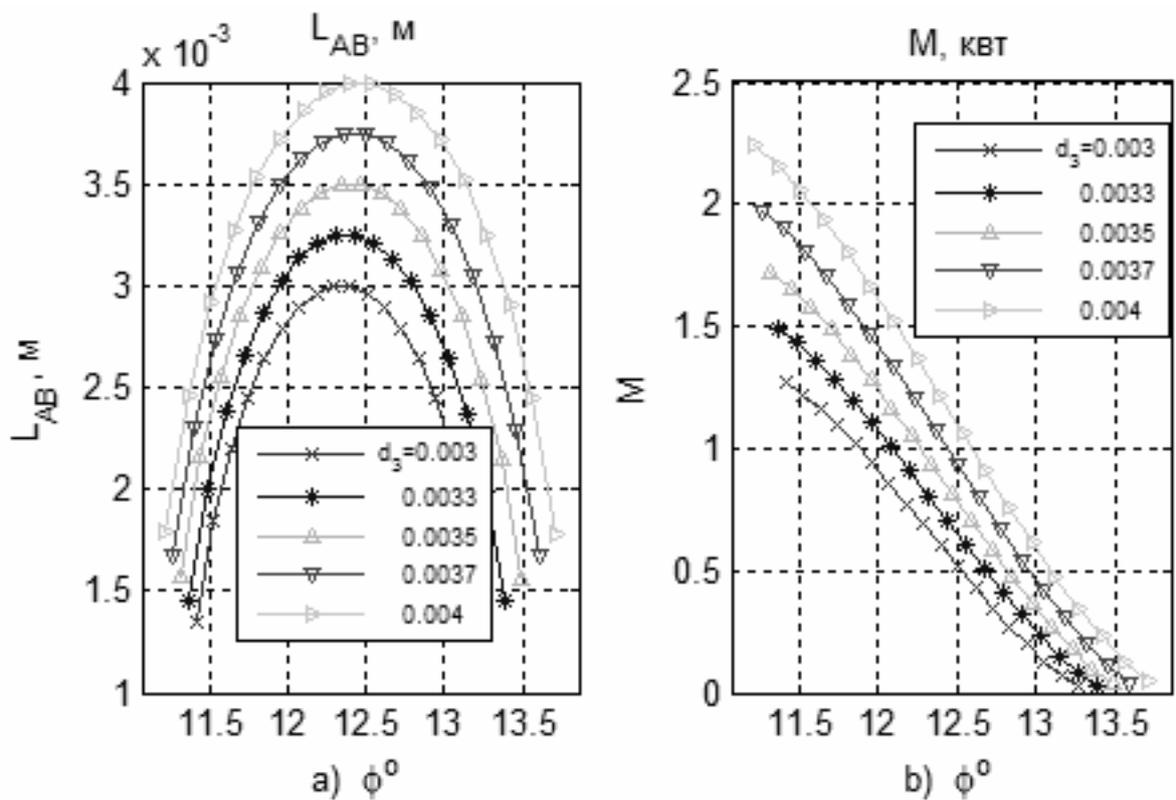


Рисунок 9 – Зависимости мощности резания зерна фрезой для различных диаметров зерна при частоте вращения фрезы равной 2500 об/мин

На рисунках 8 и 9 а), приведены графики длины хорды AB поперечного сечения зерна. Эта величина определяет характер резки зерна фрезой. Мощность резки M меняется в процессе перемещения зерна. Как видно из формулы [5] она пропорциональна срезаемой площади S_c .

Выводы. В результате рассмотрения геометрии движения зерна в рабочей камере роторной дробилки и изучения его кинематики выполнено математическое описание процесса на основании, которого предложен метод расчета мощности расходуемой на измельчение зерна.

Список использованных литературных источников

1. Деталізовані норми годівлі сільськогосподарських тварин / Т.М. Ноздрін, М.М. Карпусь, В.Д. Каравашенко та інш. – К.: “Урожай”, 1991. – 352 с.
2. Концепция развития механизации и автоматизации процессов в животноводстве на период до 2015года: материалы междунар. науч.-практ. конф., 15 марта 2003 г. Подольск / редкол.: Л.М. Цой (отв. ред.) – Подольск: ГНУ ВНИИМЖ, 2003. – 100с.
3. Ермичев, В.А. Энергосбережение в технологиях кормопроизводства / В.А. Ермичев, А.И. Купреенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 4. – С. 11–13.
4. Погорелов А.В. Лекции по дифференциальной геометрии / А.В. Погорелов. Харьков: Изд-во Харьковск. госун-та, 1967. - 163 с.
5. Беляев Н.М. Соппротивление материалов / Н.М. Беляев. М.: Наука, 1965. - 856 с.

Анотація

КІНЕМАТИКА ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА В РОТОРНІЙ ДРОБАРЦІ І ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ЇЇ РОБОТУ

Нанка О.В.

Приведений математичний опис кінематичних процесів, що протікають в робочій зоні дробарки, де процес подрібнення зерна виконується різанням-сколюванням. На підставі розглянутої геометрії руху зерна в робочій камері дробарки запропонований розрахунок потужності процесу подрібнення

Abstract

KINEMATICS TO THE PROCESS OF GRINDING DOWN OF GRAIN IN TO THE ROTOR CRUSHER AND EXPENSES OF POWER ON ITS WORK

A. Nanka

Mathematical description of kinematics processes, flowings in the working area of crusher is resulted, where the process of grinding down is carried out cutting-splitting off. On the basis of the considered geometry of motion of grain the calculation of power of process of grinding down is offered in the working chamber of crusher