

УДК 631 363

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАЛЬЦОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ЗЕРНОФУРАЖА

Ю.Н. Гнедько,

нач. службы механизации ОАО «Г² Минская птицефабрика»

Д.Ф. Кольга,

зав. каф. технологии и механизации животноводства БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.И. Пунько,

зав. лабораторией механизации приготовления концентрированных кормов
РГУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент

Г.Г. Тычина,

доцент каф. технологии и механизации животноводства БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Представлено теоретическое обоснование двухступенчатой вальцовой схемы измельчения зернофуража, установлены математические зависимости для определения конструктивных параметров измельчителя.

The theoretical rationale for the two-stage roller circuit grinding grain forage is given, mathematical relationships to determine the design parameters of the chopper are established.

Введение

Комбикорм – один из важнейших и незаменимых компонентов в рационе всех сельскохозяйственных животных. Одним из основных требований, предъявляемых к нему, является то, что компоненты комбикорма должны быть измельчены до частиц требуемого размера, а смесь должна быть однородной, без пылевидных частиц. Традиционно для измельчения компонентов комбикорма используют молотковые дробилки. Полученный в результате измельчения на этих дробилках комбикорм обладает повышенным содержанием пылевидных частиц. Замена дробления плющением существенно снижает образование пылевидных частиц, но в процессе плющения зерно полностью не разрушается [1]. Для усовершенствования процесса приготовления качественного комбикорма разработаны двухступенчатые вальцовые измельчители зернофуража, представляющие собой бункер, под которым размещается пара вальцов, вращающихся навстречу друг другу с разной скоростью [2]. Степень измельчения компонентов комбикорма достигается путем изменения зазора между вальцами.

Основная часть

Минимальный радиус вальцов определим из условия нормального функционирования вальцового из-

мельчителя, которое выполняется при захвате вальцами частиц компонентов дробления.

На рисунке 1а и 1б представлена схема к определению условия захвата частицы 1 вальцами 2, каждый из которых получает привод от отдельного электродвигателя через клиноременную передачу, причем, правый валец с повышенной скоростью.

Условие захвата частицы может быть получено из явления заклинивания частицы между вальцами [3]. Для этого составим уравнение суммы моментов сил, действующих на частицу 1, относительно одной из точек контакта частицы с вальцом (на схеме 1б, левым вальцом в точке А). Тогда, исходя из рисунка 1б, получим

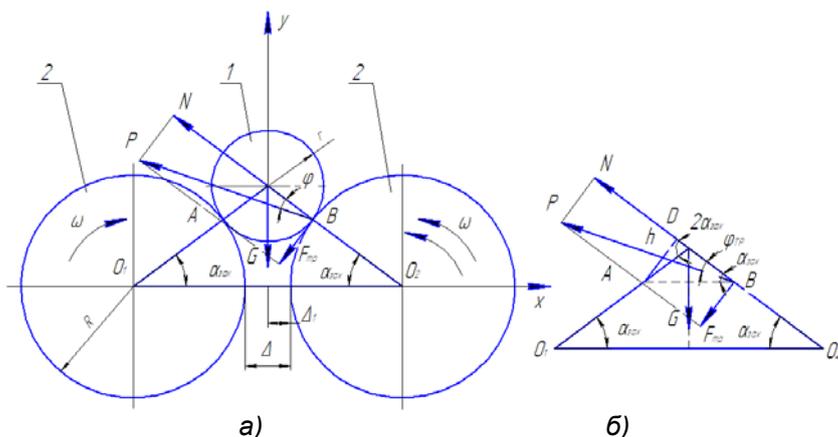


Рисунок 1. Схема к определению условия захвата частицы вальцами: а – общая схема; б – схема приложения сил: 1 – частица; 2 – валец

$$\Sigma M_A(F_i) = -Nh + Gr \cos \alpha_{\text{зах}} +$$

$$+ F_{\text{тр}}(r + r \cos 2\alpha_{\text{зах}}) = 0,$$

где r – радиус частицы m ;

$h = r \sin 2\alpha_{\text{зах}}$ – плечо действия силы N , м;

G – сила тяжести, H .

Учитывая закон Кулона, что $F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}}N$, определим реакцию N

$$N = \frac{G \cos \alpha_{\text{зах}}}{\sin 2\alpha_{\text{зах}} - f_{\text{тр}}(1 + \cos 2\alpha_{\text{зах}})}. \quad (1)$$

Явление заклинивания частицы развивается следующим образом. Возникающая сила трения $F_{\text{тр}}$ стремится повернуть частицу по часовой стрелке, что вызывает увеличение реакции N . Это, в свою очередь, вызывает увеличение силы трения $F_{\text{тр}}$, что приводит к увеличению реакции N и т.д. до достижения предела прочности частицы, при котором происходит ее разрушение. Если гипотетически увеличивать предел прочности частицы до бесконечности, то реакция N также будет стремиться к бесконечности. При этом знаменатель дроби выражения (1) будет стремиться к нулю.

$$\sin 2\alpha_{\text{зах}} - f_{\text{тр}}(1 + \cos 2\alpha_{\text{зах}}) = 0.$$

Учитывая, что $\sin 2\alpha_{\text{зах}} = 2\sin\alpha_{\text{зах}}\cos\alpha_{\text{зах}}$ и $1 + \cos 2\alpha_{\text{зах}} = 2\cos^2\alpha_{\text{зах}}$, то получаем $f_{\text{тр}} = \text{tg}\alpha_{\text{зах}}$, а так как $f_{\text{тр}} = \text{tg}\varphi_{\text{тр}}$, то имеем, что $\varphi_{\text{тр}} = \alpha_{\text{зах}}$.

Очевидно, что заклинивание будет происходить и при $\varphi_{\text{тр}} > \alpha_{\text{зах}}$. Следовательно, окончательно имеем условие заклинивания

$$\varphi_{\text{тр}} \geq \alpha_{\text{зах}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения частицы о валец (угол между результирующей силой от заклинивания P и нормальной составляющей N);

$\alpha_{\text{зах}}$ – угол захвата вальцов.

Полученное выражение 2 (условие захвата частицы вальцами) будет более точным, так как учитывает влияние силы тяжести G . Другим необходимым условием продвижения частицы через вальцы является смятие (или сжатие) этой частицы. Если частица абсолютно твердая, то механизм «частица – вальцы» заклинит в начальном положении. После заклинивания нарастание реакции N и силы трения $F_{\text{тр}}$ замедлится, и оно будет определяться характером смятия (сжатия) частицы.

Силы, действующие на частицу при ее заклинивании, определим при рассмотрении равновесия вальца (рис. 2).

Из рисунка 2 получим

$$F_{\text{тр}} R = M_{\text{об}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{об}}$ – момент, вращающий валец, Нм;

R – радиус вальца, м.

Отсюда определим

$$F_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{об}}}{R}, \quad (4)$$

тогда

$$N = \frac{F_{\text{тр}}}{f_{\text{тр}}} = \frac{M_{\text{об}}}{f_{\text{тр}} R}. \quad (5)$$

Если при этом значении N не произойдет смятие (сжатие) частицы, то механизм заклинит.

Если же частица подверглась смятию (сжатию), то есть она деформировалась, то под действием сил трения она будет затаскиваться между вальцами. Действительно, умножив выражение $f_{\text{тр}} = \text{tg}\alpha_{\text{зах}}$ на N , получим

$$N f_{\text{тр}} = N \frac{\sin \alpha_{\text{зах}}}{\cos \alpha_{\text{зах}}}, \quad (6)$$

откуда с учетом первой части выражения (5) получим выражение

$$F_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{зах}} \geq N \sin \alpha_{\text{зах}} \quad (7)$$

Учитывая, что коэффициент трения постоянен и исходя из условия $f_{\text{тр}} \geq \text{tg}\alpha_{\text{зах}}$, определим радиус вальцов R .

Из прямоугольного треугольника KDO_2 (рис. 1а) имеем

$$KD^2 = DO_2^2 - KO_2^2 = (R+r)^2 - (R+\Delta_1)^2,$$

$$\text{tg}\alpha_{\text{зах}} = \frac{KD}{KO_2} = \frac{\sqrt{(R+r)^2 - (R+\Delta_1)^2}}{R+\Delta_1},$$

где $\Delta_1 = \Delta/2$ – половина зазора между вальцами, м.

Отсюда

$$f_{\text{тр}} \geq \text{tg}\alpha_{\text{зах}} = \frac{\sqrt{(R+r)^2 - (R+\Delta_1)^2}}{R+\Delta_1}. \quad (8)$$

Перепишем формулу (8) в относительных единицах, введя обозначения $R/r = \lambda$, $\Delta_1/r = \varepsilon$ – коэффициент сжатия. Для этого разделим числитель и знаменатель на r :

$$f_{\text{тр}} \geq \frac{\sqrt{(\lambda+1)^2 - (\lambda+\varepsilon)^2}}{\lambda+\varepsilon}. \quad (9)$$

Преобразуем данное выражение

$$[f_{\text{тр}}(\lambda+\varepsilon)]^2 \geq \left[\sqrt{(\lambda+1)^2 - (\lambda+\varepsilon)^2} \right]^2,$$

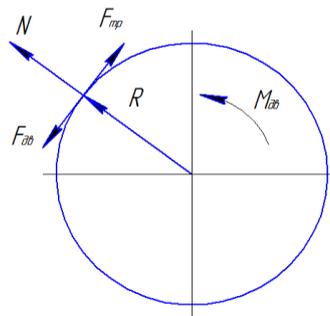


Рисунок 2. Равновесное состояние вальца

$$f_{mp}^2 \lambda^2 + 2\lambda \varepsilon f_{mp}^2 + f_{mp}^2 \varepsilon^2 \geq \lambda^2 + 2\lambda + 1 - \lambda^2 - 2\lambda \varepsilon - \varepsilon^2.$$

Далее получаем уравнение

$$\lambda^2 + 2 \frac{(1 + f_{mp}^2) \varepsilon - 1}{f_{mp}^2} \lambda + \frac{(1 + f_{mp}^2) \varepsilon^2 - 1^2}{f_{mp}^2} = 0$$

Корни уравнения

$$\lambda = - \frac{(1 + f_{mp}^2) \varepsilon - 1}{f_{mp}^2} \pm \sqrt{\left[\frac{(1 + f_{mp}^2) \varepsilon - 1}{f_{mp}^2} \right]^2 - \frac{(1 + f_{mp}^2) \varepsilon^2 - 1^2}{f_{mp}^2}},$$

(знак «-» опускаем как не реальный).

Упрощая полученное выражение, получим

$$\lambda = \frac{1 - (1 + f_{mp}^2) \varepsilon + \sqrt{(1 + f_{mp}^2)(1 - \varepsilon)^2}}{f_{mp}^2} = (1 - \varepsilon) \frac{1 + \sqrt{1 + f_{mp}^2}}{f_{mp}^2} - \varepsilon. \quad (10)$$

Для надежности заклинивания введем коэффициент $\beta \approx 1,05 \div 1,1$.

Тогда

$$\lambda = \beta \left[(1 - \varepsilon) \frac{1 + \sqrt{1 + f_{mp}^2}}{f_{mp}^2} - \varepsilon \right]. \quad (11)$$

На рисунке 3 иллюстративно показан характер изменения зависимостей $\lambda = f(f_{mp})$, представляющих собой гиперболы. Данные теоритические зависимо-

сти λ от коэффициента трения f_{mp} для различного ε , имеющего значения 0,1; 0,25 и 0,5, рассчитаны по формуле (11).

Рисунки 3а и 3б имеют вертикальную асимптоту $f_{тр} = 0$ (при $f_{тр} \rightarrow 0, \lambda \rightarrow \infty$). При увеличении коэффициента трения $f_{тр}$ величина λ уменьшается, а значит и радиус вальца R , обеспечивающий заклинивание тела, так же уменьшается.

Из рисунка 3а видно, что изменение радиуса вальца весьма чувствительно к изменению коэффициента трения при малых его значениях: R быстро возрастает при уменьшении $f_{тр}$. При больших значениях $f_{тр}$ чувствительность быстро уменьшается.

Определим скорость изменения λ от $f_{тр}$

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{df} &= (1 - \varepsilon) \frac{f_{mp}^2 \frac{2f_{mp}}{2\sqrt{1+f_{mp}^2}} - (1 + \sqrt{1+f_{mp}^2}) 2f_{mp}}{f_{mp}^4} = \\ &= -(1 - \varepsilon) \frac{2(1 + \sqrt{1+f_{mp}^2}) + f_{mp}^2}{f_{mp}^3 \sqrt{1+f_{mp}^2}} = \\ &= - \frac{1 + 2\sqrt{1+f_{mp}^2} + 1 + f_{mp}^2}{f_{mp}^3 \sqrt{1+f_{mp}^2}} = \\ &= \frac{(1 + \sqrt{1+f_{mp}^2})^2}{f_{mp}^3 \sqrt{1+f_{mp}^2}} (1 - \varepsilon). \quad (12) \end{aligned}$$

Знак минус в данном случае говорит о том, что коэффициент трения $f_{тр}$ и λ противоположны друг другу: с уменьшением $f_{тр}$ λ возрастает и наоборот.

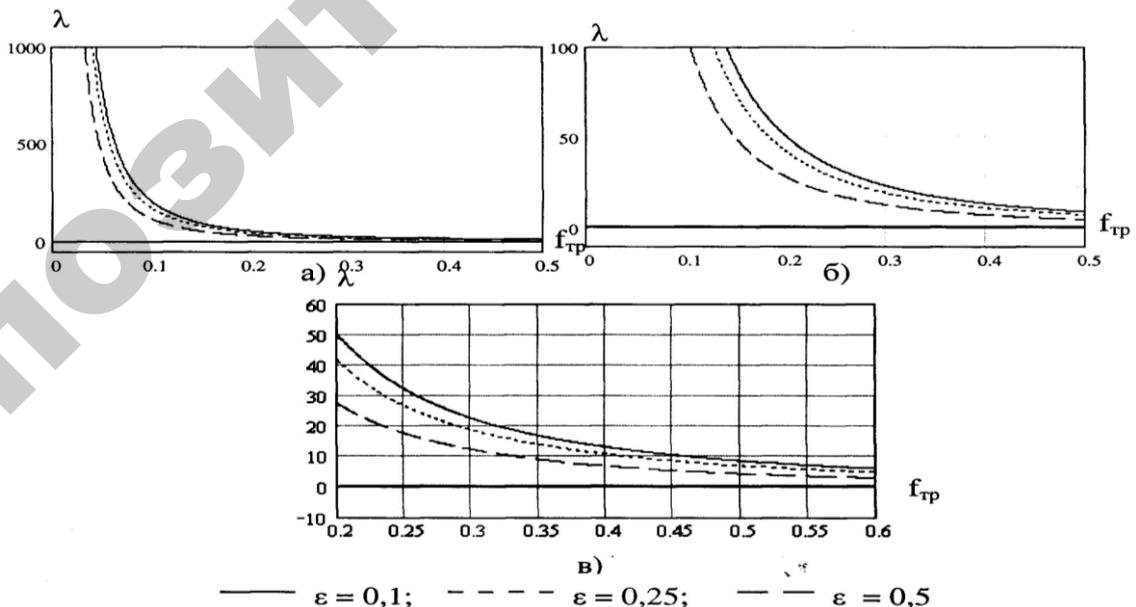


Рисунок 3. Зависимость изменения минимального радиуса R вальцов от коэффициента трения $f_{тр}$.

На рисунке 4 представлена теоретическая зависимость $\lambda = f(\varepsilon)$, рассчитанная по формуле (12) для различных значений коэффициента трения

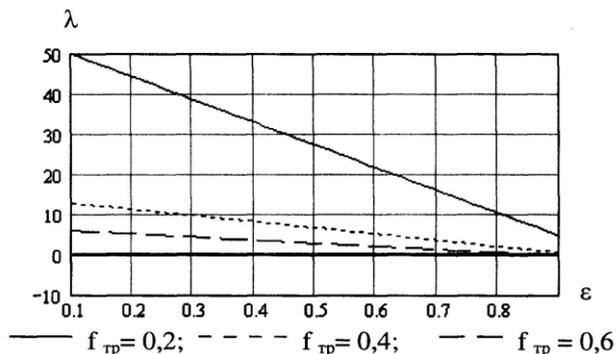


Рисунок 4. Графическая зависимость минимального радиуса вальца R от степени сжатия ε

Анализируя данную зависимость можно сказать, что чем меньше степень сжатия зерна, тем меньший радиус вальца можно применить.

На рисунке 5 показана графическая зависимость $f_{тр} = f(\varepsilon)$, рассчитанная по формуле (12) для различных значений λ .

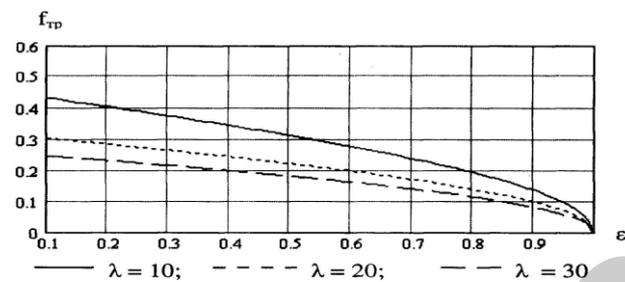


Рисунок 5. Графическая зависимость коэффициента трения $f_{тр}$ от степени сжатия ε

Из данной зависимости и формулы (12) следует, что чем меньше степень сжатия зерна, тем при меньшем коэффициенте трения происходит его заклинивание. В пределе при $\varepsilon \rightarrow 1$ (то есть $r \rightarrow \Delta_1$) коэффициент $f \rightarrow 0$, то есть при очень маленьком сжатии и близком равенстве поперечных размеров зерна расстоянию между вальцами Δ теоретически заклинивание будет происходить при бесконечно малом коэффициенте трения. Это вполне понятно, так как угол $\alpha \approx 0$, реакции N направлены почти горизонтально, а силы трения F почти вертикально, и в начальный момент соприкосновения зерна с вальцами сила тяжести зерна G вызывает значительные по величине силы N .

На рисунке 6 приведена номограмма для расчета необходимого диаметра вальца по формуле (12) и $\lambda = R/r$.

Задав коэффициент трения $f_{тр}$ (зерна о материал вальца) на рисунке 6а, поднимаемся по вертикали по стрелке до кривой, отвечающей требуемой степени сжатия (плющения) и определяем отношение λ . Затем на рисунке 6б находим соответствующее значение отношения λ и по горизонтали проводим стрелку по прямой, отвечающей соответствующему поперечному размеру r зерна и,

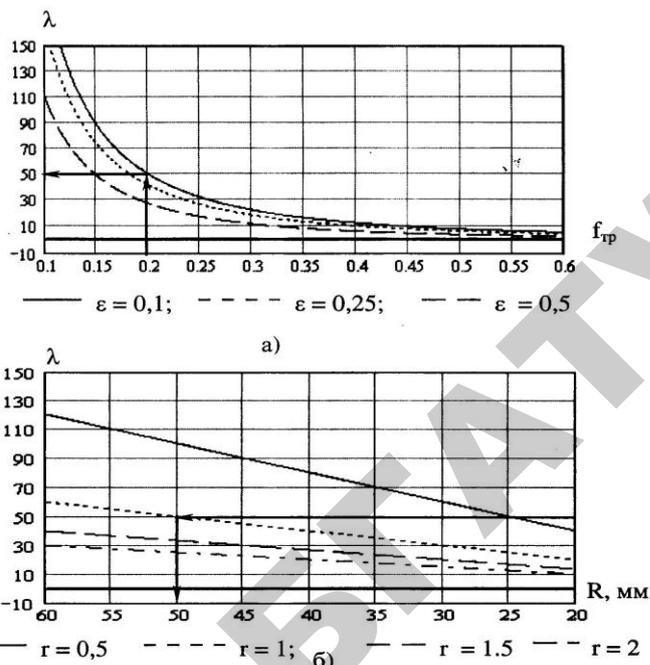


Рисунок 6. Номограмма для определения необходимого радиуса вальца R .

опускаясь по вертикали вниз, находим минимально необходимый радиус вальца.

При $f_{тр} \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 1$ необходимый радиус вальца $R \rightarrow 0$. Если предположить что в формуле (11) $\lambda = 0$, получим формулу связи $f_{тр}$ и ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + f_{тр}^2}}, \quad (13)$$

Из данной формулы вытекает, что при $f_{тр} = 0$ $\varepsilon = 1$. Если же коэффициент трения $f_{тр} \neq 0$, то $\varepsilon < 1$.

Заключение

В результате аналитических исследований установлено, что для поступления частицы материала на измельчение в вальцовый узел необходимо соблюсти условие: угол трения частицы по вальцам должен быть больше угла захвата вальцов.

Минимальный радиус вальцов определяется коэффициентом трения частицы о поверхность вальцов и радиусом частиц (размером частиц измельчаемого материала).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шило, И.Н. Современные технические средства для плющения зерна / И.Н. Шило, Н.А. Воробьев // Агропанорама, 2007. – № 4. – С. 4-7.
2. Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методика испытаний: ОСТ 70.19.2-83 СССР.
3. Байдов А.В.: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01. – Рязань, 2005. – 22 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 31.03.2015