

УДК (631.363)

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВАЛЬЦОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ЗЕРНОФУРАЖА**

**А.И. Пунько**, к.т.н., доц.

*Республиканское унитарное предприятие*

*«НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»*

*г. Минск, Республика Беларусь*

**Д.Ф. Кольга**, к.т.н., доц., **В.С. Сыманович**, к.т.н., доц.,

**Г.Г. Тычина**, к.т.н., доц., **Ю.Н. Гнедько**, соискатель

*Учреждение образования*

*«Белорусский государственный аграрный технический университет»*

*г. Минск, Республика Беларусь*

### **Введение**

Комбикорм является одним из важнейших и незаменимых компонентов в рационе всех сельскохозяйственных животных. Основным требованием к готовому продукту является определенный размер измельченных частиц компонентов комбикорма без пылевидной фракции (равномерность), а смесь должна быть однородной.

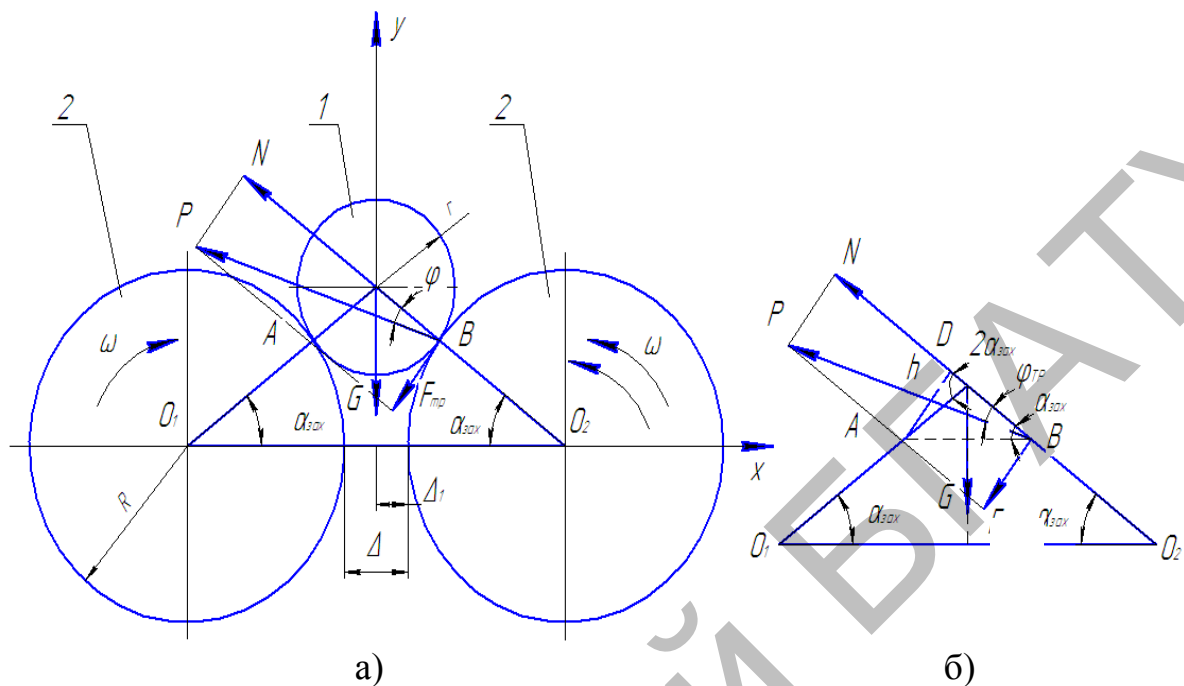
Традиционно для измельчения компонентов комбикорма используют молотковые дробилки. Полученный в результате измельчения на этих дробилках комбикорм обладает повышенным содержанием пылевидных частиц, что снижает переваримость питательных веществ. Замена дробления плющением существенно снижает их образование, но в процессе плющения зерно полностью не разрушается [1]. Для усовершенствования процесса приготовления качественного комбикорма разработаны двухступенчатые вальцовые измельчители зернофуража, содержащие одну или две пары вальцов, вращающихся навстречу друг другу с разной скоростью [2]. Степень измельчения компонентов комбикорма достигается путем изменения межвальцового зазора.

### **Основная часть**

Минимальный радиус вальцов определим из условия нормального функционирования вальцового измельчителя, которое выполняется при захвате вальцами частиц зернофуража.

На рисунке 1а и 1б представлены схемы 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.



1 – частица; 2 – валец  
а) общая схема; б) схема приложения сил

**Рисунок 1 – Схемы к определению условия захвата частицы вальцами**

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 (левым вальцом в точке  $A$  (схема 1б)). Тогда, исходя из рисунка 1б, получим:

$$\sum_i M_A(F_i) = -Nh + Grc \cos \alpha_{\text{зах}} + F_{\text{тр}}(r + r \cos 2\alpha_{\text{зах}}) = 0,$$

где  $r$  – радиус частицы, м;

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

$G$  – сила тяжести, Н;

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

Исходя из закона Кулона,  $F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N$ , 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  $F_{mp}$ , 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:

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

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

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

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

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

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  $F_{mp}$  замедлится, и оно будет определяться характером смятия (сжатия) частицы.

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

Из рисунка 2 следует:

$$F_{mp} R = M_{\partial в}, \quad (3)$$

где  $M_{\partial в}$  – момент, вращающий валец,  $Hm$ ;

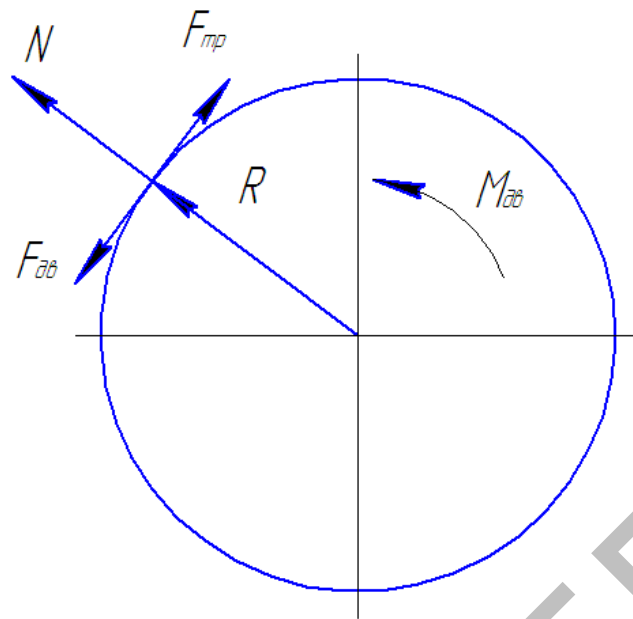
$R$  – радиус вальца,  $m$ .

Следовательно,

$$F_{mp} = \frac{M_{\partial в}}{R}. \quad (4)$$

Тогда реакция  $N$  определится как

$$N = \frac{F_{mp}}{f_{mp}} = \frac{M_{\partial в}}{f_{mp} R}. \quad (5)$$



**Рисунок 2 – Равновесное состояние вальца**

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 затягиваться в межвальцовое пространство. Действительно, умножив выражение  $f_{mp} = \operatorname{tg}\alpha_{зах}$  на  $N$ , получим:

$$Nf_{mp} = N \frac{\sin\alpha_{зах}}{\cos\alpha_{зах}}, \quad (6)$$

откуда, с учетом первой части выражения (5), получим выражение:

$$F_{mp} \cos\alpha_{зах} \geq N \sin\alpha_{зах}. \quad (7)$$

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

Из прямоугольного треугольника  $KDO_2$  (рисунок 1а) имеем:

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

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

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

Отсюда

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

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

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

Преобразуем данное выражение

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

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

Далее получаем уравнение:

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

Корни уравнения

$$\lambda = -\frac{(1+f_{mp}^2)\varepsilon-1}{f_{mp}^2} \pm \sqrt{\frac{[(1+f_{mp}^2)\varepsilon-1]^2}{f_{mp}^4} - \frac{(1+f_{mp}^2)\varepsilon^2-1^2}{f_{mp}^2}},$$

(знак «-» опускаем как нереальный).

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

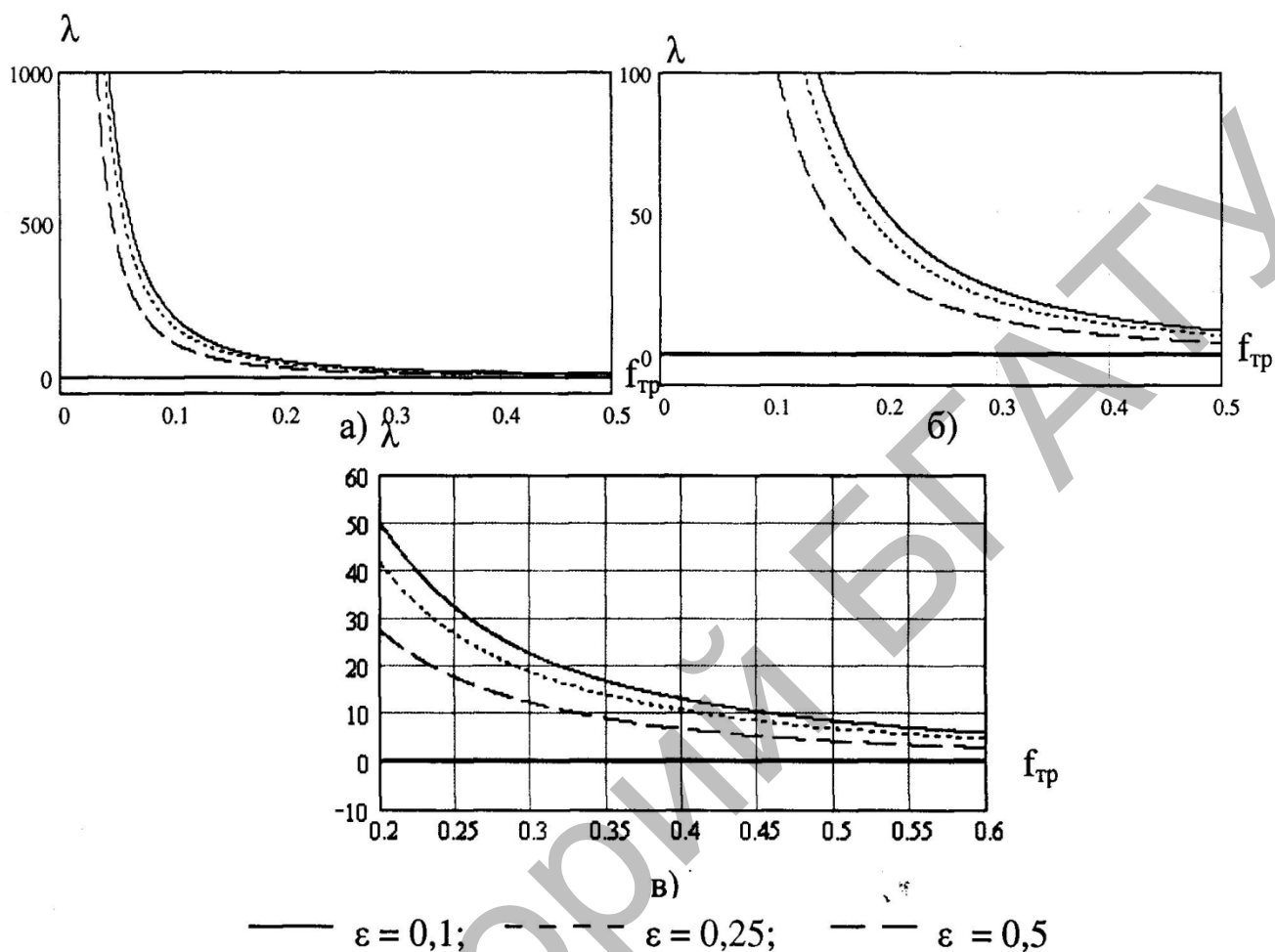
$$\lambda = \beta \left[ (1-\varepsilon) \frac{1+\sqrt{1+f_{mp}^2}}{f_{mp}^2} - \varepsilon \right]. \quad (11)$$

На рисунке 3 иллюстративно показан характер изменения зависимостей  $\lambda = f(f_{mp})$ , представляющих собой гиперболы. Данные теоретические зависимости  $\lambda$  от коэффициента трения  $f_{mp}$  для различного  $\varepsilon$ , имеющего значения 0,1; 0,25 и 0,5, рассчитаны по формуле (11).

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

Из рисунка 3а видно, что изменение радиуса вальца весьма чувствительно к изменению коэффициента трения при малых его значениях:

$R$  быстро возрастает при уменьшении  $f_{mp}$ . При больших значениях  $f_{mp}$  чувствительность быстро уменьшается.



**Рисунок 3 – Зависимость изменения минимального радиуса  $R$  вальцов от коэффициента трения  $f_{mp}$**

Определим скорость изменения  $\lambda$  в зависимости от коэффициента трения  $f_{mp}$ .

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

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

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

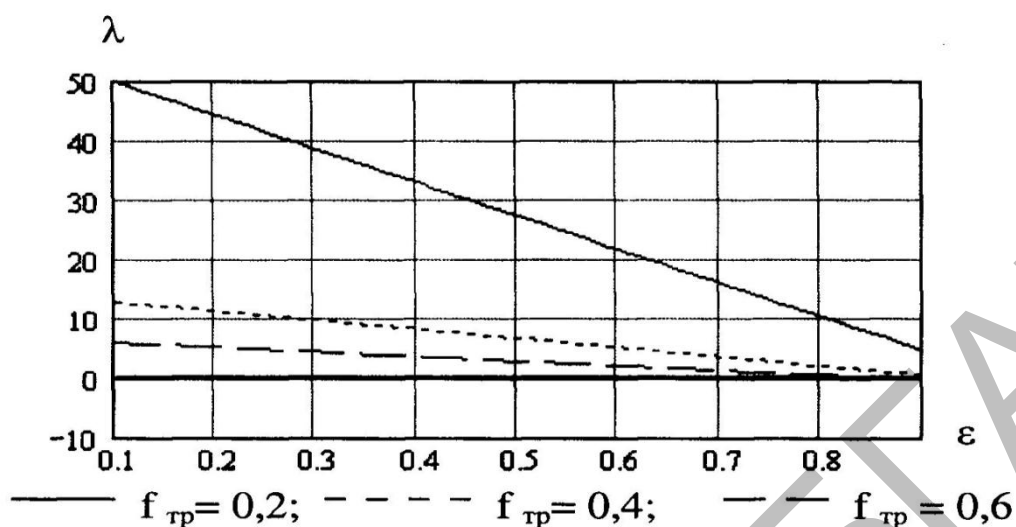


Рисунок 4 – Графическая зависимость минимального радиуса вальца  $R$  от степени сжатия  $\varepsilon$

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  $\lambda$ .

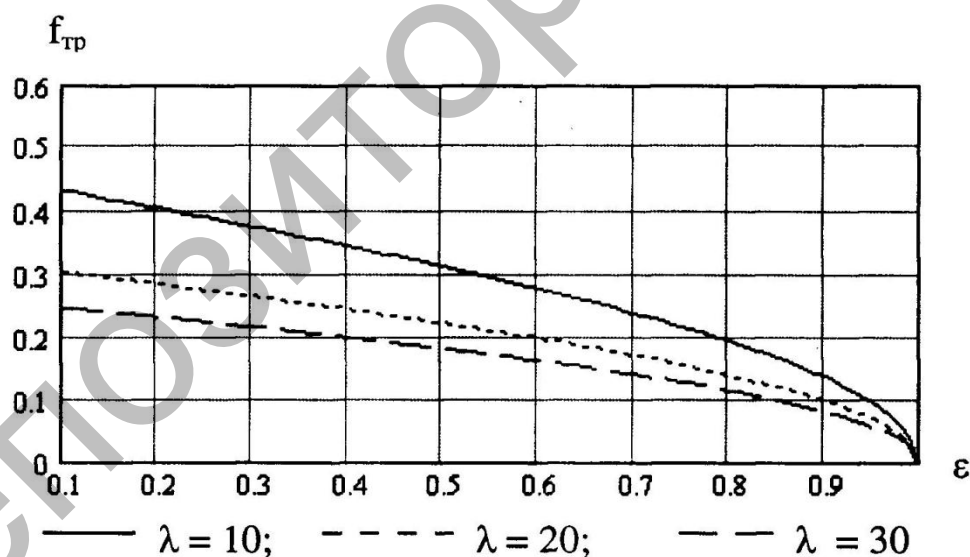


Рисунок 5 – Графическая зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  от степени сжатия  $\varepsilon$

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  $\Delta$  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  $N$ .

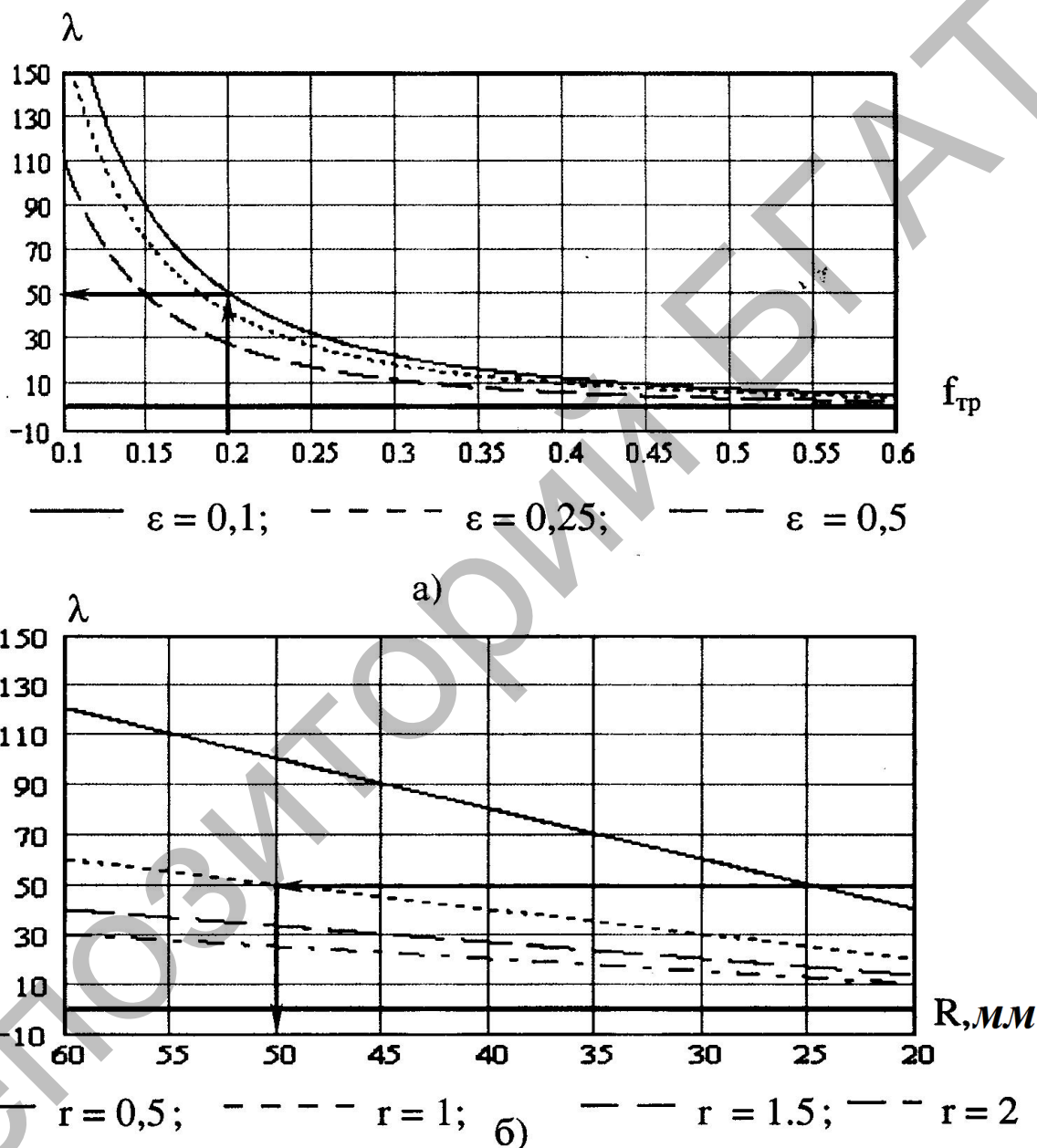


Рисунок 6 – Номограмма для определения необходимого радиуса вальца  $R$

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



Зная коэффициент трения  $f_{mp}$  зерна о материал вальца, на рисунке *ба* поднимаемся вертикально по стрелке до кривой, отвечающей требуемой степени сжатия (плющения), и определяем отношение  $\lambda$ . Затем на рисунке *бб* находим соответствующее значение  $\lambda$  и по горизонтали проводим стрелку по прямой, отвечающей соответствующему поперечному размеру  $r$  зерна, и, опускаясь по вертикали вниз, находим минимально необходимый радиус вальца.

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

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

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

### Заключение

В результате аналитических исследований установлено:

1. Для поступления частицы материала на измельчение в вальцовый узел необходимо соблюсти условие – угол трения частицы по вальцам должен быть больше угла захвата вальцов.
2. Минимальный радиус вальцов определяется коэффициентом трения частицы о поверхность вальцов и радиусом частиц (размером частиц измельчаемого материала).

### Литература

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. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 114 с.
3. Байдов, А.В. Технология и агрегат для приготовления комбикорма из плющеного фуражного зерна: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Байдов; Рязан. гос. с.-х. акад. им. П.А. Костычева. – Рязань, 2005. – 22 с.