

УДК 631.363.2

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАЛЬЦОВОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО МОЛОТКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ СПОСОБЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА

С.А. Дрозд,

ст. преподаватель каф. стандартизации и метрологии БГАТУ

*В статье предлагается способ измельчения зерна, при котором зерно измельчается в две стадии. На первой стадии осуществляется деформация зерна со сдвигом путем вращения вальцов с разными окружными скоростями, исключая компрессионное сжатие зерна. На второй – подача зерна производится ускорителем, измельчение осуществляется молотковым измельчителем с вертикальной осью вращения. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструктивных и технологических параметров устройства для осуществления предложенного способа двухстадийного измельчения зерна.*

*Ключевые слова: способ измельчения зерна, двухстадийное измельчение, вальцовый измельчитель, молотковый измельчитель.*

*A method for grinding grain in which the grain is crushed in two stages is presented in the article. In the first stage the deformation of the grain with a shift is carried out by rotating the rollers at different circumferential speeds, excluding compression of the grain. In the second stage the grain is fed by an accelerator, grinding is carried out by a hammer grinder with a vertical axis of rotation. The results of theoretical and experimental studies on the substantiation of the design and technological parameters of the device for the implementation of the proposed method of two-stage grain grinding are presented.*

*Key words: grain grinding method, two-stage grinding, roller grinder, hammer grinder.*

### Введение

Основу полнорационного корма животных составляют концентрированные корма, основной частью которых является зерно. На протяжении последних лет в Республике Беларусь ежегодно собирается около 8,0 млн тонн зерна, половина из них идет на кормовые цели, в том числе для производства комбикормов [1].

Важнейшей технологической операцией производства комбикорма является измельчение зерна, которое необходимо для обеспечения усвояемости питательных веществ животными [2]. При этом для каждого вида и возрастной группы необходима определенная степень измельчения с соответствующей определяющей фракцией, характеризующая показателем качества измельчения. За счет повышения показателя качества измельчения зерна можно уменьшить количество корма, затраченного на получение килограмма привеса животного, что обеспечивает снижение себестоимости мясомолочной продукции [3].

Для производства комбикормов зерно измельчается при влажности 12-13 %, преимущественно молотковыми измельчителями, с удельными энергозатратами 8-25 кВт·ч/т, зависящими от степени измельчения и их конструкции. При этом измельченное ими зерно характеризуется невысокими показателями качества измельчения [4]. Известны вальцовые машины для

измельчения зерна (преимущественно плющилки зерна повышенной влажности), характеризующиеся относительно низкими удельными энергозатратами 3-11 кВт·ч/т, но и невысокими показателями качества измельчения [4, 5]. Существуют также машины, применяемые в мукомольной промышленности, способные обеспечить требуемый показатель качества измельчения, но обладающие очень большими габаритами, высокой металлоемкостью и стоимостью [4].

Для совершенствования процесса измельчения зерна предложен способ, при котором зерно измельчают в две стадии. На первой стадии осуществляют деформацию зерна со сдвигом, вращая вальцы с разными окружными скоростями, исключая компрессионное сжатие зерна, а на второй – осуществляют измельчение зерен, подавая их ускорителем на ротор молоткового измельчителя с вертикальной осью вращения [6].

Комбинация двух измельчителей позволяет подбирать оптимальные режимы работы каждой из стадий, обеспечивая наименьшие удельные энергозатраты и требуемый фракционный состав. Данный способ можно применить как при разработке и создании нового оборудования для измельчения зерна, так и при использовании вальцовых и молотковых измельчителей из существующего парка машин Республики Беларусь.

Цель настоящей работы – улучшение качества измельчения зерна на кормовые цели и снижение удельных энергозатрат путем обоснования парамет-

ров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя.

**Основная часть**

На первой стадии двухстадийного измельчения осуществляется предварительное воздействие на зерно вальцами, что способствует нарушению целостности зерна и образованию в нем микротрещин, тем самым снижается прочность зерна. При этом деформация зерна осуществляется со сдвигом и до величины, исключающей компрессионное сжатие.

Величина межвальцового зазора определяет степень измельчения и удельные энергозатраты процесса, при этом работа вальцовых машин с малым межвальцовым зазором сопряжена с высокими удельными энергозатратами [5]. Одна из причин данного явления – возникновение компрессионного сжатия зерна, то есть сжатие без возможности бокового расширения, приводящее к уплотнению зерна без его разрушения. Следовательно, для снижения удельных энергозатрат процесса измельчения на первой стадии, необходимо исключить компрессионное сжатие вальцами.

Величину межвальцового зазора (м), исключающего компрессионное сжатие на первой стадии измельчения, определим по зависимости:

$$b_{max} = d_n - \frac{h(l-p)}{l} - d_n \cdot \varepsilon_{max} = d_n - \frac{h(l-p)}{l} - d_n \cdot \left( 1 - \pi l_3 d_n^2 \cdot \left[ 6i \left( l_3 d_n \cdot (d_n + 2R_B - 2\sqrt{R_B^2 - \frac{d_n^2}{4}}) - R_B^2 l_3 2 \arccos \left( \frac{\sqrt{4R_B^2 - l_3^2}}{2R_B} \right) + R_B^2 l_3 \sin \left( \arccos \left( \frac{\sqrt{4R_B^2 - l_3^2}}{2R_B} \right) \right) + \frac{h(l-p)l_3 d_n}{l} \right) \right]^{-1} \right). \quad (1)$$

- где  $d_n$  – начальный размер зерна, м;
- $l_3$  – длина зерна, м;
- $R_B$  – радиус вальцов, м;
- $l$  – шаг рифли вальцов, м;
- $p$  – ширина полки рифлей, м;
- $h$  – высота рифлей, м;
- $i$  – соотношение скоростей вальцов;
- $b$  – межвальцовый зазор, м;
- $\varepsilon_{max}$  – предельная степень деформации зерна.

Разрушение зерна на первой стадии измельчения следует осуществлять со сдвигом, который обеспечивается различной частотой вращения вальцов. В результате уменьшается сила сжатия, необходимая для снижения прочности зерна и образования в нем микротрещин. При этом зерно не должно разделяться на части, так как на второй стадии большие частицы легче попадают под удар молотков, и, обладая большей массой, интенсивнее разрушаются.

Соотношение скоростей вальцов, исключающее разделение зерна на части при первой стадии измельчения, определим по формуле:

$$i = \frac{d_n}{R_B \arccos \left( 1 - \frac{(d_n - b)}{2R_B} \right)} + 1. \quad (2)$$

Скорость деформации зерна на первой стадии измельчения (м/с) определяем по зависимости:

$$v_{деф} = v_{в.т} \cdot \left[ \left( d_n - b - \frac{h(l-p)}{l} \right)^2 + \left( R_B \times \arccos \left( 1 - \frac{(d_n - b)}{2R_B} \right) \cdot i - R_B \cdot \arccos \left( 1 - \frac{(d_n - b)}{2R_B} \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ R_B \cdot \arccos \left( 1 - \frac{(d_n - b)}{2R_B} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $v_{в.т}$  – окружная скорость тихоходного вальца, м/с.

Для расчета по формулам (1-2) были приняты следующие параметры зерна: пшеницы  $d_n=0,0027$  м и  $l_3=0,0064$  м; ржи  $d_n=0,0024$  м и  $l_3=0,0075$  м; тритикале  $d_n=0,0026$  м и  $l_3=0,0075$  м; ячменя  $d_n=0,003$  м и  $l_3=0,0108$  м; овса  $d_n=0,0026$  м и  $l_3=0,0123$  м; значения диаметра вальцов  $R_B = 0,145$  м; шага рифлей  $l=0,00185$  м; ширины полки рифли  $p=0,00025$  м; высоты рифли  $h=0,00055$  м; окружной скорости тихоходного вальца – 10 м/с; межвальцового зазора в диапазоне от 0 до 0,002 м; соотношения скоростей вальцов в диапазоне от 1 до 1,25. В результате были построены графики зависимости межвальцового зазора и скорости деформации зерна от соотношения скоростей для различных злаковых культур (рис. 1). Их анализ позволил определить теоретические значения следующих параметров:

1) межвальцовый зазор на первой стадии измельчения, при котором исключается компрессионное сжатие зерна: 0,57 мм для пшеницы; 0,45 мм для ржи; 0,52 мм для тритикале; 0,69 мм для ячменя; 0,50 мм для овса;

2) соотношение скоростей вальцов на первой стадии измельчения: 1,154 для пшеницы; 1,143 для ржи; 1,149 для тритикале; 1,163 для ячменя; 1,148 для овса.

При использовании данных параметров межвальцового зазора и соотношения скоростей вальцов, используется зависимость (3). Установлено, что скорость деформации зерна вальцами находится в диапазоне 1,7-1,8 м/с.

На второй стадии предварительно разрушенное зерно измельчается молотковым ротором с вертикальной осью вращения за счет ударов молотков и зерна о деку или решето. Это позволяет применить к процессу разрушения зерна теорию удара.

Согласно теореме об изменении количества движения точки при ударе, изменение количества движения зерна за время удара будет равно сумме действующих на зерно ударных импульсов [7]:

$$m_3(v_c - v_0) = \sum S_{уд}, \quad (4)$$

где  $m_3$  – масса зерна, кг;

$v_c, v_0$  – соответственно скорость зерна в начале и после удара о молоток, м/с;

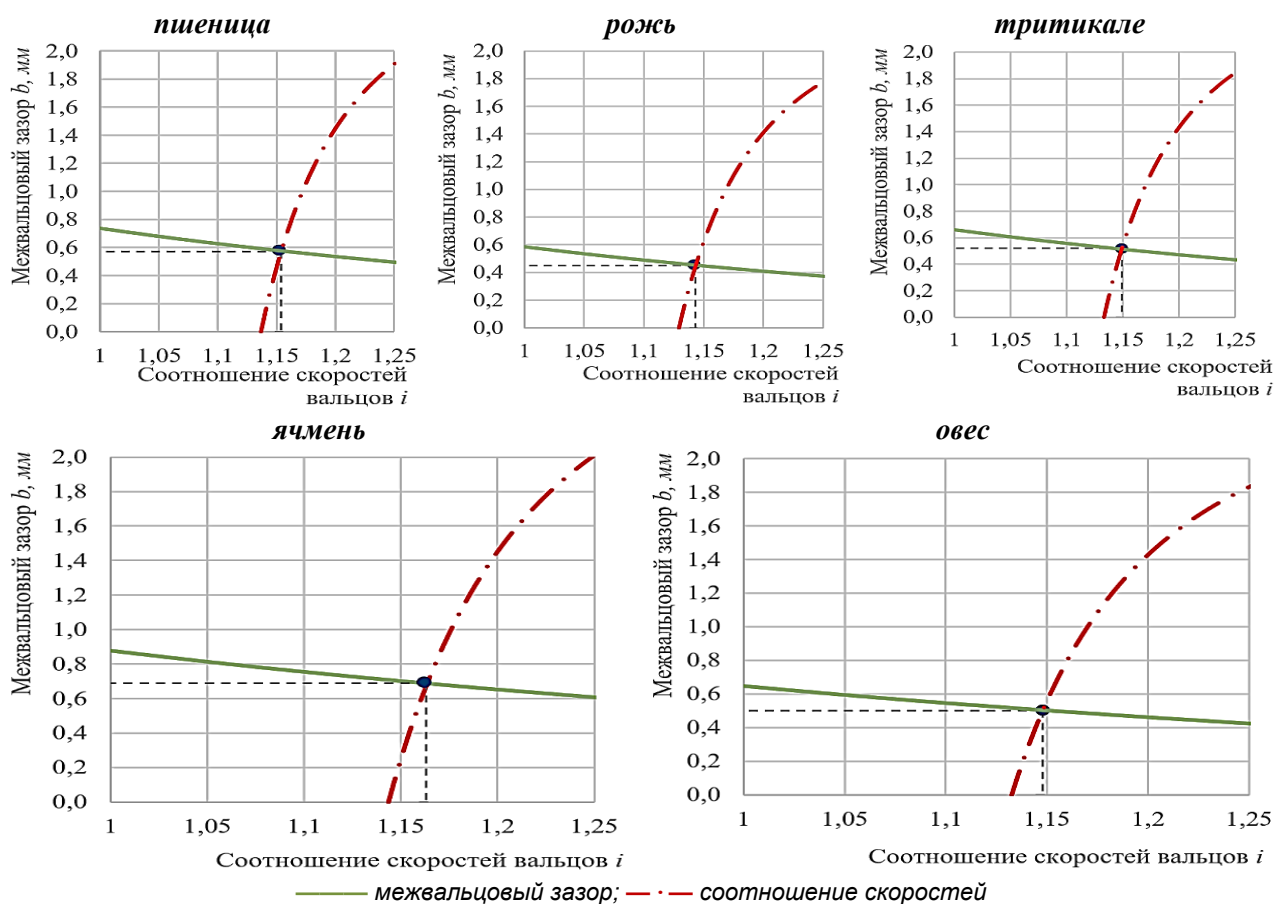


Рисунок 1. Графические зависимости межвальцового зазора и скорости деформации зерна от соотношения скоростей при измельчении различных злаковых культур

Из зависимости (4) видно, что основным фактором при разрушении зерна является скорость зерна после удара молотка, значение которой принимается равной окружной скорости молотков  $v_m$ .

Для обоснования окружной скорости молотков, были проведены экспериментальные исследования по изучению зависимости степени деформации зерна на второй стадии измельчения от окружной скорости молотков при различной степени деформации на первой стадии измельчения. Деформация на первой стадии создавалась сжатием зерна пластинами с нанесенными на них рифлями, аналогичными применяемым на вальцах. Затем на предварительно деформированное зерно, с различной скоростью сбрасывался груз, создавая тем самым, количество кинетической энергии, получаемой при ударе молотком по зерну на второй стадии. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей (рис. 2).

Для анализа зависимости, представленной на рисунке 2, зададим степень деформации на второй стадии, равную 81 % (большая степень деформации не применяется для измельчения зерна на кормовые цели [8]) и степень деформации первой стадии – 60 % (значение, полученное по зависимости (1) в соответствии с приведенными выше рекомендуемыми теоретическими значениями межвальцового зазора). В ре-

зультате получим значение окружной скорости молотков  $v_m = 70$  м/с.

Значение ударного импульса, проявляющегося при ударе молотка о зерно, зависит не только от массы зерна, скоростей зерна и молотка до удара, но и от их упругих свойств. При ударе они характеризуются коэффициентом восстановления.

В результате была выдвинута гипотеза, что с увеличением степени деформации на первой стадии, будет пропорциональное снижение коэффициента восстановления. При степени деформации 0 (0 % измельчения – целое зерно) значение коэффициента восстановления будет соответствовать значениям для целого зерна (при влажности 13 % коэффициент восстановления целого зерна составляет: для пшеницы – 0,50; для ржи – 0,47; для тритикале – 0,49; для ячменя – 0,53; для овса – 0,43) [9]. При степени деформации 1 (100 % деформация – полностью измельченное зерно) коэффициент восстановления будет равен нулю.

Получена формула для определения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии:

$$k_\varepsilon = k - k \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где  $k_\varepsilon$  – коэффициент восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии;

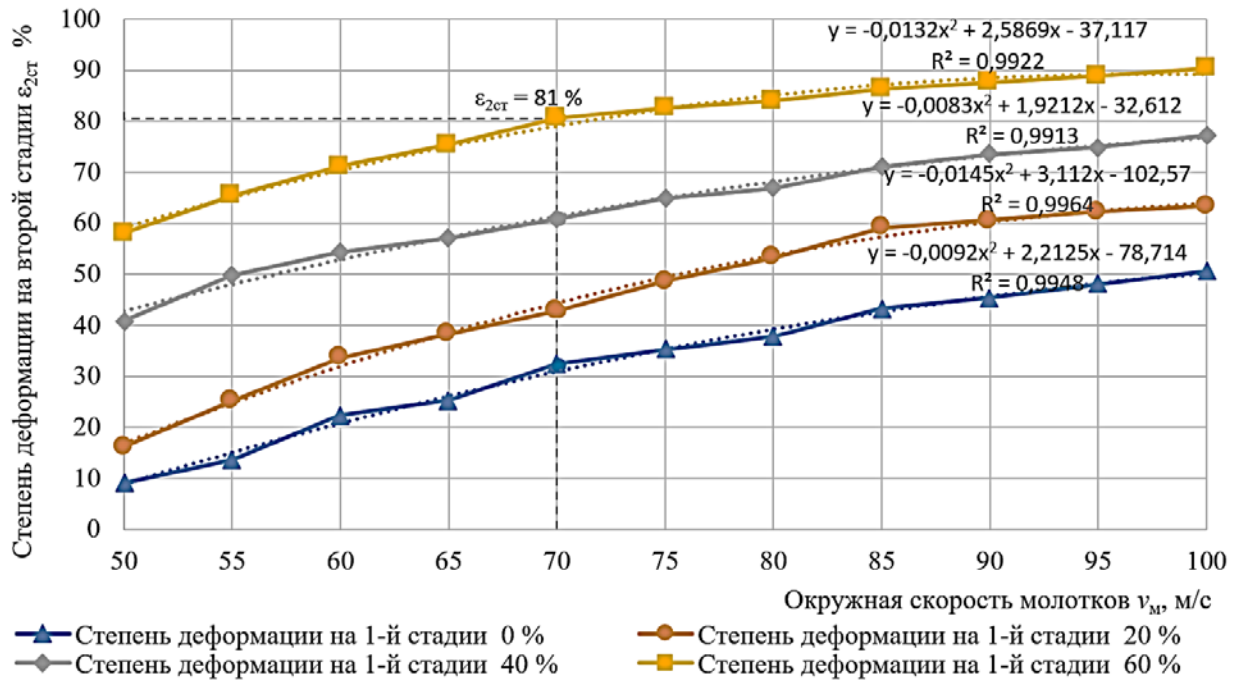


Рисунок 2. Зависимости степени деформации зерна на второй стадии измельчения от окружной скорости молотков при различной степени деформации на первой стадии измельчения

$k$  – коэффициент восстановления целого зерна;  
 $\epsilon$  – степень деформации зерна на первой стадии измельчения (находится в диапазоне от 0 до 1).

Для экспериментальной проверки формулы (5) проведен эксперимент по определению зависимости коэффициента восстановления зерна от степени его деформации (рис. 3). В качестве образца был выбран ячмень с влажностью 13 %.

Из рисунка 3 видно, что экспериментальные значения коррелируются с теоретическими (значение коэффициента корреляции составляет  $r = 0,99$ ), подтверждая тем самым зависимость (5).

Подставив в зависимость (5) значения степени деформации на первой стадии ( $\epsilon = 0,6163$  для пшеницы;  $\epsilon = 0,6183$  для ржи;  $\epsilon = 0,6133$  для тритикале;  $\epsilon = 0,6114$  для ячменя;  $\epsilon = 0,6174$  для овса), рассчитанные с использованием зависимости (1), получим значение коэффициента восстановления зерна после предварительного измельчения на первой стадии: для пшеницы  $k_\epsilon = 0,19$  мм; для ржи  $k_\epsilon = 0,18$  мм; для тритикале  $k_\epsilon = 0,19$  мм; для ячменя  $k_\epsilon = 0,21$  мм; для овса  $k_\epsilon = 0,16$  мм.

Процесс разрушения зерна опишем, используя теорему об изменении кинетической энергии системы. В результате получим ряд аналитических зависимостей:

1. Зависимость для определения энергии, затраченной на пластическую деформацию зерна в результате удара молотка о зерно (Дж):

$$U_{\text{деф}} = \frac{m_3 v_c^2}{2} - \frac{m_3 (k_\epsilon v_c)^2}{2} \quad (6)$$

2. Зависимость для определения скорости зерна после частичного восстановления его первоначальной формы и отрыва от молотка:

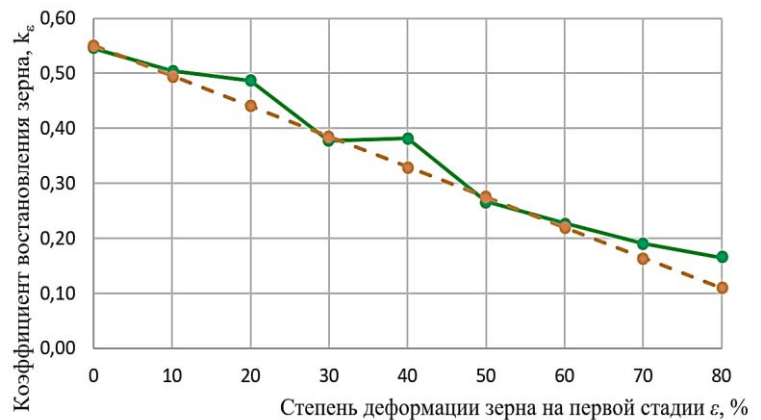


Рисунок 3. Зависимость коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии измельчения  $k_\epsilon$  от степени деформации первой стадии  $\epsilon$

$$v_{зр} = v_c + k_\epsilon v_c = v_c + (k - k \cdot \epsilon) v_c \quad (7)$$

3. Зависимость для определения энергии, образовавшейся вследствие удара зерна о решето и идущей на его деформацию (Дж):

$$U_{\text{реш_зр}} = \frac{m_3 ((1 - k_\epsilon) v_{зр} \cos \alpha_{зр})^2}{2} \quad (8)$$

где  $\alpha_{зр}$  – угол падения зерна на решето, рад.

Из зависимостей (6-8) видно, что снижение коэффициента восстановления зерна вследствие пред-

варительного измельчения на первой стадии, позволяет увеличить количество энергии, идущее на деформацию, и повысить интенсивность измельчения на второй стадии.

Для подтверждения эффективности предложенного способа измельчения и оптимизации технологических параметров оборудования, был проведен эксперимент по определению влияния межвальцового зазора первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке второй стадии измельчения на производительность  $Q$  (т/ч); удельные энергозатраты  $q$  (кВт·ч/т); степень измельчения  $\lambda_{изм}$ ; средневзвешенный размер частиц  $L_s$  (мм); однородность измельченного продукта (коэффициент вариации)  $V$  (%); показатель качества измельченного зерна  $K$ .

Уровни и значения факторов приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Значение факторов  $X_1$  и  $X_2$  в кодированном и натуральном виде**

Факторы	Обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Межвальцовый зазор, мм	$X_1$	1,0	0,5	1,5	2,5
Диаметр отверстий в решетке, мм	$X_2$	1,5	3	4,5	6

Обработка экспериментальных данных позволила получить адекватные регрессионные модели, описывающие влияние межвальцового зазора первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке второй стадии измельчения на:

производительность –  $y_1 = 0,56 - 0,16X_1 + 0,06X_2 - 0,02X_1X_2 - 0,09X_1^2$ ;

удельные энергозатраты –  $y_2 = 5,99 + 0,45X_1 - 1,57X_2 - 0,40X_1X_2 + 1,10X_1^2 + 0,37X_2^2$ ;

степень измельчения –  $y_3 = 2,17 - 0,25X_1 - 0,28X_2$ ;

средневзвешенный размер частиц –  $y_4 = 1,53 + 0,17X_1 + 0,21X_2 + 0,05X_1X_2 + 0,05X_2^2$ ;

однородность измельченного продукта –  $y_5 = 5,84 - 1,09X_1 - 1,39X_2$ .

Из функциональных показателей наиболее важным является показатель качества измельченного зерна, который определяется согласно ТКП 273-2010 по формуле:

$$K = \frac{\sum G_i}{G_0} 10^2, \quad (9)$$

где  $\sum G_i$  – масса фракции требуемого размера, г;  
 $G_0$  – общая масса пробы, г.

Требуемая фракция определяется видом животного и его возрастной группой. Анализ требований к качеству измельчения для приготовления комбикормов показал, что размер требуемой фракции измельченного зерна для различных видов животных составляет:

– для свиней – 0-2 мм (СТБ 2111-2010) и 0-3 мм (ГОСТ 13299-71; 9267-68; 16955-2015; 21055-2019);

– для КРС – 0-2 мм при откорме в животноводческих комплексах и 0-3 мм при откорме в хозяйствах (СТБ 1842-2008, ГОСТ 18221-2018);

– для перепелов, молодой сельскохозяйственной птицы, включая цыплят бройлеров – 0-3 мм (СТБ 1842-2008);

– для взрослой сельскохозяйственной птицы – 3,0-5,0 мм (СТБ 1842-2008).

На основании ряда исследований [10, 11] установлено, что для повышения усвояемости корма, определяющую фракцию необходимо скорректировать: для свиней она должна составлять 0,1-2,0 мм; для КРС 1,0-3,0 мм; для молодняка птицы 1,0-3,0 мм. При расчете показателя качества зададим четыре варианта требуемой фракции. Это позволит получить уравнения, позволяющие учесть рекомендации по кормлению различных видов животных.

По экспериментальным данным получили адекватные регрессионные модели, описывающие влияние межвальцового зазора первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке второй стадии измельчения на показатели качества для различных видов животных (табл. 2).

Применение полученных уравне-

**Таблица 2. Уравнения регрессии, позволяющие определить показатель качества двухстадийного измельчения зерна**

Требуемая фракция	Уравнение регрессии
0 – 2,0 мм	$y_6 = 81,70 - 3,04X_1 - 3,66X_2 + 9,19X_1^2$
0 – 3,0 мм	$y_7 = 99,50 - 0,30X_2 + 0,32X_1^2$
0,1 – 2,0 мм	$y_8 = 77,68 - 9,54X_1 - 11,83X_2 - 2,60X_1X_2 + 3,06X_1^2 - 2,72X_2^2$
1,0 – 3,0 мм	$y_9 = 80,92 + 2,70X_1 + 2,78X_2 - 3,00X_1X_2 - 2,62X_1^2$

ний позволяет проводить многокритериальную оптимизацию двухстадийного измельчения зерна. Для этого следует воспользоваться методом математического программирования, заключающегося в решении задачи минимизации целевой функции при заданном ограничении. Расчет можно проводить при помощи компьютерной программы MS Excel, применяя встроенную надстройку «Поиск решения» [12].

Например, зададим в качестве целевой функции снижение удельных энергозатрат, а ограничивающей функции – показатель качества не менее 95%, при размере требуемой фракции 0-2 мм. Тем самым будет обеспечено производство корма для свиней в соответствии с СТБ 2111-2010 и КРС при откорме в животноводческих комплексах в соответствии с ГОСТ 18221-2018:

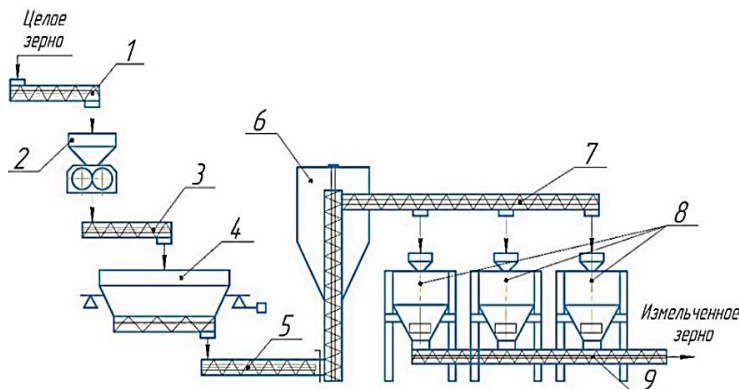
$$\begin{cases} y_2(q) \rightarrow \min \\ y_6(K_{0-2\text{мм}}) \geq 95 \% \\ -1 \leq x_i \leq +1 \end{cases} \quad (10)$$

В результате решения получим, что для обеспечения содержания не менее 95 % размера требуемой фракции в диапазоне 0-2,0 мм необходимо установить валцы на первой стадии измельчения с зазором  $b = 0,50$  мм, а диаметр отверстия в решетке на второй стадии измельчения –  $d=4,01$ мм. При этом удельные энергозатраты процесса измельчения составят  $q = 7,10$  кВт ч/т.

Для получения размера требуемой фракции 0-3 мм ( $y_7$ ) при ее содержании 95 %, обеспечивая производство корма для свиней в соответствии с ГОСТ 13299-71; 9267-68; 16955-2015; 21055-2019, КРС при откорме в хозяйствах в соответствии с СТБ 1842-2008, ГОСТ 18221-2018 и молодой сельскохозяйственной птицы, включая цыплят бройлеров в соответствии с СТБ 1842-2008, необходимо установить межвальцовый зазор на первой стадии измельчения  $b = 1,50$  мм, а диаметр отверстия в решетке на второй стадии измельчения в размере  $d=6,00$ мм. При этом удельные энергозатраты процесса измельчения составят  $q = 4,79$  кВт ч/т.

Применяя полученные уравнения, можно задать требуемое качество для различных видов животных. При этом для целевой функции можно использовать различные показатели: удельные энергозатраты, производительность, однородность измельчения.

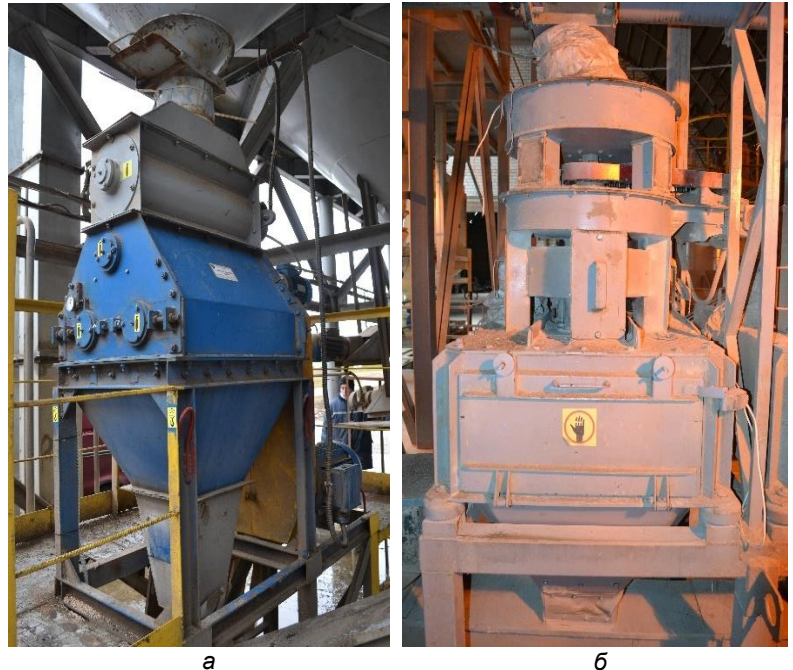
В результате исследований была обоснована технологическая схема двухстадийного измельчения зерна (рис. 4).



**Рисунок 4. Технологическая схема двухстадийного измельчения зерна, внедренная в МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи»:**  
1 – конвейер, подающий зерно; 2 – вальцовый измельчитель ДВ-3; 3 – конвейер разгрузки вальцового измельчителя ДВ -3; 4 – бункер весовой; 5 – конвейер разгрузки бункера весового; 6 – накопительный бункер; 7 – распределительный конвейер; 8 – молотковые измельчители ДЗВ-5; 9 – выгрузной конвейер

Опытный образец оборудования для двухстадийного измельчения зерна был установлен в комби-

кормовом цеху Минского районного унитарного предприятия «Агрокомбинат «Ждановичи» (рис. 5).



**Рисунок 5. Производственная проверка технологии и оборудования для двухстадийного измельчения зерна: а – вальцовый измельчитель ДВ-3 (первая стадия измельчения); б – молотковый измельчитель ДЗВ-5 (вторая стадия измельчения)**

В результате сопоставления функциональных показателей работы одностадийного молоткового и двухстадийного измельчения зерна (удельных энергозатрат и показателя качества измельчения в соответствии с ТКП 273-2010) по результатам производственной проверки было отмечено снижение удельных энергозатрат на 44,7 % (с 10,5 до 5,8 кВт·ч/т). При этом количество требуемой фракции 0,1-2,0 мм, выражаемое через показатель качества измельчения, в измельченном зерне повысилось с 71,2 % до 81,9%.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии двухстадийного измельчения зерна составил более 10,5 тыс. рублей, срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 1,34 года, удельный экономический эффект – 0,52 рублей на тонну переработанного зерна.

### **Заключение**

Предложен способ двухстадийного измельчения зерна, включающий предварительное разрушение за счет воздействия на зерно валцов и окончательное измельчение молотковым ротором с вертикальной осью вращения.

Получены аналитические зависимости для определения значения межвальцового зазора, соотношения скоростей и скорости деформации зерна, учитывающие размер зерна, радиус, окружную скорость и профиль рифленой поверхности валцов, исключаяющие компрессионное сжатие зерна.

Получены экспериментальные зависимости степени деформации зерна на второй стадии измельчения от окружной скорости молотков при различной степени деформации на первой стадии измельчения. Определено значение окружной скорости молотков  $v_m = 70$  м/с.

Установлено, что увеличение степени деформации на первой стадии приводит к пропорциональному снижению коэффициента восстановления. Снижение коэффициента восстановления зерна вследствие предварительного измельчения на первой стадии позволяет увеличить количество энергии, идущее на деформацию зерна, повышая интенсивность измельчения на второй стадии.

Установлены регрессионные модели, позволяющие установить зависимости технологических, функциональных и энергетических показателей двухстадийного измельчения зерна от межвальцового зазора на первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке на второй стадии, а также рациональные значения технологических параметров, обеспечивающих повышение показателя качества измельчения зерна со снижением удельных энергозатрат.

Результаты производственной проверки показали, что использование оборудования двухстадийного измельчения зерна в технологии подготовки комбикормов позволило снизить удельные энергозатраты на 44,7 % и увеличить показатель качества измельчения зерна на 10,7 %.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сборник / И.В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2021 – 179 с.

2. Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных / В.А. Афанасьев [и др.]. – Воронеж: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт». – 2007. – 389 с.

3. Терешко, А. Уменьшаем издержки. Концепция прибыльного производства свинины / А. Терешко //

Белорусское сельское хозяйство. – 2018. – № 11 (199). – 108 с.

4. Демский, А.Б. Оборудование для производства муки, крупы и комбикормов: справочник / А.Б. Демский, В.Ф. Веденев. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 760 с.

5. Баранов, Л.Н. Повышение эффективности производства плющеного зерна путем совершенствования технологий и комплекса технических средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Л.Н. Баранов. – СПб.: Павловск, 2005. – 167 с.

6. Устройство для одновременного измельчения нескольких видов зерна и способ одновременного измельчения нескольких видов зерна: пат. № 23315 Респ. Беларусь, МПК В 02 С 4/06 / И.Н. Шило, Н.А. Воробьев, С.А. Дрозд; заяв. Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u20190073; заявл. 15.03.2019.; опубл. 28.02.2021 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2021.

7. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. пособ. для вузов / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.

8. Воробьев, Н.А. Анализ зоотехнических требований к качеству измельчения зерна на кормовые цели / Н.А. Воробьев, С.А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 267-268.

9. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия): учебник / Л.А. Глебов [и др.]; под ред. Л.А. Глебова, А.Б. Демского. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 816 с.

10. Vukmirović, D. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition – A review / D. Vukmirović, R. Čolović, S. Rakita, T. Brlek, O. Đuragića, D. Solà-Oriol // Animal Feed Science and Technology. – Vol. 233. – November, 2017. – P. 133-144.

11. Parsons, A.S. Effect of corn particle size and pellet texture on broiler performance in the growing phase / A.S.Parsons, N.P. Buchanan, K.P. Blemings, M.E. Wilson, J.S. Moritz // Journal of Applied Poultry Research – Vol. 15. – July, 2006. – P. 245-255.

12. Сухарев, А.Г. Курс методов оптимизации: учеб. пособие / А.Г. Сухарев, А.В. Тимохов, В.В. Федоров. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 368 с.

ПОСИТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 14.03.2022