

УДК 631.363

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДРОБИЛКИ С ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКОЙ МАТЕРИАЛА

¹ П.А. САВИНЫХ, ² В.Н. НЕЧАЕВ, ² С.Ю. БУЛАТОВ, ³ Б.Г. НАЗАР

¹ ФГБНУ «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Россия

² ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический
университет», г. Княгинино, Россия

³ Государственный Аграрный Университет Молдовы

Abstract. The article includes test results regarding the operation of a hammer crusher with pneumatic material handling. The main purpose of this article is to justify the possibility to reduce power inputs of the working process by optimizing design and technological parameters of the crusher, which ensures the production of a final output that meets zootechnical requirements for all the groups of farm animals. Investigations were carried out on barley grains of the Elf variety with an equivalent diameter of 4.21 mm and humidity of 13-14 %. There was implemented the Box-Behnkin design for three factors in order to describe their influence on optimization criteria from the mathematical point of view. The factors included rotational speed of the rotor-fan, the radius of blade curvature and the diameter of sieve openings. Optimization criteria included power inputs per unit, the grinding degree, the average size of grinded particles, the amount of whole grains, the dust fraction content and residues on a sieve with 3 mm holes. Based on experiment results, we have determined optimal performance indices of the crusher.

Key words: Hammer crusher; Curvature radius; Rotor-fan; Grain grinding.

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных исследований работы молотковой дробилки с пневматической загрузкой материала. Основная цель статьи заключается в обосновании возможного снижения энергозатрат рабочего процесса дробилки путем оптимизации ее конструктивно-технологических параметров, которые обеспечивают получение готового продукта, удовлетворяющего зоотехническим требованиям для всех групп сельскохозяйственных животных. Исследования проводились на зерне ячменя сорта «Эльф» с эквивалентным диаметром 4,21 мм, влажностью 13-14 %. Для математического описания влияния исследуемых факторов на критерии оптимизации реализован план Бокса-Бенкина для трех факторов. В качестве факторов выступили частота вращения ротора-вентилятора, радиус кривизны лопаток, диаметр отверстий решета. Критериями оптимизации выступили удельные энергозатраты, степень измельчения, средний размер измельченных частиц, количество целых зерен, содержание пылевидной фракции и остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм. По результатам эксперимента определены оптимальные показатели работы дробилки.

Ключевые слова: Молотковая дробилка; Радиус кривизны; Ротор-вентилятор; Измельчение зерна.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых трудоемких процессов животноводства является кормоприготовление, а именно операции измельчения кормов, скармливаемых животным. Существенную долю в структуре кормовых рационов занимают концентраты, поэтому важную роль играет технология подготовки их к скармливанию.

В настоящее время наибольшее распространение получила технология производства комбикормов непосредственно в хозяйствах. Однако опыт эксплуатации дробилок комбикормовых агрегатов с пневматической загрузкой и выгрузкой исходных компонентов комбикорма выявил их существенные недостатки. Это, прежде всего, низкий КПД воздушного потока, невысокая пропускная способность и недостаточное качество получаемого продукта. В связи с этим у сельхозпроизводителя возникает множество проблем: снижение объемов производства и качества продукции, повышение затрат труда на производство кормов, снижение продуктивности животных, уменьшение рентабельности.

Несмотря на широкое распространение молотковых дробилок с пневматической загрузкой материала, их рабочий процесс недостаточно изучен, что обуславливает необходимость проведения исследований в данном направлении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для изучения процесса измельчения зерна изготовлена лабораторная установка, состоящая из дозатора, зерноприемника, двух материалопроводов, дробилки и осадителя (Рис. 1). Работа установки осуществляется следующим образом. Зерно из дозатора поступает в зерноприёмник и далее по гибкому пневмопроводу – на измельчение в дробилку с ротором-вентилятором. Измельчённый материал воздушным потоком транспортируется в осадитель по пневмопроводу. Регулирование подачи осуществляется заслонкой по тарировочной таблице.

Молотковая дробилка (Рис. 2) состоит из рамы 1 с установленным на ней электродвигателем 2, корпуса 3, выполненного в форме архимедовой спирали, внутри которого смонтирован ротор-вентилятор 4 (Савиных, П.А., Булатов, С.Ю., Нечаев, В.Н. 2012).



Рисунок 1. *Общий вид лабораторной установки*

Ротор-вентилятор 4 выполнен в виде ступицы 5 с внутренним 6 и наружным 7 дисками, между которыми установлены оси подвеса 8, каждая с набором молотков 9. Наружный диск 7 представляет из себя кольцо, при этом конструкция дробилки позволяет при исследованиях устанавливать его с различными внутренними диаметрами. На внутреннем диске 6 крепятся лопатки вентилятора 10. К внутренней стороне корпуса дробилки крепится решето 11.

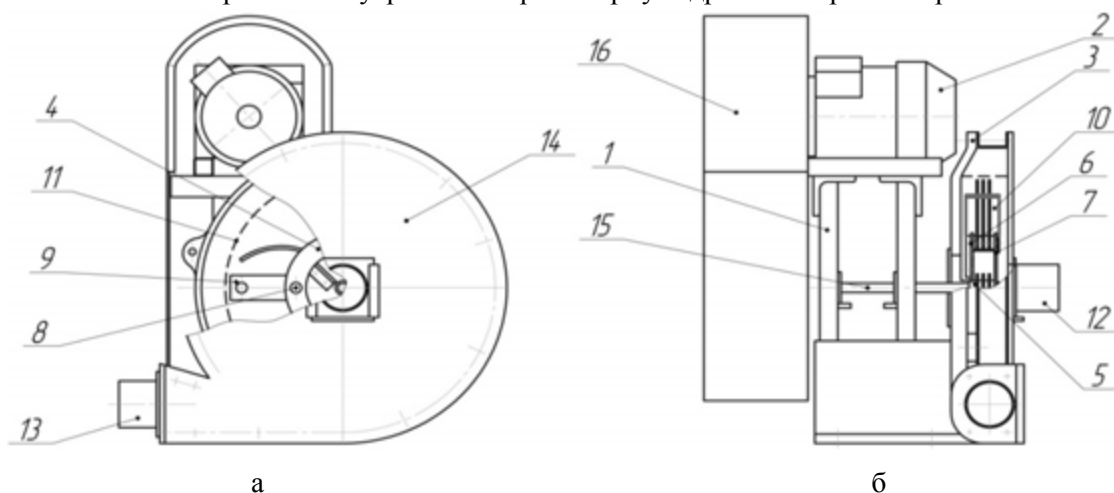


Рисунок 2. *Конструктивное устройство экспериментальной молотковой дробилки с ротором-вентилятором: а – общий вид; б – вид сбоку; 1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – корпус; 4 – ротор-вентилятор; 5 – ступица; 6, 7 – соответственно внутренний и наружный диски; 8 – ось подвеса; 9 – набор молотков; 10 – лопатки вентилятора; 11 – решето; 12 – всасывающий патрубок; 13 – выгрузной патрубок; 14 – крышка; 15 – вал; 16 – кожух*

Экспериментальные исследования проводили в соответствии с действующими ГОСТами, общепринятыми и частными методиками испытаний техники (Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский, Ю.В. 1976), обеспечивающими получение первичной информации в виде реализаций случайных процессов с последующей их обработкой на персональном компьютере при помощи программы «Statgraphics Plus».

В процессе проведения экспериментальных исследований использовались различные приборы и аппаратура. Потребляемую мощность измеряли с помощью токоизмерительных клещей Mastech MS2203. Рассев и взвешивание проб готового продукта осуществляли с помощью лабораторного отсева РЛ-1 и весов ВК-300.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Поисковый эксперимент показал, что в готовом продукте содержится значительное (превышающее нормы ГОСТ в 1,5 раза) количество целых зерен (Савиных, П.А., Булатов, С.Ю., Нечаев, В.Н. 2013).

Для определения влияния конструктивных факторов на показатели работы дробилки реализован план Бокса “ Бенкина для трех факторов. При этом факторы варьировались в следующих пределах:

- x_1 – частота вращения ротора-вентилятора n : 3000, 3500 и 4000 мин⁻¹;
- x_2 – радиус кривизны лопаток c : 40, 45 и 50 мм (Рис. 3);
- x_3 – диаметр отверстий решета d_p : 3, 4 и 5 мм (Рис. 4).

В ходе исследований оценивалось влияние изучаемых факторов на

- \bar{y}_1 – удельные энергозатраты \bar{E} , $\frac{кВт \cdot ч}{т \cdot ед.ст.изм.}$;
- \bar{y}_2 – степень измельчения I ;
- \bar{y}_3 – средний размер измельченных частиц d_{cp} , мм;
- качество получаемого продукта, характеризуемое содержанием: \bar{y}_4 – целых зёрен m_1 , %, \bar{y}_5 – пылевидной фракции m_2 , % и \bar{y}_6 – остатка на сите с отверстиями диаметром 3 мм m_3 , %.

По результатам поисковых экспериментов установили, что наилучшие показатели рабочего процесса дробилки достигаются при максимальном значении подачи материала Q и диаметре кольца ротора $D_k = 120$ мм.

Исследования проводили на зерне ячменя сорта «Эльф» с эквивалентным диаметром 4,21 мм, влажностью 13-14 %. Матрица плана и результаты эксперимента представлены в таблице 1.

После проведения опытов и обработки результатов получены модели регрессии рабочего процесса (незначимые факторы исключены):

$$\bar{y}_1 = 1,94 + 0,79 \cdot x_1 + 0,96 \cdot x_3 + 1,24 \cdot x_1^2 - 1,22 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (1)$$

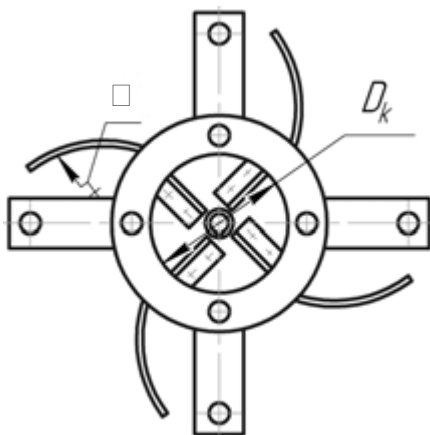


Рисунок 3. Ротор-вентилятор

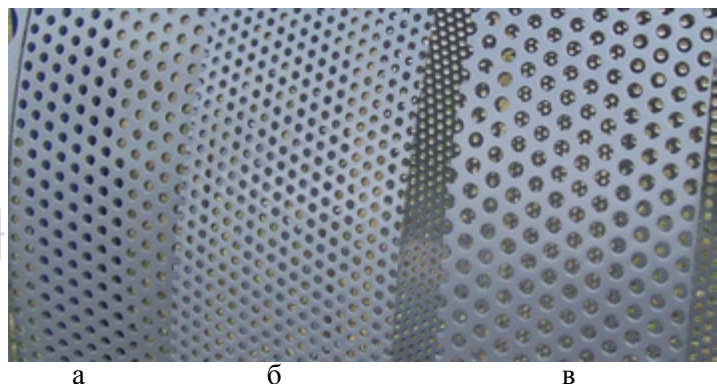


Рисунок 4. Перфорированные решета с диаметрами отверстий:
а – 4 мм; б – 3 мм; в – 5 мм

Таблица 1. Матрица плана Бокса-Бенкина и результаты эксперимента

№ п/п	Факторы			Критерии оптимизации					
	Частота вращения n , мин ⁻¹	Радиус кривизны лопаток ρ , мм	Диаметр отверстий решета d_p , мм	Удельные энергозатраты \mathcal{E} , $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$	Степень измельчения λ	Средний размер измельченных частиц $d_{\text{ср}}$, мм	Содержание целых зерен m_1 , %	Пылевидная фракция m_2 , %	Остаток на сите с отверстиями диаметр 3 мм m_3 , %
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{y}_4	\bar{y}_5	\bar{y}_6
Уровни варьирования									
Нижний -1	3 000	40	3						
Основной 0	3 500	45	4						
Верхний +1	4 000	50	5						
1	0	0	0	1,83	3,05	1,392	0,186	0,53	4,64
2	-1	-1	0	1,47	2,18	1,207	0,433	0,69	7,7
3	1	-1	0	5,78	2,83	1,496	0,161	1,4	5,81
4	-1	1	0	3,42	2,78	1,407	0,483	1,09	10,2
5	1	1	0	2,86	3,2	1,324	0,13	1,27	4,15
6	-1	0	-1	1,69	2,9	1,467	0,202	0,43	5,76
7	1	0	-1	1,61	3,62	1,171	0,083	1,89	3
8	0	0	0	1,83	3,05	1,392	0,186	0,53	4,64
9	-1	0	1	2,99	1,91	2,222	0,812	0,14	27,08
10	1	0	1	5,64	3,83	2,496	0,361	1,01	7,81
11	0	-1	-1	1	3,16	1,341	0,123	0,93	4,14
12	0	1	-1	1,92	2,81	1,51	0,112	1,01	4,41
13	0	-1	1	1,91	2,43	1,743	0,783	0,85	14,21
14	0	1	1	3,32	1,83	2,326	0,744	0,1	30,99
15	0	0	0	1,83	3,05	1,392	0,186	0,53	4,64

$$\bar{y}_2 = 3,058 + 0,463 \cdot x_1 - 0,311 \cdot x_3 + 0,3 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,406 \cdot x_2^2; \quad (2)$$

$$\bar{y}_3 = 1,37 + 0,097 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_3 + 0,14 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,41 \cdot x_3^2; \quad (3)$$

$$\bar{y}_4 = 0,198 - 0,149 \cdot x_1 + 0,27 \cdot x_3 - 0,083 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,094 \cdot x_2^2 + 0,157 \cdot x_3^2; \quad (4)$$

$$\bar{y}_5 = 0,51 + 0,40 \cdot x_1 - 0,27 \cdot x_3 + 0,365 \cdot x_1^2 + 0,221 \cdot x_2^2; \quad (5)$$

$$\bar{y}_6 = 4,578 - 3,74 \cdot x_1 + 7,84 \cdot x_3 - 4,13 \cdot x_1 \cdot x_3 + 4,13 x_2 \cdot x_3 + 6,38 \cdot x_3^2. \quad (6)$$

Анализируя полученные модели, можно заключить следующее.

1. Удельные энергозатраты снижаются при уменьшении частоты вращения ротора-вентилятора ($b_1 = 0,79$, $b_{11} = 1,24$), а также при увеличении парных взаимодействий факторов ($b_{12} = -1,22$).

2. На степень измельчения в значительной степени оказывают влияние частота вращения ротора-вентилятора ($b_1 = 0,463$) и радиус кривизны лопаток ($b_2 = 0,406$).

3. Величина среднего размера измельченных частиц зависит в большей степени от диаметра отверстий решета ($b_3 = 0,41$, $b_{33} = 0,41$).

4. Количество целых зерен в готовом продукте снижается с уменьшением диаметра отверстий решета и с возрастанием частоты вращения ротора-вентилятора.

5. С уменьшением частоты вращения ротора-вентилятора ($b_1 = 0,4$, $b_{11} = 0,365$) и с увеличением диаметра отверстий решета ($b_3 = -0,27$) содержание пылевидной фракции уменьшается.

6. Содержание остатка на сите с отверстиями диаметром 3 мм снижается при уменьшении диаметра отверстий решета ($b_3 = 7,84$, $b_{33} = 6,38$), радиуса кривизны лопаток и диаметра отверстий решета ($b_{23} = 4,13$).

Оптимизацию параметров проводили методом наложения двумерных сечений поверхностей отклика, решая компромиссную задачу по получению готового продукта, удовлетворяющего зоотехническим требованиям, с минимализацией энергозатрат на единицу степени измельчения.

Анализ сечений поверхностей откликов позволил сделать вывод, что оптимальный радиус кривизны лопаток для всех критериев оптимизации составляет $c = 45$ мм, поэтому далее следует определить оптимальные значения критериев оптимизации при сочетании следующих факторов: диаметра отверстий решета d_p и частоты вращения ротора-вентилятора n при фиксированном значении радиуса кривизны лопаток.

Анализ поверхностей отклика показывает, что наименьшие удельные энергозатраты достигаются при диаметре отверстий решета 3 мм и частоте вращения ротора-вентилятора

3000 мин^{-1} и составляют $1,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$ (Рис. 5, а), а изменение частоты вращения ротора-

вентилятора n с 3000 до 4000 мин^{-1} и диаметра отверстий решета d_p с 3 до 5 мм приводит к возрастанию степени измельчения l с 1,9 до 3,52, т.е. на 85,3 %, при этом средний размер измельченных частиц d_{cp} увеличивается на 87,5 % (рис. 5, б и в).

При частоте вращения ротора-вентилятора 3000 мин^{-1} и установке решета с диаметром отверстий 3 мм (рис. 5, г; 6, а и б) остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм составляет менее 5 %, количество целых зерен 0,2 %, а количество пылевидной фракции уменьшается до 0,54 %. Такое качество готового продукта удовлетворяет зоотехническим требованиям для всех групп сельскохозяйственных животных.

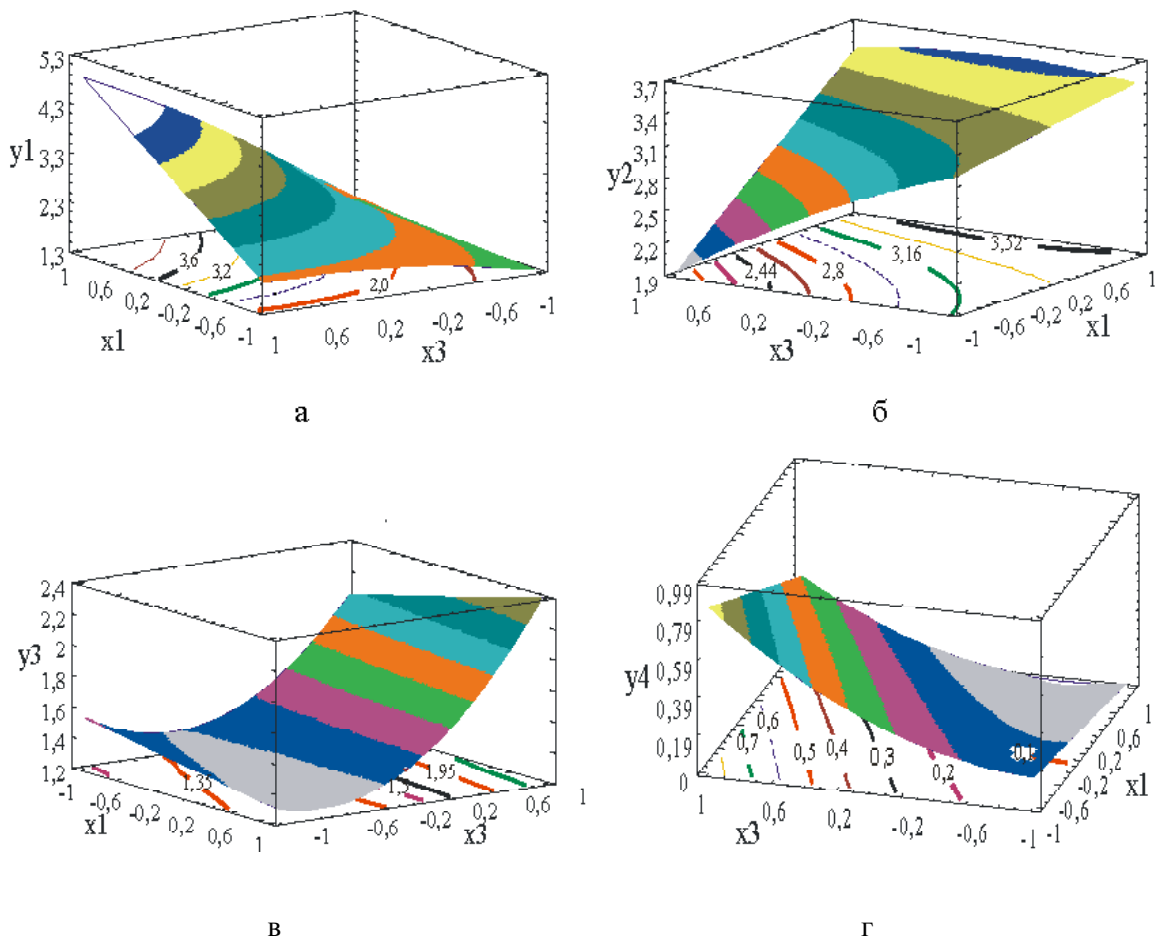


Рисунок 5. Поверхности отклика, характеризующие влияние частоты вращения ротора-вентилятора (x_1), мин^{-1} и диаметра отверстий решета (x_3) d_p , мм при $x_2 = 0$ на: а – на удельные энергозатраты (y_1) Э, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / (\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.})$; б – степень измельчения (y_2) l ; в – средний размер измельченных частиц (y_3) d_{cp} , мм; г – количество целых зерен в готовом продукте (y_4) t_p , %

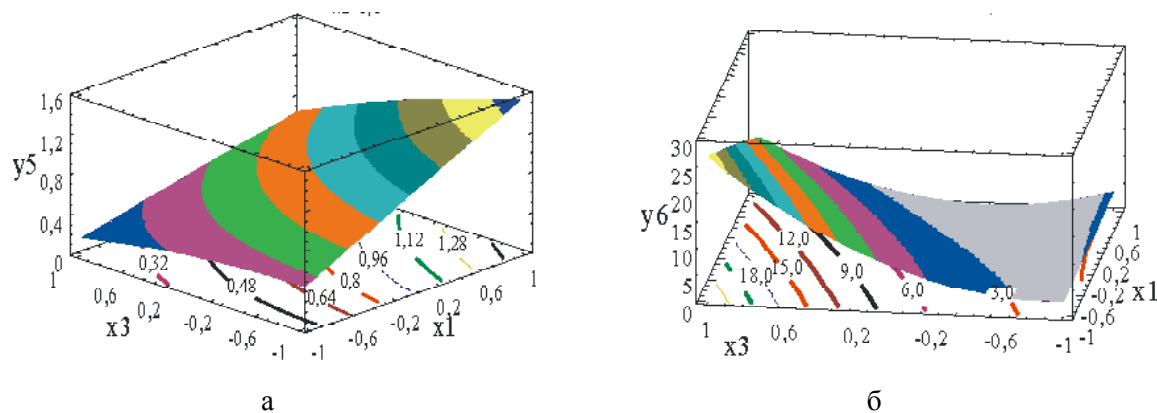


Рисунок 6. Поверхности отклика, характеризующие влияние частоты вращения ротора-вентилятора (x_1) и, мин^{-1} и диаметра отверстий решета (x_3) d_p , мм при $x_2 = 0$ на: а – содержание пылевидной фракции (y_5) t_2 , %; б – содержание остатка на сите диаметром 3 мм (y_6) t_3 , %

Устанавливая решето с диаметром отверстий 4 мм при частоте вращения ротора-вентилятора 3000 мин^{-1} , получаем остаток на сите диаметром 3 мм порядка 9 %, количество целых зерен 0,4 % и содержание пылевидной фракции 0,45 %, то есть качество готового продукта, удовлетворяющее зоотехническим требованиям для всех групп сельскохозяйственных животных, кроме телят в возрасте до 6 мес., поросят-отъемышей, ягнят в возрасте до 4 мес., цыплят и молодняка кур в возрасте до 90 дней, бройлеров, утят и гусят в возрасте до 20 дней, индюшат в возрасте до 60 дней. При этом удельные энергозатраты на единицу степени

измельчения возрастут с 1,3 до $2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$ (Рис. 5, а).

При применении решета с диаметром отверстий 5 мм и неизменной частоте вращения ротора-вентилятора количество целых зерен достигает 0,9 %, остаток на сите диаметром 3 мм “ 27 % и количество пылевидной фракции “ 0,2 %. Данный режим можно рекомендовать для некоторых групп сельскохозяйственной птицы: молодняка кур и утят в возрасте до 150 дней, кур-несушек и взрослых уток, индюшат в возрасте до 180 дней и взрослых индеек. При этом удельные

энергозатраты на единицу степени измельчения составляют $2,2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$.

Таким образом, установку решета с разными диаметрами отверстий (3,4 и 5 мм) можно рекомендовать как способ регулирования качества готового продукта для тех групп животных, для которых остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм и количество целых зерен не превышают допустимых по зоотехническим требованиям пределов. Для удовлетворения потребностей в готовом продукте всех остальных групп животных рекомендуется применять решето с диаметром отверстий 3 мм. Качество готового продукта можно регулировать также изменением частоты вращения ротора-вентилятора. При диаметре отверстий решета 3 мм и увеличении частоты вращения ротора-вентилятора до 4000 мин^{-1} количество целых зерен близко к нулю, остаток на сите диаметром 3 мм менее 5 %, удельные энергозатраты на единицу

степени измельчения увеличиваются с 1,3 до $1,8 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$, то есть на 38,5 %. Но

содержание пылевидной фракции резко возрастает с 0,54 до 1,5 %, то есть происходит переизмельчение материала (в 3-4 раза меньше, чем у аналогичных дробилок с пневматической подачей материала (Баранов, Р.Н., Фуфачев, В.С., Сергеев, А.Г. 2006). Большая концентрация пыли в готовом продукте, как известно, может привести к снижению продуктивности и вызвать у сельскохозяйственных животных некоторых групп легочные заболевания. Следовательно, работать при таких настроечных параметрах нецелесообразно.

Одновременное повышение частоты вращения ротора-вентилятора и увеличение диаметра

отверстий решета не дает требуемого качества готового продукта, при этом лишь происходит увеличение удельных энергозатрат на единицу степени измельчения до $5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований показали, что оптимальными параметрами работы дробилки зерна являются: удельные энергозатраты $1,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{ед.ст.изм.}}$, количество целых зерен до 0,2 %, остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм, не превышающий 5 %, содержание пылевидной фракции не более 0,54 % при диаметре отверстий решета 3 мм, частоте вращения ротора-вентилятора 3000 мин⁻¹ и радиусе кривизны лопатки 45 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АДЛЕР, Ю.П., МАРКОВА, Е.В., ГРАНОВСКИЙ, Ю.В. (1976). Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука. 297 с.
2. БАРАНОВ, Р.Н., ФУФАЧЕВ, В.С., СЕРГЕЕВ, А.Г. (2006). Исследование рабочего процесса модернизированной дробилки фуражного зерна ДКР-3. В: Улучшение эксплуатационных показателей с.-х. энергетики: Межвуз. сб. науч. тр. Киров: Вятская ГСХА. Вып. 6, ч. 3, с. 162-166.
3. САВИНЫХ, П. А., БУЛАТОВ, С. Ю., НЕЧАЕВ, В. Н. (2012). Зернодробилка с ротором-вентилятором. В: Сельский механизатор, № 9, с. 9. ISSN 0131-7393.
4. САВИНЫХ, П. А., БУЛАТОВ, С. Ю., НЕЧАЕВ, В.Н. (2013). Исследование рабочего процесса молотковой дробилки зерна с ротором-вентилятором. В: Аграрная наука Евро-Северо-Востока, № 1, с. 54-59. ISSN 2072-9081.

Data prezentării articolului: 23.05.2015

Data acceptării articolului: 26.09.2015