

УДК 631.363

## ПРОЦЕСС ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРНА

Кушнир В.Г. - д.т.н., профессор, Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова

Гаврилов Н.В., к.т.н., доцент Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова;

Шило И.Н. - д.т.н., профессор, Белорусский государственный аграрного технического университет, г. Минск, Белоруссия

Романюк Н.Н. - к.т.н., доцент Белорусского государственного аграрного технического университета, г. Минск, Белоруссия

В статье рассмотрены основные задачи исследований - разработка средств приготовления кормов для ферм и комплексов крупного рогатого скота. Проведен небольшой обзор исследований процесса дробления зернового материала осуществленного рядом авторов. При этом отмечено особое влияние конструкции молотка на процесс дробления и производительность установки.

Ключевые слова: дробилка, молоток, доизмельчитель, качество измельчения.

Процесс дробления зерна является наиболее энергоёмким среди всех других операций по подготовке зерна, поэтому применение оптимальных режимов работы молотковой дробилки ведёт к значительной экономии энергии.

Исследованию влияния работы молотков на процесс измельчения посвящено большое количество работ.

Влияние конструктивных особенностей молотков на процесс измельчения зерновых культур еще в 1927 году рассмотрел профессор W.C. Krueger, он сделал заключение, что расстановка молотков и их количество не оказывают влияние на процесс измельчения [1].

Демидов П.Г. отметил, что эффективность работы дробилки зависит от числа пакетов и молотков [2].

Профессор Куприц Я.Н. утверждал, что толщина молотков должна выбираться в зависимости от вида измельчаемой зерновой культуры [3].

Сыроватка В.И. исследовав влияние острых граней молотка на показатели работы дробилки пришел к выводу, что молотки с острой формой грани повышают производительность в 1,2...1,3 раза [4].

Шуб Г.И. исследовав измельчение зерновых культур пришел к выводу, что толщина молотка должна находиться в диапазоне от 1,5 до 2 мм [5].

Исследования влияния количества, толщины и формы молотков на энергоёмкость и качество получаемого продукта проведены Зеленым А.А. [6]. Он сделал следующие выводы: толщина молотков при измельчении зерна должна находиться в пределе 1,5...2 мм, уменьшение толщины молотков от 12 до 2 мм снижает удельный расход энергии на 5...7%; при измельчении зернового материала лучшим по форме является пластинчатый молоток с радиально расположенными гранями; при увеличении числа молотков от 12 до 72 снижается удельный расход энергии на 4...25%.

В конструкциях молотковых дробилок используют пластинчатые и объемные молотки. Пластинчатые молотки применяются с двумя отверстиями (прямоугольные (ГОСТ 8772-58), со ступенчатыми концами и фигурные, а объемные - сплошные и составные.

В кормодробилках производства СНГ применяют пластинчатые молотки (прямоугольные или со ступенчатыми концами). Для измельчения зерна используют тонкие молотки толщиной 2...3 мм. В зависимости от материала и термообработки молотки служат от 72 до 280 часов [7].

Проверку работоспособности и подтверждение гипотезы исследований (повышение производительности процесса измельчения зернового материала, однородности выходной массы при установке на рабочий орган (молоток) дополнительного элемента (измельчителя, предположительно треугольной формы) осуществляли на лабораторной установке, разработанной на кафедре машин, тракторов и автомобилей Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова (рисунок 1).

Для экспериментальных исследований изготовлено три типа рабочих органов доизмельчителей (рисунок 2).

Для привода дробилки использовался двигатель постоянного тока независимого возбуждения, что позволило изменять частоту вращения ротора в диапазоне от 2200 до 3000 мин<sup>-1</sup>. В качестве сырья было использовано зерно ячменя, овса и пшеницы влажностью 15; 20; 25%.

По результатам теоретических исследований и поисковых экспериментов было выявлено два фактора влияющих на работу дробилки, которые позволили реализовать двухуровневый план Бокса-Бенкина второго порядка [8].

За критерий оптимизации  $Y$  была принята производительность дробилки  $Q$ . В качестве основных факторов было выбрано: скорость вращения ротора и диаметр отверстий сита. Другие факторы фиксировались на оптимальном уровне и в процессе опытов не изменялись.

Для установления зависимости между критерием оптимизации и влияющими на его величину факторами  $X_1$  (диаметр отверстий сита, мм) и  $X_2$  (окружная скорость молотка, м/с) была рассмотрена задача многофакторного планирования эксперимента.

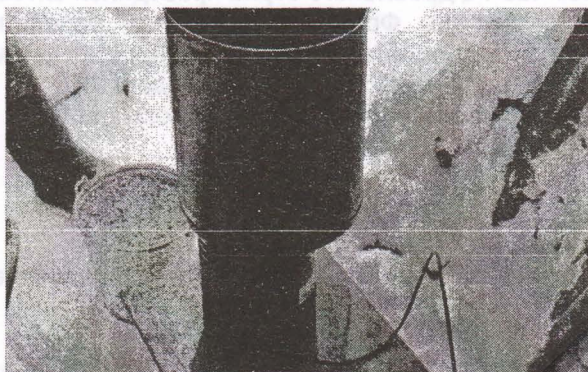
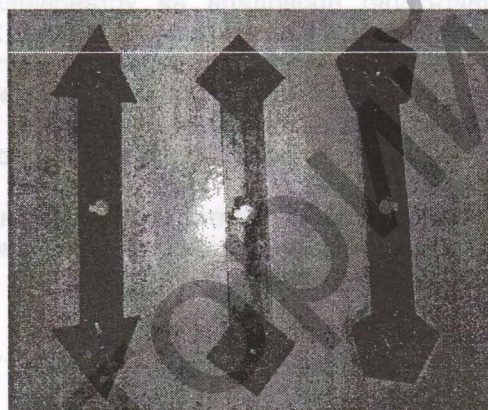


Рисунок 1. Общий вид экспериментальной дробилки



а б в

Рисунок 2. Рабочий орган дробилки с дополнительным измельчителем: а - с треугольным доизмельчителем (внутренний угол  $60^\circ$ ); б - с прямоугольным доизмельчителем (внутренний угол  $90^\circ$ ); в - с пятиугольным доизмельчителем (внутренний угол  $108^\circ$ )

По результатам теоретических исследований и серии поисковых опытов был установлен основной уровень для всех факторов, а интервалы варьирования приняты такими, при которых заметно изменение хода процесса дробления.

Получено уравнение регрессии адекватно описывающее процесс дробления:

$$Y = 50,64 - 0,08 X_1 + 0,0001X_1^2 - 0,4111X_2 - 0,011 X_2^2 - 0,0002 X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

Так как результаты проведения процесса дробления с применением многогранного доизмельчителя авторами [7,8], показал результат повышения производительности с большим количеством пылевых фракций, нами было решено провести исследования по дроблению зерна с использованием дополнительного фактора - угла расположения выступов доизмельчителя (возможность повышения производительности до 15%). Разработанная конструкция доизмельчителя, должна была устранить вышеуказанные недостатки процесса дробления зернового материала.

Проведение исследований осуществляли по предыдущему плану, в качестве критерия оптимизации  $Y$  принят модуль дробления. В качестве основных факторов было выбрано: количество углов доизмельчителя, влажность зернового материала.

Получено уравнение регрессии адекватно описывающее процесс дробления:

$$Y = 5,63 - 0,08 X_1 + 0,0003X_1^2 - 0,3111X_2 - 0,011 X_2^2 - 0,0002 X_1 \cdot X_2 \quad (2)$$

Длительность опыта составляла 4...5 минут с трёхкратной повторностью. Производительность дробилки (Q, т/ч) определялась по формуле:

$$Q = 3,6 \frac{q}{t}, \quad (3)$$

где q - масса контрольного помола за учтённое время, кг;  
 t - продолжительность опыта, с.

Для определения размеров частиц дроблёного зерна проводился ситовый анализ 50 г продукта, взятого из пробы контрольного помола. Фракционный состав определялся на вибрационном классификаторе РФ-1 с набором решёт, имеющим круглые отверстия диаметром от 0,25 до 5 мм. Среднюю пробу массой 100 г взвешивали на весах с точностью до 0,01.

Данные ситового анализа использовали для расчёта по формуле:

$$M = \frac{0,25P_0 + 0,5P_1 + 1,0P_2 + 1,5P_3 + 2,5P_4 + 3,5P_5}{100}, \quad (4)$$

где M - модуль дробления, мм;

P<sub>0</sub> - весовой остаток на сборном дне;

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> - весовые остатки на ситах с диаметром отверстий соответственно 0,25; 0,5; 1,0; 2 и 3 мм.

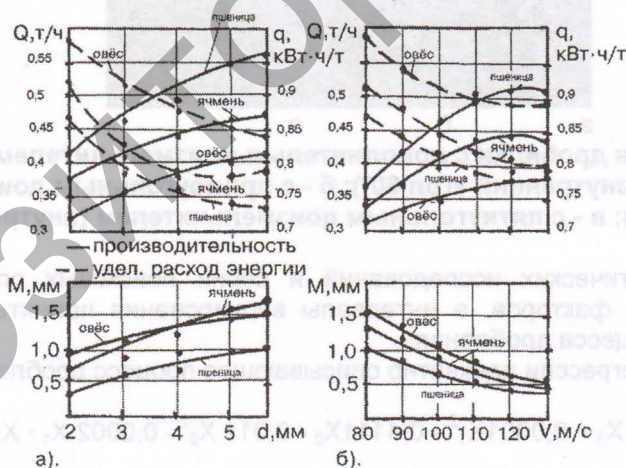
Количество целых зёрен определялось, выделением их из навески, взвешиванием, и выражалось в процентах.

Измерения и регистрация первичных показателей (силы тока, напряжения, мощности, коэффициента загрузки электродвигателя) проводили на установившихся режимах рабочего и холостого ходов дробилки. Время записи одной повторности составляло 20 с.

Сравнительная оценка процесса измельчения проводилась по удельным показателям.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 3, 4, 5, 6. На рисунке 3 приведены графики зависимости производительности, удельного расхода энергии и модуля дробления от диаметра отверстий сита (а) и окружной скорости молотков (б) для пшеницы ячменя и овса.

С увеличением диаметра отверстий производительность дробилки увеличивается на всех материалах, причём на пшенице рост идёт более интенсивно, чем на ячмене и овсе, удельный расход энергии уменьшается, а модуль дробления увеличивается.



**Рисунок 3. Зависимость производительности, удельного расхода энергии и модуля дробления от диаметра отверстий сит (а) и окружной скорости молотков (б) при параметрах (W=15%; l=150 мм; b=35 мм; S=3 мм; β=0,8)**

Важным фактом, влияющим на эффективность работы дробилки, является окружная скорость молотков. С повышением окружной скорости молотков, производительность дробилки возрастает до определённой величины для каждого материала. При измельчении овса и ячменя максимальная производительность достигается при окружной скорости равной 120 м/с, а для пшеницы - 125 м/с.

Удельный расход энергии для всех видов зерна при этом снижается и достигает своего наименьшего значения для овса и ячменя при скорости молотков, равной 120 м/с, а для пшеницы 125 м/с, при этом модуль дробления также уменьшается.

На рисунке 4 представлена зависимость производительности и удельного расхода энергии от влажности зерна. Из графика видно, что с повышением влажности зерна производительность дробилки снижается, а удельный расход энергии резко возрастает.

На эффективность работы дробилки влияет также величина зазора между молотками и ситовой поверхностью (рисунок 5). С уменьшением зазора модуль дробления уменьшается, а удельный расход энергии увеличивается.



Рисунок 4. Зависимость производительности и удельного расхода энергии от влажности зерна при ( $V=120$  м/с;  $l=150$  мм;  $b=35$  мм;  $S=3$  мм;  $\beta=0,8$ )



Рисунок 5. Зависимость удельного расхода энергии и модуля дробления от расстояния между молотками и ситом при параметрах ( $n=120$  м/с;  $\beta=0,8$ ;  $d=3$  мм;  $W=15\%$ )

На рисунке 6 показана зависимость производительности, потребной мощности и удельного расхода энергии от степени загрузки установки.

Анализ зависимостей, отражающих процессы измельчения зерна (пшеницы, овса, ячменя) при влажности в среднем 15% на решётах с диаметром отверстий 3 мм, позволяет установить закономерности процесса дробления.

Производительность растёт до определённой величины, а затем начинает резко падать, при этом мощность имеет тенденцию к увеличению.

На графике величина загрузки  $\beta=0,82$  соответствует максимально возможной загрузке рабочей камеры, а производительность в зоне изменения загрузки 0,8...1,0 падает, в результате удельный расход энергии увеличивается. Это явление можно объяснить следующим. Зерно в рабочей камере принимает вид кольцеобразного слоя, вращающегося с определённым скольжением по отношению к окружной скорости молотков.

С увеличением степени загрузки установки плотность и толщина этого слоя будут возрастать, что положительно сказывается на работе дробилки в пределах до значения загрузки  $\beta=0,8$ . Дальнейшее повышение плотности слоя приводит к снижению интенсивности дробления и просеивающей способности решёт, отверстия которых в значительной степени перекрываются крупными частицами, что затрудняет проход мелких.

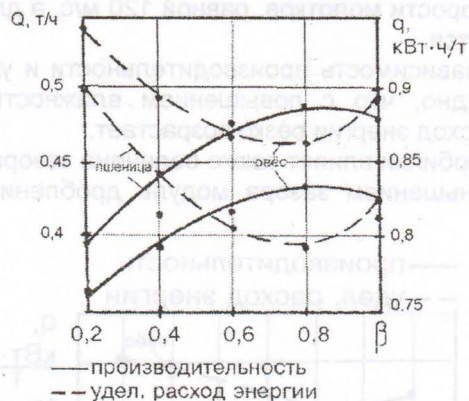


Рисунок 6. Зависимость производительности и удельного расхода энергии от степени загрузки установки при ( $n=120$  м/с;  $l=150$  мм;  $b=35$  мм;  $S=3$  мм;  $\beta=0,8$ ;  $W=15\%$ )

На рисунке 7 показана зависимость производительности, удельного расхода энергии и модуля дробления экспериментальной дробилки от угла расположения доизмельчителя. Анализируя полученные результаты исследования процесса дробления зернового материала (пшеницы, ячменя, овса) можно сделать следующие выводы. При использовании в экспериментах молотка с доизмельчителем с внутренним углом 60 градусов имеем минимальные затраты энергии, в сравнении с другими конструкциями доизмельчителей. Но при этом более низкая производительность установки. Модуль дробления достигается максимальным при угле доизмельчителя 108 градусов (пятигранник), но при этом получаем большое количество пылевых фракций. Поэтому более оптимальным является изготовление доизмельчителя треугольной формы.

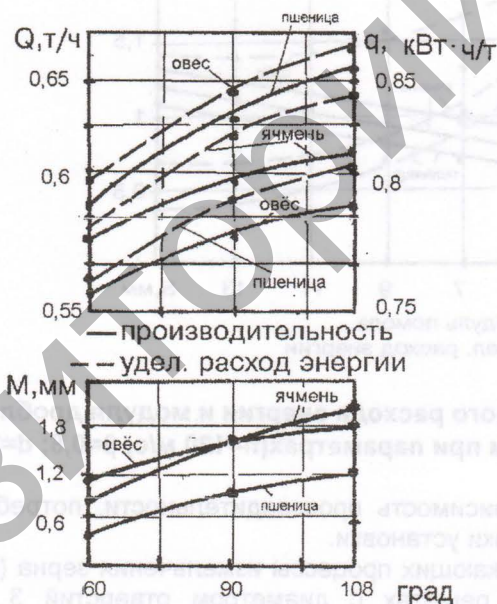


Рисунок 7. Зависимость производительности, удельного расхода энергии и модуля дробления от угла расположения доизмельчителя при параметрах ( $l=150$  мм;  $b=35$  мм;  $S=3$  мм;  $\beta=0,8$ ;  $V=120$  м/с;  $W=15\%$ )

При измельчении пшеницы, ячменя и овса для мелкого и среднего модуля дробления можно использовать сита с диаметром отверстий 3 и 5 мм.

Окружная скорость концов молотков должна быть 120...125 м/с, при влажности зерна в пределах 12...15 %.

Для экспериментальной дробилки производительностью 1 т/ч необходимы следующие параметры молотка: длина молотка - 150 мм; ширина - 35 мм; толщина - 3 мм; параметры доизмельчителя - треугольной формы с равными сторонами 80 мм (угол 60 градусов); диаметр отверстий сит - 3 мм; окружная скорость молотков - 20 м/с; зазор между ситом и концами молотков - 10 мм;

При этом удельные затраты энергии минимальны и будут составлять 0,85 кВт·ч; установленная мощность электродвигателя - 1,5 кВт.