

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 631.363.21  
DOI: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-81-86

**В.В. Садов, С.А. Сорокин**  
**V.V. Sadov, S.A. Sorokin**

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

### INFLUENCE OF GRAIN MATERIAL FLOW DENSITY ON GRINDING EFFICIENCY IN A HAMMER CRUSHER

**Ключевые слова:** молотковая дробилка, плотность зернового материала, статическое давление, эффективность измельчения, соударение частиц.

Большое количество факторов влияют на качество работы молотковой дробилки. Как правило, основную роль в исследованиях отводят конструктивным особенностям машины и физико-механическим свойствам материала, а именно угловой скорости ротора, количеству молотков, живому сечению решета, влажности материала и т.д. Однако определенное значение имеет и создаваемый воздушный поток ротором на процесс измельчения и энергоёмкость процесса. Сделанное предположение об увеличении статического давления внутри корпуса от центра вращения к периферии оказалось верным, что подтверждают данные эксперимента. Это означает, что воздушный поток способствует уплотнению материала в зоне измельчения. На основании этих данных была сконструирована и изготовлена молотковая вертикальная дробилка с лопатками, установленными на нижнем и верхнем дисках ротора. Исходя из плотности среды, можно говорить о вероятности столкновения частиц зернового материала с молотком и соседними частицами. Чем выше вероятность, тем выше эффективность измельчения. В итоге получили, что плотность зернового слоя в зоне измель-

чения существенно влияет на эффективность измельчения за счет увеличения количества соударений с молотками и истирания частицами друг друга. Этому способствует увеличение статического давления, создаваемого лопатками ротора. Графические зависимости влияния плотности зернового слоя на интенсивность измельчения зерна для молоткового измельчителя с разгонными лопатками и ротором, расположенным в горизонтальной плоскости, позволяют определить, что при малых размерах частиц вероятность соударения и переизмельчения высокая, чем для крупных частиц.

**Keywords:** hammer crusher, grain material density, static pressure, grinding efficiency, particle collision.

A large number of factors affect the quality of the hammer crusher operation. As a rule, the main role in research is assigned to the design features of the machine and the physical and mechanical properties of the material, namely the angular velocity of the rotor, the number of hammers, sieve open area, moisture content of the material, etc. However, the air flow created by the rotor has some influence on the grinding process and the energy intensity of the process. The assumption made about the increase in static pressure inside the body from the center of rotation

to the periphery turned out to be correct which was confirmed by the experimental data. This means that the air flow contributes to the compaction of the material in the grinding zone. Based on these data, a vertical hammer crusher with blades mounted on the lower and upper rotor discs was designed and manufactured. Based on the density of the medium, we may consider the probability of collision of grain material particles with a hammer and neighboring particles. The higher is the probability, the higher is the grinding efficiency. As a result, it is found that the den-

sity of the grain layer in the grinding zone significantly affects the grinding efficiency due increased number of collisions with hammers and abrasion by particles of each other. This is facilitated increased static pressure created by the rotor blades. Graphic dependences of grain layer density influence on the intensity of grain grinding for a hammer grinder with accelerating blades and a rotor located in a horizontal plane make it possible to determine that with small particle sizes, the probability of collision and overgrinding is higher than for large particles.

**Садов Виктор Викторович**, д.т.н., ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Сорокин Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

**Sadov Viktor Viktorovich**, Dr. Tech. Sci., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Sorokin Sergey Anatolevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

### Введение

На эффективность работы молотковой дробилки влияет большое количество факторов от конструктивных особенностей машины до физико-механических свойств материала, а именно угловая скорость ротора, количество молотков, живое сечение решета, влажность материала и т.д. [1]. Как правило, в исследованиях упор делается именно на эти факторы, в значительной степени влияющие на процесс. Однако многие факторы считаются малозначимыми и не попадают в зону исследования. К ним относится плотность потока зернового материала. Сделаем предположение: чем выше плотность материала, тем эффективность измельчения увеличивается при снижении удельной энергоёмкости.

**Цель** исследования – исследовать влияние плотности частиц, находящихся в зоне вероятностного столкновения на эффективность ударного разрушения.

### Объекты и методы исследований

Конструктивные особенности дробилки позволили получить следующие допущения и предположения:

1) лопатки верхнего ротора отклоняют вектор абсолютной скорости зерновки в радиальном направлении, что способствует увеличению количества лобовых (центральных) ударов материала о деку;

2) лопатки нижнего диска создают поток воздушно-зерновой смеси в направлении перпендикулярном (ортогональном) плоскости решета, интенсифицируя удаление измельченного материала из дробилки;

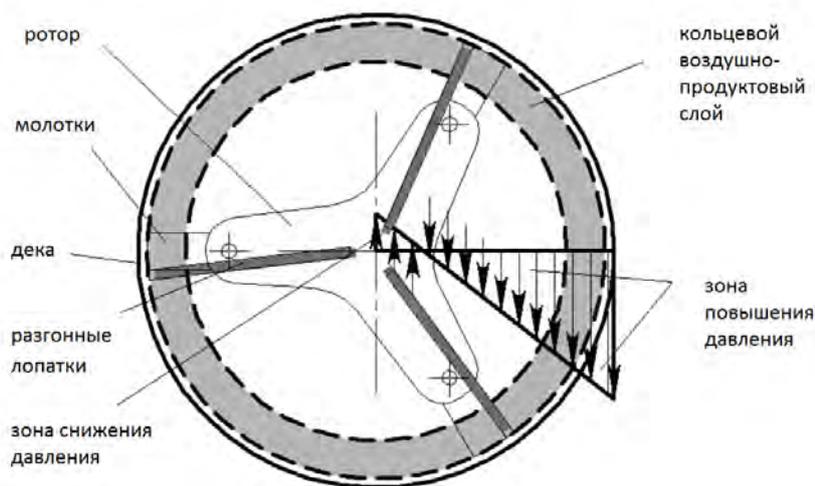
3) из-за незначительной высоты ротора вертикальных дробилок картина распределения скоростей будет одинакова по высоте как в зоне лопаток, так и вне ее;

4) конструкция ротора способствует увеличению давления к периферии ротора, чем достигается высокая энергоэффективность (рис. 1).

Увеличение плотности зернового (продуктового) слоя повышает интенсивность разрушения и истирания зерновок за счет увеличения вероятности попадания молотка по зерновке и истирания частицами. Чем плотнее объем заполнен частицами близ деки в рабочей части молотков (рис. 1), тем прочнее удар, и большее их количество за единицу времени приходится по лобовой поверхности молотка.

Как отмечает С.В. Мельников, на стадии проектирования молоткового измельчителя необходимо усиливать радиальную составляющую потока за счет выбора рациональной формы деталей и применения соответствующих направляющих [2]. Благодаря повышению величины радиальной составляющей потока, так же как увеличению статического давления, возрастает скорость движения воздуха через отверстия решета, стимулируя этим интенсивность отвода готового продукта и производительность дробилки.

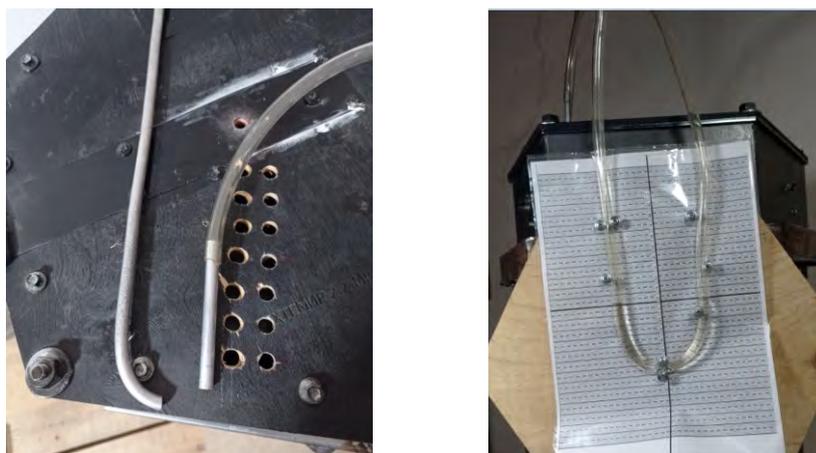
В работе [3] автор предлагает дополнить конструкцию ротора лопатками, которые позволят обеспечить увеличенный и направленный поток воздуха в рабочей камере. Результаты показали, что такая конструкция дает возможность уменьшить энергопотребление на размол от 11,5 до 16,3% и снизить количество пыли в продукте от 18,5 до 21,2%.



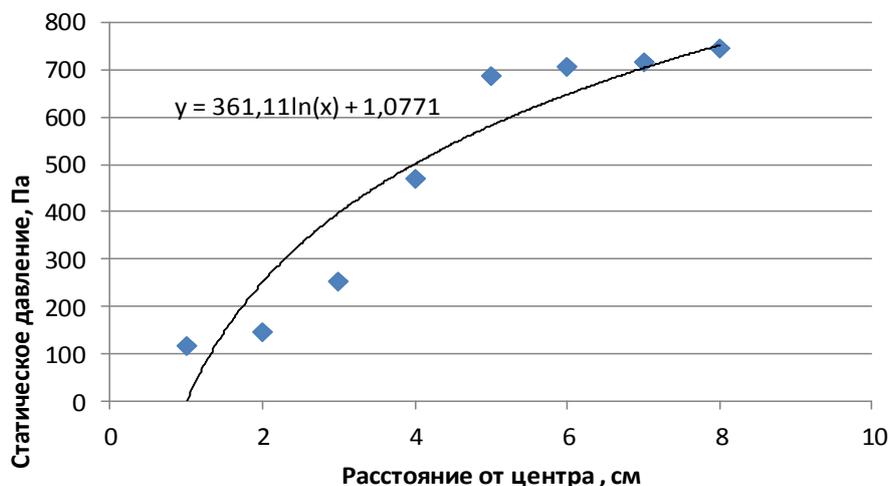
**Рис. 1. Схема распределения давления в камере измельчения**

Проведем эксперимент по определению распределения плотности воздушного потока внутри камеры измельчителя. Для этого при помощи трубки Пито в радиальном направлении определим статическое давление (рис. 2).

Результаты измерения позволили получить зависимость изменения давления внутри камеры молотковой дробилки в радиальном направлении (рис. 3).



**Рис. 2. Определение статического давления**



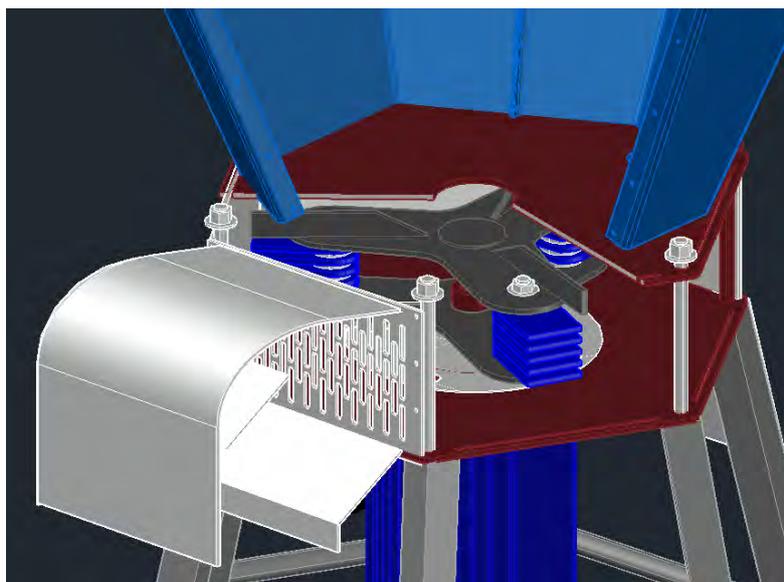
**Рис. 3. Изменение статического давления внутри камеры молотковой дробилки в радиальном направлении**

Увеличение такой плотности или концентрации частиц измельченного зерна у деки растёт с увеличением давления, спровоцированным разгонными лопатками [4, 5]. Центробежная сила инерции приталкивает частицы к деке, образуя плотный слой. Толщина продуктового слоя в зоне измельчения колеблется до 2 см [1]. Чем

интенсивнее выражено это явление, тем больше воздуха вытесняется из кольцевого слоя, и зерновки целые и частично измельченные укладываются плотнее друг к другу. Конструктивно лопатки и молотковая дробилка представлены на рисунках 4 и 5.



а б  
*Рис. 4. Лопатки верхнего (а) и нижнего ротора (б)*



*Рис. 5. Модель трехлопастного ротора с разгонными лопатками*

### Результаты исследования

Рассмотрим, какова вероятность соударения зерновки в зоне измельчения. Допустим, что плотность воздушно-зерновой смеси в кольцевом объеме зоны измельчения одинаковая. Толщину слоя определяют геометрия и динамические характеристики ротора, а также в значительной степени влияние оказывают разгонные лопатки. Молотки, рассекающие объем смеси, перемешивают её, исключая появление слоя с преобладанием частиц одного размера. Тогда каждая частица своего размера имеет одинако-

вую вероятность соударения с лобовой поверхностью молотка. Это столкновение произойдет, когда на пути движения молотка окажется хотя бы одна частица в облаке воздушно-зерновой смеси. Движущийся через него молоток ограничивает пространство, равное объему параллелепипеда с основанием, равным прямоугольнику, представляющему лобовую часть молотка. Объем  $V$  параллелепипеда будет параметром, который при определении зависимости вероятности с экспоненциальным распределением заменит параметр времени [6, 7]. Так, вероят-

ность прохождения частицей пути без соударения составит

$$P_B = e^{-\lambda V}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – число частиц в единице объема зоны измельчения;

$V$  – объем параллелепипеда с основанием  $b \times h$ ,  $b$  и  $h$  – толщина и длина молотка соответственно.

Вероятность соударения на пути  $L$  за это же время:

$$P_{zt} = 1 - P_B = 1 - e^{-\lambda V}. \quad (2)$$

Параметр  $\lambda$  находится из отношения веса измельчаемого материала к весу воздуха, с учетом размера зерновок в заданном кольцевом объеме близ деки [1].

$$\lambda = \frac{6 \cdot K \cdot \gamma_{воз}}{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma_{зерн}}, \quad (3)$$

где  $K$  – концентрация зерновок;

$\gamma_{воз}$  – удельный вес воздуха;

$\gamma_{зерн}$  – удельный вес рассматриваемого зернового материала;

$d$  – эквивалентный диаметр зерновок.

Объем параллелепипеда

$$V = h \cdot b \cdot L, \quad (4)$$

где  $b$  и  $h$  – толщина и длина молотка соответственно;

$L$  – длина пути пролета частицы без соударения.

Зависимость вероятности соударения запишем в виде

$$P_{zt} = 1 - e^{-\frac{6 \cdot K \cdot \gamma_{воз} \cdot h \cdot b \cdot L}{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma_{зерн}}}. \quad (5)$$

Численное решение уравнения (5) по нахождению вероятности соударений движущихся зерновок размером от 0,1 до 3 мм представлена на рисунке 6.

Из графиков следует, что рост вероятности столкновений, с увеличением концентрации (плотности зерновок в зоне измельчения), для мелких частиц растет значительно быстрее, чем для более крупных частиц. В связи с этим выгрузная горловина выполнена по высоте корпуса для быстрого вывода продукта.

Кроме того, созданный воздушный поток лопатками позволяет эффективнее удалять измельченную фракцию через решетку, не переизмельчая его. В данном случае поступление воздуха в дробилку происходит через небольшой

слой зерна из бункера. В случае создания недостаточного напора необходимо в зоне отрицательного давления выполнить заслонку.

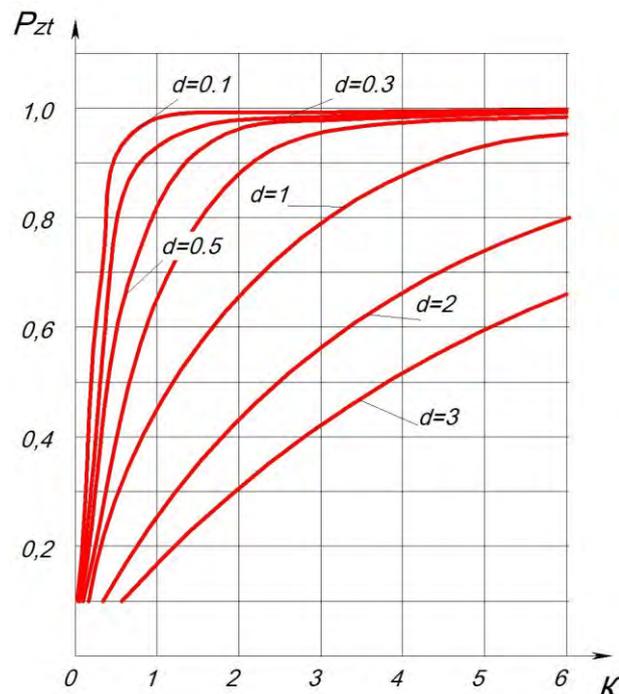


Рис. 6. Зависимость вероятности соударения  $P_{zt}$  от концентрации  $K$  и диаметра зерен  $d$ , мм

### Выводы

1. Плотность зернового слоя в зоне измельчения существенно влияет на эффективность измельчения за счет увеличения количества соударений с молотками и истирания частицами друг друга. Этому способствует увеличение статического давления, создаваемого лопатками ротора.

2. Полученные графические зависимости влияния плотности зернового слоя на интенсивность измельчения зерна для молоткового измельчителя с разгонными лопатками и ротором, расположенным в горизонтальной плоскости, позволяют определить, что при малых размерах частиц вероятность соударения и переизмельчения высокая, чем для крупных частиц. Поэтому отвод продукта необходимо производить по высоте камеры измельчения.

### Библиографический список

1. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.
2. Мельников, С. В. Аэродинамические исследования молотковых кормодробилок /

С. В. Мельников. – Текст: непосредственный // Земледельческая механика: сборник трудов. – Москва: Машиностроение, 1971. – Т. 8. – С. 270-281.

3. Ежи, К. Модернизация конструкции молоткового измельчителя для зерна / К. Ежи. – Текст: непосредственный // Агропанорама. – 2002. – № 2. – С. 16-19.

4. Садов, В. В. Теоретические предпосылки обоснования разрушения зернового материала разгонным диском в молотковой дробилке / В. В. Садов С. А. Сорокин. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (172). – С. 156-161.

5. Садов, В. В. Обоснование параметров разгонного диска на дробилках с вертикальными валами / В. В. Садов, В. А. Садовая. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 1 (51). – С. 43-46.

6. Rink R. Prawdopodobieństwo zderzenia się cząstek w przeciwbieżnych strumieniach mieszanin powietrza z materiałem. *Cement - Wapno - Gips*, 1974, 29 (41), s. 180-184.

7. Постникова, И. В. Расчет процесса измельчения частиц при их столкновении в противоточных струях / И. В. Постникова, В. Н. Блиничев, Я. Кравчик. – Текст: непосредственный // Czasopismo Techniczne. z. 2-M. – 2008. – S. 301-310.

## References

1. Melnikov, S.V. Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia zhivotnovodcheskikh ferm / S.V. Melnikov. – Leningrad: Kolos, 1978. – 560 s.

2. Melnikov S.V. Aerodinamicheskie issledovaniia molotkovykh kormodrobilok // Zemledelcheskaia mekhanika: Sb. tr. – Moskva: Mashinostroenie, 1971. – Т. 8. – S. 270-281.

3. Ezhi K. Modernizatsiia konstruksii molotkovogo izmelchitelia dla zerna // Agropanorama. – 2002. – No. 2. – S. 16-19.

4. Sadov, V.V. Teoreticheskie predposylki obosnovaniia razrusheniia zernovogo materiala razgonnym diskom v molotkovoii drobilke / V.V. Sadov, S.A. Sorokin // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 2 (172). – S. 156-161.

5. Sadov, V.V. Obosnovanie parametrov razgonnogo diska na drobilkakh s vertikalnymi valami / V.V. Sadov, V.A. Sadovaia // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – No. 1 (51). – S. 43-46.

6. Rink R. Prawdopodobieństwo zderzenia się cząstek w przeciwbieżnych strumieniach mieszanin powietrza z materiałem. *Cement - Wapno - Gips*, 1974, 29 (41), s. 180-184.

7. Postnikova I.V., Blinichev V.N., Kravchik Ia. Raschet protsessa izmelcheniia chastits pri ikh stolknoventii v protivotochnykh struiakh // Czasopismo Techniczne. z. 2-M/2008. S. 301-310.



УДК 631.3.004.67

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-86-93

С.Ю. Журавлев  
S.Yu. Zhuravlev

## ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКТАЦИИ КОЛЕСНОГО 4К4 ТРАКТОРА НА ЕГО ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

## INFLUENCE OF A WHEELED 4K4 TRACTOR CONFIGURATION ON ITS TRACTION AND ENERGY PERFORMANCE

**Ключевые слова:** комплектация, трактор, двигатель постоянной мощности, переменная нагрузка, обработка почвы, тягово-энергетические показатели, эксплуатационная масса.

Цель работы – анализ влияния различных комплектаций (использование балластных грузов и сдвоенных колес) колесного 4К4Б трактора на его технико-экономические показатели с учетом воздействия пере-

менной внешней нагрузки. В ходе анализа результатов вычислительного эксперимента по вероятностной оценке параметров стендовой характеристики двигателя ЯМЗ-53625 трактора К-424 «Кировец» установлены следующие закономерности. В области номинального момента  $M_{к.н.}$  при значении коэффициента вариации крутящего момента  $v_M = 0,2$  недоиспользование (снижение) мощности дизеля  $N_e$  достигает почти 8%, т.е. от 171 до 158 кВт. В области стендовой характеристики,