



*Молотковая дробилка,
ротор, частота
вращения, дробильная
камера, рабочая
атмосфера*

*Hammer crusher,
rotor, speed,
beater chamber,
working atmosphere*

Научная статья
УДК 631.354.2
doi:10.35694/YARCX.2021.56.4.013

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ РАБОЧЕЙ АТМОСФЕРЫ

Ф. А. Киприянов¹ (фото)
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергетических
средств и технического сервиса
А. В. Палицын¹
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергетических
средств и технического сервиса
В. А. Сухляев¹
аспирант инженерного факультета
С. А. Белозеров¹
аспирант инженерного факультета
¹ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, г. Вологда-Молочное

Анализ современного состояния молочного животноводства характеризуется сокращением поголовья животных, устареванием материально-технической базы, повышением себестоимости сельскохозяйственной продукции, а также зависимостью от субсидий государства [1]. На развитие материально-технической базы в условиях Северо-Запада России воздействует ряд сложных и далеко не очевидных факторов, оказывающих существенное влияние на издержки предприятия [2].

Наиболее распространённым способом подготовки концентрированного корма к скармливанию выступает процесс измельчения дроблением [3]. В настоящее время существует большое количество различных конструкций молотковых дробилок, которые применяются во многих отраслях промышленности, в том числе и в сельском хозяйстве. Повсеместное использование молотковых дробилок обосновано их высокой надёжностью и более низким потреблением энергии [4].

Дальнейшее расширение возможностей и применимости использования дробилок требует углубленного исследования процессов, протекающих в рассматриваемых машинах, точного анализа характеристик получаемого продукта и оптимизации энергозатрат рабочего процесса при переработке зерна.

Целью исследования является разработка конструкции молотковой дробилки с возможностью регулирования параметров искусственно создаваемой рабочей атмосферы для повышения энергоэффективности процесса измельчения зерна.

Материалы и методы

Методологической основой исследования являются фундаментальные положения, опубликованные в трудах учёных, занимав-

шихся проблемами энергосбережения в аграрном производстве, а также результаты исследований научных организаций, занимающихся вопросами приготовления кормов в сельском хозяйстве. Экспериментальные результаты исследования процесса измельчения в зерновой дробилке и определение оптимальных теоретических и технологических параметров, полученных в лабораторных и производственных условиях, основаны на использовании математических, физических и статистических методов.

Результаты

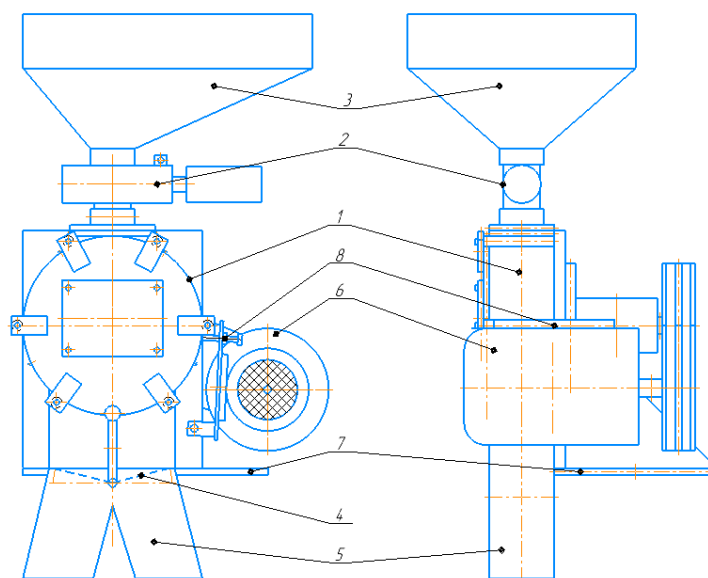
Экспериментальный измельчитель (рис. 1) состоит из молотковой дробилки закрытого типа, питателя зернового материала барабанного типа, что необходимо для равномерной подачи материала в дробилку и оптимизации процесса дробления. Ниже камеры измельчения, со сменными рабочими органами, имеется разгрузочная горловина с заслонкой и управляемым рычагом, а также управляемый рычаг (впоследствии преобразованный в механизм управления) и стабилизирующая пружина, обеспечивающая процесс изменения направления потоков измельчённого материала и фиксацию положения, чтобы точно отделить образцы для анализа эффективности процесса измельчения.

Экспериментальный измельчитель работает следующим образом. При включении электродвигателя дробилки обеспечивается процесс подготовки измельчителя с набором оборотов и раз-

гоном ротора, чтобы убедиться, что все системы машины работают правильно и нет посторонних шумов. После этого включается привод питателя, обеспечивающий непрерывную и оптимальную подачу материала через загрузочное устройство из бункера в дробильную камеру, где материал в результате соударения с движущимися рабочими органами и деками измельчается до заданной крупности и в процессе просеивается через сменное решето. Далее измельчённая масса проходит по каналу и перекидной заслонке и подаётся в соответствующую сборную ёмкость.

Выбранные конструкции рабочих органов основываются следующими факторами:

1. Образование отдельных по размерам слоёв частиц измельчённого материала в дробильной камере молотковой дробилки создаёт предпосылки для повышения энергоёмкости процесса измельчения зерна и неравномерности его гранулометрического состава. Это значительно затрудняет ударное воздействие молотков и разрушение крупных частиц продукта, закрывающих сепарирующую поверхность решета, что мешает удалению мелких частиц из дробильной камеры и приводит к переизмельчению материала и повышению энергозатрат. На начальном этапе исследования проведены поисковые эксперименты и определены сочетания рабочих органов и вариации запланированных режимов работы для эффективного измельчения материалов в соответствии с требованиями гранулометрического состава измельчаемого продукта при кормлении животных.



- 1 — корпус измельчителя; 2 — питатель — дозатор с приводным электродвигателем; 3 — загрузочный бункер;
4 — перекидная заслонка; 5 — выгрузные растрески; 6 — электродвигатель привода измельчителя;
7 — опорная плита; 8 — механизм натяжения приводных ремней.

Рисунок 1 — Конструктивно-технологическая схема измельчителя

2. На оптимальном варианте измельчителя с комбинацией различных факторов, влияющих на процесс и способствующих определению эффективности его работы с сохранением оптимальных параметров измельчаемого продукта, проведены исследования процесса совершенствования технологии измельчения зерна для приготовления концентрированных кормов.

3. Испытания конструкции проведены в специально подготовленной изолированной камере, обеспечивающей изменение не только рабочих параметров измельчителя, но и среды, в которую будет помещена конструкция.

Затраты мощности на циркуляцию воздуха через дробилку (вентиляторный эффект ротора дробилки) зависят от конструкции ротора и рабочих органов, а также конструктивных особенностей рабочей камеры дробилки [5].

Исходя из проведённого анализа, выдвинута гипотеза о том, что оптимизация параметров искусственно создаваемой рабочей атмосферы (давления) в дробильной камере молотковой дробилки будет способствовать энергоэффективности процесса измельчения зерновых материалов за счёт снижения мощностных затрат на циркуляцию воздуха через дробилку (вентиляторный эффект). Параметры рабочей среды в барокамере задавались и контролировались компрессорно-вакуумной установкой.

Затраты мощности на дробление и измельчение зерна обусловлены как физико-механическими характеристиками измельчаемого зернового

материала, так и заданными режимами измельчения. Определены экспериментально, как разность мощностей, полученных при работе по измельчению зернового материала и работе молотковой дробилки с ротором в дробильной камере [6].

Материал, полученный при проведении экспериментов, представлен в виде графика (рис. 2).

Анализ полученных графических зависимостей показывает, что при одинаковых параметрах рабочей среды в барокамере ключевым фактором, оказывающим влияние на изменение мощности привода, становится частота вращения ротора. Частота вращения ротора в экспериментах регулировалась частотным преобразователем за счёт изменения частоты питающего тока для приводного электродвигателя. В экспериментах задавались частоты питающего тока в 35, 50 и 65 герц. Скольжение электродвигателя в экспериментах не учитывалось. По результатам проведённого эксперимента можно предположить, что энергетические характеристики существующих молотковых дробилок могут быть улучшены за счёт оптимизации параметров рабочей среды (атмосферы) в рабочей камере. При этом не известны: уровень влияния параметров рабочей атмосферы в камере дробилки на подачу зерна к рабочим органам дробилки, получаемый гранулометрический состав дерти и её выгрузка из рабочей зоны дробилки. Это требует дальнейших исследований вышеприведённых параметров на лабораторной установке. Можно выдвинуть предположение, что есть оптимальные параметры разрежения, которые необходимо со-

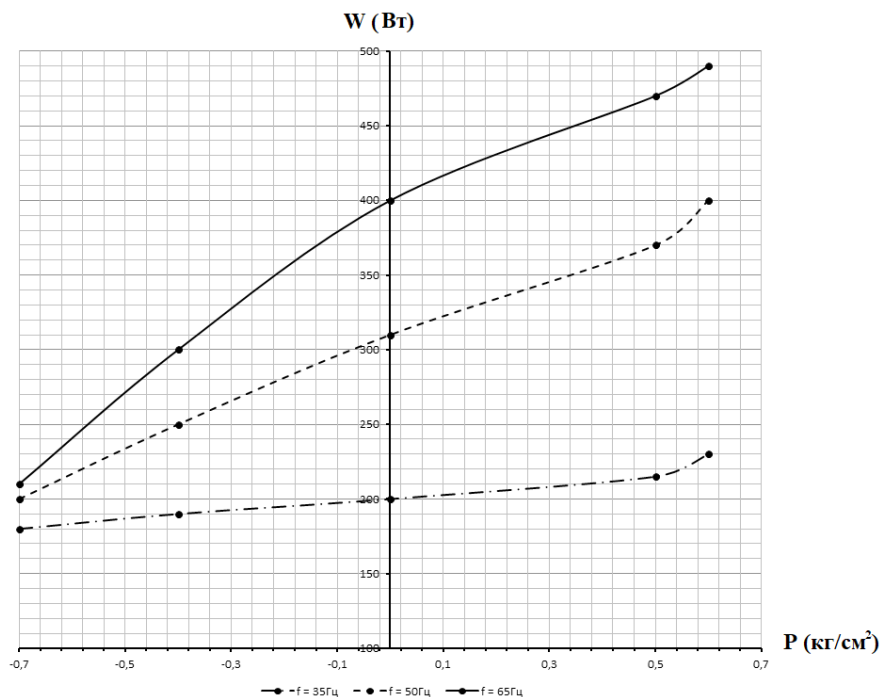


Рисунок 2 – Затрачиваемая мощность привода (Вт) в функции изменения давления в барокамере (эксперименты с вентилятором в барокамере)

питатель. Он обеспечивает линейность характеристики подачи зернового материала в широком диапазоне частот вращения, а также высокую равномерность подачи. Это обусловлено наличием пяти каналов для дозирования зернового материала, которые выполнены по внешней винтовой линии ротора с небольшим перекрытием конца одного канала началом следующего, что при вращении питателя создаёт непрерывный поток зернового материала из питающего бункера в дробильную камеру.

Поисковые эксперименты по исследованию энергетических характеристик проведены на разработанной экспериментальной молотковой дробилке. В конструкции дробилки предусмотрена возможность смены роторов с рабочими органами, бесступенчатое регулирование их частоты вращения, а также изменение способа подачи зернового материала на измельчение: осевое или радиальное. Частота вращения приводного электродвигателя задавалась посредством частотного преобразователя С 200-4Т-0037. Частота вращения ротора контролировалась по оптическому тахометру ДО-03-02. Подача зернового материала на измельчение осуществлялась шнековым доза-

тором с питанием от частотного преобразователя ЕЗ-8100К-S2L.

Сравнительный анализ четырёх конструкций роторов проведён в рамках эксперимента энергетических характеристик дробилки: молоткового ротора с 32-мя ступенчатыми молотками на свободном подвесе, молоткового ротора с 32-мя прямоугольными молотками на свободном подвесе, молотково-лопастного ротора с 32-мя прямоугольными молотками на свободном подвесе и лопастного ротора с 8-ю жестко закреплёнными лопастями. Диаметры роторов по концам молотков и лопастей изготовлены одинаково.

Рациональным диапазоном скоростей рабочих органов молотковых дробилок для измельчения зерновых материалов считается диапазон от 40 до 60 м/с [7]. В экспериментах по исследованию энергетических затрат на привод различных конструкций роторов дробилки частотным преобразователем задавались частоты вращения ротора для получения скоростей рабочих органов от 30 до 70 м/с с шагом в 10 м/с (рис. 4). Эксперименты проведены без подачи зернового материала в дробильную камеру молотковой дробилки.

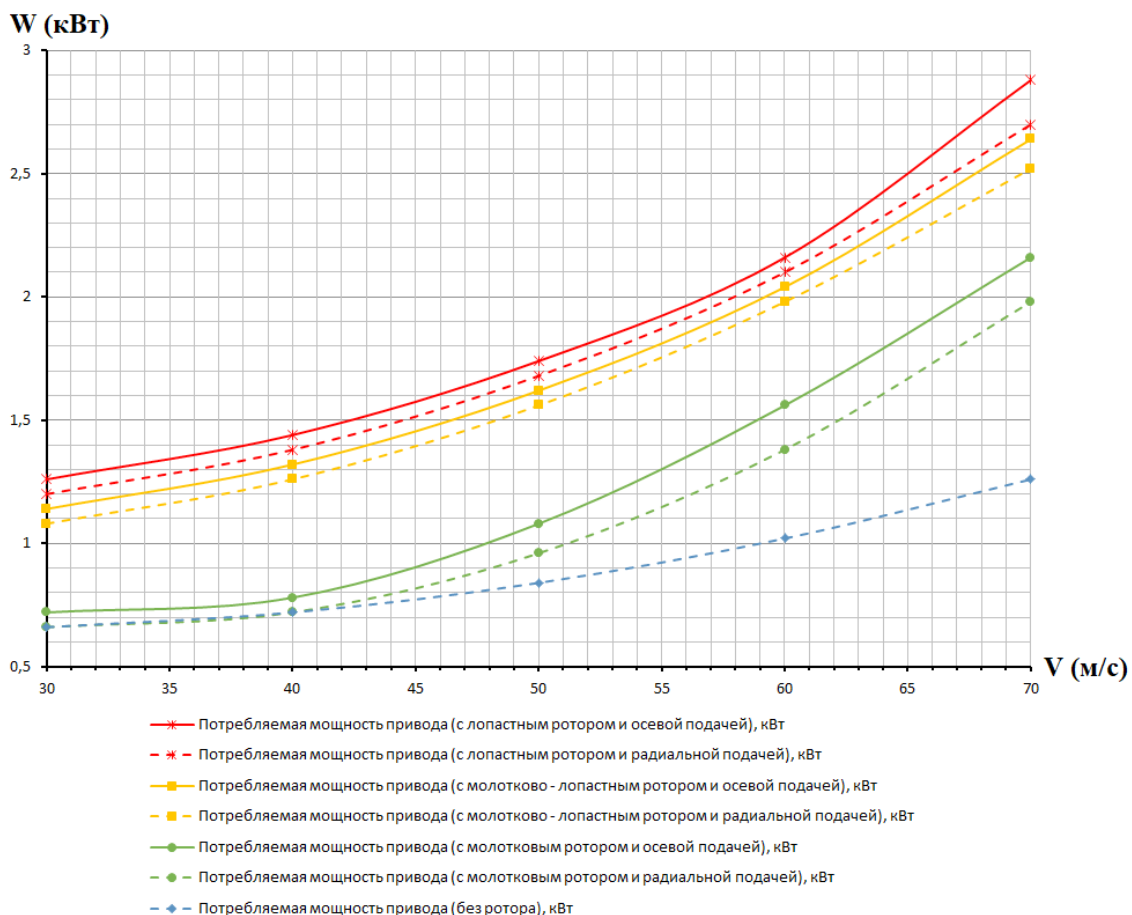


Рисунок 4 – Энергетические затраты на привод различных конструкций роторов дробилки

здавать в рабочей камере дробилки. Дальнейшее повышение разряжения в камере будет способствовать росту энергетических издержек на вакуумное оборудование.

Функционирование питателя дробилки оказывает существенное влияние на энергетические показатели процесса измельчения зерновых материалов и гранулометрические параметры получаемого измельчённого продукта на выходе из дробильной камеры. Для определения характеристик

питателей по массе подаваемого зернового материала проведён ряд экспериментов, которые выполнены в статическом режиме работы питателя (без установки на экспериментальную дробилку). Частота вращения питателя регулировалась изменением частоты питающего тока, подаваемого на приводной электродвигатель питателя. Результаты экспериментов приведены в таблице 1 как в формате минутной, так и часовой производительности по подаче зернового материала.

Таблица 1 – Экспериментальные данные для определения подачи питателей на различных частотах вращения приводного электродвигателя

Показатель	Значение частоты, задаваемое на частотном преобразователе, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Характеристики двухзаходного шнекового питателя (d = 26 мм)								
Подача, кг/мин (кг/ч)	0,86 (51,6)	1,1 (66,0)	1,36 (81,8)	1,67 (100,2)	1,98 (118,8)	2,29 (137,3)	2,54 (152,4)	2,79 (167,4)
Характеристики однозаходного шнекового питателя (d = 56 мм)								
Подача, кг/мин (кг/ч)	4,614 (276,84)	9,172 (550,32)	12,478 (748,68)	14,660 (879,6)	16,466 (987,96)	17,632 (1057,92)	18,528 (1111,68)	19,230 (1153,8)
Характеристики пятизаходного роторного питателя (d = 60 мм)								
Подача, кг/мин (кг/ч)	1,448 (86,88)	2,573 (154,38)	3,638 (218,28)	4,727 (283,62)	5,811 (348,66)	6,973 (418,38)	7,913 (474,78)	8,937 (536,22)

Для питателя важны такие параметры, как линейность характеристики и равномерность подачи зернового материала на рабочем участке. Для проведения сравнительного анализа минутные подачи трёх питателей, в зависимости от частоты

питающего тока приводного электродвигателя, приведены на рисунке 3.

По результатам проведённых исследований – для работы с экспериментальной дробилкой наиболее предпочтителен пятизаходный роторный

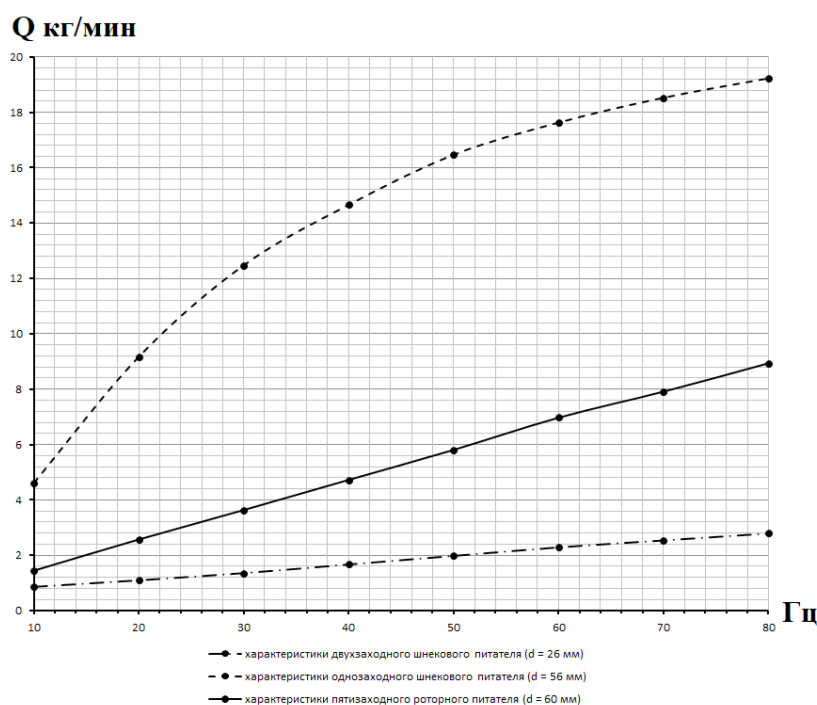


Рисунок 3 – Подача зернового материала питателями

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что переустановка питателя зернового материала с радиальной на осевую подачу приводит к увеличению затрат мощности на привод ротора дробилки при прочих равных условиях работы. Вариация по лопастному ротору составляет $2,8 \div 6,7\%$, по молотково-лопастному ротору $3,0 \div 5,5\%$ и по молотковому $8,3 \div 13,0\%$ соответственно. Причиной увеличения затрат мощности на привод ротора при переустановке питателя зернового материала является приращение вентиляторного эффекта ротора и изменение движения воздушного потока внутри дробильной камеры.

Приращению вентиляторного эффекта и повышению затрат мощности на привод ротора способствует увеличение площади лопаток ротора.

По сравнению с затратами мощности привода без ротора, вариация по лопастному ротору составляет $90,9 \div 128,5\%$, по молотково-лопастному ротору $72,7 \div 109,5\%$ и по молотковому $9,0 \div 71,4\%$ соответственно, для осевой установки питателя зернового материала.

На следующем этапе экспериментов исследовано влияние размера решета (4 мм и 5,5 мм) при различных видах подачи зернового материала в дробильную камеру (осевой или радиальной) на удельные энергозатраты при варьировании скоростей рабочих органов дробилки. Полученные результаты приведены на графике, рисунок 5.

Результаты экспериментальных исследований доказывают, что переустановка решета с отверстиями 5,5 мм на решето с отверстиями 4 мм при-

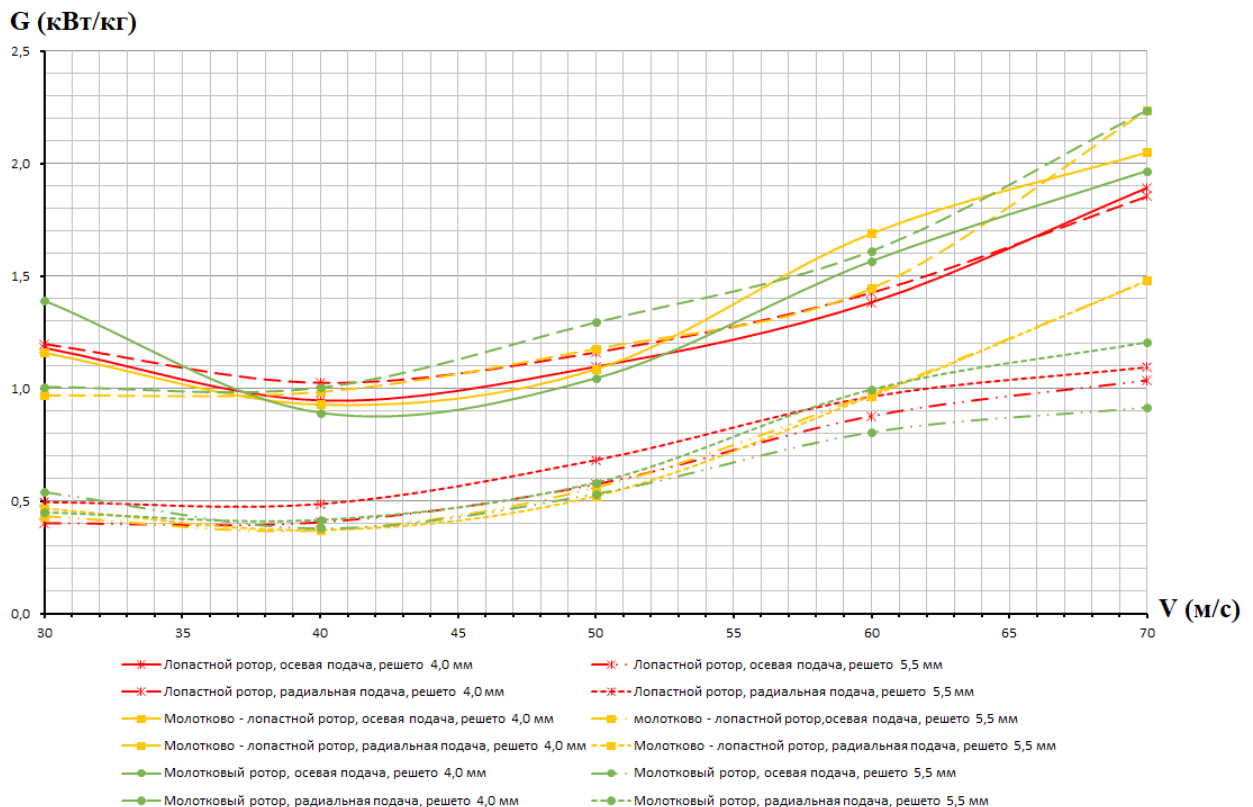


Рисунок 5 – Энергозатраты (кВт/кг) в функции скорости рабочих органов

водит к увеличению удельных энергозатрат при прочих равных условиях работы. Графические материалы свидетельствуют о том, что наименьшие энергозатраты при измельчении зернового материала приходятся на диапазон скоростей рабочих органов в $40 \pm \Delta$ м/с. Вариация энергозатрат для решета с отверстиями 5,5 мм на различных видах роторов составляет $0,37 \div 0,48$ кВт/кг. При установке решета с отверстиями 4 мм вариация энергозатрат на различных видах роторов составляет $0,89 \div 1,02$ кВт/кг.

Выводы

Молотковый ротор, по сравнению с лопастным, при прочих равных условиях, имеет меньшие удельные энергозатраты на процесс измельчения зерновых материалов. Наименьшие удельные энергозатраты в экспериментах получены для решета с отверстиями 5,5 мм. При установке решета с отверстиями 4 мм энергозатраты на процесс измельчения зерновых материалов возрастают. При этом модуль помола зернового материала имеет обратно пропорциональную степенную

зависимость по отношению к удельным энергозатратам. Подача зернового материала в дробильную камеру (осевая или радиальная) также влияет как на удельные энергозатраты процесса измельчения, так и на гранулометрические характеристики получаемой дерти. Наименьшие энергозатраты

получены на радиальной подаче зернового материала в дробильную камеру. При этом более равномерный гранулометрический состав получаемой в процессе измельчения дерти наблюдается на осевой подаче зернового материала в дробильную камеру.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Медведева, Н. А. Сценарии развития сельского хозяйства региона / Н. А. Медведева. – Текст : непосредственный // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика. – 2014. – № 3 (35). – С. 60–64. – ISSN 2073-9338.
2. Medvedeva, N. A. Assessment of Company Competitive Advantage Strategy Through Supply Chain / N. A. Medvedeva, A. O. Merenkov, E. V. Medvedeva. – Text : unmediated // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 778–783.
3. Kipriyanov, F. A. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding / F. A. Kipriyanov, P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov. – Text : unmediated // Journal of Water and Land Development. – 2021. – Т. 49, № 4–6. – С. 74–78.
4. Kipriyanov, F. A. Assessment of technical provision in agricultural sector of Russia / F. A. Kipriyanov, P. A. Savinykh. – Text : unmediated // EurAsian Journal of BioSciences. – 2019. – Т. 13, № 2. – P. 1651–1658.
5. Кишкилев, С. В. Математическая модель измельчения зернового сырья / С. В. Кишкилев, В. П. Попов, Д. С. Кобылкин. – Текст : непосредственный // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2017. – № 8. – С. 67–70. – ISSN 2077-7175.
6. Савиных, П. А. Термическая обработка зерна как способ повышения его усвояемости / П. А. Савиных, А. Ю. Исупов, Ф. А. Киприянов. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 2. – С. 31–40. – ISSN 1995-4646.
7. Сысуйев, В. А. Комбинированные расчётные схемы в математических моделях процессов фракционирования зерна / В. А. Сысуйев, А. В. Алёшкин, Ю. В. Сычугов, А. Ю. Исупов. – Текст : непосредственный // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 4. – С. 24–29. – ISSN 1995-4301.

References

1. Medvedeva, N. A. Scenarii razvitija sel'skogo hozjajstva regiona / N. A. Medvedeva. – Tekst : neposredstvennyj // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo universiteta servisa. Serija: Jekonomika. – 2014. – № 3 (35). – S. 60–64. – ISSN 2073-9338.
2. Medvedeva, N. A. Assessment of Company Competitive Advantage Strategy Through Supply Chain / N. A. Medvedeva, A. O. Merenkov, E. V. Medvedeva. – Text : unmediated // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 778–783.
3. Kipriyanov, F. A. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding / F. A. Kipriyanov, P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov. – Text : unmediated // Journal of Water and Land Development. – 2021. – Т. 49, № 4–6. – С. 74–78.
4. Kipriyanov, F. A. Assessment of technical provision in agricultural sector of Russia / F. A. Kipriyanov, P. A. Savinykh. – Text : unmediated // EurAsian Journal of BioSciences. – 2019. – Т. 13, № 2. – P. 1651–1658.
5. Kishkilev, S. V. Matematicheskaja model' izmel'chenija zernovogo syr'ja / S. V. Kishkilev, V. P. Popov, D. S. Kobylkin. – Tekst : neposredstvennyj // Intellekt. Innovacii. Investicii. – 2017. – № 8. – S. 67–70. – ISSN 2077-7175.
6. Savinykh, P. A. Termicheskaja obrabotka zerna kak sposob povyshenija ego usvojaemosti / P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov, F. A. Kipriyanov. – Tekst : neposredstvennyj // Mezhdunarodnyj tehniko-jekonomicheskij zhurnal. – 2021. – № 2. – S. 31–40. – ISSN 1995-4646.
7. Sysuev, V. A. Kombinirovannye raschjotnye shemy v matematicheskijh modeljah processov frakcionirovanija zerna / V. A. Sysuev, A. V. Aleshkin, Yu. V. Sychugov, A. Yu. Isupov. – Tekst : neposredstvennyj // Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija. – 2018. – № 4. – S. 24–29. – ISSN 1995-4301.