

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Китун, А. А. Романович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА
МЕХАНИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕРНОФУРАЖА
К СКАРМЛИВАНИЮ**

Минск
БГАТУ
2020

Китун, А. В. Энергоэффективные технологии и средства механизации подготовки зернофуража к скармливанию / А. В. Китун, А. А. Романович. – Минск : БГАТУ, 2020. – 156 с. – ISBN 978-985-25-0048-7.

Рассмотрены способы подготовки зернофуража к скармливанию и машины для их реализации, приведено теоретическое обоснование параметров многофункционального модульного измельчителя кормов и гидродиспергатора, изложена методика экспериментальных исследований по определению их оптимальных конструктивных параметров.

Для магистрантов, аспирантов, конструкторов и научных работников.

Табл. 34. Ил. 52. Библиогр.: 65 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 20 января 2020 г.)

Рецензенты:

главный научный сотрудник РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *В. И. Передня*;
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии
и механизации животноводства Белорусского государственного
аграрного технического университета *Ф. Д. Сапожников*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ КОРМОВЫХ КОМПОНЕНТОВ РАЦИОНА ЖИВОТНЫХ	
1.1. Анализ кормовых компонентов рациона крупного рогатого скота	6
1.2. Анализ кормовых компонентов рациона свиней	10
2. СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ КОРМОВ К СКАРМЛИВАНИЮ И МАШИНЫ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ	
2.1. Подготовка к скармливанию зернофуража влажностью до 14 %	16
2.2. Подготовка к скармливанию зернофуража влажностью от 14 до 40 %	22
2.3. Измельчители корнеклубнеплодов	28
2.4. Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального измельчителя-смесителя кормов	30
2.5. Способ приготовления заменителей цельного молока	33
2.6. Гидродинамический способ повышения усвояемости зернофуража	35
2.7. Оборудование для влаготепловой обработки зернофуража	38
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДУЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВ	
3.1. Исследование геометрических параметров рабочих органов измельчителя вертикального типа	48
3.1.1. Обоснование выбора толщины ножа	51
3.1.2. Определение величины угла заточки ножа в измельчителе кормов вертикального типа	55
3.1.3. Определение параметров рифленых дек	59
3.1.4. Исследование процессов сепарации продуктов измельчения через ситовую поверхность	64
3.1.5. Определение затрат энергии на привод измельчителя кормов вертикального типа	70
3.1.6. Теоретико-вероятностное исследование процесса измельчения кормов	73
3.2. Исследование процесса перемещения кормов по внутренней поверхности рабочей камеры	78

3.3. Экспериментальные исследования	
по определению оптимальных конструктивных параметров модулей для измельчения зерновых кормов любой влажности к многофункциональному измельчителю вертикального типа.....	85
3.3.1. Программа исследований.....	85
3.3.2. Методика исследований.....	89
3.3.3. Определение оптимальных конструктивных параметров модуля для измельчения зерна влажностью до 14 %	92
3.3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований	104
3.3.5. Определение числа ярусов решет модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 %.....	109
3.3.6. Параметры модулей для измельчения зернофуража влажностью до 14 % и влажностью от 14 до 40 %.....	113
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОДИСПЕРГАТОРА	
4.1. Определение параметров рабочих органов установки для гидродинамической обработки зерна.....	116
4.2. Энергетический расчет установки для влаготепловой обработки зерна	126
4.3. Экспериментальные исследования по определению параметров рабочих органов и режимов работы гидродиспергатора	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150

ВВЕДЕНИЕ

В новых условиях хозяйствования, в рамках Таможенного союза и Единого экономического пространства, необходимо работать в жестких условиях глобальной конкуренции. Со вступлением России, основного торгового партнера Республики Беларусь, во Всемирную торговую организацию (ВТО), она будет только возрастать.

В сельском хозяйстве Республики Беларусь явный приоритет принадлежит животноводству. Именно в этой отрасли формируется около 80 % выручки от реализации сельскохозяйственной продукции, а на основе ее переработки – более 90 % аграрного экспортного потенциала. В перспективе перед агропромышленным комплексом страны стоит ряд крупных задач. Главное в этом направлении – выйти к 2021 году на уровень продуктивности дойного стада в среднем по республике не менее 6,5 т молока, на откорме крупного рогатого скота – не менее 1000 г в сутки. Годовое производство молока приблизится к 15 млн т, а говядины – не менее 1,4 млн т [1].

Рыночная экономика не принимает принцип производства продукции «любой ценой». В рыночных условиях конкурентоспособной продукцией является та, которая имеет лучшее качество и меньшую стоимость, т. е. действуют два фактора – цена и качество.

В условиях рыночных отношений на первый план выходят проблемы организации рентабельного производства продукции животноводства, где определяющим фактором являются корма, которые в структуре себестоимости продукции составляют 55...70 % от общих затрат.

Повышение продуктивности животных, снижение затрат кормов на единицу продукции невозможны без эффективного использования кормов, основу которых составляют концентрированные корма.

Республика ежегодно убирает свыше 4 млн т зерна на фуражные цели, и более половины из них повышенной влажности (20–40 %). В последние годы все большее распространение получает технология консервирования влажного плющеного зерна. Как показали исследования РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству», усвояемость плющеного зерна животными не превышает 60 % [2].

Ведутся поиски и апробации различных способов по эффективному использованию зерна, в т. ч. консервированного.

1. АНАЛИЗ КОРМОВЫХ КОМПОНЕНТОВ РАЦИОНА ЖИВОТНЫХ

1.1. Анализ кормовых компонентов рациона крупного рогатого скота

В зависимости от физиологического состояния и продуктивности животных формируются рационы кормления крупного рогатого скота [3–6], которые составляются исходя из норм потребности животных в сухом веществе, обменной энергии, протеине, жире, углеводах, минеральных веществах и витаминах. Учитывается процент жира в молоке, уровень продуктивности животных, стадия лактации, стельность, возраст, живая масса [7–9].

Исследованиями установлено, что сбалансированный по питательности кормовой рацион позволяет на 15...20 % увеличить усвояемость кормов [10, 11]. В табл. 1.1 и 1.2 представлены примерные рационы для лактирующих коров и молодняка, находящегося на дорациивании и откорме [12].

Таблица 1.1

Примерные рационы для лактирующих коров

Рацион	При суточном удое, кг		
	15	20	25
Состав:			
Сено, кг	2	2	4
Сенаж, кг	16	18	18
Силос, кг	16	13	13
Корнеплоды, кг	13	16	16
Комбикорм, кг	3,7	5,8	6,0
Патока, кг	0,5	0,5	0,5
Содержание:			
Обменная энергия, МДж	12,5	15,1	17,4
Переваримый протеин, г	1245	1540	1980
Фосфор, г	75	92	95
Кальций, г	85	105	120
Каротин, г	552	641	750

Таблица 1.2

Примерный рацион на дорастивании и откорме

Корм, кг	Возраст молодняка, мес.			
	4...8	8...12	12...15	15...18
Сено	1,0	1,0	1,0	1,0
Солома	1,0	1,0	2,0	2,0
Силос	12,0	15,0	20,0	18,0
Комбикорм	1,0	2,0	2,50	3,70
Патока	0,50	0,50	1,0	1,20
Минеральный премикс	0,05	0,06	0,07	0,08
Мочевина	0,06	0,07	0,07	0,06
Монокальцийфосфат	0,02	0,03	0,03	0,03
Соль	0,03	0,04	0,05	0,06

Приведенные в табл. 1.1 и 1.2 данные показывают, что в рацион животных включается по питательности до 70 % стебельчатых и до 25 % высокоэнергетических кормов, а также жидкие корма. Для телят молочного периода жидкие корма являются основными.

Питательными молокогонными кормами являются силос и сенаж, составляющие в структуре рациона животных по питательности 10...50 % [13].

Силос возбуждает у животных аппетит, улучшает усвоение питательных веществ других кормов. За счет силоса в значительной мере удовлетворяется потребность животных в каротине и минеральных веществах. Силосованные стебельчатые корма скармливают в измельченном виде. Длина резки частиц зеленой массы для силоса не должна превышать 20 мм [14].

Сенаж хорошего качества по биологической и кормовой ценности наиболее близок к зеленым растениям. Питательность сенажа зависит от влажности, степени измельчения, плотности укладки, сроков укладки и составляет 0,2...0,36 к. ед. в 1 кг корма [7]. Размер частиц сенажа находится в пределах 30...80 мм [15, 16].

Измельчение зеленой массы при заготовке силоса и сенажа на хранение позволяет выдавать эти корма в кормушки животным кормораздатчиком при выемке их из хранилищ.

Значительное место в рационах жвачных животных, особенно молодняка КРС и сухостойных коров в зимний период, занимает сено [17]. Качество сена зависит от ботанического состава трав,

сроков уборки и способов хранения. Для жвачных животных сено может составлять 4...10 % общей питательности рациона. Оно является источником питательных веществ, протеина, минеральных элементов, витаминов, влияет на интенсивность бактериального синтеза аминокислот, белков.

Корнеклубнеплоды характеризуются большим содержанием воды (70...90 %), малым количеством протеина (1...2 %), жира, клетчатки. Основную массу сухого вещества корнеклубнеплодов составляют углеводы – крахмал и сахар. Корнеплоды бедны кальцием и фосфором (0,3...0,4 %) и богаты витамином С.

Протеин корнеплодов содержит значительное количество лизина и триптофана. Корнеплоды обладают молокогонным и диетическим действием и благоприятно влияют на переваримость и усвояемость питательных веществ сухих кормов в зимнем рационе, поэтому корнеклубнеплоды должны скармливаться в составе рациона, богатого сухими веществами, белком и зольными элементами [2, 18–20].

Зерновые корма (табл. 1.3), имея высокую питательность, значительно отличаются от других кормов как по общему составу, так и по содержанию протеина, минеральных веществ и витаминов. Умеренная дача зерновых кормов повышает питательность и полноценность кормовых рационов и способствует увеличению продуктивности сельскохозяйственных животных. С помощью зерновых кормов во всех странах балансируют рационы по питательности.

Таблица 1.3

Химический состав, переваримость и питательность зерновых кормов

Показатель	Ячмень	Овес	Рожь
Химический состав, %:			
сухого вещества	87	87	84
протеина	11,6	10,4	11,9
белка	10,8	9,1	10,1
жира	2,2	4,9	1,9
клетчатки	4,8	10,4	2,3
безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ)	65,6	57,3	66,1
золы	2,8	4,0	1,8
Коэффициент переваримости, %:			
протеина	70,7	77,7	83,0
жира	90,5	83,4	65,0

Показатель	Ячмень	Овес	Рожь
клетчатки	33,4	25,3	53,0
БЭВ	92,0	77,0	92,0
Питательность 1 кг корма:			
обменная энергия, МДж	1,21	1,00	1,14
переваримый протеин, г	81,0	85,0	100
кальций, г	1,2	1,4	0,7
фосфор, г	3,3	3,3	3,2

Клетчатка, содержащаяся в больших количествах в зерне и бобах, особенно в их верхних защитных слоях и оболочках, без специальной обработки трудноусвояема [18, 19, 21].

Рапс и рапсовый шрот включаются в состав кормов также в ограниченном количестве, несмотря на значительное содержание в них белка и жиров. Невысока отдача и других видов шротов, что связано с повышенным содержанием глюкозинолатов и их производных, которые относятся к токсичным веществам. Глюкозинолаты являются сложными органическими соединениями, включающими глюкозу и аглюкон. Под воздействием фермента микрозиназы глюкозинолаты гидролизуются с образованием циклических соединений – нитрилов и других подобных веществ, отрицательно влияющих на функцию щитовидной железы, печени и пищеварительного тракта животных. Кроме того, на поверхности зернофуража, особенно консервированного плющеного, содержится различная патогенная микрофлора и плесневые грибки, которые увеличивают группу антипитательных веществ [18, 19, 21].

Таким образом, рацион составляется исходя из норм потребности животных в переваримом протеине, жире, клетчатке, сахаре, крахмале, минеральных веществах и витаминах. Учитывается уровень продуктивности животных. Для кормления крупного рогатого скота используются корма с различными физико-механическими свойствами, производство которых можно организовать на каждом объекте хозяйствования.

Анализ показал, что только зерновые корма, имея высокую питательность, значительно отличаются по химическому составу от других кормов.

Можно сделать вывод, что для сбалансированного скормливания и механизации процесса раздачи кормов животным такие корма,

как зернофураж и корнеклубнеплоды, требуют предварительной подготовки. Общая технологическая операция для этих кормов – измельчение. Дополнительным источником кормов на фермах КРС служат отходы переработки пищевого сырья.

1.2. Анализ кормовых компонентов рациона свиней

Для нормальной жизнедеятельности свиньи нуждаются в постоянном поступлении питательных веществ с кормом. К таким веществам относятся органические соединения (протеин, аминокислоты, жиры и углеводы), минеральные вещества (макро- и микроэлементы), витамины и другие биологически активные вещества (ферменты, гормоны). Особую роль в питании и обменных процессах играет вода. Свиньям требуется около 80 элементов питания, из которых 25 они должны получить с кормом, остальные же синтезируются в организме.

Расход энергии на поддержание жизни складывается из постоянных и переменных величин. К первым относятся минимальные затраты на основной обмен – энергия на кровообращение, дыхание, деятельность нервной, эндокринной и других внутренних систем, причем основной обмен определяется возрастом и величиной животного. Переменные затраты энергии связаны с перевариванием кормов поддерживающего рациона, обменными превращениями питательных веществ и двигательной активностью.

Уровень кормления не оказывает существенного влияния на степень использования обменной энергии для ее отложения в продукции. В то же время использование обменной энергии отдельного корма зависит от состава рациона, в который этот корм входит. Например, обменная энергия кукурузной муки использовалась для отложения жира в теле свиньи на 58...74 % в зависимости от сбалансированности рациона. Если растущее животное будет получать рацион, недостаточный по белку или по отдельной аминокислоте, то энергия в его организме будет откладываться в форме жира, а не белка, и эффективность использования обменной энергии снизится. Использовать обменную энергию из углеводов животное будет более эффективно, чем из белка. На эффективность этого процесса также влияет сбалансированность рациона по витаминам и минеральным веществам.

На осуществление жизнедеятельности, т. е. на теплопродукцию, расходуется в среднем около 50 % валовой энергии корма, 20 % теряется с калом, 5 % – с мочой и только примерно 25 % использу-

ется на образование продукции (прирост, приплод, молоко, сперма). Коэффициент использования валовой энергии корма меняется с возрастом – от 50 % у сосунов до 24 % у свиней в возрасте 6,5 месяцев. У подсвинков на откорме использование энергии зависит от его интенсивности – при среднесуточном приросте 380 г оно составляет 16 %, при 665 г – 28,5 %, при 1117 г – 45 %.

В зависимости от наличия в хозяйстве различных групп кормов можно рекомендовать три основных типа кормления свиней: с высоким содержанием концентрированных кормов (80 % и более по обменной энергии), средним (70 %) и низким (60 %). В табл. 1.4 и 1.5 представлен примерный рацион для поросят-отъемышей и поросят 2...4-месячного возраста [18].

Таблица 1.4

Примерные нормы кормления поросят-отъемышей

Показатель	Живая масса, кг	
	20...30	30...40
Кормовые единицы, кг	1,50	1,80
Абсолютно сухое вещество, кг	1,15	1,39
Сырой протеин, г	230	278
Переваримый протеин, г	179	217
Кальций, г	11	13
Фосфор, г	9	10
Поваренная соль, г	5	6
Каротин, мг	8	9,7

Таблица 1.5

Примерный рацион для поросят 2...4-месячного возраста (на голову в сутки)

Корм	Зимой		Летом	
	2...3 мес.	3...4 мес.	2...3 мес.	3...4 мес.
Смесь концентратов, кг	0,9	1,0	1,0	1,2
Картофель, кг	0,5	0,8	–	–
Свекла, кг	1,5	2,0	–	–
Морковь или комбисилос, кг	0,25	0,50	–	–
Зеленые корма, кг	–	–	1,5	2,0
Травяная мука, кг	0,1	0,2	–	–
Обезжиренное молоко, кг	1,0	1,0	1,0	1,0

Окончание таблицы 1.5

Корм	Зимой		Летом	
	2...3 мес.	3...4 мес.	2...3 мес.	3...4 мес.
Мел, г	20	20	20	20
Поваренная соль, г	10	15	10	15
В рационе содержится:				
к. ед., кг;	1,6	2,0	1,7	2,1
переваримого протеина, г	190	220	195	225

Данные табл. 1.4 и 1.5 свидетельствуют о том, что в рационе поросят значительную часть составляют высокоэнергетические корма.

Основная масса поросят после 4...5 месяцев передается на откорм. В хозяйствах Беларуси применяются три вида откорма: мясной, беконный и до жирной кондиции. Каждый вид откорма имеет своей целью получение в кратчайший срок наибольшего количества мяса и сала хорошего качества при наименьших затратах. На результаты откорма влияет подготовленность молодняка к откорму, возраст свиней, пол, количество и качество корма.

На мясной откорм молодняк ставят при живой массе 30...40 кг и снимают при 100...130 кг. Нормы кормления молодняка на откорме зависят от периода откорма и его интенсивности.

В первом периоде откорма до живой массы 60...70 кг, когда у животных происходит интенсивный рост мышечной ткани, в структуре рациона свиней должны преобладать богатые белком корма. Во втором периоде (живая масса 70...130 кг) скармливают корма, которые благоприятно влияют на качество мясо-сальной продукции (ячмень, пшеница, горох, молочные корма, морковь, свекла, трава бобовых). Примерная структура рациона для свиней при мясном откорме с использованием различных типов кормления приведена в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Примерная структура рациона для свиней мясного откорма по питательности, %

Корм	Тип кормления					
	концентратный		концентратно-корнеплодный		концентратно-картофельный	
	зимой	летом	зимой	летом	зимой	летом
1	2	3	4	5	6	7
Концентраты	82...87	85...90	72...75	75...80	60...65	70...75
Корнеплоды, комбисилос	7...12	—	17...22	—	29...34	—

Окончание таблицы 1.6

1	2	3	4	5	6	7
Травяная или сенная мука	3	–	3	–	3	–
Зеленые корма	–	7...12	–	17...22	–	20...27
Корма животного происхождения	3	3	3	3	3	3

Согласно данным табл. 1.6, в рацион свиней мясного откорма в обязательном порядке, как зимой, так и летом, входят концентрированные корма, причем их доля весьма велика.

Беконный откорм применяют для получения мясной свинины высокого качества. Беконном называют особым способом просоленную и прокопченную молодую свинину, стойкую при хранении, обладающую хорошим вкусом, высокой питательностью и привлекательным внешним видом. Бекон хорошего качества получается, когда откорм подсвинков начинают в возрасте 3...4 месяцев при живой массе 30...40 кг и заканчивают не старше 8-месячного возраста при массе 80...105 кг.

Нормы кормления молодняка при беконном откорме такие же, как и при интенсивном мясном, но требования к кормам более высокие. Обязательными компонентами рациона должны быть сочные корма: сахарная и полусахарная свекла, морковь, комбисилос, тыква, картофель, молодая зелень бобовых трав. В структуру рациона для беконного откорма желательно включать концентрированные корма – 72...77 %, травяную или сенную муку – 3...5 %; сочные или зеленые корма – 15...20 %, обрат или другие корма животного происхождения – 5...10 % по общей питательности (табл. 1.7).

При беконном откорме необходимо учитывать специфическое влияние кормов на качество бекона, особенно в заключительный период. К кормам, улучшающим качество бекона, относят ячмень, пшеницу, горох, обрат, сыворотку, мясокостную, мясную и кровяную муку. Ухудшают качество бекона корма, богатые жиром: кукуруза, овес, жмыхи, отруби. Их можно использовать в ограниченном количестве в первый период откорма (кукуруза – примерно $\frac{1}{3}$ концентратной части рациона, жмыхи – не более 10 %, отруби пшеничные – не более 25 % от общей питательности).

Важным источником кормления животных являются кормовые отходы переработки сельскохозяйственного сырья, такие как барда, патока и пивная дробина.

Таблица 1.7

Примерный рацион для беконного откорма свиней (на голову в сутки)

Корм	Живая масса, кг			
	зимой		летом	
	20...60	60...100	20...60	60...100
Ячмень, кг	1,1	1,7	1,2	2,0
Горох, кг	0,15	0,25	0,15	0,25
Отруби пшеничные, кг	0,15	0,20	0,15	0,20
Мука мясокостная, кг	—	0,15	—	0,10
Дрожжи кормовые, кг	0,05	0,10	0,05	0,10
Обрат, кг	3,0	—	2,0	—
Травяная мука бобовых, кг	0,15	0,25	—	—
Корне- и клубнеплоды, кг	1,3	2,5	—	—
Зеленая масса бобовых, кг	—	—	2,0	3,0
Мел, г	—	10	—	5,0
Соль, г	22	35	22	35
В рационе содержится:				
к. ед.	2,25	3,64	2,21	3,56
переваримого протеина, г	263	376	295	443

Значительное количество побочных продуктов образуется в свекло-сахарном производстве, спиртовой, пивоваренной и дрожжевой отраслях. Эти продукты, большая часть которых представляет собой водянистые, малотранспортабельные, скоропортящиеся продукты, не всегда используются рационально [22]. В табл. 1.8 приведена характеристика кормов, полученных при переработке пищевого сырья и наиболее широко используемых в животноводстве.

Таблица 1.8

Состав и питательная ценность кормов,
полученных при переработке пищевого сырья

Корм	Содержание воды, %	Содержание сухих веществ, %	В 100 кг содержится	
			к. ед.	переваримого протеина кг
Барда	92,0...94,0	6,0...8,0	3,2...12,2	0,6...1,7
Пивная дробина	70,0...80,0	20,0...30,0	16...22	4,2

Корм	Содержание воды, %	Содержание сухих веществ, %	В 100 кг содержится	
			к. ед.	переваримого протеина кг
Свежий жом	92,5...94,0	6,0...7,5	10	0,5...0,6
Мезга карто- фельная	80,5	9,5	11	0,5
Меласса	30,1	69,9...83,7	75,0	—

Перечисленные корма содержат от 30 до 94 % воды и 0,5...1,7 кг (кроме мелассы) переваримого протеина.

Таким образом, основу рациона составляют концентрированные корма, сочные и зеленые корма. На мелких и средних фермах в рационе свиней объемистые корма занимают 25...30 % по питательности. В условиях фермерских хозяйств и подворьях населения доля их может возрасти до 50 % в рационе откармливаемых свиней. Для зернобобовых характерно высокое содержание белков (от 20 до 40 % по видам культур), минеральных веществ (фосфора, кальция, калия), микроэлементов (железа, меди, цинка, кобальта), витаминов (В₂, В₃, В₄, В₅, а также Е). В зернах злаковых и бобовых культур содержится большое количество белков и углеводов, хотя переваримость их без углубленной переработки невысока. Белки в таких культурах откладываются в значительных количествах в специализированных субклеточных формах – алейроновых зернах, окруженных единой мембраной и содержащих кристаллические белковые тела.

Мембраны выполняют роль защитных оболочек, плохо пропускающих жидкости, в т. ч. желудочный сок. Они содержат большой набор ферментов, препятствующих воздействию внешних факторов на белки. В зерновых культурах в больших количествах содержатся ингибиторы трипсина и химотрипсина.

Зерно злаковых культур наряду с белками содержит много крахмала, усвоение которого у животных происходит медленно. По данным ряда исследований, усвояемость питательного потенциала крахмала в природной форме не превышает 20...25 % в зависимости от вида культуры.

Повышение температуры зерна также приводит к разрыву связей крахмала на клеточном уровне и переводу его в более простые соединения (декстрины и сахара), особенно при наличии воды, т. е. происходит желатинизация крахмала или декстринизация его на более простые составляющие.

2. СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ КОРМОВ К СКАРМЛИВАНИЮ И МАШИНЫ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

2.1. Подготовка к скармливанию зернофуража влажностью до 14 %

Улучшить усвояемость содержащихся в зерне веществ и тем самым повысить его питательную ценность можно после предварительной подготовки, включающей различные операции, в т. ч. измельчение. Эта операция обеспечивает разрушение зерна и выполняется дробилками, которые просты по конструкции и в эксплуатации и надежны в работе [23, 26]. Измельченный дробилками зерновой продукт может сохраняться длительное время, что позволяет проводить его предварительную подготовку, более рационально использовать оборудование и рабочую силу.

Удельная энергоемкость подготовки зерна влажностью до 14 % на молотковых дробилках почти в два раза ниже, чем аналогичный показатель при подготовке зерна плющилками [27]. Более простой и менее энергоемкий способ измельчения зерна с использованием дробилок предопределил его широкое внедрение в хозяйства и создание ряда соответствующих машин. Классификация дробилок рассмотрена в работах [28, 29]. Так, применяемые для измельчения зернофуража молотковые дробилки в зависимости от организации рабочего процесса подразделяются на машины закрытого и открытого типов. В рабочей камере дробилок открытого типа материал не участвует в круговом вращении. В таких машинах продукт быстро эвакуируется из рабочей камеры. Механическим фактором измельчения в машинах этого типа является свободный удар молотка по поступающему материалу.

В дробилках закрытого типа решето и деки охватывают весь барабан. Поступающее в рабочую камеру зерно при своем перемещении совершает многократное круговое движение, концентрируясь на внутренних стенках дробильной камеры в виде воздушно-продуктового слоя. Рабочий процесс в этих машинах характеризуется тем, что материал измельчается путем многократного ударного воздействия молотков и истирания ими корма при проходе в среде рыхлого циркулирующего слоя. Дробилки с данным типом измельчающего

аппарата широко используются на технологических линиях подготовки зернофуража к скармливанию, т. к. просты по устройству и не требуют повторного измельчения зерна. По назначению они подразделяются на специализированные и универсальные.

Специализированные дробилки предназначены только для дробления зерна и состоят из горизонтально расположенной рабочей камеры, по внутреннему периметру которой закреплены деки (дробилка ДБ-5) или сочетание дек и сит (дробилка ДМ). Внутри рабочей камеры этих машин установлен ротор с молотками. Для подачи исходного материала в зону рабочих органов в поверхности рабочей камеры выполнено загрузочное окно. Удаление измельченного зерна осуществляется двумя способами. Если в рабочей камере установлены только деки (дробилка ДБ-5), то измельченное зерно поступает в разделительную камеру. Установленный в ней сетчатый сепаратор разделяет массу на мелкие и крупные фракции. Первая выводится из машины шнековым транспортером, а крупная направляется в дробильную камеру на повторный размол. При установке в рабочей камере дек и сит (дробилка ДМ) измельченное зерно удаляется из рабочей камеры через отверстия сит. Это исключает повторное поступление продукта в рабочую камеру.

К *универсальным дробилкам* относятся машины, измельчающие наряду с зерном и другие виды кормов. Они более сложны по устройству и включают в себя два измельчающих аппарата. Дробильная камера этих машин предназначена для измельчения зерновых кормов, а ножевой аппарат – для измельчения других видов кормов (рис. 2.1).

Совмещение на раме одной машины двух различных измельчающих аппаратов позволило данным дробилкам найти широкое распространение среди сельскохозяйственных предприятий. Технологический процесс работы машин этого типа одинаков.

Рассматривая универсальные дробилки применительно к измельчению зернофуража, можно отметить, что конструктивные схемы их дробильных аппаратов и специализированных дробилок одинаковы. В горизонтально расположенной рабочей камере устанавливаются рабочие органы – решето, дека и молотки. Разрушение зерна в измельчителях этого типа производится ударами частиц о неподвижную поверхность (решето или деку), друг о друга и молотками.

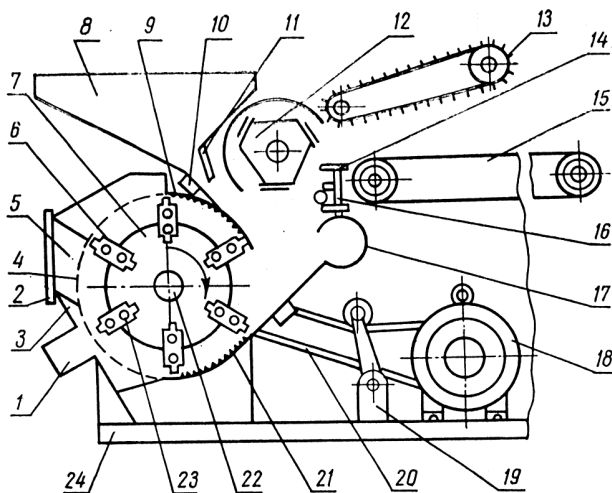


Рис. 2.1. Схема дробилки КДУ-2:

1 – отсасывающий патрубок; 2 – крышка выгрузного люка; 3 – вставная выбросная горловина; 4 – решето; 5 – крышка дробильной камеры; 6 – молоток; 7 – диск ротора; 8 – бункер; 9 – верхняя дека; 10 – верхний магнитный сепаратор; 11 – поворотная заслонка; 12 – режущий барабан; 13 – прессующий транспортер; 14 – противорежущая пластина; 15 – питающий транспортер; 16 – коллектор; 17 – подводящий воздушный патрубок; 18 – электродвигатель; 19 – натяжное устройство; 20 – нижний магнитный сепаратор; 21 – нижняя дека; 22 – вал ротора; 23 – ось; 24 – рама

Производительность молотковых дробилок зависит главным образом от размеров рабочей камеры и скорости барабана [30]. Скорость молотков достигает 100...120 м/с, а производительность – 5...6 кг/с при измельчении зерна [31].

Объективным критерием, отражающим полноценность организации рабочего процесса дробилок, является удельная энергоемкость процесса – от 7 до 13 кВт·ч/т. Однако удельный показатель не учитывает качество измельчения зернофуража, что является важным условием повышения эффективности скормливания кормов животным. При переизмельчении продукта непроизводительные затраты на его подготовку возрастают. С точки зрения экономической целесообразности неравномерность состава продуктов помола увеличивает себестоимость производства животноводческой продукции.

При изучении технологического процесса дробления зерна машинами с горизонтально расположенной рабочей камерой уста-

новлено, что при ударе зерна о гладкую поверхность решета угол его падения равен 70...80°. Величина этого угла значительно снижает эффект разрушения зерна о решето. Энергия, сообщенная молотком зерну, затрачивается на бесполезное перемещение измельченного материала в дробильной камере. Эффективность разрушения зерна при ударе о неподвижную поверхность может быть увеличена с помощью деки.

Дробилкам данного типа присущ ряд недостатков. В процессе работы машины, при соударении частиц зерна, возникает одинаковая сила взаимодействия, вызывающая напряжение в их молекулярной структуре, что является причиной разрушения. Однако большее напряжение (при одинаковой силе взаимодействия) возникает в меньшей частице. Вследствие этого процесса первоначально разрушаются мелкие зерна, что ведет к образованию неравномерного состава продуктов помола. Кроме того, горизонтально расположенное в дробилках решето затрудняет эвакуацию измельченных частиц зерна за пределы дробильной камеры. В результате происходит переизмельчение зерна, а следовательно, ухудшается его качество и возрастает удельный расход энергии на выполняемый процесс [32]. Данный вывод подтверждают исследования, проведенные В. И. Сыроватко. Получено уравнение движения частицы внутри рабочей камеры дробилки:

$$y'' = \omega_m \cdot 2l_q(\cos\alpha + f_3\sin\alpha) - cF_q(\rho_v / 2gm_q)[(\omega_q l_q)^2 + (y')^2](f_3\cos\beta + \sin\beta) - 2f_3\omega_m y', \quad (2.1)$$

где ω_m – частота вращения молотков, c^{-1} ;

l_q – размер частицы, м;

f_3 – коэффициент трения зерна по металлу;

c – коэффициент, зависящий от формы тела;

F_q – проекция частицы по направлению движения, m^2 ;

ρ_v – удельный вес воздуха, kg/m^3 ;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

m_q – масса частицы, кг;

ω_q – частота вращения частицы зерна в дробильной камере, c^{-1} .

В соответствии с уравнением (2.1) рассчитана скорость движения частицы внутри рабочей камеры дробилки. Полученные данные

показывают, что крупные частицы перемещаются по поверхности молотка быстрее, чем мелкие, а значит, в основном располагаются на рабочей поверхности решета. Мелкие частицы при этом находятся в зоне воздействия молотков. В результате такого разделения кормовой массы крупным частицам трудно попасть в рабочую зону молотков, а мелким – выпадать через отверстия в решете. Это является причиной неравномерности помола и высокого удельного расхода энергии. Экспериментальные исследования В. И. Сыроватко с применением скоростной киносъемки подтвердили теоретические выводы. Результаты исследований, приведенные в ряде других научных работ, подтверждают большую неравномерность фракционного состава концентрированных кормов, измельченных на дробилках с горизонтально расположенной рабочей камерой [33, 34].

Изучению процессов, протекающих в дробилках с осевой (центральной) загрузкой зерна, посвящена и работа И. И. Ревенко [35]. Большое внимание уделено изучению распределения перерабатываемого материала в камере измельчения молотковой дробилки. По И. И. Ревенко, максимальная нагрузка на молотки возникает в начале камеры, а ее резкое снижение наблюдается в средней зоне решетной поверхности. Сопоставление диаграмм выхода продуктов дробления с данными по износу рабочих органов по длине барабана позволяет заключить, что больше изнашиваются крайние молотки, установленные возле боковых стенок камеры. Неравномерный износ рабочих органов барабана приводит к нарушению его балансировки, что, в свою очередь, сказывается на долговечности дробилки [36].

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса молотковых дробилок с горизонтально расположенной рабочей камерой позволяют сделать следующие выводы. Конструктивные схемы рассмотренных дробилок не обеспечивают равномерного измельчения зернофуража, вследствие чего нарушается гранулометрический состав конечного продукта [37]. Это приводит к росту удельной энергоемкости выполняемого процесса и отрицательно сказывается на эффективности скармливания зернофуража.

К дробилкам *с вертикально расположенной рабочей камерой* относятся дробилка ДЗВ-5 и ее модификации – ДЗВ-5-1, ДЗВ-5-2 [38]. Эти машины предназначены только для измельчения зерна.

Дробильный аппарат дробилок типа ДЗВ конструктивно одинаков. Внутри рабочей камеры соосно установлен ротор, представляющий

собой два несущих диска, между которыми по периметру шарнирно закреплены пакеты молотков. По наружному периметру и снизу ротора закреплено решето. Привод ротора и загрузочная горловина для приема зерна расположены на верхнем основании рабочей камеры.

В дробилке ДЗВ-5 (рис. 2.2) привод ротора осуществляется непосредственно от вала электродвигателя, в дробилках ДЗВ-5-1 и ДЗВ-5-2 – через промежуточную клиноременную передачу.

Анализ конструкции дробилок с вертикально расположенной рабочей камерой позволил установить, что для обеспечения их работы необходим зазор между нижним несущим диском и решетом. Величина зазора равна толщине несущего диска и расстоянию между смежными плоскостями нижнего несущего диска и решета. Так как зерно в рабочей камере движется вертикально вниз под действием силы тяжести, то на горизонтально установленном решете формируется слой крупных частиц. В результате снижается пропускная способность решета и увеличиваются затраты энергии на вращательное движение зерна.

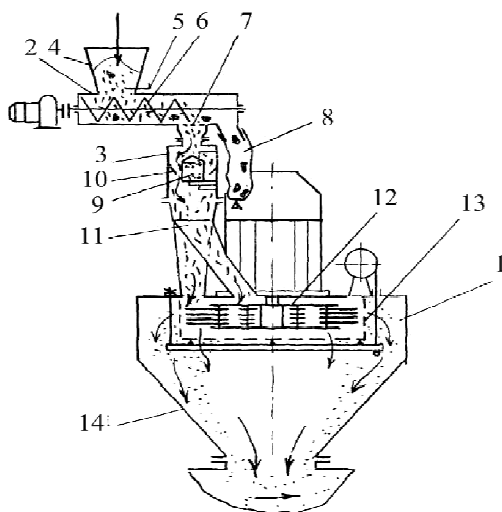


Рис. 2.2. Схема дробилки ДЗВ-5:

- 1 – дробилка; 2 – питатель; 3 – сепаратор магнитный;
- 4 – воронка; 5 – задвижка; 6 – шнек; 7 – решетка;
- 8 – рукав; 9 – магнитная головка; 10 – отражатель;
- 11 – распределитель; 12 – ротор; 13 – решето; 14 – воронка

Вертикально расположенное решето дробилок закреплено внутри рабочей камеры. В межстенное пространство поступает измельченное зерно, которое под действием гравитации перемещается в выгрузную камеру. Однако молотки при вращении создают радиально направленный воздушный поток, под действием которого мелкие частицы измельченного зерна перемещаются к внутренней поверхности рабочей камеры, формируя движущийся по ее поверхности слой. Исследованиями установлена степень влияния гранулометрического состава на сцепные свойства мелкодисперсных кормовых материалов и коэффициент притяжения частиц в зависимости от их размеров. Графики зависимости показывают, что с уменьшением размеров частиц сцепные свойства и притяжение частиц кормовых материалов возрастают. Результаты исследований позволяют предположить накопление мелких частиц зернофуража на внутренней поверхности рабочей камеры рассматриваемых дробилок. Следствием этого является снижение производительности машины, а при длительной работе – ее остановка.

Конструктивные схемы рассмотренных дробилок не обеспечивают равномерного измельчения зернофуража, вследствие чего нарушается гранулометрический состав конечного продукта. Этот фактор приводит к росту удельной энергоемкости выполняемого процесса и отрицательно сказывается на эффективности скармливания зернофуража.

2.2. Подготовка к скармливанию

зернофуража влажностью от 14 до 40 %

Республика Беларусь ежегодно убирает свыше 4 млн т зерна на фуражные цели. Более половины выращиваемого урожая – повышенной влажности (20...40 %), что определяет огромный объем работ по приведению его в стойкое для хранения состояние. Сушка влажного зерна требует значительных капитальных вложений, энерго- и трудозатрат.

Все большее распространение получает технология консервирования зерна ранних стадий спелости. Консервирование такого зерна позволяет производить обмолот в момент наибольшего содержания в зерне питательных веществ, при этом кормовое зерно не высушивается. Данный способ позволяет получить с каждого гектара площади урожай зерна на 5...10 ц больше и собрать его на 2...3 недели раньше обычных сроков, что важно для регионов с неустойчивым

климатом. Использование данного способа позволяет исключить из технологии приготовления фуражного зерна высушивание [39].

Данная технология универсальна (подходит для всех видов зерновых, кукурузы и бобовых), а неравномерное созревание зерна не затрудняет его обработку, т. к. используются зеленые мелкие и разрушенные зерна. Зерно не высушивается, а закладывается на хранение сразу после плющения. Перед закладкой зерна на хранение, с целью лучшей консервации, в массу вводится консервант. Смешивание зерна и консерванта производится с помощью дополнительно устанавливаемого за плющилкой смесителя. При закладке плющеного зерна на хранение его уплотняют.

Для подготовки к скармливанию зерна влажностью 14...40 % применяется его разрушение плющением.

Данный процесс предусматривает разрушение зерна методом раздавливания для превращения зерна в хлопья и осуществляется вращающимися с разной скоростью навстречу друг другу вальцами (рис. 2.3). Для реализации этого метода разрушения зерна используются плющилки.

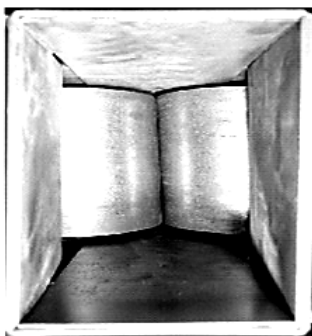


Рис. 2.3. Общий вид плющильного аппарата

По принципу работы плющилки во многом схожи и состоят из рамы, цилиндрических вальцов с гладкой, рифленой или микрошероховатой поверхностью, вращающихся с разными окружными скоростями навстречу друг другу, механизмов перемещения и регулировки зазора между ними.

Технологический процесс протекает следующим образом. Зерно направляется на вальцы плющилки. Быстро вращающийся валец

обгоняет частицу в зоне измельчения и обрабатывает ее своими рифами, а частица, обгоняя медленно вращающийся валец, затягивает продукт в зазор между вальцами, испытывая сжатие, сдвиг и срез. Это и ведет к разрушению зерна.

Качество измельчения регулируют путем изменения зазора в вальцевой паре и соотношения окружных скоростей вальцов. Величина зазора между вальцами изменяется от 0,03 до 1,50 мм, малое изменение приводит к существенному изменению в процессе плющения.

На рис. 2.4 показана принципиальная схема зерноплющилки. Зерноплющилка состоит из бункера 1 для загрузки зерна различных видов. В нижней части бункера 1 имеется дозатор 2. На раме 3 крепятся вальцы 4 на подшипниках.

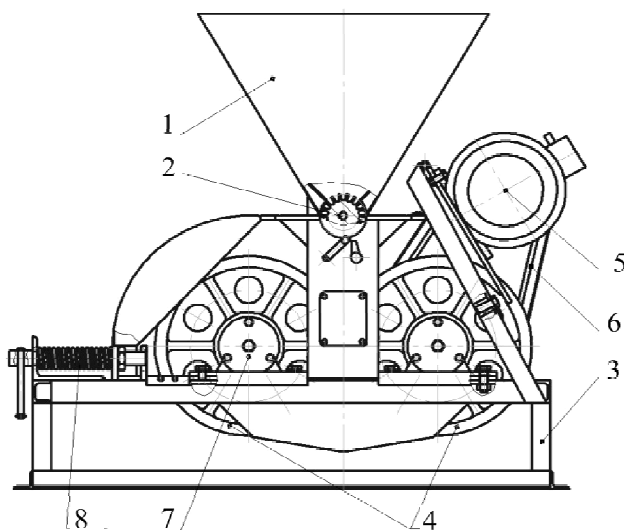


Рис. 2.4. Принципиальная схема зерноплющилки

Один из вальцов крепится на раме неподвижно и соединен приводом с электродвигателем 5. Второй валец 7 подпружинен специальным механизмом 8 и может перемещаться по раме горизонтально. Это обеспечивает пропуск между вальцами случайно попавших твердых предметов. При снятии ремня 6 с электродвигателя 5 привод зерноплющилки может осуществляться от вала отбора мощности трактора через карданный вал.

По конструкции исполнения рабочих валцов плющилки могут быть:

- с внешним контактом рабочих плоскостей и одинаковым размером рабочих органов (рис. 2.5);
- с внешним контактом рабочих плоскостей и разным размером рабочих органов (рис. 2.6);
- с внутренним контактом рабочих плоскостей (рис. 2.7).

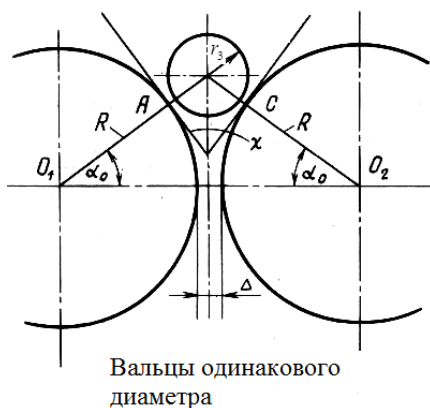


Рис. 2.5. Схема плющильного аппарата с внешним контактом рабочих плоскостей и одинаковым размером рабочих органов

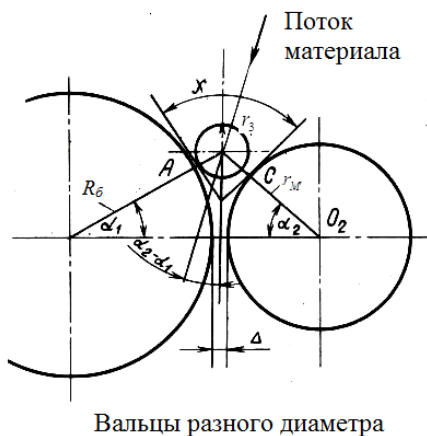


Рис. 2.6. Схема плющильного аппарата с внешним контактом рабочих плоскостей и разным размером рабочих органов

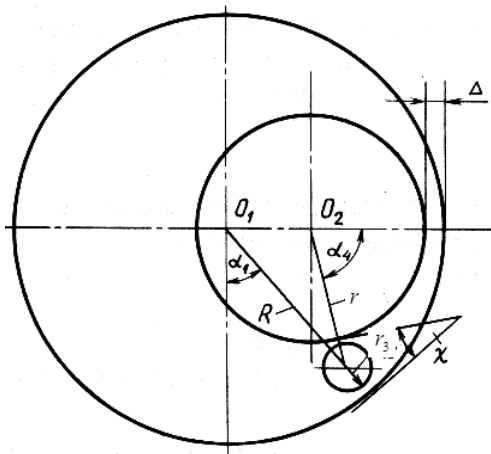


Рис. 2.7. Схема плющильного аппарата с внутренним контактом рабочих плоскостей

Цилиндрические вальцы выпускаются с гладкой поверхностью. Для увеличения производительности плющильного аппарата на поверхности вальцовых цилиндров выполняют рифление, при этом профиль рифов может быть различным (рис. 2.8).

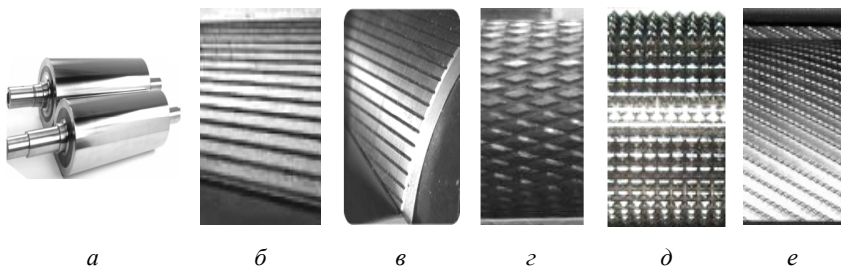


Рис. 2.8. Цилиндрические вальцы:

a – с гладкой поверхностью; *б* – с горизонтально выполненными канавками; *в* – с канавками, выполненными под углом к оси вала; *г* – с рельефом поверхности вальцов в виде ромба; *д* – с рельефом поверхности вальцов в виде правильной пирамиды; *е* – с выполненной под углом к оси вала микрошероховатой поверхностью

Конструкция вальцовой плющилки модели Murska отличается от других вальцовых мельниц тем, что имеет плющильный аппарат дискового типа (рис. 2.9).

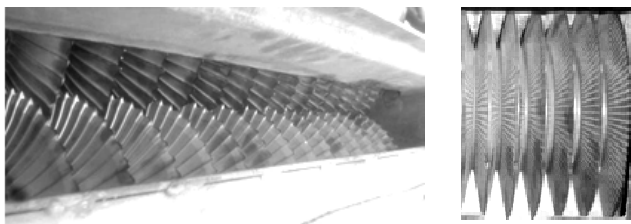


Рис. 2.9. Плющильный аппарат дискового типа

Зерновые плющилки могут иметь рельеф поверхности валцов в виде зубцов, что дает возможность их полного сведения (зазор между валцами приблизительно равен 0 мм) и, в свою очередь, обеспечивает качественное плющение зерна любого размера без разрушения его структуры (рис. 2.10).

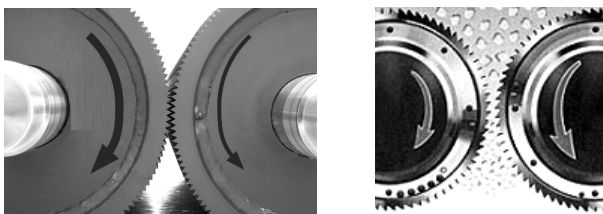


Рис. 2.10. Плющильный аппарат с рельефом поверхности валцов в виде зубцов

Процесс плющения предусматривает разрушение влажного зерна методом раздавливания (для злаковых культур толщина плющеного зерна должна составлять не более 1,1...1,8 мм) и смешивание его с консервантом. Присутствие устройства для смешивания зерна с консервантом дополнительно увеличивает энергоемкость и металлоемкость процесса. Кроме того, по причине релаксационных свойств толщина влажного зерна частично восстанавливается. Это ведет к образованию воздушных полостей в уплотненной массе и, как следствие этого, вызывает окислительные процессы, значительно снижающие качество корма.

Чтобы исключить указанные недостатки при заготовке на хранение фуражного зерна влажностью от 14 до 40 % предлагается усовершенствованная технология, в соответствии с которой влажное зерно необходимо измельчить [40]. В данном случае целостность зерна нарушается путем разрезания на части его клеток, что сводит

к минимуму выделение сока, наиболее богатого питательными веществами. При измельчении зерна уменьшаются его геометрические размеры, что исключает восстановление прежней формы и снижает энергозатраты процесса уплотнения корма при закладе на хранение.

При явных преимуществах рассмотренной технологии заготовки зерна на корм животным на ранних стадиях его спелости технология плющения имеет и недостатки. Узкая специализация плющилки ограничивает продолжительность ее эксплуатации в хозяйстве, и окупаемость машины возрастает, что увеличивает себестоимость животноводческой продукции.

2.3. Измельчители корнеклубнеплодов

Для выполнения технологической операции по измельчению корнеклубнеплодов используются мойка-измельчитель корнеклубнеплодов ИКМ-5, ИКМ-Ф-10, измельчитель ИКВ-5А, универсальная дробилка КДУ-2, измельчитель-смеситель кормов ИСК-3, комбинированный агрегат АПК-10. Измельчение корнеклубнеплодов в этих машинах происходит по различным схемам: рубкой в ИСК-3, ИКМ-5, резанием со скольжением в ИКВ-5А, ударом в КДУ-2.

При измельчении корнеклубнеплодов измельчителю ИКВ-5А присущи те же недостатки, что и при измельчении грубых кормов. Кроме того, конструкция аппарата вторичного резания измельчителя ИКВ-5А такова, что не исключена возможность продвижения массы корма к выходу без достаточного воздействия ножей, что обуславливает неравномерность измельчения корма.

Эффективность работы измельчающего аппарата зависит от сопротивления резанию, N , определяемого по рациональной формуле В. П. Горячкина

$$P_{\text{рез}} = P_{\text{д. л}} B l_{\text{лезв}} \delta_{\text{лезв}} \delta + P_{\text{д}} + 0,025 \rho h_c^2 v^2, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{д. л}}$ – давление лезвия ножа, Па;

B – коэффициент, зависящий от механической прочности материала (для свеклы – 10,4, для моркови – 7,5, для картофеля – 6,5);

$l_{\text{лезв}}$ – длина лезвия ножа, участвующая в резании, м;

$\delta_{\text{лезв}}$ – толщина лезвия ножа, м;

δ – отношение величины пути сжатия к длине элемента стружки, зависящее от угла трения материала по грани ножа, толщины стружки и угла наклона передней грани ножа;

P_d – сопротивление деформации и трения на передней и задней гранях ножа, Н;

ρ – плотность корма, кг/м³;

h_c – толщина стружки, м;

v – скорость резания, м/с.

Согласно формуле (2.2) усилие резания зависит от физико-механических свойств корнеклубнеплодов, величина которых постоянна для различных схем измельчающих аппаратов и угла наклона передней грани ножа. Сопротивление разделению корма уменьшается при использовании в качестве рабочих органов ножей. В данном случае процесс резания ножом рассматривается как действие острого клина, перемещаемого в толще материала. В соответствии с исследованиями Н. Г. Соминича и Г. И. Новикова, процесс резания протекает с переменным усилием. В первоначальный момент нож, внедряясь в материал, сжимает его, а затем, по мере продвижения, происходит скалывание стружки.

По данным исследований Г. М. Кукты, измельчители с ножевыми режущими аппаратами обеспечивают лучшее качество измельчения при наименьшей энергоемкости [40]. Молотковые дробильные аппараты имеют больший удельный расход энергии на разрушение. При ударном воздействии молотков на корнеклубнеплоды происходит их разрушение со значительным выделением клеточного сока, что не отвечает зоотехническим требованиям. Машины этого типа и машины, работающие по принципу скобления стружки (ИКМ-5, ИКМ-Ф-10), при измельчении корнеклубнеплодов с ботвой плохо измельчают ботву и забиваются ею.

Таким образом, удельный расход энергии на измельчение корнеклубнеплодов наименьший у машин с режущим измельчающим аппаратом, а наибольший – у измельчителей ударного действия с молотковыми барабанами. Измельчители, работающие по принципу скобления стружки, требовательны к состоянию корнеклубнеплодов. Наиболее рациональным аппаратом, обеспечивающим измельчение корнеклубнеплодов с минимальными затратами энергии и позволяющим автоматизировать данный технологический процесс, является измельчитель ИСК-3 с вертикально расположенной рабочей камерой.

2.4. Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального измельчителя-смесителя кормов

С точки зрения снижения затрат энергии и металлоемкости оборудования для подготовки к хранению зерна молочно-восковой спелости представляет интерес применение многофункционального измельчителя кормов, способного выполнять и функции измельчителя-смесителя. Такая машина позволит упростить технологическую схему подготовки кормов к скармливанию, т. к. в одной машине будут выполняться несколько технологических операций:

- измельчение зернофуража, корнеклубнеплодов и грубых кормов (при необходимости);
- смешивание измельченного зерна с консервантом;
- смешивание кормовых компонентов.

Для создания многофункционального измельчителя-смесителя кормов были изучены машины для измельчения кормов. Установлено, что для измельчения зерна применяются как специализированные, так и универсальные дробилки. Корнеклубнеплоды и грубые корма можно измельчать как измельчителями, так и измельчителями-смесителями. С точки зрения универсальности измельчения кормов выполнение этой операции обеспечивают только дробилки КДУ-2 и ДКУ-2.

Однако эти машины имеют такие существенные недостатки, как неоднородность дробления зерна и присутствие ручного труда, что не отвечает зоотехническим требованиям и требованиям организации поточного производства при минимальных затратах ручного труда. Дробилки КДУ-2 и ДКУ-2 могут эксплуатироваться только как измельчители кормов, а технологические линии с их участием требуют для получения кормосмеси машину для смешивания.

На основании изложенного можно сделать вывод о нецелесообразности применения универсальных дробилок КДУ-2 и ДКУ-2 для комплектов машин, обеспечивающих приготовление многокомпонентной высокоэнергетической добавки.

Измельчитель кормов ИКВ-5А содержит ножевой измельчающий аппарат барабанного типа. Выявленные недостатки данной машины при измельчении грубых кормов и корнеклубнеплодов, ручной труд при выполнении технологического процесса и необходимость в смесителе кормов не позволяют выбрать данную машину в качестве прототипа для создания многофункционального измельчителя кормов.

Снизить удельную энергоемкость и металлоемкость технологического процесса подготовки кормов к скармливанию позволяют измельчители-смесители кормов непрерывного действия. Эти машины измельчают грубые корма и корнеплоды, смешивают корма в соответствии с рационом животных. К этой группе машин относится измельчитель-смеситель ИСК-3. Важное его преимущество – выполнение операций по измельчению корнеклубнеплодов и грубых кормов. Конструктивная схема позволяет организовать автоматизированную подачу кормов, а следовательно, исключить ручной труд.

Измельчитель-смеситель ИСК-3 (рис. 2.11) состоит из вертикально установленной рабочей камеры, внутри которой по периметру расположены подпружиненные блоки противорежущих элементов. Такое конструктивное решение позволяет легко удалять их за пределы рабочей камеры при попадании твердых предметов или замене. Внутри камеры соосно установлен ротор с радиально закрепленными на нем ножами. При вращении ротора ножи и противорезы образуют режущие пары, которые измельчают и смешивают корма в потоке.

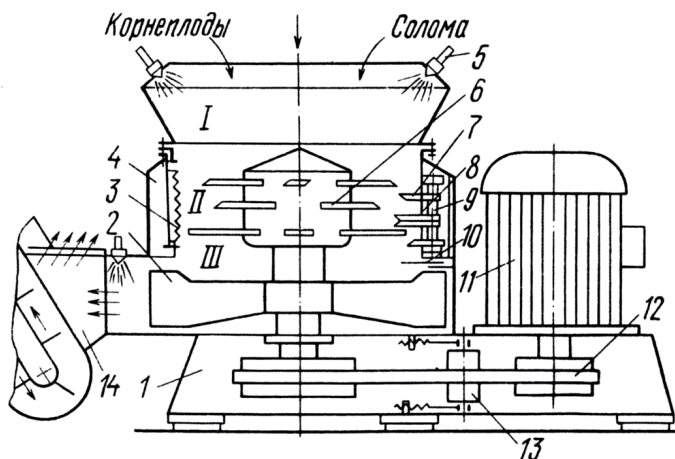


Рис. 2.11. Схема измельчителя-смесителя ИСК-3:

- I* – приемная камера; *II* – камера измельчения и смешивания; *III* – выгрузная камера;
- 1 – рама; 2 – лопастная швырялка; 3 – зубчатая дека; 4 – кожух;
- 5 – форсунка; 6 – ротор; 7 – противорежущий нож; 8 – основание;
- 9 – нож; 10 – шибер; 11 – электродвигатель; 12 – клиноременный привод;
- 13 – ролик; 14 – бункер выгрузного транспортера

По конструктивному исполнению ножи способны измельчать и зерновые корма, для этого в рабочей камере достаточно установить решето. При выполнении этой технической операции необходимо удалить за пределы рабочей камеры противорежущие элементы. Так как они закреплены шарнирно, то данная работа выполняется за короткий промежуток времени без значительных трудозатрат. Закрепить решето радиально внутри рабочей камеры можно болтовыми соединениями. При переходе от зерновых кормов к грубым или сочным достаточно извлечь решето и вернуть в рабочую камеру противорежущие элементы.

Конструкция измельчающего аппарата вертикального типа позволяет устанавливать в рабочей камере несколько ярусов решет. Диаметр отверстий в них может быть различным – от большого до обеспечивающего необходимую крупность измельчения. Следовательно, в данной машине можно организовать последовательное дробление зерна – по мере его прохождения через рабочую камеру, что улучшает эвакуацию уже измельченных частиц с рабочей зоны ножей и способствует выравниванию фракционного состава [40]. При такой организации процесса дробления образование пылевидной фракции практически невозможно.

Достичь выполнения всех операций одним типом измельчающего аппарата не представляется возможным в силу различных физико-механических свойств кормов. Поэтому наиболее целесообразно при разработке многофункционального измельчителя кормов использовать модульный принцип. В этом случае необходимо разработать отдельные, быстро перенастраиваемые модули для измельчения зернофуража различной влажности. Они должны быть гибкими техническими средствами, устанавливаемыми на измельчитель при минимальных затратах времени.

Создание рациональной схемы таких модулей – сложная и трудоемкая задача. Для ее решения необходимы теоретические и экспериментальные исследования.

Многофункциональный модульный измельчитель кормов в соответствии с выбранной малозатратной механизированной технологией подготовки кормов к скармливанию коренным образом способен изменить состав комплекта машин для подготовки кормов к скармливанию при соблюдении точности производства.

2.5. Способ приготовления заменителей цельного молока

В настоящее время для выпойки телят используют как цельное молоко в количестве 250...400 л на одного теленка, так и жидкий корм, восстановленный из различных сухих составляющих, производимых в основном на молочных заводах [41, 42].

Проблема сокращения в рационе телят расхода цельного молока путем увеличения производства заменителей цельного молока (ЗЦМ), близкого по свойствам к натуральному, является актуальной, т. к. это дает возможность повысить товарность цельного молока до 90 % и более. Использование ЗЦМ при выращивании телят позволяет сократить срок выпойки молоком до 10 дней, а его количество – до 50...60 кг на голову [42].

Основой почти всех выпускаемых заменителей цельного молока является сухое обезжиренное молоко, которое обогащается различными добавками с целью повышения его питательности. Однако это приводит к перерасходу молочного белка – ценного пищевого продукта. Сократить его расход на кормовые цели можно за счет производства заменителей молока, включая в их состав недефицитные белки растительного происхождения [41].

В последние годы разработаны различные рецепты ЗЦМ. Так, заменитель, вырабатываемый на АО «Экмол» (ССК-2), содержащий в своем составе 48 % сухого обезжиренного молока и 17 % гидрогенизированного жира с добавками витаминов и микроэлементов, обеспечивает получение 700 г среднесуточного прироста. Однако он не получил широкого распространения из-за недостатка необходимого количества сухого обезжиренного молока и гидрогенизированных жиров [42, 43].

Хозяйства вынуждены готовить местные заменители, составляя кормовые смеси из имеющихся кормов. Такие заменители, как правило, неполноценны, и рекомендовать их для массового внедрения нецелесообразно.

Зная состав питательных компонентов, входящих в ЗЦМ, РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству» разработало рецепты для приготовления заменителей цельного молока с использованием местных зерновых культур, таких как люпин, рапс, овес, льняное семя, в сочетании с молочной сывороткой и другими обогатительными добавками и витаминно-минеральным комплексом [44].

Первые пробные порции ЗЦМ из зерновых компонентов были получены на кавитационной установке типа «ТЕКМАШ» сотруд-

никами РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству» совместно с сотрудниками РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». Как показали результаты испытаний на данной установке, технология приготовления пастообразной смеси достаточно сложна, т. к. необходимо предварительно намачивать зерновые компоненты в течение 12 ч, а затем загружать в установку, которая измельчает и одновременно нагревает полученную массу.

Состав ЗЦМ, приготовленного на экспериментальной установке по разработанным рецептам с использованием местных зерновых культур, в сравнении с голландским ЗЦМ «Кальволак» приведен в табл. 2.1.

Из данных табл. 2.1 видно, что по кормовым единицам, обменной энергии и ряду других основных составляющих заменители практически одинаковы, а стоимость ЗЦМ, полученного из зерновых компонентов, меньше. Так, заменители ЗЦМ-1 и ЗЦМ-2 содержат соответственно 1,43 и 1,41 к. ед., обменной энергии – 14,4 МДж, а «Кальволак» – 1,48 к. е., обменной энергии – 14,9 МДж. Основу этих заменителей составляют зерновые корма, выращиваемые во всех хозяйствах Республики Беларусь [44].

Таблица 2.1

Состав рецептов заменителей цельного молока

Компоненты и показатели питательности	«Кальволак»	ЗЦМ-1	ЗЦМ-2
Сухое обезжиренное молоко, %	–	28	23
Сухая подсырная сыворотка, %	70	–	–
Пшеница, %	–	19	16
Тритикале, %	–	–	8
Овес шелушенный, %	–	6	6
Рапс, %	–	25	25
Люпин, %	–	15	15
Льносемя, %	–	5	5
Соевый белок, %	12	–	–
Растительное масло, %	15	–	–
Монокальцийфосфат, %	–	0,7	0,7
Соль поваренная, %	–	0,3	0,3
Премикс (ароматизатор), %	3	–	–
Премикс ПКР-1, %	–	1	–
Премикс ПКР-2, %	–	–	1
Итого, %	100	100	100
Стоимость 1 кг, руб.	0,3040	0,18481	0,15925

Компоненты и показатели питательности	«Кальволак»	ЗЦМ-1	ЗЦМ-2
В 1 кг содержится:			
сухого вещества, г	911,4	907,1	902,6
органического вещества, г	861,4	861,9	860,2
кормовых единиц, кг	1,48	1,43	1,41
обменной энергии, МДж	14,9	14,4	14,4
сырого протеина, г	214,9	209	198,1
сырого жира, г	120,2	133,5	134,3
сырой клетчатки, г	5,1	16,1	17,1
БЭВ, г	521,2	473,3	480,7

2.6. Гидродинамический способ повышения усвояемости зернофуража

Технология подготовки к скармливанию зерна молочно-восковой спелости, как и технология плющения, является неотъемлемой частью индустриальной технологии его возделывания и уборки. Однако, как показали проведенные исследования в РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству», переваримость консервированного зерна составляет 60...65 %, что является недостаточным. Для повышения переваримости и усвояемости консервированного плющеного зерна необходимо найти наиболее рентабельный способ его дальнейшей переработки.

В мировой практике известен ряд методов и технологий обработки зернового сырья. Наибольшее применение получили поджаривание, осолаживание, запаривание (варка), экструдирование, микронизация, экспандирование, гидротермическая обработка, плющение, дробление.

Поджаривание применяется в основном при приготовлении кормов для поросят-сосунов с целью приучения их к поеданию корма и стимуляции секреторной деятельности пищеварения. При поджаривании часть крахмала распадается до моносахаров, однако вследствие денатурации белка несколько снижаются переваримость протеина и доступность аминокислот.

Осолаживание применяют для улучшения вкусовых качеств зерновых кормов и повышения их поедаемости. При осолаживании кормов часть крахмала под действием температуры и влаги переходит в сахар.

Запаривание применяют для инактивации антипитательных веществ, снижающих эффективность использования кормов, особенно зернобобовых (горох, люпин, соя, чечевица).

Эти способы трудно поддаются полной механизации и автоматизации всего технологического процесса.

В последние годы, особенно за рубежом, широко применяются экструдирование, экспандирование и другие виды термомеханической обработки зернофуража [45].

Экструдирование предусматривает два вида воздействия на зерно: механическое и влаготепловое. Подлежащее экструзии сырье доводят до влажности 12...16 % и в некоторых случаях измельчают, а затем подают в экструдер, где под действием высокого давления (2,8...2,9 МПа) и трения зерновая масса разогревается до 120...150 °С. В результате быстрого перемещения ее из зоны высокого давления в зону атмосферного происходит «взрыв» – масса вспучивается и образуется продукт микропористой структуры [46].

Вследствие деструкции целлюлозно-лигниновых образований и желатинизации крахмала значительно улучшается его кормовая ценность. Однако экструдирование имеет и недостатки. Тепловая обработка зерна происходит при высоких температурах – 120...150 °С. При таких режимах работы происходит частичное разрушение незаменимых кислот, некоторых витаминов, и требуются большие затраты энергии.

Экспандирование – процесс, основанный на гидротермической обработке корма под давлением. Принцип действия экструдеров и экспандеров одинаков: в шнековом рабочем органе продукт разогревается, уплотняется и выпрессовывается. Однако режимы обработки существенно отличаются. В экструдерах продукт разогревается только за счет трения при движении по виткам шнека и активном перемешивании под большим давлением. В экспандере обработка проводится при более высокой влажности (до 26 %) и разогрев осуществляется не только за счет трения, но и за счет ввода пара, в результате чего обработка зерна происходит в менее жестких условиях с большей производительностью и с меньшими затратами электроэнергии.

В основе термовструдирования лежит кратковременная (5...15 с), высокотемпературная (350...600 °С) обработка зерна в потоке горячего воздуха. При термовструдировании используют высокие температуры и на порядок меньшее время на обработку зерна за счет сверхинтенсивного подвода тепла к зерну в специально организованном режиме теплового удара. В этом случае отпадает необходимость в искусственном увлажнении зерна, используется только внутренняя естественная влага. Зерна злаков в процессе термовструдирования сами становятся миниатюрными высокоскоростными «котлами варки» под давлением [2].

Термовструдирование зернобобовых позволяет значительно нейтрализовать ингибиторы трипсина и химотрипсина. Вместе с тем, как показала практика, организовать подвод тепла к зерну в летящем потоке достаточно сложно, а из-за высоких температур происходит частичное разрушение незаменимых аминокислот и витаминов. Поэтому такой способ пока не получил распространения.

Представляет интерес малоизученная гидротермическая механизированная обработка зерна с помощью различных установок. В таких установках обработка зерна осуществляется в водной среде без доступа кислорода в специально спрофилированных насадках за счет гидродинамических процессов. Под действием энергии гидравлических ударов и ударных волн от схлопнувшихся кавитационных пузырьков осуществляется разрушение зерна и нагрев жидкозерновой массы. Влаготепловая обработка позволяет осуществить и обеззараживание зернового сырья, инактивацию антипитательных факторов (ингибиторов трипсина, глюкозидов, микотоксинов и т. п.) и преобразование питательных веществ в легкоусвояемые формы [2].

Ценность такой обработки заключается в том, что на специальной гидродинамической установке можно получить однородную мелкодисперсную пастообразную смесь, что представляет интерес при приготовлении заменителей цельного молока из зерновых компонентов, и пастообразную смесь с более крупными частицами для кормления взрослого поголовья животных.

На рис. 2.12 приведен график удельных энергозатрат при наиболее распространенных способах обработки зернофуража.

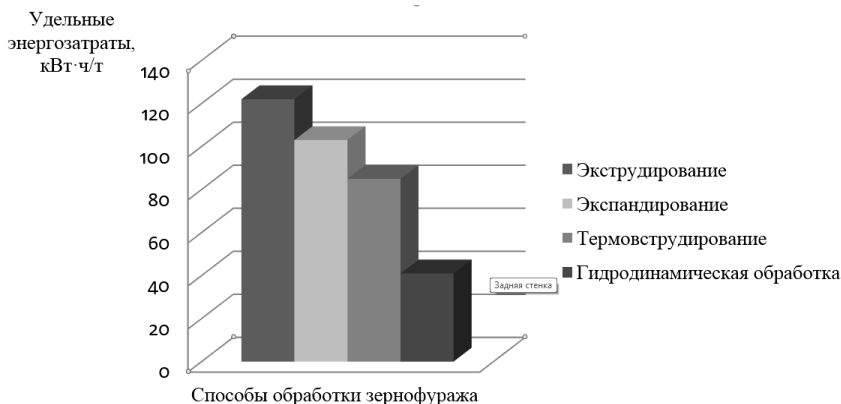


Рис. 2.12. График удельных энергозатрат при различных способах обработки зерна

На основании проведенных исследований установлено, что для повышения усвояемости зернофуража его перед скармливанием подвергают обработке, в т. ч. посредством высоких температур. Из известных способов обработки зерна наибольший интерес представляет гидродинамический – малоизученный и наименее энергоемкий.

2.7. Оборудование для влаготепловой обработки зернофуража

Рассмотрим устройства, применяемые для реализации гидродинамического способа переработки зернофуража.

Согласно принятой классификации методов диспергирования и диспергирующих устройств диспергаторы подразделяют в зависимости от принципа действия:

- за счет ударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных полостей;
- за счет энергии удара о наковальню частиц, движущихся с потоком жидкости.

Роторный диспергатор (рис. 2.13) состоит из корпуса, внутри которого concentрично установлен ротор и статор с каналами в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора [42]. Статор выполнен в виде соплового аппарата с сужающимися в направлении движения жидкости соплами, а ротор – в виде рабочего колеса центробежного насоса с лопатками, загнутыми вперед по ходу вращения рабочего колеса.

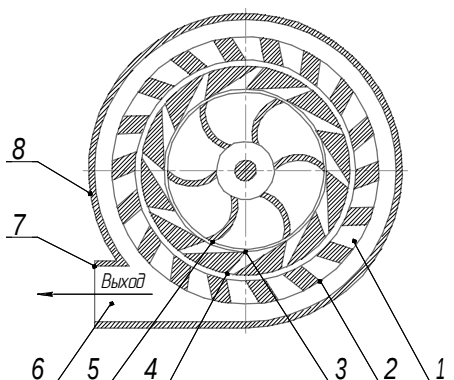


Рис. 2.13. Схема роторного диспергатора:

- 1 – цилиндрический канал; 2 – кольцо-активатор; 3 – сопла; 4 – сопловый аппарат;
5 – ротор; 6 – выходной патрубок; 7 – входной патрубок; 8 – корпус

Ротор состоит из центральной и периферийной частей, между которыми располагается неподвижный сопловой аппарат (статор). Центральная часть ротора представляет собой рабочее колесо центробежного насоса с малой степенью реактивности, что позволяет преобразовать часть напора, сообщаемого потоку в колесе, в скоростной напор (кинетическая энергия потока) и, соответственно, уменьшить долю статического напора (потенциальная энергия давления потока). Такое соотношение наиболее благоприятно для реализации двух стадий измельчения частиц: увеличение скоростного напора приводит к росту скорости потока на выходе из рабочего колеса (на входе в сопловой аппарат) и к увеличению скорости выхода потока из соплового аппарата; уменьшение статического напора способствует незначительному повышению давления в радиальном направлении (к периферии), что важно с точки зрения зарождения и развития кавитационных полостей (внутреннее вскипание жидкости из-за локального понижения давления в жидкости).

Каналы соплового аппарата (сопла) выполнены так, что одна из стенок канала совпадает по направлению с тангенциальной составляющей абсолютной скорости потока на выходе из рабочего колеса. Это способствует безударному входу потока в сопловой аппарат, а также увеличивает протяженность канала в направлении движения потока, что позволяет стабилизировать поле скоростей потока на выходе из сопла.

Периферийная часть ротора, кольцо-активатор, содержит систему цилиндрических каналов, оси которых составляют с направлением окружной скорости угол $120...140^\circ$. Это уменьшает абсолютную скорость потока на выходе из каналов и снижает потери энергии в спиральной камере отвода диспергатора. Боковая поверхность входной части цилиндрического канала выполняет функцию «наковальни», на которой происходит освобождение энергии удара частиц, движущихся в потоке в направлении, преимущественно перпендикулярном оси канала. Цилиндрическая поверхность канала изменяет траекторию движения частиц из прямолинейной в криволинейную, что увеличивает вероятность взаимного соударения частиц и их разрушения. Совокупное взаимодействие частиц с «наковальней» и друг с другом способствует интенсификации первой стадии измельчения частиц. Наличие малого радиального зазора между сопловым аппаратом и кольцом-активатором позволяет практически замыкать цилиндрический канал со стороны его входа с помощью межсопловой перемычки статора при их относи-

тельном смещении. При быстром перекрытии входного сечения канала создаются условия для разрыва сплошности потока, который имеет место ввиду инерции столба жидкости, движущейся в канале. В достаточно большом объеме жидкости возникают кавитационные полости, что в сочетании с последующим резким повышением давления в канале способствует интенсификации второй стадии измельчения частиц.

Роторный диспергатор работает следующим образом. Поток жидкости (суспензии) подается на вход 7 корпуса 8, откуда попадает в межлопаточные каналы ротора 5. В рабочем колесе центробежного насоса происходит преобразование механической энергии вращения ротора в гидравлическую энергию потока жидкости. Выходя из межлопаточных каналов ротора 5, жидкость направляется в неподвижный сопловой аппарат 4, в соплах которого происходит увеличение скорости истечения. Выходные сечения сопел 3 аппарата 4 циклически сообщаются с цилиндрическими каналами 1 кольца-активатора 2 или перекрываются межканальными перемычками. В момент прохождения входного сечения канала 1 мимо выходного сечения сопла 3 происходит взаимодействие высокоскоростного потока жидкости с цилиндрической поверхностью канала 1, ориентированной преимущественно перпендикулярно направлению истечения жидкости из сопла 3. При взаимодействии измельчаемых частиц с твердой стенкой канала 1 и друг с другом высвобождается энергия удара, которая расходуется на их измельчение (1-я стадия измельчения), и создается разрыв сплошности потока при резком уменьшении давления во входной части канала 1. В результате этого создаются условия для образования кавитационных полостей. При сообщении канала 1 со следующим по ходу движения соплом 3 происходит практически мгновенный рост давления во входной части канала 1 и, соответственно, захлопывание кавитационных полостей (2-я стадия измельчения).

Недостатком аппарата является то, что при крупных (более 0,5 мм) твердых включениях в рабочую жидкую среду процесс диспергирования становится весьма длительным, т. к. кавитационные пузырьки при схлопывании выламывают из твердых включений малые (порядка нескольких микрон) частички, не раскалывая твердые куски диспергируемого материала. К тому же крупные куски зачастую плотно забивают ротор, перекрывают щели, поток жидкости сквозь них прекращается, что полностью останавливает процесс диспергирования.

Известен также *роторный кавитационный аппарат*, состоящий из корпуса с входным и выходным отверстиями для рабочей жидкости,

образующими рабочую камеру. Внутри нее размещены статор и ротор, состоящий из дисков, установленных вдоль оси симметрии камеры поочередно в направлении «вход–выход» (рис. 2.14) [43].

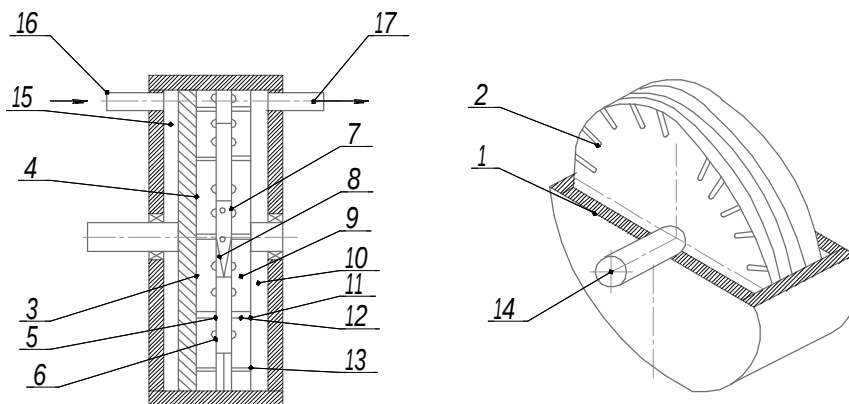


Рис. 2.14. Роторный кавитационный аппарат:

- 1 – корпус; 2 – первый диск ротора; 3 – диск статора;
- 4 – радиальные лопатки; 5 – прорезь; 6, 7, 13 – проточка;
- 8 – радиальные режущие лопатки; 9 – второй диск ротора;
- 10 – второй диск статора; 11 – прорезь; 12 – керн; 14 – приводной вал;
- 15 – рабочая камера; 16 – входное отверстие; 17 – выходное отверстие

Первый от входного отверстия диск ротора представляет собой нагнетательное колесо осевого насоса, на котором расположены радиальные лопатки. На втором диске ротора расположены радиальные режущие лопатки, причем передняя по ходу вращения часть лопатки выполнена в виде клина, а задняя – в виде параллелепипеда с радиальными проточками на его боковых гранях. Диски статора снабжены радиальными прорезями. Внутри прорези второго диска статора вдоль ее оси симметрии установлен радиальный керн треугольного сечения, одна из вершин которого лежит в плоскости диска, смежной с лопастями ротора. Радиальные лопатки и лопасти ротора, прорези и проточки в дисках статора расположены равномерно по окружностям дисков и имеют одинаковые радиальные длины.

Устройство работает следующим образом. При вращении ротора первый диск с лопатками 4 подает рабочую жидкость в объем рабочей камеры, ограниченный статорными дисками. Первый диск статора 3 предотвращает закручивание рабочей жидкости относи-

тельно оси симметрии устройства, что исключает уменьшение относительной скорости режущих лопастей ротора и набегающей на них жидкости. Вращающийся второй диск ротора 9 своими режущими лопатками 8 рассекает набегающий поток жидкости. За счет эффекта клина, возникающего в среде при вращении ротора, разрывные напряжения значительно превышают предел прочности жидкости, поэтому на режущей кромке клина происходит разрыв сплошности жидкости, а на гранях клина образуется большая кавитационная каверна. Взаимодействуя с радиальными проточками 6 и прорезями 11 во втором диске статора 10, каверна дробится на большое количество мелких кавитационных пузырьков, которые схлопываются в зазоре между плоскими гранями лопастей ротора 8 и статорными дисками 3, 10. Мощные кавитационные эффекты, возникающие при схлопывании, активируют соответствующие физико-химические процессы в рабочей среде.

Недостаток этого аппарата – достаточно интенсивный шум в слышимом диапазоне частот, что небезвредно для здоровья обслуживающего персонала. Кроме того, процесс измельчения зернофуража нестабилен и существенно зависит от напора рабочей жидкости на входе и скоростного режима ротора, что ухудшает качество конечного продукта и создает определенные эксплуатационные проблемы, связанные с необходимостью контроля и регулировки режимов работы.

ООО НПО «Специальные технологии» (Москва) запатентовало устройство для влаготепловой обработки зерна (рис. 2.15), которое состоит из вертикального проточного аппарата, имеющего корпус, закрытый в рабочем положении крышкой, с асимметричной рабочей полостью, круглой по всей высоте [47].

При выполнении технологического процесса взвешенную порцию семян замачивают в емкости в течение не менее 12 ч и через крышку загружают в вертикальный проточный аппарат 1. Затем заливают воду и включают рециркуляционный контур, который всасывает ее вместе с семенами через отверстие в донной области и подает массу в рабочий орган турбулизации и в вертикальный проточный аппарат.

При достижении значения температуры нагрева 105 °С установка автоматически отключается, и масса выдерживается в вертикальном проточном аппарате в течение 10...20 мин, по истечении которых готовый продукт выгружается. Для получения дальнейших порций циклы замачивания, загрузки семенами и заполнения водой повторяются.

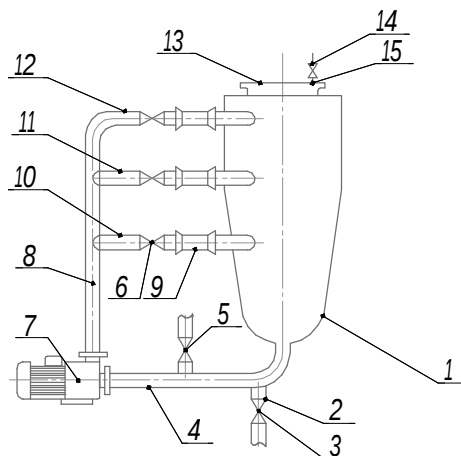


Рис. 2.15. Схема устройства для диспергирования зерна:

1 – вертикальный проточный аппарат; 2, 4, 8, 10–12, 15 – трубопроводы;
3, 5, 6, 14 – краны; 7 – насос; 9 – средство турбулизации; 13 – крышка

Установка имеет ряд недостатков: небольшая производительность, сложная технология, требующая предварительного замачивания зерна, и высокие температуры нагрева, приводящие к разрушению витаминного комплекса, особенно группы В.

Представляет интерес оборудование, разработанное специалистами херсонского НПП «Институт ТЕКМАШ» для влаготепловой обработки зерна (рис. 2.16). Установка ТЕК-СМ состоит из насоса 1 с электрическим приводом, бункера 2, в который загружают составляющие (соя, пшеница, горох, ячмень и другие зернобобовые культуры, вода, добавки), и специальной насадки 3, где осуществляются процессы размола, гомогенизации и тепловой обработки смеси. Автоматика контролирует и поддерживает температуру, необходимую по технологии переработки.

В табл. 2.6 приведена техническая характеристика модификаций установки ТЕК-СМ [48].

Недостатки данного оборудования – значительные затраты электроэнергии на процесс приготовления жидких кормов и небольшая производительность. Для увеличения производительности и уменьшения энергозатрат зерно, подлежащее измельчению, предварительно замачивают. В этом случае необходимо иметь на ферме обогреваемые помещения для оборудования, что увеличивает себестоимость

готового продукта. Кроме того, температура тепловой обработки составляет 105...110 °С, что не позволяет сохранить в полном объеме все витамины и незаменимые аминокислоты, а следовательно, качество корма снижается.

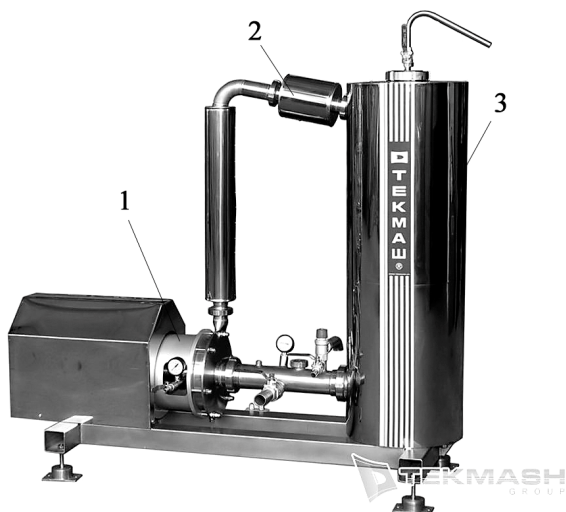


Рис. 2.16. Установка ТЕК-СМ:
1 – насос; 2 – насадка; 3 – бункер

Таблица 2.2

Техническая характеристика модификаций установки ТЕК-СМ

Параметр	ТЕК-1СМ	ТЕК-2СМ	ТЕК-3СМ	ТЕК-4СМ
Мощность двигателя, кВт	11	15	22	45
Температура тепловой обработки, °С	105...110	105...110	105...110	105...110
Производительность (паста/молоко), кг/ч	70/210	100/300	150/450	320/960
Длительность цикла переработки, мин	60	60	60	60
Вес, кг	480	500	620	960
Обслуживающий персонал, чел.	1	1	1...2	2

Гидродиспергатор, производимый предприятием «АгроИнновации» (рис. 2.17), представляет собой центробежный насос, в котором установлены разнонаправленно вращающиеся решетки. Через отверстия этих решеток проходит водно-зерновая субстанция с ферментами, которая подвергается глубокой диспергации в условиях кавитационных воздействий. Таким образом достигается степень измельчения частиц зерна до 0,5...5,0 мкм.

Для размещения установки требуется площадь 10 м² в отапливаемом помещении с подводом электроэнергии, технической воды и канализации. Для привода насоса используется двигатель мощностью 11 кВт. Производительность – 500 л пасты за 1 рабочий цикл (3,5 ч) [49, 50].

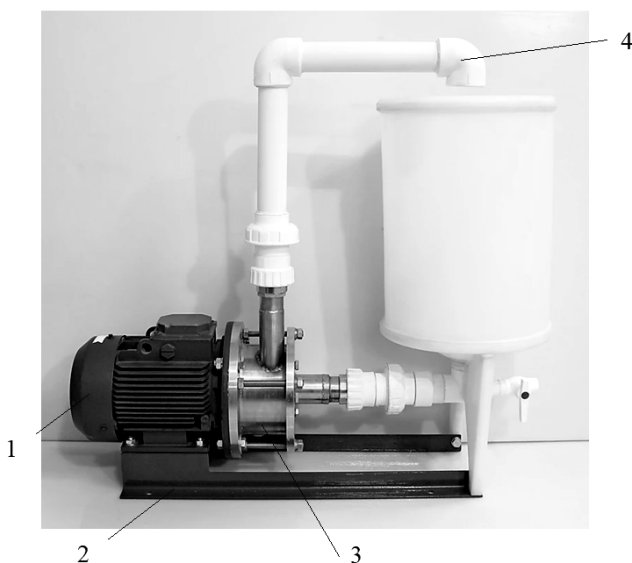


Рис. 2.17. Гидродиспергатор, производимый предприятием «АгроИнновации»:

1 – электродвигатель; 2 – рама установки; 3 – ременная передача;

4 – центробежный насос; 5 – трубопровод

Недостатком данной установки является то, что нагрев смеси происходит до температуры стерилизации, в результате чего разрушаются незаменимые аминокислоты, а длительность обработки влечет за собой высокие энергозатраты.

Установка для приготовления жидких кормов КИП-0,6 производства ОАО «НОЭЗНО» (рис. 2.18) осуществляет однородное тонкое измельчение зернофуража до получения киселеобразной массы для кормления молодняка.

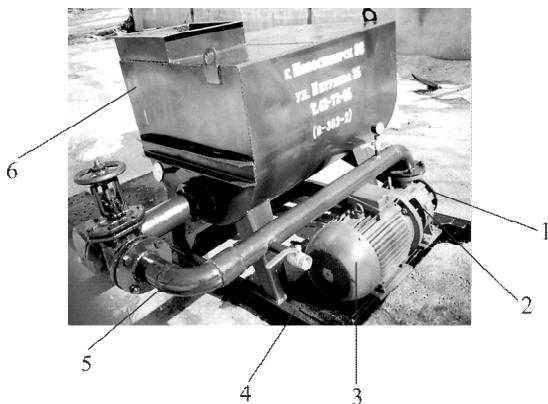


Рис. 2.18. Установка для приготовления жидких кормов КИП-0,6:
1 – центробежный насос; 2 – ременная передача; 3 – электродвигатель;
4 – рама установки; 5 – трубопровод; 6 – емкость для корма

Установка является технологическим оборудованием периодического действия, обслуживается одним оператором и применяется для приготовления зерновой пасты. Техническая характеристика представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Техническая характеристика КИП-0,6

Параметр	Значение
Объем бака	700 л
Объем рабочей массы	650 л
Время цикла приготовления кормовой пасты при максимальной/минимальной загрузке	1,5/2 ч
Температура готовой кормовой пасты	52 °С
Насос	КМ 100-80-160
Электродвигатель	15 кВт/3000 об/мин

Принцип действия установки: смесь продуктов с водой через насос и инжекторный патрубок попадает из бака в измельчитель-

теплогенератор, внутри которого расположены секции с наклонными и поперечными пазами и многогранные элементы расширителя потока. В результате ударов потока об острые грани пазов и расширителя продукт измельчается и одновременно нагревается, превращая кинетическую энергию в тепловую. На острых углах пазов рабочих секций и элементов расширителя вихревой поток создает встречные завихрения, трение которых вызывает эффект кавитации и взрывы пузырьков в зоне разрежения, что ускоряет процесс измельчения продукта и нагрева [51].

Недостаток данного оборудования – длительность процесса переработки, что влечет за собой высокие энергозатраты.

Таким образом, известное оборудование обладает достаточно серьезными недостатками, главными из которых являются высокая энергоемкость и большие рабочие температуры, разрушающие витамины и аминокислоты, что снижает питательность зернофуража. Поэтому необходимо разработать оборудование, способное в условиях хозяйства перерабатывать консервированное зерно в легкоусвояемый жидкий корм с меньшими энергозатратами, сохраняя витаминный комплекс и незаменимые аминокислоты.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДУЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВ

3.1. Исследование геометрических параметров рабочих органов измельчителя вертикального типа

Процесс работы многоплоскостного измельчителя с вертикально расположенной рабочей камерой основан на разрушении материала активными рабочими органами. От числа и конструкции последних во многом зависят основные показатели машины: удельная энергоемкость выполняемого процесса, производительность и степень измельчения кормов. При выборе геометрии рабочих органов следует учитывать технологичность их изготовления.

Аналитические исследования различных способов измельчения кормов показали, что в качестве элемента разрушения органических веществ, используемых на корм скоту, могут применяться ножи и молотки. Молотки, как правило, используют только для измельчения зернофуража. Для кормов повышенной влажности данный рабочий орган практически неэффективен. Процесс измельчения корнеклубнеплодов молотками сопровождается обильным соковыделением, что приводит к потере питательных веществ.

Рассмотренные недостатки отсутствуют при использовании в качестве рабочих органов ножей. Так как многофункциональный измельчитель должен подготавливать к скармливанию животным все виды кормов, то более полно поставленным требованиям отвечают ножи. Эти рабочие элементы измельчителя могут иметь различную форму. Исследования формы лезвия ножей для плоско-вращательных аппаратов провел академик В. П. Горячкин. Им были рассмотрены следующие формы лезвий: гиперболическая, логарифмическая, архимедова спираль и др.

Несмотря на ряд положительных характеристик ножей с криволинейной формой лезвия, к которым следует отнести условия резания, на практике в большинстве случаев используют прямолинейные ножи. Широкое их применение обусловлено простотой изготовления и монтажа, удобством заточки лезвий. В свою очередь, к этим режущим элементам относятся ножи сегментного и молоткового типов (рис. 3.1).

Для выбора формы режущего элемента к многофункциональному измельчителю, создаваемому на базе ИСК-3, определим условия, необходимые для нормальной его работы.

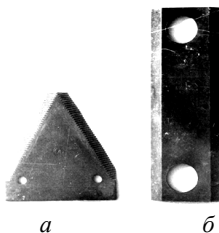


Рис. 3.1. Типы ножей:
а – сегментный; б – молотковый

При неизменной форме противорежущего элемента измельчителя нож должен обеспечивать наименьший расход энергии на резание кормов режущими кромками пары «нож–противорез». Так, угол раствора режущей пары $\alpha_{\text{рез}}$ можно определить из условия

$$\tau_n + \beta_{\text{пр}} \leq \alpha_{\text{рез}}, \quad (3.1)$$

где τ_n и $\beta_{\text{пр}}$ – углы наклона ножа и противорежущего элемента, град.

По данным ВИСХОМа, значение угла $\alpha_{\text{рез}}$ должно находиться в пределах 30...50°. Из представленных на рис. 3.1 режущих элементов ножи сегментного типа выпускаются серийно. Угол наклона их лезвия – 30°, высота – 80 мм, толщина – 2 мм.

При проведении поисковых исследований было установлено, что режущий элемент сегментного типа образует с противорежущим элементом измельчителя ИСК-3 угол раствора, равный 10° (рис. 3.2, а). При отклонении ножа от радиального положения на угол 15° (рис. 3.2, б) $\alpha_{\text{рез}} = 0^\circ$, то есть происходит рубка корма, а следовательно, затраты энергии на процесс резания возрастают.

Наиболее благоприятен режим резания при отклонении сегмента на угол более 50° (рис. 3.2, в), тогда $\alpha_{\text{рез}} = 27^\circ$. Однако в этом случае вершина угла, образованного ножом и противорезом, направлена к внутренней поверхности рабочей камеры, а значит, корм, перемещаемый под действием центробежной силы вдоль лезвия ножа, выскальзывает из режущей пары.

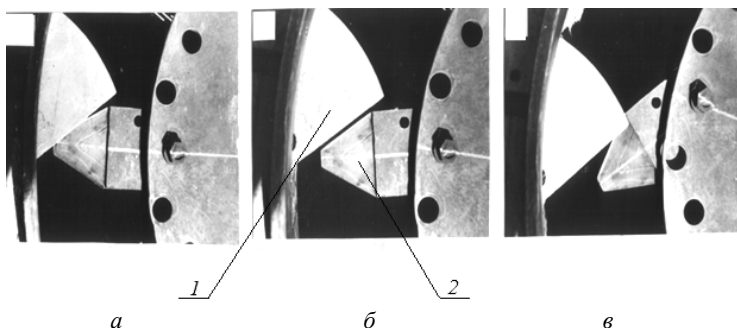


Рис. 3.2. Технологический процесс взаимодействия ножа сегментного типа 2 с противорежущим элементом 1

Установлено, что при использовании в качестве режущего элемента ножа молоткового типа угол раствора режущей пары $\alpha_{\text{рез}} = 35^\circ$ (рис. 3.3, а). Значение находится в пределах, соответствующих изложенным выше условиям, а следовательно, режим резания в этом случае наименее энергоемок.

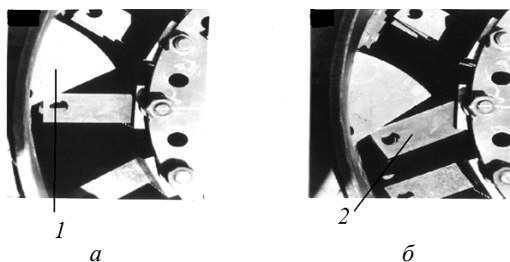


Рис. 3.3. Взаиморасположение ножей молоткового типа 2 и противорежущего элемента 1

При создании модуля для измельчения зернофуража был рассмотрен вариант шарнирного крепления ножа. Учитывая, что шарнирно закрепленный режущий элемент во время работы совершает колебания вокруг оси крепления, можно предположить, что к моменту среза угол раствора увеличится до $\alpha_{\text{рез}} = 40...45^\circ$. С ростом сопротивления движению при резании нож отклоняется в противоположную направлению движения сторону. Из представленного на рис. 3.3, б взаиморасположения ножа и противорежущего элемента видно, что только при отклонении ножа на угол 30° угол $\alpha_{\text{рез}} = 15^\circ$.

Таким образом, наиболее полно условиям отвечает нож молоткового типа. Изготавливаются ножи из высокоуглеродистой стали марок У9 и 65Г с термообработкой рабочей зоны до твердости 60 НВ.

Работы, выполненные в БелНИИМСХ и Белорусской сельскохозяйственной академии, показали, что в измельчителе вертикального типа можно устанавливать противорежущие элементы круглой формы (рис. 3.4).

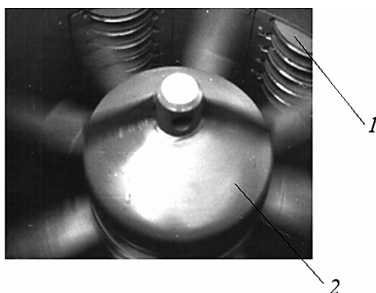


Рис. 3.4. Измельчитель с противорежущими элементами круглой формы:
1 – противорежущий элемент; 2 – ротор измельчителя

Предложенная геометрия противорезов за счет вращения их на осях крепления по мере затупления части лезвия позволяет эксплуатировать их в течение длительного периода без заточки. Однако результаты наблюдения за режимом работы измельчителя с противорежущими элементами круглой формы практически не отличались от серийного. Но так как серийно выпускаются противорежущие элементы сегментной формы, то было принято решение взять данную форму за основу при проектировании многофункционального модульного измельчителя кормов [52, 53].

3.1.1. Обоснование выбора толщины ножа

Важным параметром режущего элемента является его толщина. Экспериментально установлено, что с увеличением толщины ножа возрастают затраты энергии на резание. Толщина режущего элемента должна быть наименьшей, однако в этом случае он будет прогибаться в наименьшем сечении, что может стать причиной поломки ножа при встрече с противорежущим элементом.

Техническим решением, снижающим вероятность встречи ножа с противорежущей пластиной, является увеличение зазора между

ними. Однако при решении задачи надежности возникает проблема возрастания затрат энергии на выполняемый процесс. При значительном зазоре частицы корма просто перемещаются между плоскостями режущей пары. С целью уменьшения затрат энергии зазор между плоскостями ножа и противорежа следует устанавливать наименьшим.

Таким образом, от толщины ножа зависит энергоемкость выполняемого процесса и эксплуатационная надежность измельчителя. Эти два фактора являются важным аргументом для теоретического обоснования толщины ножа к multifunctional модульному измельчителю кормов.

В плоскоповращательном режущем аппарате резание кормов осуществляется с подпором. Для этого в вертикально установленной рабочей камере, на роторе закреплены ножи, а по внутреннему периметру – противорежущие элементы. В процессе работы измельчителя ножи движутся над противорежущими элементами (рис. 3.5). Так как между ними установлен зазор, то корм поступает в это пространство. В результате возникает вертикально направленная сила обжатия

$$F_{\text{обж}} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h_{\text{сл}}}, \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль деформации корма, Н/м²;

$h_{\text{сж}}$ – величина сжатого слоя корма, м;

$h_{\text{сл}}$ – величина сжимаемого слоя корма, м.

Величина сжимаемого слоя корма зависит от величины зазора между ножом и противорежущей пластиной, поэтому справедливо равенство $h_{\text{сл}} = \Delta_1$. Тогда формула (3.2) будет иметь вид:

$$F_{\text{обж}} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{\Delta_1}, \quad (3.3)$$

где Δ_1 – зазор между ножом и противорежущей пластиной, м.

Под воздействием силы обжатия возникает сила трения

$$F_{\text{тр1}} = F_{\text{обж}} f_{\text{к}}, \quad (3.4)$$

где $f_{\text{к}}$ – коэффициент трения корма по металлу.

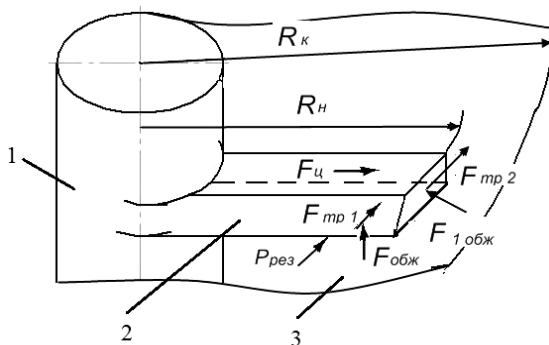


Рис. 3.5. Схема для обоснования выбора толщины ножа:
1 – ротор; 2 – нож; 3 – рабочая камера измельчителя

Работа, затрачиваемая на преодоление силы трения $F_{тр1}$, определяется по формуле

$$A_{тр1} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_1} f_k l_{н.пр}, \quad (3.5)$$

где $l_{н.пр}$ – длина ножа, движущегося над плоскостью противорежущей пластины, м.

В процессе работы измельчителя корм поступает в зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом. В результате возникает горизонтально направленная сила обжатия, величину которой можно определить по формуле

$$F_{1обж} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_2}, \quad (3.6)$$

где Δ_2 – зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом, м.

Под воздействием обжатия возникает сила трения

$$F_{тр2} = F_{1обж} f_k. \quad (3.7)$$

Работа, затрачиваемая на преодоление силы трения $F_{тр2}$:

$$A_{тр2} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_2} f_k b_n. \quad (3.8)$$

где b_n – ширина ножа, м.

При резании корма лезвием ножа на его активной части возникает критическая сила резания

$$A_{\text{кр. рез}} = P_{\text{рез}} l_{\text{лезв}}, \quad (3.9)$$

где $P_{\text{рез}}$ – сила резания, Н.

Вращательное движение ножа осуществляется действием окружной силы, работу на преодоление которой можно определить по формуле

$$A_{\text{окр}} = F_{\text{окр}} R_{\text{н}} = \frac{N_{\text{дв}}}{\omega_{\text{р}}}, \quad (3.10)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность, передаваемая от электродвигателя на ротор измельчителя, кВт;

$\omega_{\text{р}}$ – угловая скорость ротора измельчителя, с^{-1} .

Полученные уравнения позволяют определить изгибающую нагрузку, действующую на нож при опорном резании:

$$A_{\text{изг}} = A_{\text{тр}_1} + A_{\text{тр}_2} + A_{\text{окр}} + A_{\text{кр. рез}}. \quad (3.11)$$

Крепление режущего элемента в измельчителе исключает его перемещение в вертикальной плоскости, что позволяет с некоторыми допущениями рассматривать нож как консольную балку с жестко закрепленным концом. Для такого крепления максимальную изгибающую нагрузку, действующую на нож, можно определить по формуле

$$P_{\text{н}} = \frac{b h_{\text{н}}^2}{l_{\text{кр}}} \frac{\sigma_{\text{в}}}{6}, \quad (3.12)$$

где $h_{\text{н}}$ – толщина ножа, м;

$l_{\text{кр}}$ – длина ножа от оси крепления до торца, м;

$\sigma_{\text{в}}$ – допустимый предел прочности, МПа.

Работа, затраченная на преодоление указанной силы, определяется по формуле

$$A_{\text{изг}} = P_{\text{н}} R_{\text{н}}, \quad (3.13)$$

где $P_{\text{н}}$ – действующая на нож нагрузка, Н;

$R_{\text{н}}$ – радиус, описываемый ножами, м.

Подставив соответствующие составляющие в уравнение (3.11), получим:

$$\mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_1} f_k l_{н.пр} + \mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_2} f_k b_n + \frac{N_{дв}}{\omega_{рот}} + P_{рез} l_{лезв} = \frac{b_n h_n^2}{l_{кр}} \frac{\sigma_b}{6} R_n. \quad (3.14)$$

Из уравнения (3.14) определим толщину режущего элемента:

$$h_n = \sqrt{\frac{\mu \frac{E}{2} h_{сж}^2 f_k l_{н.пр} + \mu \frac{E}{2} \frac{h_{сж}^2}{\Delta_2} f_k b_n + \frac{N_{дв}}{\omega_{рот}} + P_{рез} l_{лезв}}{b_n \sigma_b R_n}}. \quad (3.15)$$

Анализ формулы (3.15) показывает, что с увеличением передаваемой на нож мощности его толщина возрастает. При расчете необходимо учитывать физико-механические свойства кормов и конструктивные особенности измельчителя. Расчетная толщина h_n ножа, образующего режущую пару с противорежущим элементом измельчителя кормов вертикального типа ИСК-3, при потребляемой мощности 39 кВт равна 10 мм.

3.1.2. Определение величины угла заточки ножа в измельчителе кормов вертикального типа

Важным геометрическим параметром ножа, влияющим на затраты энергии, является угол его заточки. В своем исследовании Н. Е. Резник приводит график зависимости, из которого следует, что с уменьшением угла заточки ножа критическая сила резания снижается. Это свидетельствует о целесообразности выполнять угол заточки ножа минимальным. Однако с уменьшением этого параметра снижается прочность лезвия, а следовательно, и надежность измельчителя.

Таким образом, при создании многофункционального модульного измельчителя кормов вертикального типа необходимо определить угол заточки ножа с учетом конструктивных особенностей машины.

В измельчителе с вертикально расположенной рабочей камерой и многоплоскостным измельчающим аппаратом корма перемещаются в сторону выгрузной камеры по винтовой линии. Во время движения они попадают в рабочую зону лезвий режущих элементов. На рис. 3.6 показан клин, представляющий собой часть ножа с односторонней заточкой, по поверхности которого со скольжением перемещается частица корма.

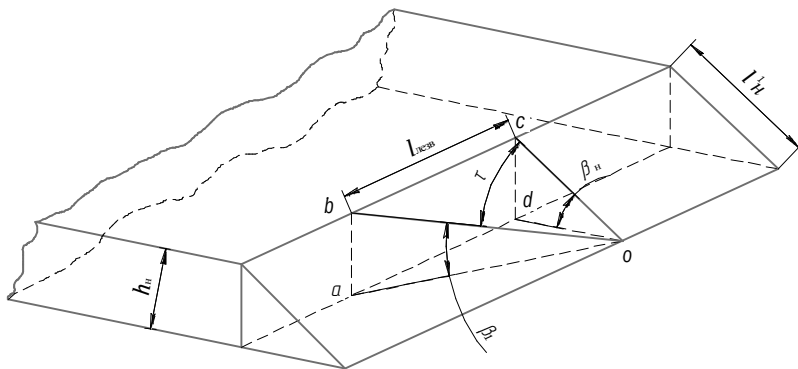


Рис. 3.6. Схема для определения угла заточки ножа

В соответствии с рис. 3.6 угол заточки ножа можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\cos \tau}, \quad (3.16)$$

где β_1 – величина трансформированного угла заточки ножа, град.;
 τ – угол скольжения, град.

Используя тригонометрические формулы, определим величину трансформированного угла заточки ножа:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{ab \operatorname{tg} \tau}{bc \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \tau}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\frac{ab \operatorname{tg} \tau}{bc \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \tau}}}{\frac{a}{b}}^2}}}. \quad (3.17)$$

Полученное выражение (3.17) подставим в уравнение (3.16), заменив символы параметрами ножа:

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{h_n}{l_n^1 \frac{a}{b} \frac{1}{c} - \frac{h_n}{l_n + l_{\text{лез}}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \cos \tau}. \quad (3.18)$$

Формула (3.18) показывает, что угол заточки ножа зависит от его толщины h_n , длины наклонной грани l_n и величины смещения частицы корма $l_{\text{лезв}}$ по наклонной грани. При известных параметрах

ножа необходимо определить, на какое расстояние $l_{\text{лезв}}$ сместится частица, перемещаясь по наклонной грани ножа.

Значение $l_{\text{лезв}}$ соответствует длине лезвия ножа, осуществляющего резание частицы корма. Этот процесс сопровождается взаимодействием лезвия ножа с материалом. В многоплоскостном измельчающем аппарате для создания противорежущего подпора используются противорезы, выполненные в виде ножа. Они закреплены на внутренней поверхности рабочей камеры и образуют с ножами режущие пары. При попадании частицы корма в раствор режущей пары происходит внедрение лезвий в материал. Работа, затрачиваемая на выполняемый процесс, определяется по формуле

$$A_{\text{рез}} = P_{\text{рез}} 2r_{\text{ч}}, \quad (3.19)$$

где $r_{\text{ч}}$ – радиус сечения частицы корма, м.

Усилие резания определяется как произведение площади кромки лезвия ножа на разрушающее контактное напряжение S_p :

$$P_{\text{рез}} = \delta_{\text{лезв}} l_{\text{лезв}} \sigma_p, \quad (3.20)$$

где $\delta_{\text{лезв}}$ – толщина лезвия ножа, м.

Тогда работу, затрачиваемую на разделение частицы силой резания, можно определить по формуле

$$A_{\text{рез}} = \delta_{\text{лезв}} l_{\text{лезв}} \sigma_p \times 2r_{\text{ч}}. \quad (3.21)$$

В процессе резания частицы корма перемещаются по лезвию ножа, преодолевая силу трения. Затрачиваемая на преодоление этой силы работа определяется по формуле

$$A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} l_{\text{лезв}}, \quad (3.22)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, Н.

Тогда работа, затрачиваемая на резание частицы корма и преодоление силы трения при перемещении частицы корма по лезвию ножа:

$$A = A_{\text{рез}} + A_{\text{тр}}, \quad (3.23)$$

откуда

$$l_{\text{лезв}} = \frac{A}{\delta_{\text{лезв}} \sigma_p \times 2r_{\text{ч}} + F_{\text{тр}}}. \quad (3.24)$$

Работу, затрачиваемую на преодоление указанных сил, можно также определить по формуле

$$A = \frac{N_{\text{рез}}}{\omega_p}, \quad (3.25)$$

где $N_{\text{рез}}$ – мощность, затрачиваемая ножом на процесс резания, кВт;
 ω_p – угловая скорость ротора измельчителя, с^{-1} .

Подставив в формулу (3.24) значения рассмотренных сил, получим выражение, позволяющее определить длину пути резания частицы:

$$l_{\text{лезв}} = \frac{N_{\text{рез}}}{(\delta_{\text{лезв}} \sigma_p \times 2r_{\text{ч}} + F_{\text{тр}}) \omega_p}. \quad (3.26)$$

Формула (3.26) позволяет определить угол заточки ножа с учетом длины его лезвия, участвующей в резании частиц корма:

$$\text{tg } \beta_{\text{н}} = \frac{h_{\text{н}}}{l_{\text{н}} + \frac{N_{\text{рез}}}{(\delta_{\text{лезв}} \sigma_p \times 2r_{\text{ч}} + F_{\text{тр}}) \omega_p} \cos \tau}. \quad (3.27)$$

Угол заточки ножа является одним из наиболее сложных параметров рабочего органа. Уменьшить затраты энергии на резание без изменения угла заточки ножа можно при резании со скольжением. В этом случае наблюдается трансформация угла заточки ножа в сторону уменьшения. Впервые эксперименты по данному вопросу были проведены В. П. Горячкиным. Установлена зависимость между нормальным давлением на лезвие и касательным его перемещением относительно материала, сделан вывод о снижении нормального давления на перерезаемый материал только после того, как угол скольжения приобретает определенную величину.

Рекомендуемый угол скольжения – $60...70^\circ$ [54]. Несколько отлична его величина при резании грубых кормов: наименьшая удельная работа резания соответствует углам скольжения, изменяющимся в пределах от 30 до 80° , причем с уменьшением значения угла работа резания снижается. При расчете угла заточки ножа необходимо учитывать и конструктивные параметры измельчителя кормов [55].

В соответствии с уравнением (3.27) получен график зависимости угла заточки ножа от его толщины и мощности, затрачиваемой на резание корма (рис. 3.7).

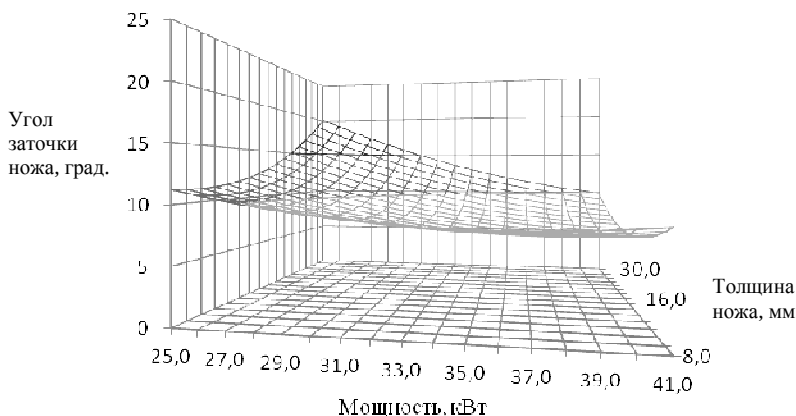


Рис. 3.7. График зависимости угла заточки ножа от его толщины и мощности на резание корма

Анализ полученного графика показывает, что с увеличением толщины ножа угол его заточки возрастает, а с ростом мощности – уменьшается. Установлено, что для ножа толщиной 10 мм при мощности электродвигателя 39 кВт угол заточки ножа равен 8° .

3.1.3. Определение параметров рифленых дек

В качестве пассивных рабочих органов для измельчения зернофуража используются рифленые деки. Они отличаются от плоской поверхности выступами, образующими рифленую поверхность, обращенную в сторону активных рабочих органов измельчителя.

При перемещении кормового слоя по рифленой поверхности дек происходит снижение его переносной скорости. В этом случае в результате разности скоростей между вращающимися вокруг оси ротора рабочими органами и частицами корма происходит разрушение массы.

Рифы могут быть различной формы – прямоугольной, полукруглой, треугольной – и иметь различное положение по дуге охвата рабочей камеры измельчителя. Различен шаг, ширина рифленых планок, угол установки их по отношению к направлению движения материала. Подобные конструкции пассивных рабочих органов достаточно изучены и широко используются для измельчения кормов в кормоуборочных комбайнах и дробилках с горизонтально расположенной рабочей камерой.

Рабочие процессы с использованием рифленых дек в измельчителях с вертикально расположенной рабочей камерой рассматривались в работе [56]. Изучены процессы измельчения зерна кукурузы в вертикальном потоке и установлено, что измельчение частиц происходит в результате:

- непосредственного разрушения частиц при ударе о поверхность рифа – неупругий удар;
- воздействия на частицы зернофуража активных рабочих органов – упругий удар;
- образования режущих пар между кромками активных рабочих органов и рифами.

Таким образом, параметры рифов должны обеспечивать эффективные условия для осуществления перечисленных видов разрушений.

Из схемы на рис. 3.8, *а* видно, что для обеспечения прямого центрального удара фронтальная грань должна располагаться под углом α_r к радиусу рабочей камеры.

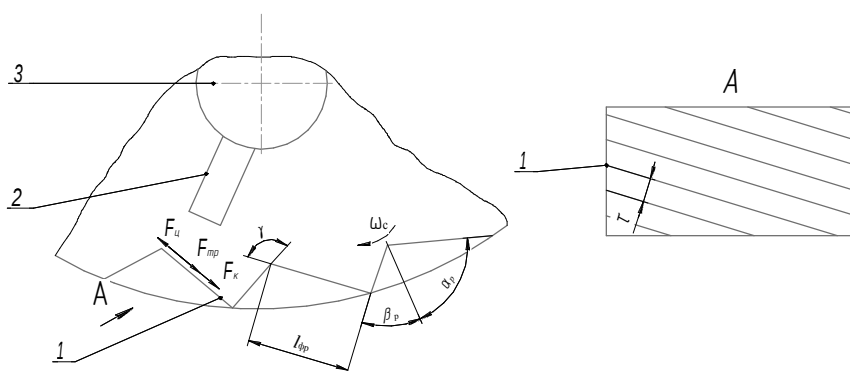


Рис. 3.8. Схемы для определения геометрических параметров рифов:
1 – риф; 2 – нож; 3 – ротор измельчителя

Наиболее эффективно располагать фронтальную грань исходя из условия

$$\arccos(1 - l_b / R_n) \leq \alpha_p \leq \pi - 2(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (3.28)$$

где l_b – расстояние от точки вылета частицы до деки, м;

R_n – радиус, описываемый активными рабочими органами, м;

φ_1, φ_2 – углы трения корма по поверхности деки и активного рабочего органа соответственно, град.

Важным параметром, обеспечивающим чистоту впадин, образованных смежными рифами, является угол заострения рифа. Минимальное значение угла заострения, обращенного в сторону активных рабочих органов, должно превышать двойной угол трения:

$$\gamma_{\min} > 2\varphi. \quad (3.29)$$

Для рационального числа рифов на деке значение угла γ должно находиться в диапазоне $80...100^\circ$.

Забивание впадин между смежными рифами происходит из-за постоянного смещения частиц корма вдоль радиуса активного рабочего органа к внутренней поверхности рабочей камеры. Грань выступа рифа, расположенная за его фронтальной гранью, ограничивает перемещение частиц между рифами и приводит к их залипанию. Устранение данного недостатка возможно при замене трения покоя на трение движения. Для этого рифы на деке должны располагаться под углом τ к горизонтальной плоскости (рис. 3.9, б):

$$40...58^\circ \leq \tau \leq 65...75^\circ. \quad (3.30)$$

При известных углах наклона рифов неизвестной величиной является длина фронтальной грани, по которой перемещается измельчаемый материал. Для определения данного параметра рассмотрим силы, действующие на частицу корма при перемещении ее по фронтальной плоскости рифа.

При измельчении зернофуража частицы корма, поступающие в рабочую камеру, подвергаются воздействию активных рабочих органов. В этом случае кормовой поток меняет направление своего движения. Частицы корма начинают двигаться с относительной скоростью к внутренней поверхности рабочей камеры. Одновременно они приобретают переносную скорость, действием которой

увлекаются в круговое движение. На частицу корма, перемещающуюся по фронтальной плоскости рифа, действуют следующие силы:

– сила трения частицы о поверхность рифа

$$F_{\text{т}} = f_{\text{к}} m_{\text{к}} g, \quad (3.31)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса частицы, кг;

– центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = m_{\text{к}} \omega_{\text{с}}^2 l_{\text{ф.п}}, \quad (3.32)$$

где $\omega_{\text{с}}$ – частота вращения слоя корма внутри рабочей камеры, с^{-1} ;

$l_{\text{ф.п}}$ – длина фронтальной плоскости рифа, м;

– Кориолисова сила

$$F_{\text{кор}} = 2 m_{\text{к}} \omega_{\text{с}} \frac{dl_{\text{ф.п}}}{dt}, \quad (3.33)$$

где $\frac{dl_{\text{ф.п}}}{dt}$ – скорость движения частицы зернофуража, м/с.

Тогда дифференциальное уравнение движения частицы относительно ножа

$$m_{\text{к}} \frac{d^2 l_{\text{ф.п}}}{dt^2} - m_{\text{к}} \omega_{\text{с}}^2 l_{\text{ф.п}} + 2 f_{\text{к}} m_{\text{к}} \omega_{\text{с}} \frac{dl_{\text{ф.п}}}{dt} = - f_{\text{к}} m_{\text{к}}. \quad (3.34)$$

Полученное уравнение является линейным неоднородным 2-го порядка. Общее решение его складывается из общего решения однородного линейного уравнения и частного решения неоднородного уравнения (3.34):

$$\frac{d^2 l_{\text{ф.п}}}{dt^2} - \omega_{\text{с}}^2 l_{\text{ф.п}} + 2 f_{\text{к}} m_{\text{к}} \omega_{\text{с}} \frac{dl_{\text{ф.п}}}{dt} = 0. \quad (3.35)$$

Решив уравнение (3.35), получим:

$$l_{\text{ф.п}} = C_1 e^{\left(f_{\text{к}} \omega_{\text{с}} + \omega_{\text{с}} \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1}\right)t} + C_2 e^{\left(f_{\text{к}} \omega_{\text{с}} - \omega_{\text{с}} \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1}\right)t}. \quad (3.36)$$

Находим частное решение неоднородного уравнения (3.34). При $l_{\phi, p} = c$ имеем $\frac{d^2 l_{\phi, p}}{dt^2} = 0$ и $\frac{dl_{\phi, p}}{dt} = 0$. Тогда уравнение (3.34) будет иметь вид $0 + 0 - \omega_c^2 C = -fg$, откуда $C = -(fg / \omega_c^2)$.

Искомое общее решение уравнения будет иметь вид:

$$l_{\phi, p} = C_1 e^{(f_k \omega_c + \omega_c \sqrt{f_k^2 + 1})t} + C_2 e^{(f_k \omega_c - \omega_c \sqrt{f_k^2 + 1})t} + \frac{f_k g}{\omega_c^2}. \quad (3.37)$$

При начальных условиях $t = 0$, $l_{\phi, p} = 0$, $\frac{dl_{\phi, p}}{dt} = 0$ получим:

$$\begin{aligned} l_{\phi, p} &= C_1 + C_2 + \frac{f_k g}{\omega_c^2} = 0; \\ l_{\phi, p} &= C_1 + (\omega_c \sqrt{f_k^2 + 1}) + C_2 (\omega_c \sqrt{f_k^2 + 1}) = 0. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Решим систему уравнений относительно C_1 и C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{f_k g}{\omega_c^2} \frac{f_k + \sqrt{f_k^2 + 1}}{2\sqrt{f_k^2 + 1}} - 1; \\ C_2 &= \frac{(f_k + \sqrt{f_k^2 + 1}) \frac{f_k g}{\omega_c^2}}{2\omega_c^2 \sqrt{f_k^2 + 1}}. \end{aligned} \quad (3.39)$$

При известных значениях коэффициентов C_1 и C_2 решение уравнения (3.35) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} l_{\phi, p} &= \frac{f_k g}{\omega_c^2} \frac{f_k + \sqrt{f_k^2 + 1}}{2\sqrt{f_k^2 + 1}} e^{(f_k \omega_c + \omega_c \sqrt{f_k^2 + 1})t} - \\ &- \frac{f_k g}{\omega_c^2} \frac{f_k + \sqrt{f_k^2 + 1}}{2\omega_c^2 \sqrt{f_k^2 + 1}} e^{(f_k \omega_c - \omega_c \sqrt{f_k^2 + 1})t} + 1. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Чтобы исключить забивание впадин между смежными рифами измельчаемым зернофуражом, фронтальную грань рифа на деке следует расположить под углом τ к горизонтальной плоскости (рис. 3.9, б). Тогда уравнение для определения длины фронтальной грани рифа будет иметь вид:

$$l_{\text{ф.р}} = \tau \frac{f_{\text{к}} g}{\omega_c^2} \frac{\frac{\partial f_{\text{к}}}{\partial t} + \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1} \ddot{\theta}}{2\sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1}} e^{(f_{\text{к}} \omega_c + \omega_c \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1})t} - \frac{\frac{\partial f_{\text{к}}}{\partial t} + \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1} \ddot{\theta}}{2\omega_c^2 \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1}} e^{(f_{\text{к}} \omega_c - \omega_c \sqrt{f_{\text{к}}^2 + 1})t} + 1 \dot{\theta} \quad (3.41)$$

Из формулы (3.41) видно, что при определении длины фронтальной поверхности рифа необходимо учитывать динамический характер процессов, происходящих при измельчении зернофуража в рабочей камере измельчителя.

Определим длину фронтальной поверхности рифа по формуле (3.40):

$$l_{\text{ф.р}} = \frac{0,4 \times 9,8}{42,1^2} \frac{0,4 + 1,077 \ddot{\theta}}{2 \times 1,077} e^{(0,4 \times 42,1 + 42,1 \times 1,077) \times 0,024} - \frac{0,4 + 1,077 \ddot{\theta}}{2 \times 42,1^2 \times 1,077} e^{(0,4 \times 42,1 - 42,1 \times 1,077) \times 0,024} + 1 \dot{\theta} = 0,0023 \times 0,68 \times 2,7^{1,43} - 0,0003 \times 2,7^{-0,68} + 1 \dot{\theta} = 0,0087 \text{ м.}$$

По формуле (3.41) определим длину фронтальной грани рифа с учетом угла τ . Приняв угол наклона рифа равным 50° , получим $l_{\text{ф.р}} = 1,1918 \cdot 0,0087 = 0,01 \text{ м}$. Данное значение длины фронтальной поверхности рифа было принято при изготовлении деки к экспериментальному модулю для измельчения зернофуража.

3.1.4. Исследование процессов сепарации продуктов измельчения через ситовую поверхность

Важным показателем, характеризующим измельчитель кормов, является его производительность. Для измельчителей зернофуража этот показатель во многом зависит от просеиваемости ситовой

поверхности. Используемые для этой цели решета пропускают измельченный продукт, обеспечивая заданную степень его измельчения. Однако все исследования проводились на дробилках с горизонтально расположенным валом и закрепленными на нем рабочими органами, которые были охвачены решетом. Это дает основание для рассмотрения вопроса о севкости решет, закрепленных горизонтально внутри вертикально установленной рабочей камеры.

Решето в измельчителе зернофуража является сепарирующим органом. Его перфорированная поверхность может иметь различные по форме и диаметру отверстия, через которые отделяется измельчаемое зерно при выполнении технологического процесса. Таким образом, эффективность работы измельчителя зерна (а значит, такие показатели, как удельная энергоемкость, производительность и модуль помола) зависит от пропускной способности решета, которая характеризует предельную возможность просеивания продукта измельчения через сепарирующую поверхность. Для определения этого параметра решета проанализируем рабочий процесс, протекающий в камере измельчения.

Зерновой корм, поступая в рабочую камеру измельчителя, подвергается воздействию вращающихся рабочих органов и начинает перемещаться по плоскости решета. Часть энергии затрачивается на разрушение зерна, а часть – на преодоление сил трения частиц по поверхности решета и рабочей камеры. Если на пути измельченных частиц зерна встречается отверстие решета, в раствор которого частица вписывается, то она перемещается по каналу в сторону выгрузки. В этом случае пропускную способность решета можно определить по формуле

$$Q_{p1} = s_c \rho V_{np}, \quad (3.42)$$

где s_c – площадь сепарирующей поверхности, m^2 ;

ρ – плотность корма, kg/m^3 ;

V_{np} – скорость прохождения измельченного продукта через отверстия в решетке, m/s .

Из формулы (3.42) следует, что пропускная способность решета зависит от скорости продвижения измельченного продукта через отверстия в сите. Из схемы скоростей продукта, просеиваемого через отверстия в решетке (рис. 3.9), видно, что частицы перемешаются

в заштрихованное пространство в направлении вектора абсолютной скорости, которая и определяет скорость прохождения измельченного продукта через отверстия в решетке, т. е. $V_{\text{пр}} = V_{\text{абс}}$.

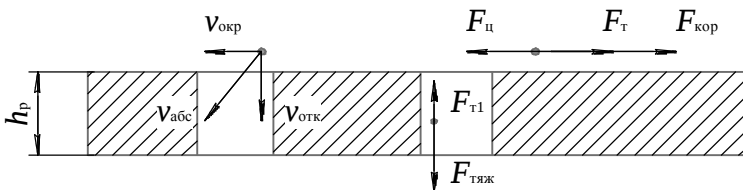


Рис. 3.9. Схема для определения пропускной способности решетки

Абсолютную скорость определяют по формуле

$$V_{\text{абс}} = \sqrt{V_{\text{окр}}^2 + V_{\text{отн}}^2}. \quad (3.43)$$

Для определения окружной скорости частицы корма, перемещающейся по ситовой поверхности, рассмотрим действующие на нее силы. На частицы зернофуража при измельчении действуют силы:

– сила трения частицы о поверхность решета, возникающая от силы тяжести:

$$F_{\text{т}} = f_{\text{к}} m_{\text{к}} g, \quad (3.44)$$

где $f_{\text{к}}$ – коэффициент трения корма по стали;

$m_{\text{к}}$ – масса частицы, кг;

– центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = m_{\text{н}} \omega_{\text{р}}^2 r_{\text{н}}, \quad (3.45)$$

где $\omega_{\text{р}}$ – угловая скорость ротора измельчителя, с^{-1} ;

$r_{\text{н}}$ – расстояние от оси вала ножа до частицы, м;

$m_{\text{н}}$ – масса ножа, кг;

– Кориолисова сила

$$F_{\text{кор}} = 2m_{\text{к}} \omega_{\text{р}} V_{\text{окр}}, \quad (3.46)$$

где $V_{\text{окр}}$ – окружная скорость движения частицы зернофуража, м/с.

Тогда уравнение движения частицы по поверхности решета

$$m_n \omega_p^2 r_n = f_k m_k g + 2m_k \omega_p V_{\text{окр}}, \quad (3.47)$$

откуда

$$V_{\text{окр}} = \frac{m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2m_k \omega_p}. \quad (3.48)$$

Для определения относительной скорости частицы корма, перемещающейся по отверстию в сите, рассмотрим действующие на нее силы. На частицы зернофуража действуют силы:

– сила тяжести

$$F_{\text{тяж}} = \frac{m_k V_{\text{отн}}^2}{h_p}, \quad (3.49)$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость движения частицы зернофуража, м/с;
 h_p – толщина решета, м;

– сила трения частицы о поверхность отверстия сита

$$F_{\text{т1}} = f_k m_k g. \quad (3.50)$$

Тогда уравнение движения частицы по отверстию сита

$$\frac{m_k V_{\text{отн}}^2}{h_p} - f_k m_k g = 0,$$

откуда

$$V_{\text{отн}}^2 = f_k h_p g. \quad (3.51)$$

Подставив в формулу (3.43) значения формул (3.47) и (3.51), определим абсолютную скорость движения частицы через отверстие решета:

$$V_{\text{абс}} = \sqrt{\frac{m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2m_k \omega_p} + f_k h_p g}. \quad (3.52)$$

Тогда пропускная способность решета

$$Q_{p1} = s_c \rho \sqrt{\frac{\alpha m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2 m_k \omega_p}} + f_k h_p g. \quad (3.53)$$

Пропускная способность решета в установившемся режиме работы измельчителя зависит от ряда факторов. Так, с положительным увеличением отношения геометрических размеров рабочей камеры и ротора измельчителя производительность будет возрастать. Следовательно, в измельчителе с вертикально установленной рабочей камерой ее периметр должен быть максимально перекрыт решетом [57].

При максимально возможной площади решета площадь его живого сечения зависит от диаметра отверстий и их числа, приходящегося на единицу поверхности. С целью увеличения пропускной способности следует выбирать наибольший диаметр отверстия. Увеличение диаметра отверстий снижает и затраты энергии на выполняемый процесс, однако влечет за собой рост крупности измельчаемого материала, что при определенных условиях лишает смысла эксплуатацию измельчителя. Диаметр отверстий в решете следует выбирать в зависимости от требований к конечному продукту. Максимальное их число на единицу площади определяется конструктивно с учетом прочности решета.

На устойчивую работу измельчителя оказывает влияние равномерность подачи материала в рабочую камеру. Соблюдение такого режима работы машины возможно при максимальном соответствии подачи и интенсивности прохождения частицами ситовой поверхности. При несоблюдении второго условия может иметь место завал рабочей камеры. При малой подаче корма в рабочую камеру этот недостаток устраним, однако в этом случае процесс измельчения протекает малоэффективно, т. к. происходит недоиспользование мощности электродвигателя.

Важным фактором, влияющим на пропускную способность решета, являются физико-механические свойства зерновых кормов. Установлено, что при измельчении зерна пленчатых культур производительность дробилки на 30–35 % ниже, чем при измельчении зерна беспленочных культур. Производительность выше при измельчении зерновой смеси, чем при измельчении зерна одной культуры. Снижается производительность и при повышении влажности зерна.

Чтобы увеличить пропускную способность решета, необходимо, чтобы возросла абсолютная скорость. Это возможно при росте скорости

вращения ножей. Однако в соответствии с принятыми условиями минимального изменения конструкции измельчителя скорость вращения ножей при измельчении всех видов корма должна быть постоянной.

Следовательно, увеличить пропускную способность измельчителя зерновых кормов можно только за счет увеличения диаметра отверстий в решетке и их живого сечения. Эти две зависимости позволили предположить возможность организации измельчения зернового корма по мере прохождения через рабочую камеру, что достигается путем установки нескольких ярусов решет с разным диаметром отверстий в каждом. Для проверки выдвинутой гипотезы необходимо проведение экспериментальных исследований.

Анализ известных видов ситовой поверхности позволил выбрать оптимальный вариант для создаваемых модулей к измельчителю зернофуража (рис. 3.10).

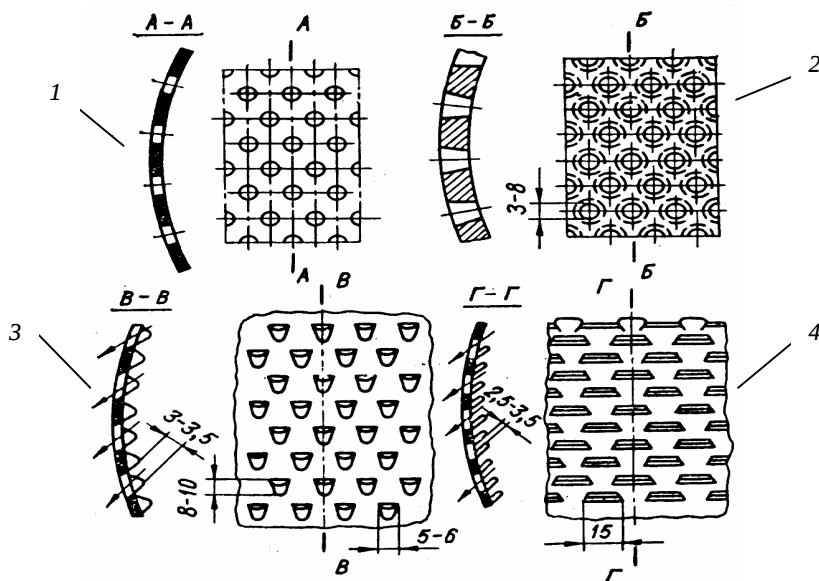


Рис. 3.10. Решета молотковых дробилок

Установлено, что для вывода измельченного продукта из рабочей зоны ножей применяют решета с круглыми 1 и продолговатыми 2 отверстиями, чешуйчатые с прямоугольной 3 или полуовальной 4 формами отверстий. Для большей севкости и прочности решет располагают отверстия в шахматном порядке.

Чешуйчатые решета изменяют коэффициент сопротивления движению частиц. Слой, прилегающий к ситовой поверхности этих решет, практически неподвижен, и частицы в нем только защемляются. Такой процесс обеспечивает быстрое удаление продукта из рабочей зоны ножей. К существенным недостаткам этого вида решет относят быстрый износ рабочих поверхностей и попадание в конечный продукт неизмельченных мелких и щуплых зерен.

Указанных недостатков лишены решета с круглыми отверстиями. Преимуществом этих решет является простота изготовления. На основании проведенных исследований принято решение использовать в поисковых экспериментах решета с круглыми отверстиями.

3.1.5. Определение затрат энергии на привод измельчителя кормов вертикального типа

Мощность, затрачиваемая на резание корма, является одним из основных параметров, определяющих выбор электродвигателя для привода измельчителя кормов:

$$N_{\text{пр}} = \Xi Q_{\text{изм}} \lambda, \quad (3.54)$$

где Ξ – удельный расход энергии на измельчение кормов, кВт·ч/т;

$Q_{\text{изм}}$ – производительность измельчителя, т/ч;

λ – степень измельчения кормов, %.

Однако применение формулы (3.54) оправдано при ориентировочных расчетах, где известен или задается удельный расход энергии на измельчение корма. При проектировании машин для измельчения кормов необходимо учитывать параметры, определяющие величину затрат энергии на рабочий процесс машины. Величину этой мощности можно определить по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{рез}} z}{t_{\text{рез}} \omega_{\text{p1}}}, \quad (3.55)$$

где $W_{\text{рез}}$ – момент количества движения ножа при выполнении процесса резания, кг·м²/с;

z – число закрепленных на роторе ножей, шт.;

$t_{\text{рез}}$ – время, затраченное на процесс резания, с;

ω_{p1} – угловая скорость ножа после процесса резания, с⁻¹.

В общем виде момент количества движения ножа при выполнении процесса резания

$$W_{\text{рез}} = (m_{\text{н}} + m_{\text{л}}) r_{\text{ин}}^2 \omega_{\text{р}}, \quad (3.56)$$

где $m_{\text{н}}$ – масса ножа, кг;

$m_{\text{л}}$ – масса корма на лезвии ножа, кг;

$r_{\text{ин}}$ – расстояние от оси ротора до центра тяжести ножа, м.

Так как процесс резания происходит за определенный промежуток времени $t_{\text{рез}}$, то момент количества движения ножа

$$M_{\text{н}} = M_{\text{кр. рез}} t_{\text{рез}}, \quad (3.57)$$

где $M_{\text{кр. рез}}$ – критический момент резания, Н·м.

Момент количества движения при резании вращающимся вокруг оси ножом можно выразить зависимостью

$$M_{\text{н}} = I_{\text{р}} (\omega_{\text{р}} - \omega_{\text{р1}}), \quad (3.58)$$

где $I_{\text{р}}$ – момент инерции ротора, $I_{\text{р}} = m_{\text{н}} R_{\text{н}}^2 / 2$, кг м²;

$R_{\text{н}}$ – радиус, описываемый ножами, м;

$\omega_{\text{р}}$ – угловая скорость ротора, с⁻¹.

Так как в уравнениях (3.57) и (3.58) левые части равны, то справедливо равенство

$$I_{\text{р}} (\omega_{\text{р}} - \omega_{\text{р1}}) = M_{\text{кр. рез}} t_{\text{рез}}. \quad (3.59)$$

Явление резания материалов возникает в результате критической силы резания $P_{\text{кр. рез}}$. Действием этой силы в период резания возникает момент

$$M_{\text{кр. рез}} = P_{\text{кр. рез}} l_{\text{лезв}}, \quad (3.60)$$

где $P_{\text{кр. рез}}$ – критическая сила резания, Н.

Из уравнения (3.59) выразим угловую скорость ножа после процесса резания:

$$\omega_{\text{р1}} = \frac{I_{\text{р}} \omega_{\text{р}} - P_{\text{кр. рез}} l_{\text{лезв}} t_{\text{рез}}}{I_{\text{р}}}. \quad (3.61)$$

Величину мощности, расходуемую на резание, можно определить по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{(m_{\text{н}} + m_{\text{л}}) r_{\text{ин}}^2 \omega_{\text{р}} z}{t_{\text{рез}} \omega_{\text{р1}}}. \quad (3.62)$$

Если ножи на роторе закреплены шарнирно, момент количества движения ножа при выполнении процесса резания

$$W_{\text{к}} = (m_{\text{н}} + m_{\text{л}}) r_{\text{ин}}^2 \omega_{\text{р}}, \quad (3.63)$$

где $r_{\text{ин}}$ – расстояние от оси ротора до центра тяжести ножа при отклонении его от оси симметрии, м.

Так как нож закреплен шарнирно, то после среза он отклоняется от радиальной оси на угол α^1 . Для шарнирно закрепленного ножа расстояние от оси ротора до центра тяжести ножа при отклонении его от оси симметрии

$$r_{\text{ин}} = R_{\text{под}} + C - C \cos \alpha^1, \quad (3.64)$$

где α^1 – максимальный угол отклонения шарнирно закрепленного ножа от радиального положения, град.;

$R_{\text{под}}$ – расстояние от оси ротора до оси крепления ножа, м;

C – расстояние от оси крепления ножа до его центра тяжести, м.

Подставив формулу (3.64) в (3.63), получим:

$$W_{\text{к}} = (m_{\text{н}} + m_{\text{л}}) (R_{\text{под}} + C - C \cos \alpha^1)^2 \omega_{\text{р}}. \quad (3.65)$$

Анализ формул (3.57) и (3.65) показывает, что величина момента количества движения ножа при резании корма зависит от динамического взаимодействия ножа с материалом и конструктивных особенностей измельчителя. Этот показатель возрастает при шарнирном креплении ножа, т. к. нарушается жесткость связи между ножом и ротором. В результате ножи при работе отклоняются от радиального положения, что трансформирует угол резания. Нарушение динамики движения рабочих органов измельчителя является причиной возникновения дополнительных нагрузок на опоры вала. Вследствие этого увеличивается износ подшипников.

Таким образом, наименее энергоемким является измельчающий аппарат с жестким креплением ножей на роторе машины. В этом случае на протяжении выполнения технологического процесса не происходит нарушения динамики движения активных рабочих органов и надежность измельчителя повышается.

По формуле (3.55) определена мощность на привод multifunctional модульного измельчителя кормов. Полученное значение мощности, 29,8 кВт, не превышает соответствующий параметр базовой машины ИСК-3.

3.1.6. Теоретико-вероятностное исследование процесса измельчения кормов

Теоретическое изучение влияния отдельных параметров измельчителей на степень измельчения кормов проводилось многими учеными. Оно было направлено на исследование влияния числа режущих пар на среднюю длину резки. Полученные результаты констатируют уменьшение средней длины резки стебельчатых кормов с увеличением числа противорежущих элементов, однако не в полной мере согласуются с экспериментальными данными. Это свидетельствует о том, что физические процессы, протекающие в измельчителях, изучены недостаточно и требуют поиска новых решений, в т. ч. для измельчителей с вертикально установленной рабочей камерой.

Физический смысл работы измельчителя состоит в массовом обслуживании корма до получения необходимых показателей качества. Используя теорию массового обслуживания, активные измельчающие органы измельчителя можно рассматривать как систему массового обслуживания с отказами, упорядоченным обслуживанием и ограничением времени пребывания заявки на обслуживании. Суть отказа в том, что частицы проходят неразрушенными или фракционный состав продукта не соответствует необходимым требованиям.

Упорядоченное обслуживание состоит в том, что если частица не обслужена (разрушена) в одной плоскости вращения ножей, то этот процесс произойдет на последующей. Ограничение времени пребывания частицы на обслуживании определяется тем, что она покидает пределы рабочей камеры измельчителя независимо от степени своего разрушения.

Исходя из изложенных предпосылок и физического процесса работы измельчающего устройства можно определить крупность измельчения частицы корма по формуле

$$l_{\text{изм}} = l_{\text{нач}} P_{\text{и}}, \quad (3.66)$$

где $l_{\text{нач}}$ – исходный размер частицы корма, м;
 $P_{\text{и}}$ – вероятность измельчения частицы корма.

Вероятность измельчения частицы корма определяется по формуле

$$P_{\text{и}} = 1 - e^{-\mu_{\text{изм}} t_{\text{ч}}}, \quad (3.67)$$

где $\mu_{\text{изм}}$ – интенсивность измельчения (параметр процесса);
 $t_{\text{ч}}$ – время нахождения частицы в рабочей зоне измельчения, с.

Процесс измельчения рассматривается как непрерывный и случайный, а входящий в него поток – как простейший, стационарный по математическому ожиданию и дисперсии. Интенсивность измельчения определяется конструктивно-кинематическими параметрами устройств, которые обеспечивают соответствующие вероятности встречи и разрушения. Поэтому интенсивность измельчения в общем виде определяется по формуле

$$\mu_{\text{изм}} = q_1 q_2, \quad (3.68)$$

где q_1 – вероятность встречи частицы корма с ножом;
 q_2 – вероятность разрушения частицы корма при встрече с ножом.

Поскольку частицы корма в рабочей камере сориентированы неодинаково, то вероятность встречи их с активными рабочими органами

$$q_1 = \frac{2 \arctg(l_{\text{н. пр}} / a)}{\pi}, \quad (3.69)$$

где $l_{\text{н. пр}}$ – длина ножа, перемещающаяся над плоскостью противорезушей пластины, м;
 a – расстояние между смежными гранями ножей, м.

Вероятность разрушения частиц корма определяется по формуле

$$q_2 = \frac{V_{\text{н}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{н}}}, \quad (3.70)$$

где $V_{\text{н}}$ – окружная скорость ножей, м/с;
 $V_{\text{ч}}$ – скорость прохождения частиц через рабочую камеру, м/с.

Тогда интенсивность измельчения можно определяется при подстановке формул (3.69) и (3.70) в выражение (3.68):

$$\mu_{\text{изм}} = \frac{2 \arctg(l_{\text{н.пр}} / a) (V_{\text{н}} - V_{\text{ч}})}{\pi V_{\text{н}}}. \quad (3.71)$$

Из формулы (3.67) видно, что вероятность измельчения частицы корма зависит от времени нахождения ее в рабочей камере. Это значение в общем виде определяется по формуле

$$t_p = \frac{l_p}{V_{\text{ч}}}, \quad (3.72)$$

где l_p – длина окружности рабочей камеры, м.

Для измельчения кормов внутри рабочей камеры устанавливаются противорезающие элементы, которые изменяют направление движения частиц. Справедливо уравнение для определения времени прохождения частицами корма через рабочую камеру

$$t_{\text{ч}} = t_p + t_{\text{пр}}, \quad (3.73)$$

где $t_{\text{пр}}$ – время перемещения частицы корма по поверхности противорезающих элементов, с:

$$t_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}}{V_{\text{пр}}}, \quad (3.74)$$

где $l_{\text{пр}}$ – длина пути частицы, перемещающейся по рабочей части противореза, м;

$V_{\text{пр}}$ – скорость перемещения частиц корма по рабочей части противореза, м/с.

Длина пути частицы, перемещающейся по рабочей части противореза, определяется по формуле

$$l_{\text{пр}} = 2\pi R_{\text{к}} - z_{\text{пр}} l_{\text{пр}} \cos \beta_{\text{пр}}, \quad (3.75)$$

где $R_{\text{к}}$ – радиус рабочей камеры, м;

$z_{\text{пр}}$ – число противорезающих элементов, шт.;

$\beta_{\text{пр}}$ – угол наклона противореза к внутренней поверхности рабочей камеры, град.

Подставив формулы (3.72), (3.74) и (3.75) в (3.73), получим:

$$t_{\text{ч}} = \frac{l_{\text{р}}}{V_{\text{ч}}} + \frac{2\pi R_{\text{к}} - z_{\text{нр}} l_{\text{нр}} \cos \beta_{\text{нр}}}{V_{\text{нр}}}. \quad (3.76)$$

Для определения вероятности измельчения частицы подставим в выражение (3.67) формулы (3.71) и (3.76):

$$P_{\text{и}} = 1 - e^{-\frac{2\text{arctg}(l_{\text{и, нр}}/a)(V_{\text{и}} - V_{\text{ч}})}{\pi V_{\text{и}}} \frac{\alpha_{\text{р}}}{C_{\text{в, ч}}} + \frac{2\pi R_{\text{к}} - z_{\text{нр}} l_{\text{нр}} \cos \beta_{\text{нр}}}{V_{\text{нр}}} \frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}}}. \quad (3.77)$$

При подстановке выражения (3.77) в (3.66) можно определить крупность измельчения частицы корма:

$$l_{\text{изм}} = l_{\text{нач}} \left(1 - e^{-\frac{2\text{arctg}(l_{\text{и, нр}}/a)(V_{\text{и}} - V_{\text{ч}})}{\pi V_{\text{и}}} \frac{\alpha_{\text{р}}}{C_{\text{в, ч}}} + \frac{2\pi R_{\text{к}} - z_{\text{нр}} l_{\text{нр}} \cos \beta_{\text{нр}}}{V_{\text{нр}}} \frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}}} \right). \quad (3.78)$$

Из выражения (3.78) видно, что вероятность измельчения частицы корма возрастает при увеличении длины ножей и противорежущих элементов. Конструктивно это выполнить сложно, т. к. в этом случае увеличивается диаметр рабочей камеры измельчителя. Более простой путь – увеличение числа закрепленных на роторе ножей или установленных по внутреннему периметру рабочей камеры противорежущих элементов. Для данного условия по выражению (3.77) была определена величина вероятности измельчения частицы корма при изменении числа противорежущих элементов.

Проведенные расчеты показывают, что с увеличением числа противорежущих элементов с четырех до восьми вероятность $P_{\text{и}}$ измельчения частицы корма возрастает соответственно от 0,047 до 0,1. После изучения всех составляющих уравнения (3.78) было принято решение увеличить $P_{\text{и}}$ за счет изменения числа режущих элементов. Для проверки выдвинутой гипотезы к измельчителю ИСК-3 был изготовлен экспериментальный ротор, режущие элементы в котором крепились в установленных между двумя дисками державках. Данная конструкция позволила варьировать число ножей в широких пределах, не меняя число противорежущих элементов измельчителя.

Экспериментальные исследования при измельчении зеленой массы показали, что с увеличением в рабочей камере измельчителя числа ножей доля мелкой фракции частиц увеличивается (рис. 3.11). В этом

случае частицы корма чаще попадают в рабочую зону режущих элементов. Данная зависимость прослеживается и при исследовании измельчителя-смесителя ИС-20.

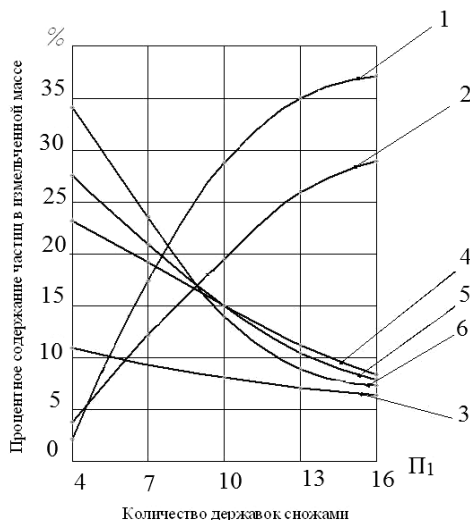


Рис. 3.11. График зависимости крупности частиц зеленой массы от числа установленных на роторе измельчителя ножей:
 1 – размер фракций до 5 мм; 2 – 5,1...10; 3 – 10,1...15;
 4 – 15,1...20; 5 – 20,1...30; 6 – свыше 30,1 мм

Однако с увеличением числа режущих элементов проявляются негативные факторы. Из графика зависимости на рис. 3.12 видно, что с увеличением числа державок с ножами в рабочей камере уменьшается производительность измельчителя. Вторым отрицательным моментом является рост удельной энергоемкости процесса измельчения. Это объясняется тем, что с увеличением числа державок с ножами уменьшается пространство между ними, возрастает переносная скорость массы и время пребывания частиц в рабочей зоне ножей и противорежущих элементов.

Таким образом, выяснено, что увеличение числа державок на роторе измельчителя снижает другие, не менее важные показатели. Вместе с тем полученные результаты позволили начать поиск рациональной конструкции рабочего органа, в результате предложена более простая и пригодная для измельчения кормов. Рабочий орган содержит два параллельных режущих ножа, закрепленных на одной державке, а следовательно, воздействие на частицу увеличено вдвое.

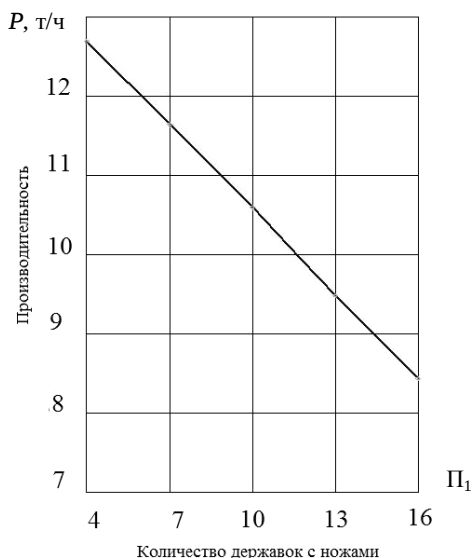


Рис. 3.12. График зависимости производительности измельчителя от числа установленных по периметру рабочей камеры ножей

Данная конструкция позволила на 50 % увеличить вероятность встречи частиц корма с режущим элементом. Новая конструкция ножа с двумя режущими лезвиями защищена патентом [58].

3.2. Исследование процесса перемещения кормов по внутренней поверхности рабочей камеры

При анализе технологического процесса измельчения кормов установлено, что поступающий в рабочую камеру материал действием вращающихся рабочих органов увлекается в круговое движение. Возникающая при этом сила инерции перемещает частицы от центра рабочей камеры к периферии. Таким образом, на внутренней поверхности рабочей камеры образуется вращающийся кормовой слой. При большом зазоре между активными рабочими органами и внутренней поверхностью рабочей камеры движущиеся с переносной скоростью частицы корма, не измельчаясь, под действием силы тяжести перемещаются в зону выгрузки. В результате фракция частиц большего размера возрастает, что отрицательно сказывается на качестве корма. Наиболее простым способом, позволяющим избежать

этого, является уменьшение зазора между концами ножей и внутренней поверхностью рабочей камеры. Однако при исследовании вопроса по определению величины указанного зазора при измельчении кормов установлено, что с уменьшением этого параметра возрастает удельная энергоёмкость процесса измельчения. Рост затрат энергии при уменьшении зазора объясняется увеличением силы трения корма о поверхность рабочей камеры.

С целью сведения к минимуму сил трения, вызываемых заклиниванием массы корма между торцевой поверхностью ножа и внутренней поверхностью рабочей камеры, была выдвинута гипотеза об уменьшении зазора только на ограниченном участке. В этом случае путь и время перемещения корма в минимальном зазоре значительно уменьшаются, а следовательно, вероятность заклинивания материала сводится к минимуму.

Для достижения поставленной цели перед каждым блоком противорежущих элементов была установлена пластина, передняя грань которой по ходу движения ножей была выполнена в виде клина (рис. 3.13).

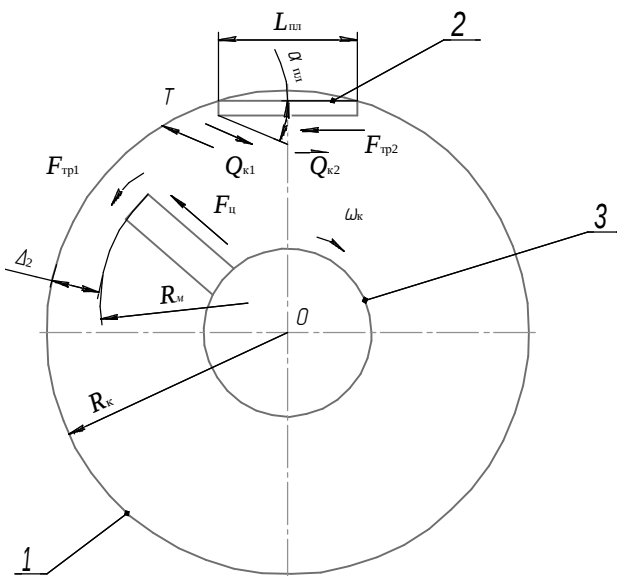


Рис. 3.13. Схема движения кормового потока внутри рабочей камеры с установленными пластинами:
1 – рабочая камера; 2 – пластина; 3 – ротор с ножами

При установке по внутреннему периметру рабочей камеры пластины кормовой поток изменяет направление своего движения. Частицы корма перемещаются по наклонной грани пластины во внутренние слои кормового потока. Вместе с тем при значительном наклоне передней границы пластины частицы корма, особенно с содержанием влаги, будут накапливаться перед пластиной, а в результате значительного торможения кормовой поток не будет перемещаться по наклонной плоскости. Накапливаясь перед передней гранью, частицы корма увеличат сопротивление движения ножей. Поэтому для организации оптимального режима движения кормов по наклонной грани пластины важным является определение угла ее наклона.

Так как длина передней, наклонной, грани пластины по отношению к внутренней поверхности рабочей камеры незначительна, то наибольшее влияние на процессы, протекающие при перемещении кормов по ее поверхности, оказывает сила трения $F_{\text{тр1}}$, препятствующая перемещению частиц.

Величина силы трения, вызванной действием центробежной силы ножей, определяется по формуле

$$F_{\text{тр1}} = f_k m_{\text{пл}} R_n \omega_n^2, \quad (3.79)$$

где f_k – коэффициент трения корма по металлу;

$m_{\text{пл}}$ – масса корма в рабочей зоне наклонной грани пластины, кг;

R_n – радиус, описываемый ножами, м;

ω_n – угловая скорость ножей, с^{-1} .

Сила, затрачиваемая на перемещение потока корма по наклонной грани пластины, определяется по формуле

$$T_1 = Q_{\text{к1}} V_{\text{ч}} \cos \alpha_{\text{пл}}, \quad (3.80)$$

где $Q_{\text{к1}}$ – масса перемещаемого по наклонной грани пластины кормового потока, кг/с;

$V_{\text{ч}}$ – скорость движения корма внутри рабочей камеры, м/с;

$\alpha_{\text{пл}}$ – угол наклона передней грани пластины, град.

Таким образом, на перемещение кормов в рабочей зоне пластины затрачивается сила

$$T = T_1 + F_{\text{тр1}}.$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$T = Q_{к1} V_{ч} \cos \alpha_{пл} + f_{к} m_{пл} R_{н} \omega_{н}^2. \quad (3.81)$$

Силу, затрачиваемую на перемещение кормов по наклонной грани пластины, можно определить по формуле

$$T = \frac{N_{дв}}{V_{ч}}, \quad (3.82)$$

где $N_{дв}$ – мощность электродвигателя измельчителя, кВт.

Из уравнений (3.81) и (3.82) выразим угол $\alpha_{пл}$:

$$\frac{N_{дв}}{V_{ч}} - (Q_{к1} V_{ч} \cos \alpha_{пл} + f_{к} m_{пл} R_{н} \omega_{н}^2) = 0,$$

откуда

$$\cos \alpha_{пл} = \frac{\frac{N_{дв}}{V_{ч}} - f_{к} m_{пл} R_{н} \omega_{н}^2}{Q_{к1} V_{ч}}. \quad (3.83)$$

Величина кормового потока, перемещающегося по наклонной плоскости пластины:

$$Q_{к1} = \frac{m_{пл}}{t_{нк}}, \quad (3.84)$$

где $t_{нк}$ – время движения частиц по передней, наклонной, грани пластины, с.

Масса корма, перемещаемая ножом по наклонной грани пластины:

$$m_{пл} = \rho b_{н} h_{н} \Delta_2, \quad (3.85)$$

где Δ_2 – зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом, м;

$b_{н}$ – ширина ножа, м;

$h_{н}$ – толщина ножа, м.

В рабочей камере измельчителя вертикального типа корм под действием ножей увлекается в круговое движение и за счет силы тяжести перемещается в выгрузную камеру. Таким образом, частицы корма в рабочей камере совершают равномерное винтовое движение, скорость которого определяется по формуле

$$V_{\text{ч}} = \frac{S_{\text{ч}} \omega_{\text{ч}}}{2\pi}, \quad (3.86)$$

где $S_{\text{ч}}$ – шаг винтовой линии движения частиц корма, м;

$\omega_{\text{ч}}$ – угловая скорость частиц корма в рабочей камере измельчителя, с^{-1} .

Шаг винтовой линии движения частиц корма в измельчителе вертикального типа

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi D_{\text{к}} H_{\text{к}}}{L_{\text{ч}}}, \quad (3.87)$$

где $D_{\text{к}}$ – диаметр рабочей камеры измельчителя, м;

$H_{\text{к}}$ – высота рабочей зоны камеры измельчителя, м;

$L_{\text{ч}}$ – путь частиц корма в рабочей камере, м.

Тогда скорость движения корма внутри рабочей камеры

$$V_{\text{ч}} = \frac{D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}}}{2L_{\text{ч}}}. \quad (3.88)$$

С учетом подстановки формул (3.85) и (3.88) в (3.83) угол наклона передней грани пластины

$$\cos \alpha_{\text{пл}} = \frac{\frac{2N_{\text{дв}} L_{\text{ч}}}{D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}}} - f_{\text{к}} \rho b_{\text{н}} h_{\text{н}} \Delta_2 R_{\text{н}} \omega_{\text{н}}^2}{\frac{\rho b_{\text{н}} h_{\text{н}} \Delta_2 D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}}}{2L_{\text{ч}} t_{\text{нк}}}}. \quad (3.89)$$

Формула (3.89) показывает, что угол наклона передней грани пластины зависит от конструктивных особенностей измельчающей камеры измельчителя, физико-механических свойств измельчаемого корма и его количества, находящегося в рабочей зоне пластины. Для измельчителя вертикального типа с мощностью электродвигателя 30 кВт угол наклона передней грани пластины равен 12° .

Экспериментальными исследованиями по определению оптимального угла наклона отбойной пластины по отношению к движущемуся слою корма в дробилке зернофуража установлено, что увеличение угла поворота отбойных пластин до 30° приводит к росту производительности на 12...15 %. Полученное расчетным путем значение угла наклона передней грани пластины соответствует оптимальному значению.

При прохождении ножом наружной плоскости пластины величина зазора между торцом ножа и рабочей камерой уменьшается. Длина участка рабочей камеры с минимальным зазором ограничивается длиной наружной грани пластины $L_{пл}$. Так как зазор между ножами и пластинами уменьшается, то обеспечивается увеличение степени измельчения кормов. Однако при перемещении корма по наружной плоскости пластины сопротивление движению ножа возрастает. С целью сведения затрат энергии на перемещение кормов по наружной плоскости пластины $L_{пл}$ к минимуму этот параметр рассчитаем с учетом накапливаемой ротором кинетической энергии.

Перемещая корм по наружной плоскости пластины, ножи преодолевают силу трения

$$F_{тр2} = f_k m_{пл} R_n \omega_n^2, \quad (3.90)$$

где $m_{пл}$ – масса корма в рабочей зоне наружной грани пластины, кг.

Мощность, затрачиваемая на преодоление силы трения:

$$N_{тр2} = F_{тр2} b_n h_n = f_k m_{пл} R_n \omega_n^2 b_n h_n. \quad (3.91)$$

Мощность, затрачиваемая на перемещение потока корма по наружной грани пластины:

$$N_{T2} = T_2 b_n h_n = Q_{к2} V_q b_n h_n, \quad (3.92)$$

где $Q_{к2}$ – кормовой поток, перемещающийся по наружной грани пластины, кг/с.

Избыточная мощность, возникающая при работе измельчителя:

$$N_{изб} = N_{дв} - (N_{тр2} + N_{T2}), \quad (3.93)$$

где $N_{дв}$ – мощность электродвигателя, кВт.

Рассчитаем избыточную мощность, возникающую при работе измельчителя, с учетом накапливаемой ротором кинетической энергии:

$$N_{\text{изб}} = I_p \omega_p^2 L_{\text{пл}}, \quad (3.94)$$

где I_p – момент инерции ротора с ножами, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, $I_p = m_p R_p^2 / 2$;

m_p – масса ротора измельчителя, кг ;

R_p – радиус ротора, м ;

ω_p – угловая скорость ротора с ножами, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$;

$L_{\text{пл}}$ – длина наружной грани пластины, м .

Так как в выражениях (3.91) и (3.92) левые части равны, то справедливо равенство:

$$I_p \omega_p^2 L_{\text{пл}} = N_{\text{дв}} - (N_{\text{тр2}} + N_{\text{Г2}}). \quad (3.95)$$

Из выражения (3.95) выразим длину наружной грани пластины:

$$L_{\text{пл}} = \frac{N_{\text{дв}} - (N_{\text{тр2}} + N_{\text{Г2}})}{I_p \omega_p^2},$$

или

$$L_{\text{пл}} = \frac{N_{\text{дв}} - (f_k m_{\text{пл}} R_n \omega_n^2 + Q_{\kappa 2} V_{\text{ч}}) b_n h_n}{I_p \omega_p^2}. \quad (3.96)$$

Формула (3.96) позволяет определить длину наружной грани пластины $L_{\text{пл}}$ с учетом конструктивных особенностей измельчителя, физико-механических свойств кормов и накопленной ротором избыточной кинетической энергии. Расчетным путем определена длина наружной грани пластины, устанавливаемой перед каждым противорежущим элементом в рабочей камере измельчителя ИСК-3, $L_{\text{пл}} = 41,1$ мм. Для проверки теоретических исследований по определению оптимальной длины наружной грани пластины был поставлен эксперимент.

Для проверки гипотезы об уменьшении зазора между торцами ножей и внутренней поверхностью рабочей камеры измельчителя только на отдельных небольших участках были укреплены перед каждым блоком противорежущие элементы пластины, передняя

грань которой по ходу вращения ротора выполнена в виде клина. В ходе однофакторного эксперимента изменяли длину пластины в пределах 20 мм от определенной теоретически. Для этого были изготовлены пластины длиной 30, 50 и 70 мм.

Конструкция измельчителя на протяжении всего эксперимента оставалась без изменений. Опыты были проведены на зеленой массе с трехкратной повторностью и рассчитаны по общепринятой методике. Результаты опыта обработаны с помощью дисперсионного анализа.

Установлено, что при длине пластины, равной 30 мм, фракция частиц размером 5...10 мм составила 74 %, а частиц размером свыше 31 мм – 2 %. Без пластин – соответственно 73 % и 4,5 %. Подтвердилось также предположение о выборе длины пластины с учетом момента инерции ротора измельчителя. При установке пластины длиной 50 мм удельная энергоемкость процесса измельчения равна 2,59 кВт·ч/т, а при измельчении зеленой массы без пластин – 2,68 кВт·ч/т. С пластинами длиной 50 мм фракция частиц размером 5...10 мм равна 84,7 %, а частиц размером свыше 31 мм – 0,46 %. При установке пластины длиной 70 мм значения составляют соответственно 86 % и 0,3 %. Однако с увеличением длины пластины производительность измельчителя снижается до 9,9 т/ч.

Наиболее целесообразно устанавливать в рабочей камере пластины длиной 50 мм, передняя грань которых выполнена в виде клина.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические расчеты: при установке пластины с углом наклона передней грани 12° и длиной наружной грани 50 мм фракция частиц размером 5...10 мм составила 84,7 %, а частиц размером свыше 31 мм – 0,46 %, удельная энергоемкость процесса измельчения равна 2,59 кВт·ч /т. Значение этих показателей при измельчении стебельчатых кормов без пластин равны соответственно 73 % и 4,5 % при удельной энергоемкости процесса измельчения 2,68 кВт·ч/т.

3.3. Экспериментальные исследования по определению оптимальных конструктивных параметров модулей для измельчения зерновых кормов любой влажности к многофункциональному измельчителю вертикального типа

3.3.1. Программа исследований

Значительно снизить энергоемкость процесса заготовки влажного зерна на фуражные цели можно объединив в одной машине две тех-

нологические операции – измельчение корма и смешивание его с консервантом. Для механизации предлагаемой технологии измельчения влажного зерна наиболее эффективно использование измельчителя-смесителя кормов.

Для подготовки к скармливанию перечисленных кормов применяют машины, способные реализовать пооперационную технологическую схему. Это накопление кормов, их транспортировка, дозирование, измельчение и смешивание (при необходимости). Из перечисленных технологических операций видоизменяющими физико-механические свойства кормов являются измельчение и смешивание. Они называются основными, причем измельчение кормов – наиболее энергоемкая операция, требующая в 10–20 раз больших затрат энергии, чем другие. Оставшиеся операции являются вспомогательными и менее энергоемки.

По затратам энергии и важности выполняемого процесса представляется необходимым совмещение технологических операций измельчения и смешивания кормов. Это позволяет сократить номенклатуру соответствующих машин до минимума, а следовательно, уменьшить затраты энергии на подготовку кормов к скармливанию и металлоемкость линий, повысить их надежность. Достичь этого можно путем применения многофункционального измельчителя-смесителя кормов, т. к. заготовка зерна молочно-восковой спелости на хранение осуществляется в ограниченный период времени после уборки урожая, а в остальное время целесообразно применение данной машины в других технологических операциях. Данная машина должна измельчать зернофураж любой влажности, корнеклубнеплоды и грубые корма, при необходимости смешивать их. Процесс разрушения перечисленных кормов осуществляется механическими способами, отличающимися относительной простотой, надежностью и высокой производительностью оборудования.

В физическом отношении измельчение представляет собой процесс разрушения кормов, определяемый прочностью двух структурных элементов – скелета (каркас, арматура), обладающего упругими и пластическими свойствами, и заполнителя, обладающего вязкими свойствами [54]. При механическом воздействии на корм элементы скелета деформируются и разделяются на части. Если напряжение $G_{\text{разр}}$ разрушения тела происходит в течение времени $t \rightarrow 0$, то пластические деформации не успевают развиваться. В данном случае имеет место хрупкое разрушение с образованием только упругих мгновенных деформаций.

Рассмотренная схема измельчения применима к зернофуражу и корнеклубнеплодам. Эти корма имеют одинаковый пространственный скелет в виде множества сот (ячеек), заполненных крахмальными зернами. Указанные особенности кормов позволяют применять для их измельчения одинаковые активные рабочие органы. Однако, имея одинаковую схему разрушения, корма характеризуются различными физико-механическими свойствами (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Физико-механические свойства кормов

Корм	Влаго содержание, %	Объемный вес, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Модуль пла- стичности, МПа
Корне клубнеплоды	75...85	560...730	0,10...0,29	0,34...0,88
Зернофураж	14...16	680...840	12,73	9,5...10

Анализ табл. 3.1 показывает, что по одной конструктивной схеме измельчающего аппарата готовить к скармливанию указанные виды кормов невозможно. На практике для измельчения зернофуража используют дробилки, а корнеклубнеплодов – измельчители. Общим конструктивным элементом этих машин являются рабочие органы, вращающиеся относительно центральной оси рабочей камеры.

При конструировании многофункционального измельчителя кормов можно взять за основу одно из конструктивных решений машины данного типа, отработанное на практике. Многофункциональный измельчитель должен выполнять технологические операции измельчения зернофуража и корнеклубнеплодов без специальной перенастройки рабочих органов, быть надежным в работе и отвечать зоотехническим требованиям подготовки кормов к скармливанию.

Модуль для измельчения зерновых кормов к многофункциональному модульному измельчителю вертикального типа должен обеспечивать установленный зоотехническими требованиями модуль помола этого вида корма для крупного рогатого скота при минимальных энергозатратах. Технические элементы модуля по конструктивному исполнению должны обладать гибкостью при монтаже и демонтаже и не противоречить основной конструкции измельчителя-смесителя.

На основании результатов проведенных поисковых исследований были выделены показатели, характеризующие эффективность работы

дробилок зернофуража – модуль помола корма, производительность машины и затраты энергии на выполняемый процесс. При создании модуля для измельчения зернофуража к измельчителю вертикального типа была поставлена задача – изучить влияние различных факторов на указанные показатели.

На технологическую эффективность работы всякого измельчителя оказывают влияние технические параметры его рабочих органов и физико-механические свойства измельчаемого продукта.

Основными техническими параметрами являются:

- форма, размеры и количество активных рабочих органов;
- форма и размеры ситовой поверхности решет;
- величина зазора между поверхностью решета и активными рабочими органами;
- величина зазора между внутренней поверхностью рабочей камеры и торцевой гранью активных рабочих органов.

Основными физико-механическими свойствами зернофуража являются влажность, вязкость, упругость, крупность и твердость.

При проведении исследований установлено, что модуль помола зернофуража, производительность и затраты энергии зависят от размеров отверстий сит при максимальном использовании их живого сечения. С увеличением диаметра отверстий значения первого и второго показателей возрастают, а значение третьего снижается. В дробилках сельскохозяйственного назначения применяются решета с отверстиями диаметром от 1 до 10 мм. Известны зависимости основных параметров этих машин от указанных диаметров отверстий, однако исследования проводились для дробилок с горизонтально установленной рабочей камерой. Сведений о подобных исследованиях применительно к измельчителям с вертикально установленной рабочей камерой выявлено не было. Если учесть различную динамику протекания процессов в измельчителях обоих типов, то возникает необходимость в проведении исследований по определению оптимального диаметра отверстий для измельчителя вертикального типа.

На модуль помола зернофуража и удельную энергоемкость выполняемого процесса влияет количество ножей, установленных над решетом измельчителя. Увеличение их числа должно повысить степень измельчения зернофуража, т. к. уменьшается время между соударениями частиц, однако это может привести к росту затрат энергии. Таким образом, для определения оптимальных показателей разрабатываемого модуля необходимо определить число ножей, установленных над решетом.

Важным параметром является зазор между движущимися рабочими органами и неподвижными решетками. Для дробилок с горизонтально расположенным валом рекомендуется принимать минимальное значение этого показателя. Из соображений эксплуатационной надежности размер зазора устанавливают, как правило, в пределах 4...10 мм.

В разрабатываемом модуле для измельчения зерна рабочие органы движутся над плоскостью решет. Протекающие при этом процессы дробления отличаются от известных в литературе, поэтому рекомендуемую величину зазора между плоскостями решет и ножей нельзя считать доказанной. Для определения оптимального значения данного показателя необходимо провести экспериментальные исследования.

На производительность, удельный расход энергии и модуль помола влияют физико-механические свойства исходного сырья. Чем выше сопротивляемость продукта измельчению, тем ниже производительность и больше удельный расход энергии. Различные виды скормливаемого животным зерна характеризуются разными структурно-механическими свойствами: прочностью, твердостью, пластичностью и другими характеристиками. Опыты, проведенные С. В. Мельниковым по испытанию твердости злаковых культур, показали, что наибольшей прочностью обладает ячмень, влажность которого 13,7 %.

Таким образом, в результате анализа литературных источников в области дробления зерна и проведенных исследований можно сделать вывод, что для измельчителей с вертикально установленной рабочей камерой такие важные факторы, влияющие на основные показатели оптимизации, как диаметр отверстий в решетке, количество установленных над решетом ножей и зазор между ножами и решетками, изучены недостаточно. Для их определения необходимы экспериментальные исследования.

3.3.2. Методика исследований

Для построения математической модели модуля к многофункциональному измельчителю вертикального типа для измельчения зернофуража использован центральный композиционный план второго порядка 2^3 . Первоначально были определены параметры модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 %. В качестве параметра оптимизации принята удельная энергоемкость выполняемого процесса. На основе априорной информации выбраны основные уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Уровни варьирования факторов

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			верхний (+1)	нижний (–1)	основной (0)
Диаметр отверстий в решетке, мм	X_1	2	6	2	4
Зазор между решетом и ножами, мм	X_2	4	12	4	8
Количество ножей, устанавливаемых над решетом, шт.	X_3	2	8	4	6

В табл. 3.3 приведена расширенная матрица трехфакторного плана первого порядка.

Таблица 3.3

Расширенная матрица трехфакторного плана первого порядка

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3
1	+	–	–	–	+	+	+
2	+	+	–	–	–	–	+
3	+	–	+	–	–	+	–
4	+	+	+	–	+	–	–
5	+	–	–	+	+	–	–
6	+	+	–	+	–	+	–
7	+	–	+	+	–	–	+
8	+	+	+	+	+	+	+

Чтобы упростить получение экспериментальных данных, план проведения опытов построен так, чтобы он был симметричным и ортогональным. Матрица планирования эксперимента представлена в виде табл. 3.4.

При проведении экспериментов, предусмотренных планом 2^3 , произведен регрессионный анализ, включающий определение адекватности полученной модели и значимости ее коэффициентов. Адекватность полученного уравнения регрессии с экспериментальными данными проверяется по критерию Фишера. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение регрессии описывает процесс дробления зерна адекватно.

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб		
		X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	8	+	+	+	6	12	8
2	2	+	+	–	6	12	4
3	6	+	–	–	6	4	4
4	1	+	–	+	6	4	8
5	4	–	+	–	2	12	4
6	3	–	–	–	2	4	4
7	5	–	+	+	2	12	8
8	7	–	–	+	2	4	8

В соответствии с целью работы, программой и методикой исследований разработана и изготовлена экспериментальная установка, включающая шнек для подачи зерна, измельчитель вертикального типа и приемный бункер. Основной объект исследований – рабочая камера измельчителя. Она выполнена в виде вертикально установленного цилиндра, внутри которого радиально устанавливаются решета. Блоки противорезающих элементов, предназначенных для измельчения других видов кормов, удалены за пределы рабочей камеры. Внутри рабочей камеры соосно с ней установлен ротор, на котором радиально закреплены четыре яруса ножей. На каждом ярусе установлено по четыре ножа. Для равномерного распределения нагрузки на ротор ярусы ножей смещены относительно друг друга. Ножи верхнего яруса обеспечивают равномерное распределение загружаемого зернофуража по периметру рабочей камеры.

Для проверки различных комбинаций схем модуля измельчителя достаточно установить в рабочей камере решета с нужным диаметром отверстий и переместить их в пазах крепления по вертикали.

Экспериментальный модуль измельчителя работает следующим образом. Зернофураж шнековым транспортером загружается в приемную камеру, из которой поступает в рабочую. В этой камере зерно попадает в рабочую зону, образуемую ножами и решетом, где подвергается активному воздействию ножей до момента, пока его частицы не достигнут размеров диаметра отверстий в решетке. В зависимости от плана эксперимента дробленое зерно поступает на нижний ярус решет или в выгрузную камеру, из которой удаляется в приемный бункер.

Определение гранулометрического состава измельченного зерна проведено ситовым методом – путем отбора проб и последующим разделением на фракции. Для отсева измельченного корма применены пробивные сита с круглыми отверстиями. Взвешивание отобранного материала произведено на электронных весах ВЛКТ-500М. За параметр качества принимается модуль помола, рассчитываемый по формуле

$$M = \frac{0,1P_0 + 0,4P_1 + 1,5P_2 + 2,5P_3 + 3,5P_4}{100}, \quad (3.97)$$

где P_0 – остаток зерна на поддоне, %;
 P_1, P_2, P_3, P_4 – остатки на ситах, %.

Удельная энергоемкость выполняемого процесса

$$\Theta = \frac{N_{\text{дв}}}{Q_{\text{изм}}}, \quad (3.98)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность, потребляемая на измельчение, кВт;
 $Q_{\text{изм}}$ – производительность измельчителя, т/ч.

С целью получения более точных результатов опыты проведены трехкратно. По результатам определено среднее значение.

3.3.3. Определение оптимальных конструктивных параметров модуля для измельчения зерна влажностью до 14 %

Для отыскания области оптимума энергозатрат модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 % при действии трех факторов реализован полный факторный эксперимент типа 2^3 , матрица планирования которого представлена в табл. 3.2, 3.3. Эксперимент включает восемь опытов, проведенных трехкратно. Обработка результатов эксперимента проведена в следующей последовательности.

Для крутого восхождения используем линейное уравнение регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{23}x_{23}, \quad (3.99)$$

где y – удельная энергоемкость процесса измельчения зернофуража (параметр оптимизации);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты регрессии.

Значение коэффициентов регрессии находим по формуле

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i, \quad (3.100)$$

где N – число опытов в матрице планирования;

x_i – кодированное значение (± 1) i -го фактора;

y_i – значение параметра оптимизации в i -м опыте.

В соответствии с формулой (3.99) вычислим значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = \frac{10,23 + 8,89 + 7,35 + 8,29 + 14,37 + 10,5 + 18,13 + 12,33}{8} = 11,26;$$

$$b_1 = \frac{-10,23 + 8,89 - 7,35 + 8,29 - 14,37 + 10,5 - 18,13 + 12,33}{8} = -1,25; \quad (3.101)$$

$$b_2 = \frac{-10,23 - 8,89 + 7,35 + 8,29 - 14,37 - 10,5 + 18,13 + 12,33}{8} = 0,26.$$

Для остальных коэффициентов получим следующие значения:

$$b_3 = 2,57; \quad b_{12} = 0,04; \quad b_{13} = -1,15; \quad b_{23} = 1,13.$$

Получим уравнение регрессии

$$y = 11,26 - 1,25x_1 + 0,26x_2 + 2,57x_3 + 0,04x_{12} - 1,15x_{13} + 1,13x_{23}. \quad (3.102)$$

Адекватность полученной модели определим по критерию Фишера. Для этого вычислим дисперсию воспроизводимости каждого опыта по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{m - 1}, \quad (3.103)$$

где y_i – экспериментальное значение параметра оптимизации в i -м опыте;

$\bar{y}_i$ – значение параметра оптимизации в i -м опыте, вычисленное по уравнению регрессии;

m – число повторностей опыта, $m = 3$.

При вычислении значения $\bar{y}_i$ в уравнение регрессии подставляем кодированные значения факторов:

$$y_1 = 11,26 - 1,25(-1) + 0,26(-1) + 2,57(-1) + 0,04 \cdot 1 + 1,15 \cdot 1 + 1,13 \cdot 1 = 9,7;$$

$$y_2 = 11,26 - 1,25(-1) + 0,26(-1) + 2,57(-1) + 0,04(-1) + 1,15(-1) + 1,13 \cdot 1 = 9,42.$$
(3.104)

Остальные значения параметров оптимизации приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Вспомогательная таблица для расчета S^2

Номер опыта	y_i	$\bar{y}_i$	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
1	10,23	9,7	0,53	0,28	0,14
2	8,89	9,42	-0,53	0,28	0,14
3	7,35	7,88	-0,53	0,28	0,14
4	8,29	7,76	0,53	0,28	0,14
5	14,37	14,88	-0,51	0,26	0,13
6	10,50	10,0	0,5	0,25	0,125
7	18,13	17,58	0,55	0,30	0,15
8	12,33	12,86	-0,53	0,28	0,14
				$S = 2,21$	$S^2 = 1,105$

Так как число параллельных опытов m одинаково, то однородность ряда дисперсий S_y^2 проверяем по критерию Кохрена:

$$s = \frac{S_{y \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_y^2} = \frac{0,15}{1,105} = 0,1357.$$
(3.105)

Табличное значение σ_m при 5%-м уровне значимости для $N = 8$ и $m - 1 = 2$ составляет $\sigma_m = 0,5157$. Так как расчетное значение меньше табличного, гипотеза однородности дисперсий принимается.

Убедившись в однородности дисперсий S_y^2 , определим дисперсию воспроизводимости эксперимента:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_y^2}{N} = \frac{1,105}{8} = 0,1381. \quad (3.106)$$

Для проверки гипотезы адекватности определим дисперсию по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{S_p}{f}, \quad (3.107)$$

где S_p – остаточная сумма квадратов;
 f – число степеней свободы.

Остаточная сумма квадратов

$$S_p = \sum_{i=0}^N y_i^2 - N \bar{a}^2 b_i^2 m = (1100,95 - 1100,78)3 = 0,51, \quad (3.108)$$

где k – число исследуемых факторов, $k = 3$.

Число степеней свободы $f = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$.

Вычислим дисперсию:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{S_p}{f} = \frac{0,51}{4} = 0,12. \quad (3.109)$$

Гипотезу адекватности проверим по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} = \frac{0,12}{0,1381} = 0,86. \quad (3.110)$$

Табличное значение критерия Фишера при 5%-м уровне значимости и числах свободы для числителя 4, для знаменателя 2 составляет $F_m = 19,3$. Так как расчетное значение F_p меньше табличного, то модель, представленную уравнением регрессии, можно признать адекватной.

Для оценки значимости коэффициентов найдем дисперсию коэффициентов:

$$S_{bi}^2 = \frac{S}{Nm} = \frac{0,1381}{8 \times 3} = 0,0057. \quad (3.111)$$

Определим доверительный интервал:

$$Db_i = \pm S_{bi} t = 2,12 \times 0,0057 = 0,0121, \quad (3.112)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при 5%-м уровне значимости и числе свободы $N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$, $t = 2,12$.

В полученном линейном уравнении регрессии (3.102) все коэффициенты больше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически значимыми.

Убедившись в адекватности уравнения (3.102), перейдем к крутому восхождению. Центральным композиционным ротatableльный план второго порядка для трех факторов состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^3 (опыты 1...8), шести экспериментов в «звездных точках» (опыты 9...14) и шести экспериментов в центре плана (опыты 15...20). Матрица планирования и результаты экспериментов представлены в виде табл. 3.6.

Таблица 3.6

Матрица планирования (результаты экспериментов)

Номер опыта	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			Y_{cp} , кВт·ч/т
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	+	+	+	6	14	8	10,23
2	+	+	–	6	14	4	8,89
3	+	–	–	6	2	4	7,35
4	+	–	+	6	2	8	8,29
5	–	+	–	2	14	4	14,37
6	–	–	–	2	2	4	10,50
7	–	+	+	2	14	8	18,13
8	–	–	+	2	2	8	12,33
9	+1,682	0	0	8	8	4	7,52
10	–1,682	0	0	2	8	4	11,02
11	0	+1,682	0	4	16	4	13,12
12	0	–1,682	0	4	2	4	8,17
13	0	0	+1,682	4	8	8	10,60

Номер опыта	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			У _{ср} , кВт·ч/т
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
14	0	0	-1,682	4	8	2	8,81
15	0	0	0	4	8	4	8,45
16	0	0	0	4	8	4	8,47
17	0	0	0	4	8	4	8,46
18	0	0	0	4	8	4	8,58
19	0	0	0	4	8	4	8,48
20	0	0	0	4	8	4	8,52

Для крутого восхождения используем линейное уравнение регрессии вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (3.113)$$

Коэффициенты регрессии при ротатбельном планировании рассчитываем по формулам

$$b_0 = \frac{A}{N} [2\lambda^2 K + 2) \overset{N}{\underset{i=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} y_i - 2\lambda C \overset{K}{\underset{i=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{ij}] = 0,16666 \overset{20}{\underset{i=1}{\overset{20}{\mathbf{a}}}} y_i - 0,05694 \overset{3}{\underset{i=1}{\overset{20}{\mathbf{a}}}} \overset{20}{\underset{j=1}{\overset{20}{\mathbf{a}}}} x_{ij} =$$

$$= 0,16666 \times 200,29 - 0,05694 \times 437,86 = 8,448;$$

$$b_1 = \frac{C}{N} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{1j} y_i = 0,07322 \times (-26,91) = -1,97;$$

$$b_2 = \frac{C}{N} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{2j} y_i = 0,07322 \times 21,48 = 1,573;$$

$$b_3 = \frac{C}{N} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{3j} y_i = 0,07322 \times 10,88 = 0,796;$$

$$b_{12} = \frac{C^2}{N\lambda} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{1j} x_{2j} y_i = 0,125 \times (-6,14) = -0,767;$$

$$b_{13} = \frac{C^2}{N\lambda} \overset{N}{\underset{j=1}{\overset{N}{\mathbf{a}}}} x_{1j} x_{3j} y_i = 0,125 \times (-3,31) = -0,414;$$

$$b_{23} = \frac{C^2}{N\lambda} \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{2j} x_{3j} y_i = 0,125 \times 2,53 = 0,316;$$

$$b_{11} = \frac{A}{N} \{ C^2 [(K+2)\lambda - K] \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + C^2 (1-\lambda) \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^K \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda C \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^N y_i \} =$$

$$= 0,06254 \times 142,54 + 0,00695 \times 437,86 - 0,05694 \times 200,29 = 0,554;$$

$$b_{22} = 0,06254 \times 150,32 + 0,00695 \times 437,86 - 0,05694 \times 200,29 = 1,041;$$

$$b_{33} = 0,06254 \times 145,0 + 0,00695 \times 437,86 - \frac{C^2}{N\lambda} \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{1j} x_{3j} y_i =$$

$$= 0,125 \times (-3,31) = -0,414;$$

$$b_{23} = \frac{C^2}{N\lambda} \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{2j} x_{3j} y_i = 0,125 \times 2,53 = 0,316;$$

$$b_{11} = \frac{A}{N} \{ C^2 [(K+2)\lambda - K] \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{ij}^K y_j + C^2 (1-\lambda) \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^K \mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda C \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^N y_i \} =$$

$$= 0,06254 \times 142,54 + 0,00695 \times 437,86 - 0,05694 \times 200,29 = 0,554;$$

$$b_{22} = 0,06254 \times 150,32 + 0,00695 \times 437,86 - 0,05694 \times 200,29 = 1,041;$$

$$b_{33} = 0,06254 \times 145,0 + 0,00695 \times 437,86 - 0,05694 \times 200,29 =$$

$$= 0,708 \times 0,05694 \times 200,29 = 0,708.$$

$$\text{где } A = \frac{1}{2\lambda[(K+2)\lambda - K]}, \quad C = \frac{A}{\mathring{\mathbf{a}}_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad \lambda = \frac{K(n_0 + n_n^2)}{(K+2)n_n};$$

N – число экспериментов в матрице;

K – число факторов, $K = 3$;

y_j – значение функции отклика в j -м эксперименте;

x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения i -го и l -го факторов в j -м эксперименте;

n_0 – число экспериментов в центре плана.

Дисперсию S_y^2 параметра оптимизации вычисляем по результатам трех опытов в центре плана. Расчет дисперсии приведен в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Расчет дисперсии S_y^2 (при $\bar{y}_i = 8,49$)

Номер опыта	y_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
15	8,45	-0,04	0,0016	$S_y^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_i)^2}{n - 1} =$ $= \frac{0,012}{5} = 0,0024$
16	8,47	-0,02	0,0004	
17	8,46	-0,03	0,0009	
18	8,58	0,09	0,0081	
19	8,48	-0,01	0,0001	
20	8,52	0,03	0,0009	

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda(K+2)}{N} S_y^2 = 0,16666 \times 0,0024 = 0,0003;$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{C}{N} S_y^2 = 0,07322 \times 0,0024 = 0,0001;$$

$$S_{l_i}^2 = \frac{C^2}{N\lambda} S_y^2 = 0,125 \times 0,0024 = 0,0003;$$

$$S_{ii}^2 = \frac{AC^2[(K+1)\lambda - (K-1)]}{N} S_y^2 = 0,0695 \times 0,0024 = 0,0001. \quad (3.114)$$

Определим доверительный интервал:

$$\Delta b_0 = \pm t S_{b_j} = \pm 2,57 \times 0,0173 = \pm 0,0444;$$

$$\Delta b_i = \pm 2,57 \times 0,01 = \pm 0,0257;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm 2,57 \times 0,0173 = \pm 0,0444;$$

$$\Delta b_{li} = \pm 2,57 \times 0,01 = \pm 0,0257,$$

(3.115)

где $t = 2,57$ – табличное значение критерия Стьюдента при 5%-м уровне значимости и числе степеней свободы $f = 5$.

Все значения коэффициентов больше рассчитанных значений доверительного интервала, поэтому их можно считать статистически значимыми. Тогда уравнение регрессии (3.113) примет вид:

$$y = 8,448 - 1,97x_1 + 1,573x_2 + 0,796x_3 - 0,767x_1x_2 - 0,414x_1x_3 + 0,316x_2x_3 + 0,554x_1^2 + 1,041x_2^2 + 0,708x_3^2. \quad (3.116)$$

Для проверки гипотезы адекватности модели найдем дисперсию адекватности:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (3.117)$$

где y_i – экспериментальное значение параметра оптимизации в i -м опыте;

$\bar{y}_i$ – значение параметра оптимизации в i -м опыте, вычисленное по уравнению регрессии.

Значения параметров оптимизации приведены в табл. 3.8.

Однородность ряда дисперсий S_y^2 проверяем по критерию Кохрена:

$$\sigma = \frac{S_{y \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_y^2} = \frac{0,353}{2,79} = 0,127. \quad (3.118)$$

Таблица 3.8

Вспомогательная таблица для расчета $S_{ад}^2$

Номер опыта	y_i	$\bar{y}_i$	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
1	10,23	10,29	–0,06	0,0036	0,0018
2	8,89	8,89	0	0	0
3	7,35	7,91	–0,56	0,314	0,157
4	8,29	8,04	0,25	0,0625	0,031
5	14,37	13,53	0,84	0,706	0,353
6	10,50	9,49	1,01	1,02	0,51
7	18,13	16,59	1,54	2,342	1,186
8	12,33	11,28	1,05	1,103	0,551
				$S = 5,55$	$S^2 = 2,79$

Табличное значение σ_m при 5%-м уровне значимости, $N = 8$ и $m - 1 = 2$ составляет 0,5157. Так как расчетное значение меньше табличного, гипотеза однородности дисперсий принимается.

Убедившись в однородности дисперсий S_y^2 , определим дисперсию воспроизводимости эксперимента:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_y^2}{N} = \frac{2,79}{8} = 0,349. \quad (3.119)$$

Дисперсию адекватности определим по выражению

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - (K + 1)} = \frac{5,55}{8 - (3 + 1)} = 1,39, \quad (3.120)$$

где K – число факторов, $K = 3$.

Проверяем гипотезу адекватности модели по F -критерию Фишера. Для этого находим расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2} = \frac{1,39}{0,35} = 3,97. \quad (3.121)$$

При 5%-м уровне значимости и числах свободы для числителя $f_1 = 4$ и для знаменателя $f_2 = 2$, табличное значение F -критерия равно $F_m = 19,3$. Так как $F_p < F_m$, то модель, представленная уравнением (3.116), адекватна.

Определим координаты центра поверхности дифференцированием уравнения (3.116):

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dX_1} &= -1,97 - 0,767X_2 - 0,414X_3 + 2 \times 0,554X_1 = 0; \\ \frac{dy}{dX_2} &= 1,573 - 0,767X_1 + 0,36X_3 + 2 \times 1,041X_2 = 0; \\ \frac{dy}{dX_3} &= 0,796 - 0,414X_1 + 0,316X_2 + 2 \times 0,708X_3 = 0. \end{aligned} \quad (3.122)$$

Из уравнений (3.122) определим X_1 , X_2 и X_3 :

$$-1,778 - 0,692X_2 - 0,374X_1 = 0;$$

$$2,051 - X_1 + 0,412X_3 + 2,714X_2 = 0;$$

$$1,923 - X_1 + 0,763 X_2 + 3,42 X_3 = 0.$$

Откуда

$$0,273 + 2,022X_2 + 0,038X_3 = 0;$$

$$0,128 + 3,477X_2 + 3,832X_3 = 0;$$

$$X_3 = \frac{-0,273 - 2,022X_2}{0,038} = 2 - 6,052 - 53,2X_2;$$

$$X_1 = 1,80; \quad X_2 = 0,12; \quad X_3 = -0,142.$$

Подставив в уравнение (3.116) значения X_1 , X_2 и X_3 , определим значение удельной энергоёмкости:

$$\begin{aligned} y_{\min} = & 8,448 - 3,546 + 1,99 - 0,11 - 0,166 + 0,104 - \\ & - 0,005 + 1,795 + 0,015 + 0,014 = 6,747 \text{ кВт.} \end{aligned} \quad (3.123)$$

По уравнению регрессии (3.116) построены поверхности отклика, позволившие определить оптимальные значения удельной энергоёмкости для исследуемых факторов. В результате экспериментальных исследований установлено, что удельная энергоёмкость процесса измельчения возрастает с уменьшением диаметра отверстий в решетке (рис. 3.14).



Рис. 3.14. График зависимости удельной энергоёмкости от диаметра отверстий в решетке и зазора между ножом и решетом

В большей степени на удельные затраты энергии влияет зазор между решетом и ножами и количество закрепленных над решетом ножей (рис. 3.15).



Рис. 3.15. График зависимости удельной энергоёмкости от количества ножей над решетом и зазора между ножом и решетом

Полученные результаты позволяют определить оптимальный конструктивный вариант модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 %. Установлено, что схема измельчителя зернофуража, в которой установлено решето с отверстиями диаметром 3 мм и ярусом из 4 ножей над ним, а зазор между ножами и решетом равен 5 мм, обеспечивает удельную энергоёмкость процесса измельчения зернофуража, равную 8,76 кВт·ч/т, производительность 2,51 т/ч и модуль помола зерна до 0,98 мм, отвечающий зоотехническим требованиям.

На основании результатов экспериментальных исследований для организации последовательного измельчения зерна в вертикально расположенной рабочей камере были установлены два яруса решет. В нижнем ярусе установлено решето с отверстиями диаметром 3 мм, обеспечивающее требуемое качество измельчения зерна. Для определения диаметра отверстий в верхнем решетке был поставлен однофакторный эксперимент.

По результатам эксперимента определена наиболее эффективная схема измельчителя зернофуража влажностью до 14 %. При установке в рабочей камере двух ярусов решет, верхнего с отверстиями диаметром 5 мм, а нижнего – 3 мм, удельная энергоёмкость процесса измельчения будет равна 7,95 кВт·ч/т при производительности 2,77 т/ч.

Такая схема обеспечивает модуль помола до 0,98 мм. Улучшение основных показателей объясняется стабилизацией протекающего процесса измельчения зерна. На верхнем решетке зерно измельчается на крупную фракцию, а в рабочей зоне нижнего решета доизмельчается до частиц, отвечающих зоотехническим требованиям.

Для проверки данных, полученных расчетным путем, проведем анализ результатов экспериментальных исследований.

3.3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований

Установка в измельчителе вертикального типа радиально расположенных решет обеспечивает измельчение зернофуража на корм крупному рогатому скоту до требуемого зоотехническими нормативами модуля помола. Полученные результаты позволяют проследить влияние выделенных факторов на основные параметры и определить оптимальный конструктивный вариант модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 %. Интерпретировать влияние заданных факторов на процесс измельчения зернофуража проще, если представить их в виде совокупности графиков зависимости параметров от каждого фактора в отдельности. Это позволяет наглядно проследить влияние факторов на процесс измельчения зерна.

На основании экспериментальных данных построены графики зависимости удельной энергоемкости, производительности и модуля помола от зазора между ножом и решетом. Из графика (рис. 3.16) видно, что производительность многофункционального измельчителя вертикального типа зависит от зазора между плоскостью ножа и решетом. С увеличением значения этого параметра от 2 до 5 мм производительность возрастает, а при дальнейшем увеличении зазора уменьшается.

Изменение производительности объясняется механическими процессами, протекающими в вертикально установленной рабочей камере при измельчении зернофуража. Поступающий в рабочую камеру зернофураж подвергается воздействию радиально установленных ножей, верхний ярус которых обеспечивает равномерное распределение материала по периметру рабочей камеры и деформацию молекулярной структуры зерна. Частицы под действием силы тяжести поступают на плоскость решета, где подвергаются многократному воздействию установленных непосредственно над ним ножей, в результате чего происходит разрушение зерна. При достижении частицами размера, равного диаметру отверстий в решетке, они просеиваются через него.

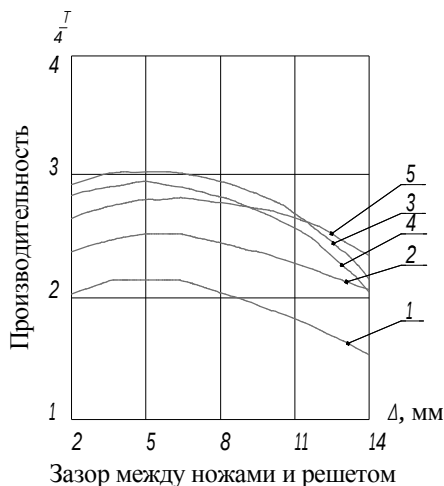


Рис. 3.16. График зависимости производительности от величины зазора между ножами и решетом:

1 – зазор между ножами и решетом 2 мм; 2 – 5 мм; 3 – 8 мм; 4 – 11 мм; 5 – 14 мм

При зазоре между ножами и плоскостью решета, равном 2 мм, воздействию подвергаются нижние слои циркулирующего материала. В результате переносная скорость кормового слоя возрастает и частицы зерна не успевают поступить в раствор отверстий решета. Вследствие этого пропускная способность решет уменьшается. С увеличением зазора до 5 мм переносная скорость нижних слоев зернофуража снижается и частицы измельченного корма успевают попасть в раствор отверстий решета. В результате пропускная способность модуля возрастает. Из данных графика зависимости (рис. 3.16) видно, что с увеличением зазора между ножами и решетом с 5 мм до 14 мм производительность модуля уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением зазора переносная скорость низших слоев материала снижается. В результате более крупные частицы, скопившиеся на поверхности решета, затрудняют просеивание более мелких.

С увеличением зазора между ножами и плоскостью решета с 2 до 5 мм удельная энергоёмкость процесса снижается рис. 3.17. Объясняется это тем, что уменьшаются затраты энергии на трение и перемещение измельчаемого продукта относительно поверхности решета. С увеличением зазора между ножами и плоскостью решета с 5 до 14 мм удельная энергоёмкость возрастает, что объясняется

снижением пропускной способности решета и накоплением зерновой массы в рабочей камере. При непроизводительном перемещении материала относительно поверхности решета возрастают, соответственно, и затраты энергии.

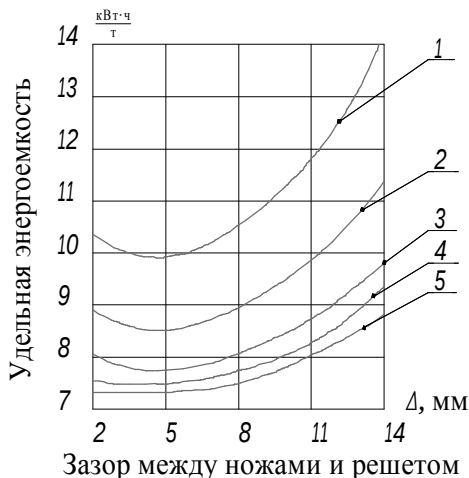


Рис. 3.17. График зависимости удельной энергоемкости от величины зазора между ножами и решетом:

1 – зазор между ножами и решетом 2 мм; 2 – 5 мм; 3 – 8 мм; 4 – 11 мм; 5 – 14 мм

На рис. 3.18 показан график зависимости модуля помола зернофуража от величины зазора между решетом и ярусом ножей.

С уменьшением зазора измельчающая способность модуля повышается, т. к. при малом зазоре перерабатываемый материал более продолжительное время находится в зоне разрушающего действия ножей. Кроме того, в этом случае поверхность решет также активно участвует в измельчении продукта. С увеличением зазора до 14 мм зерновая масса реже подвергается воздействию рабочих органов, снижается скорость перемещения продукта на поверхности решета, в результате уменьшается перетирающий эффект решета, являющийся одним из разрушающих факторов. Можно сделать вывод, что для уменьшения модуля помола зернофуража зазор между решетом и ножами должен быть минимальным. Так как при величине зазора между ножами и решетом, равной 5 мм, удельные затраты энергии возрастают незначительно, то указанный размер следует принять для измельчителя зерна с вертикально установленной рабочей камерой.

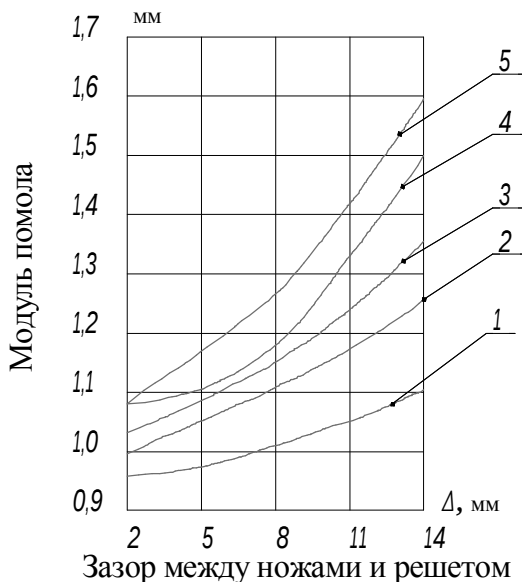


Рис. 3.18. График зависимости модуля помола от величины зазора между ножами и решетом:
 1 – зазор между ножами и решетом 2 мм;
 2 – 5 мм; 3 – 8 мм; 4 – 11 мм; 5 – 14 мм

Анализ результатов проведенных исследований выявил, что полученные зависимости прослеживаются во всех поставленных опытах. Наименьший модуль помола зернофуража достигнут при величине зазора между решетом и ножами, равной 2 мм. С увеличением значения этого параметра модуль помола возрастает. Удельная энергоемкость процесса измельчения зернофуража и производительность имеют оптимальные значения при величине зазора между ножами и решетом, равной 5 мм. В этом случае модуль помола зерна отвечает зоотехническим требованиям, в соответствии с которыми размеры частиц измельченного зернофуража для крупного рогатого скота не должны превышать 3 мм. Таким образом, можно рекомендовать устанавливать зазор между ножами и решетом 5 мм.

Из данных графика (рис. 3.19) видно, что с увеличением диаметра отверстий в решетке модуль помола зернофуража возрастает, что объясняется ростом сепарирующей поверхности.

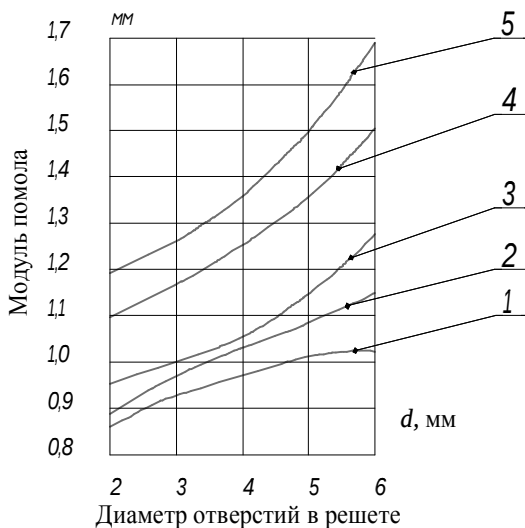


Рис. 3.19. График зависимости модуля помола от диаметра отверстий в решете:

1 – диаметр отверстий в решете 2 мм;
2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4 – 5 мм; 5 – 6 мм

Фракция частиц измельченного зернофуража размером более 2 мм образуется только при установке решет с отверстиями диаметром более 3 мм. Модуль помола максимален для рассмотренных условий при установке решета с отверстиями диаметром 6 мм. На основании результатов опытов можно сделать вывод, что по модулю помола зернофуража наиболее соответствуют установленные в рабочей камере решета с отверстиями диаметром 2 или 3 мм. Обеспечивается и более равномерный фракционный состав измельченного зерна.

Из графиков зависимости видно, что с увеличением диаметра отверстий в решетках производительность модуля возрастает. Этот показатель варьируется от 2,19 до 3,02 т/ч. Последнее значение получено на решете с отверстиями диаметром 6 мм.

Так как ставилась задача получить оптимальное значение модуля помола зернофуража при минимальной удельной энергоемкости процесса, то можно сделать вывод, что наиболее полно поставленной задаче отвечает решето с отверстиями диаметром 3 мм. Удельная энергоемкость выполняемого процесса с данным решетом – 8,76 кВт ч/т, а производительность – 2,51 т/ч.

С увеличением числа ножей, устанавливаемых над решетом, модуль помола зернофуража возрастает, что подтверждает ранее выдвинутую гипотезу. Однако с увеличением числа ножей наблюдается рост затрат энергии на измельчение зерна и уменьшение производительности модуля. Данная зависимость объясняется тем, что с увеличением числа ножей возрастает переносная скорость продуктового слоя, а следовательно, уменьшается вероятность попадания измельченных частиц в раствор отверстия решета.

Результаты исследований показывают, что с увеличением числа ножей в каждом ярусе до восьми существенного изменения модуля помола зернофуража не происходит. Если учесть, что оговоренную зоотехническими требованиями степень измельчения зернофуража обеспечивают четыре ножа в каждом ярусе, то увеличивать их число нет необходимости.

Найденные значения показателей удельной энергоемкости, производительности и модуля помола позволяют определить параметры модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 % к измельчителю вертикального типа. Оптимальные значения перечисленных показателей достигнуты в том случае, когда в рабочей камере установлено решето с отверстиями диаметром 3 мм, а над ним, на роторе, – ярус из четырех ножей при величине зазора между ножами и решетом 5 мм. Такая схема обеспечивает модуль помола до 0,98 мм при удельной энергоемкости процесса измельчения 8,76 кВт·ч/т и производительности 2,51 т/ч.

3.3.5. Определение числа ярусов решет модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 %

Как показали проведенные исследования, с увеличением диаметра отверстий в решете снижается удельная энергоемкость процесса, что объясняется увеличением севкости решет. Отрицательный эффект – увеличение модуля помола зернофуража. Противоречивость полученной зависимости позволила выдвинуть гипотезу об организации последовательного измельчения зерна. В этом случае первоначально зерно измельчается на более крупные фракции, на второй же стадии – на частицы, фракции которых соответствуют зоотехническим требованиям.

Для организации последовательного измельчения зернофуража предусматривается комплектовать модуль двумя ярусами решет. Диаметр отверстий в поярусно установленных решетках должен изменяться от большого в верхнем решете до меньшего в нижнем.

При проверке выдвинутой гипотезы возник вопрос о выборе диаметра отверстий в последовательно установленных решетках. С учетом результатов ранее проведенных исследований было решено установить в нижнем ярусе решето с отверстиями диаметром 3 мм. В этом случае обеспечивается требуемое качество измельчения зерна.

Для определения диаметра отверстий в верхнем решете был поставлен однофакторный эксперимент. В ходе его проведения в верхнем ярусе поочередно устанавливали решета с отверстиями диаметром 4, 5 и 6 мм. Зазор между решетками и ножами в каждом ярусе был равным 5 мм. Другие элементы конструкции ротора измельчителя на протяжении всего эксперимента оставались без изменений, опыты проводились трехкратно.

После обработки результатов для каждой серии опытов вычислили среднее арифметическое значение $\bar{y}$ и дисперсию воспроизводимости опыта S_y^2 :

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m - 1}, \quad (3.124)$$

где y_i – значение функции отклика в i -м опыте;
 m – число опытов в серии, $m = 3$.

Результаты расчета дисперсии воспроизводимости приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Результаты опытов и расчета дисперсии

Факторы	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	S_y^2
Ø6/3	8,3333	8,3969	8,3650	8,365	0,001
Ø5/3	7,9422	7,9422	7,9710	7,9518	0,0002
Ø4/3	8,1784	8,2089	8,2089	8,1987	0,0001
					$\bar{S}_y^2 = 0,0013$

Однородность дисперсии опытов проверяем по критерию Кохрена:

$$s_p = \frac{S_{\max}^2}{\bar{S}_y^2} = \frac{0,001}{0,0013} = 0,76. \quad (3.125)$$

Табличное значение критерия σ_m при 5%-м уровне значимости для $N = 3$ и $m = 1 - 2$ равно 0,8709. Так как расчетное значение меньше табличного, то гипотеза однородности принимается.

Убедившись в однородности дисперсии S_y^2 , можно вычислить дисперсию S^2 воспроизводимости эксперимента:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_y^2}{N} = \frac{0,0013}{3} = 0,00043. \quad (3.126)$$

Уравнение регрессии, описывающее однофакторный эксперимент, имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1, \quad (3.127)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты регрессии;
 x_1 – кодированное значение фактора.

Для получения значений коэффициентов регрессии воспользуемся формулами

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i x_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}; \quad b_1 = \frac{N \sum_{i=1}^N y_i x_i - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}. \quad (3.128)$$

Результаты вычислений для определения коэффициентов регрессии представлены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Значения для определения коэффициентов регрессии

Номер опыта	x_1	y	x_1^2	yx_1	y^2	$x + y$	$(x + y)^2$
1	+6	8,365	36	50,19	69,9732	14,365	206,3532
2	+5	7,9518	25	39,759	63,2311	12,9518	167,7491
3	+4	8,1987	16	32,7948	67,2187	12,1987	148,8082
Σ	15	24,5155	77	122,7438	200,4229	—	522,9106

Воспользовавшись значениями, приведенными в табл. 3.10, определим коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{24,5155 \times 77 - 122,7438 \times 15}{3 \times 77 - 15^2} = 7,76; \quad (3.129)$$

$$b_1 = \frac{3 \times 122,7438 - 24,5155 \times 15}{3 \times 77 - 15^2} = 0,083.$$

Тогда уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = 7,76 + 0,083x_1. \quad (3.130)$$

Для проверки значимости коэффициентов регрессии воспользуемся критерием Стьюдента. Определим доверительный интервал:

$$\Delta b = \pm t \sqrt{S^2} = 2,447 \times 0,021 = 0,051, \quad (3.131)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента. При числе степеней свободы $f = N(m-1) = 3(3-1) = 6$ и 5%-м уровне значимости $t = 2,447$.

Так как абсолютные величины коэффициентов регрессии больше доверительного интервала, то они являются статистически значимыми.

Дисперсию адекватности определим по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Dy^2}{f} = 0,00126, \quad (3.132)$$

где Δy^2 – остаточная сумма квадратов;

f – число степеней свободы, $f = N - 2 = 3 + 2 = 1$.

Для определения остаточной суммы квадратов составим табл. 3.11.

Гипотезу об адекватности проверим, воспользовавшись критерием Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S} = \frac{0,00126}{0,00043} = 2,83. \quad (3.133)$$

Таблица 3.11

Результаты определения остаточной суммы квадратов

Номер опыта	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_i$	Δy	Δy^2
1	8,3333	8,3969	8,3650	8,365	0,32	0,00102
2	7,9422	7,9422	7,9710	7,9518	0,0096	0,0000922
3	8,1784	8,2089	8,2089	8,1987	0,102	0,0001
						$\sum \Delta y^2 =$ $= 0,00126$

При 5%-м уровне значимости и числах степеней свободы $f_1 = N - 2 = 3 + 2 = 1$ и $f_2 = N(m - 1) = 3 \cdot 2 = 6$ табличное значение F -критерия равно 5,99. Так как $F < F_m$, то модель, представленная уравнением регрессии, адекватна.

3.3.6. Параметры модулей для измельчения зернофуража влажностью до 14 % и влажностью от 14 до 40 %

При определении параметров модуля для измельчения зернофуража влажностью до 14 % установлено, что выдвинутая гипотеза подтвердилась: при установке в рабочей камере измельчителя двух решет (в нижнем ярусе с отверстиями диаметром 3 мм, а в верхнем – 6 мм) удельная энергоемкость процесса составила 8,36 кВт·ч/т при производительности 2,63 т/ч.

Эффективность работы модуля с двумя ярусами решет возросла при установке решет с отверстиями диаметром 4 и 3 мм соответственно. Удельная энергоемкость процесса измельчения зерна составила 8,19 кВт·ч/т при производительности 2,68 т/ч. Наибольшая же эффективность была достигнута при установке в верхнем ярусе решета с отверстиями диаметром 5 мм. Установка решет с отверстиями диаметром 5 и 3 мм позволила улучшить результаты предыдущего опыта (рис. 3.20).

В предложенном модуле для измельчения зернофуража влажностью до 14 % с двумя ярусами последовательно расположенных решет выполняется важный технологический процесс – сепарация зерна по мере его измельчения, при этом дополнительные устройства не применяются. Закрепленные в верхнем ярусе ножи обеспечивают равномерное распределение по периметру рабочей камеры загружаемого зернового корма, в результате чего исчезают перегрузки вала измельчителя, а следовательно, не затрачивается энергия на их преодоление и повышается производительность измельчителя.

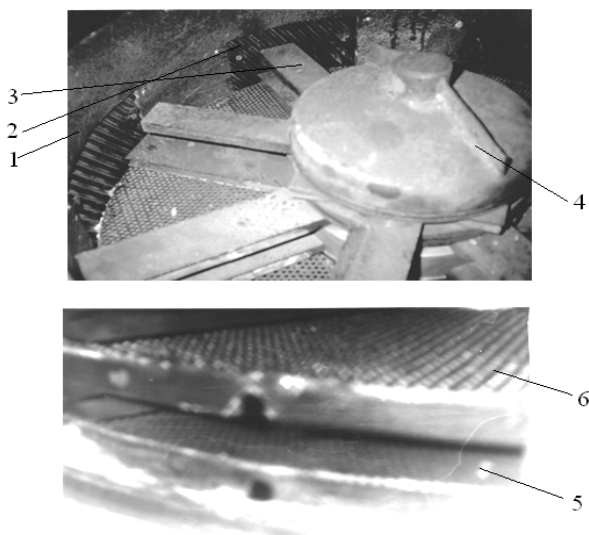


Рис. 3.20. Модуль для измельчения зернофуража влажностью до 14 % с установленными ножами и решетами:
 1 – рабочая камера измельчителя; 2 – дека; 3 – ножи;
 4 – ротор; 5 – решето с отверстиями диаметром 5 мм;
 6 – решето с отверстиями диаметром 3 мм

Лезвия ножей, воздействуя на зерновой корм, нарушают межмолекулярные связи в зерне. Затраты энергии на его измельчение нижними ярусами рабочих органов уменьшаются, повышается производительность измельчителя. Установленными в нижних ярусах, над перфорированными решетами, ножами производится измельчение зернофуража до размеров частиц, отвечающих зоотехническим требованиям. Смещение измельчающих рабочих органов каждого верхнего яруса относительно измельчающих рабочих органов нижнего обеспечивает равномерное распределение нагрузки на вал, поэтому не затрачивается дополнительная энергия на преодоление перегрузок вала.

Таким образом, данная конструкция измельчителя зерновых кормов позволяет использовать энергию удара для ослабления межмолекулярных связей внутри зерна, улучшить распределение зернофуража на протяжении всего процесса измельчения, эффективнее использовать рабочие органы и поверхности перфорированных решет

и тем самым снижает удельную энергоемкость процесса измельчения кормов при увеличении производительности измельчителя.

Результаты исследований позволили определить оптимальную конструкцию модуля для измельчения зерна влажностью более 14 % к измельчителю вертикального типа (рис. 3.21).

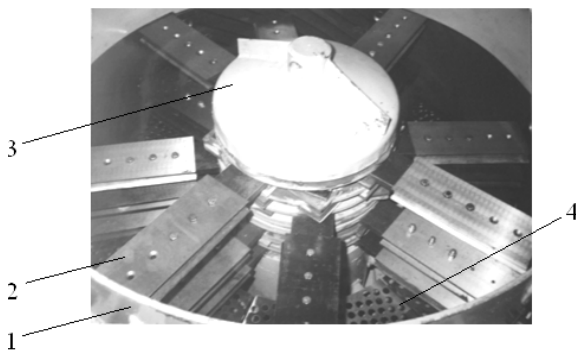


Рис. 3.21. Измельчитель зерна влажностью более 14 %:
1 – рабочая камера измельчителя; 2 – ножи; 3 – ротор;
4 – решето с отверстиями диаметром 15 мм

В качестве пассивных рабочих органов используются установленные по внутреннему периметру рабочей камеры рифленые деки, рифы которых имеют треугольную форму. Рациональный угол заострения рифа должен находиться в пределах $80...100^\circ$, значение угла наклона грани выступа – в пределах $40...58^\circ \leq \tau \leq 65...75^\circ$. Для сепарации измельченного влажного зерна под нижним ярусом ножей установлено решето, диаметр цилиндрических отверстий в котором равен 15 мм. В двух верхних ярусах установлено по четыре ножа в каждом, в двух нижних – по восемь ножей, при этом зазор между решетом и ножами нижнего решета равен 5 мм. Предложенное техническое решение защищено патентом на полезную модель.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОДИСПЕРГАТОРА

4.1. Определение параметров рабочих органов установки для гидродинамической обработки зерна

Явление кавитации (от лат. *cavitas* – пустота) обнаружил английский ученый Осборн Рейнольд в 1894 г. Кавитация – образование в жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (кавитационных пузырьков) [60, 61].

Кавитация и связанные с ней физические явления вызывают ряд эффектов. Некоторые из них, например разрушение и диспергирование твердых тел, эмульгирование жидкостей, обязаны своим происхождением ударам при схлопывании пузырьков и микропотокам вблизи них. Импульсы давления, возникающие в кавитационных пузырьках, обуславливают также мгновенные разрывы микроорганизмов и простейших, находящихся на твердых предметах и в водной среде. Пузырьки схлопываются во время полупериодов сжатия, создавая кратковременные импульсы давления с образованием точечных температур, способные разрушать даже весьма прочные материалы. Если кавитационные пузырьки замыкаются вблизи твердого тела, то многократно повторяющиеся удары приводят к разрушению его поверхности. Вода, получившая порцию энергии в виде серии возмущений давления, начинает постепенно нагреваться. Если в воду добавить животный или растительный белок, то происходит интенсивная реакция его гидратации – соединение молекул воды с биополимером, прекращение ее самостоятельного существования и превращение ее в часть этого белка.

Таким образом, технологии на основе кавитационной обработки сырья могут быть эффективны:

- при обеззараживании жидкостей и находящихся в ней твердых частиц;
- при эмульгировании обычно не смешиваемых продуктов;
- при разрыве длинных полимерных цепей в растительных жирах в процессе приготовления заменителей цельного молока из зерновых компонентов;
- при измельчении зернофуража в жидкости;
- при приготовлении жидких кормов для животных.

В процессе обработки зернового материала в гидродиспергаторе обрабатываемая среда подвергается механическому и гидродинамическому (кавитационному) воздействию в результате его прохождения через рабочий аппарат под давлением, создаваемым насосом. При гидродинамической обработке зерна одновременно происходят три процесса: измельчение, смешивание и нагрев, что объясняется наличием кавитации.

Явление кавитации возникает в жидкости при понижении в ней давления до предела, при котором происходят разрывы потока. Наступление кавитации характеризуется появлением мельчайших парогазовых пузырьков, которые при соответствующем развитии кавитации образуют в потоке кавитационные пульсирующие каверны – факелы кавитации (рис. 4.1).

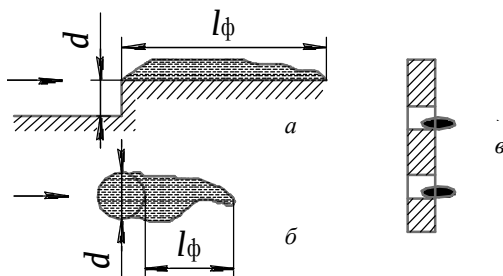


Рис. 4.1. Факелы кавитации:
а – при обтекании выступа; б – при обтекании цилиндра;
в – при обтекании отверстий

В связи с этим выдвинута гипотеза о необходимости установки кавитатора, состоящего из двух рабочих органов. Один из них должен увеличивать давление смеси до порогового значения, чтобы образованные ранее пузырьки переросли в пульсирующие каверны и при последующем резком сбросе давления начали схлопываться, создавая кратковременные импульсы давления, способные разрушить частицы зернофуража, находящегося рядом. Второй рабочий орган должен разделять поток обрабатываемой смеси на множество мелких струй, что, в свою очередь, позволит увеличить количество парогазовых пузырьков.

В результате поисковых исследований в качестве рабочих органов гидродинамической установки, создающих эффект кавитации, были выбраны решето и конический патрубок (рис. 4.2) [61–65].

Функция решета заключается в создании дополнительных течений в сплошном потоке жидкости (усиленного турбулентного течения) и частичном механическом разрушении измельчаемых частиц.

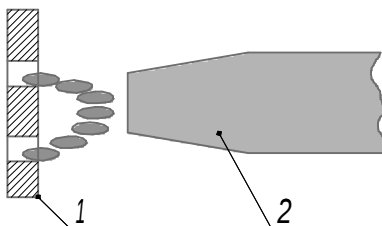


Рис. 4.2. Схема кавитатора экспериментальной гидродинамической установки:
1 – решетю; 2 – конический (ускоряющий) патрубок

Конический патрубок предназначен для увеличения давления жидкости до порогового значения, после которого, попадая в область атмосферного давления (в емкость аппарата), парогазовые пузырьки начинают схлопываться, разрушая зерновые компоненты смеси.

Для определения рациональных параметров гидродиспергатора рассмотрим процессы, происходящие в коническом патрубке при движении жидкой кормосмеси (рис. 4.3).

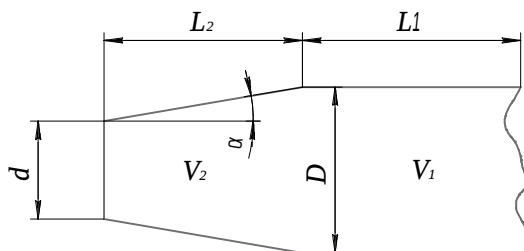


Рис. 4.3. Схема ускоряющего патрубка

При работе установки жидкость движется по участку трубопровода от выхода из центробежного насоса до ускоряющего патрубка конической формы длиной L_1 , затем по коническому патрубку длиной L_2 . Когда жидкость проходит через трубопровод диаметром D , она обладает давлением p_1 . Давление $p_1 = \text{const}$, т. к. оно создается насосом. При дальнейшем движении жидкости по коническому патрубку давление постепенно увеличивается до значения p_2 на выходе из конического патрубка диаметром d .

Таким образом, для получения эффекта кавитации в рабочей емкости гидродиспергатора следует определить выходной диаметр ускоряющего патрубка d и давление p_2 , которое необходимо создать на выходе из конического патрубка.

Запишем уравнение Бойля–Мариотта для жидкостей:

$$V_1 p_1 = V_2 p_2, \quad (4.1)$$

где $V_1 = \frac{\pi D^2}{4} L_1$ – условный объем жидкости в трубопроводе, м³;

V_2 – условный объем жидкости в коническом патрубке, м³:

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi L_2 \frac{D^2}{4} + \frac{d^2}{4} + \frac{Dd}{4} \frac{D-d}{D+d};$$

где D – диаметр трубопровода, м;

d – выходной диаметр ускоряющего патрубка, м;

L_1 – длина трубопровода от выхода из центробежного насоса до ускоряющего патрубка, м;

L_2 – длина конического патрубка, м.

Подставив выражения для нахождения объемов, получим:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{\pi D^2 L_1}{4}}{\frac{1}{3} \pi L_2 \frac{D^2}{4} + \frac{d^2}{4} + \frac{Dd}{4} \frac{D-d}{D+d}} = \frac{3D^2 L_1}{L_2 (D^2 + d^2 + Dd)}. \quad (4.2)$$

Выходной диаметр ускоряющего патрубка d можно выразить через угол наклона боковой поверхности α . Так как $\operatorname{tg} \alpha = \frac{D-d}{2L_2}$, то

$$d = D - 2L_2 \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.3)$$

Подставив формулу (3.3) в (3.2), получим:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{3D^2 L_1}{L_2 (D^2 + (D - 2L_2 \operatorname{tg} \alpha)^2 + 4D(D - 2L_2 \operatorname{tg} \alpha))}. \quad (4.4)$$

Упростим выражение (4.4):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{3D^2 L_1}{6D^2 L_2 - 12DL_2^2 \operatorname{tg} \alpha + 4L_2^3 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (4.5)$$

Так как величина $p_1 = \text{const}$, то из выражения (4.5) выразим давление p_2 :

$$p_2 = \frac{3D^2 L_1 p_1}{6D^2 L_2 - 12DL_2^2 \operatorname{tg} \alpha + 4L_2^3 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (4.6)$$

Необходимым условием возникновения кавитации является понижение давления в потоке жидкости до давления парообразования, то есть кавитация возникает, когда абсолютное мгновенное давление p_A удовлетворяет условию

$$p_A = p_2 - p_a^3 p_{\text{кр}}, \quad (4.7)$$

где p_a – атмосферное давление, кПа;

$p_{\text{кр}}$ – критическое давление с учетом влияния воздуха, выделяющегося из жидкости при кавитации, и наличия твердых взвешенных частиц, кПа.

Обычно двумя последними факторами пренебрегают и принимают $p_{\text{кр}} \approx p_v$, где p_v – абсолютное давление паров жидкости, значения которого в зависимости от температуры представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значения абсолютного давления паров жидкости в зависимости от температуры воды

Температура воды t , °С	10	15	20	25	30
Давление p_v , кПа	1,3	1,7	2,4	3,1	4,3

Представленный диапазон температур и соответствующие ему значения p_v не позволяют в полной мере оценить все диапазоны работы гидродиспергатора. Построим по табличным значениям график функции $p_v = f(t)$ и при помощи аппроксимации получим уравнение, описывающее зависимость p_v от t (рис. 4.4).

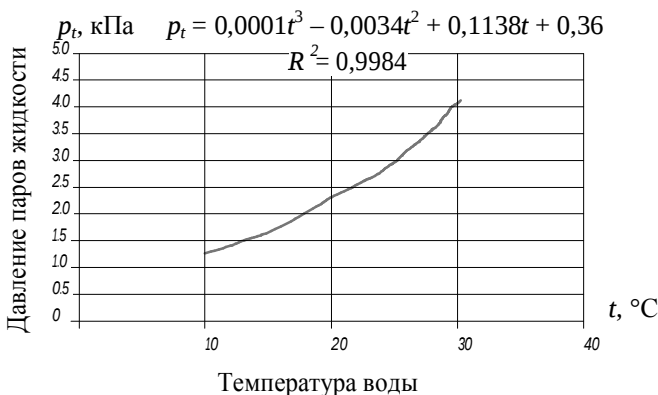


Рис. 4.4. График зависимости давления паров жидкости от температуры воды

С помощью математического пакета Excel определена величина достоверности аппроксимации, равная $R^2 = 0,9984$. Полученное значение близко к 1, что показывает высокую степень подобия полученного графика зависимости на линию тренда.

На основании анализа графика на рис. 4.4 получено искомое уравнение для определения абсолютного давления паров жидкости

$$p_t = 0,0001t^3 - 0,0034t^2 + 0,1138t + 0,36. \quad (4.8)$$

При повышении пульсации давления в вихревом следе или при сносе кавитационных пузырьков в области повышенного давления пузырьки схлопываются (разрушаются). Если схлопывание происходит у твердой стенки, то материал ее подвергается значительным механическим ударным воздействиям. Эти воздействия при соответствующих условиях приводят к разрушению измельчаемого материала.

В качестве критерия, характеризующего кавитацию, обычно применяют коэффициент кавитации

$$K = \frac{p_{\text{хар}} - p_{\text{кр}}}{\rho v_{\text{хар}}^2}, \quad (4.9)$$

где $p_{\text{хар}}$ – абсолютное давление вблизи обтекаемого тела без учета вызванных им возмущений. Разрушение зерновой массы происходит непосредственно после выхода жидкости из конического патрубка и до того момента пока давление жидкости не станет равным давлению в емкости, поэтому принимаем его равным среднему значению:

$$p_{\text{хар}} = \frac{p_2 + p_a}{2}; \quad (4.10)$$

$v_{\text{хар}}$ – абсолютная скорость потока вблизи обтекаемого тела без учета вызванных им возмущений:

$$n_{\text{хар}} = \frac{n_{\text{нас}} \cos \alpha + n_{\text{нас}}}{2}, \quad (4.11)$$

где $v_{\text{нас}}$ – скорость потока, создаваемая насосом, м/с.

Подставив формулы (4.10), (4.11) в выражение (4.9) и упростив его, получим искомое значение коэффициента кавитации:

$$K = \frac{\frac{p_2 + p_a}{2} - p_{\text{кр}}}{\rho \frac{v_{\text{нас}}^2 \cos \alpha + v_{\text{нас}}^2}{2}} = \frac{p_2 + p_a - 2p_{\text{кр}}}{2\rho v_{\text{нас}}^2 \frac{\cos \alpha + 1}{2}}. \quad (4.12)$$

Значение параметра кавитации, соответствующее условиям ее возникновения, принято называть критическим и обозначать $K_{\text{кр}}$. Кавитация не происходит, когда

$$K > K_{\text{кр}}. \quad (4.13)$$

Значение $K_{\text{кр}}$ будет различным в зависимости от видов неровностей, встречаемых потоком. В данном случае наблюдается сужение трубопровода (рис. 4.5).

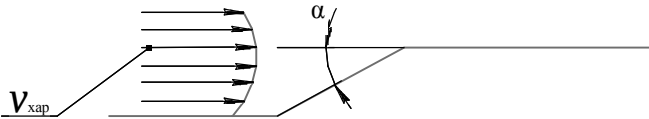


Рис. 4.5. Схема движения кормосмеси при сужении трубопровода

Для неровностей такого вида рекомендуется принимать для пространственных выступов $K_{\text{кр}} = 2\sin\alpha$ [61].

Параметром, характеризующим процесс, является степень развития (стадия) кавитации

$$\beta = \frac{K}{K_{кр}}, \quad (4.14)$$

где K – коэффициент кавитации в данных условиях работы;

$K_{кр}$ – коэффициент кавитации в условиях начала возникновения кавитации.

В зависимости от степени развития процесса различают начальную стадию кавитации, развившуюся кавитацию и суперкавитацию (рис. 4.6). Соответствующие им значения β для плохообтекаемых тел лежат в следующих границах: начальная стадия – $0,7 < \beta < 1$, развившаяся кавитация – $0,15 < \beta < 0,7$, суперкавитация – $\beta < 0,15$.

Кавитационные разрушения и их интенсивность зависят от формы и стадии кавитации, очертаний обтекаемого тела, содержания в воде воздуха, скорости потока, вида материала кавитируемого тела. При некотором значении $\beta = \beta_0$ (рис. 4.6) на стадии развившейся кавитации возникают максимальные кавитационные разрушения. На начальной же стадии и на стадии суперкавитации разрушения существенно меньше или отсутствуют, особенно при непродолжительных кавитационных воздействиях [61, 62].



Рис. 4.6. Схематический график зависимости интенсивности кавитационных разрушений i от стадии кавитации $\beta = K / K_{кр}$:

- 1 – бескавитационный режим; 2 – начальная стадия;
3 – развившаяся кавитация; 4 – суперкавитация

Для определения оптимальных параметров рабочих органов гидро-диспергатора произведем расчет по полученным ранее зависимостям.

Анализ литературных источников показал, что на экспериментальной установке принято использовать для перемещения зерна насос производительностью $Q = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $H = 32 \text{ м}$ [62]. Давление, создаваемое насосом, определяется по формуле

$$p_1 = H\gamma, \quad (4.15)$$

где $\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^2$;

ρ – плотность кормосмеси, для зерновой пасты $\rho = 980 \text{ кг}/\text{м}^3$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Тогда давление, создаваемое:

$$p_1 = 32 \times 980 \times 9,81 = 307,6 \text{ кПа}.$$

Исходя из конструктивных параметров насоса принимаем длину трубопровода $L_1 = 1200 \text{ мм}$, длину конического патрубку $L_2 = 300 \text{ мм}$, диаметр трубопровода $D = 50 \text{ мм}$. Неизвестными величинами являются диаметр конического патрубку на выходе d и давление, которое необходимо создать для получения эффекта кавитации в рабочей емкости гидродиспергатора p_2 . Приняв угол наклона боковой поверхности $\alpha = 3$ ($\text{tg} 3 = 0,05$) и подставив значения известных параметров в выражение (4.3), найдем значение искомого диаметра:

$$d = D - 2L_2 \text{tg} \alpha = 50 - 2 \times 300 \times 0,05 = 20 \text{ мм}.$$

По формуле (4.2) найдем отношение объема кормосмеси, находящегося в трубопроводе, к объему, находящемуся в коническом патрубке:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{3D^2 L_1}{L_2 (D^2 + d^2 + Dd)} = \frac{3 \times 50^2 \times 1200}{300 (50^2 + 50 \times 20 + 20^2)} = 7,7.$$

Из выражения (4.1) выразим p_2 – давление, которое необходимо создать для получения эффекта кавитации в рабочей емкости гидродиспергатора, и, подставив значения известных параметров, вычислим искомое давление:

$$p_2 = \frac{V_1}{V_2} p_1 = 7,7 \times 307,6 = 2368,5 \text{ кПа.}$$

В качестве критерия, характеризующего кавитацию, применяют коэффициент кавитации, который зависит от характерного давления $p_{\text{хар}}$ вблизи обтекаемого тела, определяемого по формуле (4.10):

$$p_{\text{хар}} = \frac{p_2 + p_a}{2} = \frac{2368,5 + 100}{2} = 1234,5 \text{ кПа.}$$

Коэффициент кавитации зависит также от характерной скорости потока $v_{\text{хар}}$, определяемой по формуле (4.11), в которой неизвестной величиной является скорость потока кормосмеси, создаваемая насосом:

$$v_{\text{нас}} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 25 \times 10^6}{3,14 \times 50^2 \times 3600} = 3,5 \text{ м/с;}$$

$$v_{\text{хар}} = \frac{v_{\text{нас}} \cos \alpha + v_{\text{нас}}}{2} = \frac{3,5 \times 0,99 + 3,5}{2} = 3,4 \text{ м/с.}$$

Давление, обеспечивающее разрушение зерна:

$$p_{\text{кр}} = \frac{\sigma}{k}, \quad (4.17)$$

где σ – разрушающее контактное напряжение, для зернофуража $\sigma = 30 \cdot 10^6$ Па;

k – коэффициент, учитывающий влажность зернофуража и степень его обработки, $k = 45$ %.

Подставив значения величин в выражение (4.17), получим:

$$p_{\text{кр}} = \frac{30 \times 10^6}{45} = 666,7 \text{ кПа;}$$

$$K = \frac{1234,5 - 666,7}{980 \times 3,4^2} = 0,05.$$

Значение параметра кавитации, соответствующее условиям возникновения кавитации $K_{\text{кр}}$ для сужающегося участка трубопровода,

определяется по формуле $K_{кр} = 2 \sin \alpha = 2 \times 0,05 = 0,1$. Процесс кавитации не происходит, когда $K > K_{кр}$. В данном случае условие не выполняется ($0,05 < 0,1$), поэтому возникает эффект кавитации.

Степень развития (стадия) кавитации характеризуется отношением (4.14):

$$\beta = \frac{K}{K_{кр}} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5.$$

Так как значение β находится в пределах от 0,15 до 0,7, то установка обеспечивает режим развившейся кавитации. Именно в этой стадии происходят наибольшие разрушения.

4.2. Энергетический расчет установки для влаготепловой обработки зерна

Мощность, затрачиваемая на приготовление зерновой пасты в гидродиспергаторе, состоит из мощности, необходимой для нагрева воды до заданной температуры, а также для транспортирования водно-зерновой массы по трубопроводу через рабочие органы:

$$N = N_n + N_b, \quad (4.18)$$

где N_n – мощность, затрачиваемая на транспортирование массы по трубам через турбулизатор и создание циркуляции материала в камере измельчения, кВт;

N_b – мощность, затрачиваемая на предварительный нагрев воды, кВт.

Мощность, требуемая для преодоления сил сопротивления в трубопроводе, кавитаторе и создания циркуляции материала в камере измельчения, определяется мощностью, потребляемой приводом насоса. Однако в связи с тем, что в гидродиспергаторе перекачивается не вода, а зерновая паста, затраты энергии будут отличаться от заданных в технической характеристике.

Мощность, требуемая для привода насоса гидродиспергатора, в общем виде:

$$N_n = N_p + N_{xx}, \quad (4.19)$$

где N_p – мощность рабочего хода насоса, кВт;

N_{xx} – мощность холостого хода насоса, кВт.

Мощность рабочего хода насоса гидродиспергатора

$$N_p = N_{\Gamma} + N_{\text{изм}}, \quad (4.20)$$

где N_{Γ} – мощность, затрачиваемая на подачу измельчаемых частиц и создание давления в кавитаторе, кВт;

$N_{\text{изм}}$ – мощность, затрачиваемая на измельчение, кВт. Так как в данном аппарате отсутствуют активные измельчающие рабочие органы, принимаем $N_{\text{изм}} = 0$.

Мощность, затрачиваемая на подачу измельчаемых частиц к кавитатору и создание давления в кавитаторе, состоит из затрат энергии непосредственно на транспортирование водно-зерновой массы $N_{\text{тр}}$ и затрат энергии на создание давления в кавитаторе, а значит, частицы зернофуража получают некоторую кинетическую энергию $N_{\text{кин}}$. Тогда формула (4.20) примет следующий вид:

$$N_n = N_{\text{тр}} + N_{\text{кин}} + N_{xx}, \quad (4.21)$$

где $N_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемая непосредственно на транспортирование водно-зерновой массы насосом, кВт;

$N_{\text{кин}}$ – мощность, затрачиваемая на придание частицам зернофуража кинетической энергии, кВт.

Мощность холостого хода насоса, как правило, не превышает 30 % от общих затрат энергии, поэтому принимаем $N_{xx} = 0,3N_n$. Тогда формула (4.21) примет вид:

$$0,7N_n = N_{\text{тр}} + N_{\text{кин}}. \quad (4.22)$$

Мощность, необходимая непосредственно для транспортирования водно-зерновой массы:

$$N_{\text{тр}} = \frac{m}{2t} v_{\text{нас}}^2, \quad (4.23)$$

где m – масса перекачиваемой жидкости, кг;

t – время обработки зернофуража, с;

$v_{\text{нас}}$ – скорость частицы на выходе из насоса, м/с.

Мощность, затрачиваемая на придание частицам зернофуража кинетической энергии:

$$N_{\text{кин}} = \frac{m}{2t} (v_{\text{хар}}^2 - v_{\text{нас}}^2), \quad (4.24)$$

где $v_{\text{хар}}$ – абсолютная скорость потока на выходе из кавитатора, м/с.

Подставив выражения (4.23), (4.24) в (4.22) и упростив, получим:

$$0,7N_{\text{н}} = \frac{m}{2t} v_{\text{хар}}^2. \quad (4.25)$$

Выражение (4.25) можно записать через производительность:

$$0,7N_{\text{н}} = \frac{Qv_{\text{хар}}^2}{2}, \quad (4.26)$$

где Q – производительность насоса, кг/с.

Абсолютная скорость потока на выходе из конического патрубка

$$v_{\text{хар}} = \frac{v_{\text{н}} \cos \alpha + v_{\text{н}}}{2}, \quad (4.27)$$

где α – угол наклона боковой поверхности конического патрубка, град.

Скорость частицы на выходе из насоса, выраженная через производительность и диаметр выходного патрубка насоса:

$$v_{\text{нас}} = \frac{4Q}{\pi D^2 \rho} \times \frac{L_0}{L_2}, \quad (4.28)$$

где D – диаметр выходного патрубка насоса, м;

ρ – плотность водно-зерновой смеси, кг/м³;

L_0 – общая длина трубопровода, м;

L_2 – длина конического патрубка, м.

Выражение (4.26) будет иметь вид:

$$0,7N_{\text{н}} = \frac{2Q^3}{\pi^2 D^4 \rho^2} (\cos \alpha + 1)^2 \frac{L_0^2}{L_2^2}. \quad (4.29)$$

Тогда мощность насоса гидродиспергатора

$$N_{\text{н}} = \frac{2,9Q^3}{\pi^2 D^4 \rho^2} (\cos \alpha + 1)^2 \frac{\mathfrak{A} L_0 \ddot{\theta}^2}{\mathfrak{E} L_2 \ddot{\theta}}. \quad (4.30)$$

Затрачиваемую мощность на предварительный нагрев воды определяют по формуле

$$N_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}}{t}, \quad (4.31)$$

где t – время нагрева воды, с;

$Q_{\text{в}}$ – затраты энергии на нагрев воды, Дж;

$$Q_{\text{в}} = C m_{\text{в}} T, \quad (4.32)$$

где C – теплоемкость воды (4180 Дж/кг);

$m_{\text{в}}$ – масса нагреваемой воды, кг;

T – температура нагрева воды, °С.

Подставив выражение (4.32) в (4.31), получим:

$$N_{\text{в}} = \frac{C m_{\text{в}} T}{t}. \quad (4.33)$$

Тогда в соответствии с формулой (4.18) определим мощность, затрачиваемую на приготовление зерновой пасты:

$$N = \frac{2,9Q^3}{\pi^2 D^4 \rho^2} (\cos \alpha + 1)^2 \frac{\mathfrak{A} L_0 \ddot{\theta}^2}{\mathfrak{E} L_2 \ddot{\theta}} + \frac{C m_{\text{в}} T}{t}. \quad (4.34)$$

Из выражения (4.34) видно, что требуемая мощность процесса получения зерновой пасты зависит как от технических характеристик насоса, так и от физико-механических свойств продукта.

В результате расчета установлено, что для гидродиспергирования зерна на установке с насосом производительностью 25 м³/ч и предварительным нагревом воды до температуры 15 °С, энергозатраты составят 6,5 кВт.

4.3. Экспериментальные исследования по определению параметров рабочих органов и режимов работы гидродиспергатора

Измельчение фуражного зерна в жидкую пасту является важным технологическим процессом, т. к. существенно влияет на качество и стоимость кормосмеси. Поэтому для определения оптимальных параметров работы гидродиспергатора и его рабочих органов нужно провести экспериментальные исследования.

При оптимизации конструкции гидродиспергатора рассматривается множество факторов. Поэтому для поиска параметров необходимо использовать метод математического планирования эксперимента. Движение к оптимуму возможно, если выбрать один параметр оптимизации, а другие характеристики процесса принять в качестве ограничений.

Эффективность технологического процесса характеризуется двумя показателями – энергоемкостью процесса и качеством измельчения, однако координаты экстремумов этих функций обычно не совпадают. Поэтому в качестве целевой функции целесообразно принять качество измельчения зерна в диапазоне зоотехнических требований с наименьшими затратами энергии.

С целью обоснования конструктивных и режимных параметров гидродиспергатора проведены экспериментальные исследования, программой которых предусматривалось:

- 1) выявление априорным ранжированием факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество измельчения зернофуража;
- 2) проведение многофакторного эксперимента с использованием центрального композиционного ортогонального плана второго порядка 2^3 ;
- 3) обработка полученных экспериментальных данных;
- 4) построение поверхностей отклика, отображающих зависимость количества недостаточно измельченных частиц от факторов, установленных в результате априорного ранжирования.

На первом этапе исследований определена область факторного пространства, в котором количество недоизмельченных частиц сырья находится в пределах зоотехнического допуска – до 2 мм не менее 40 % [64]. Осуществлен отбор факторов, предположительно наиболее сильно влияющих на качество готового продукта (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Факторы, влияющие на качество готового продукта

Наименование фактора	Обозначение фактора
1. Физико-механические свойства сырья:	
плотность исходного зернофуража	x_1
средний размер частиц сырья	x_2
температура воды	x_3
2. Параметры экспериментальной установки	
диаметр отверстий в решетке	x_4
расстояние от ускоряющего патрубка до решета	x_5
потребляемая насосом сила тока	x_6
3. Технологические факторы	
коэффициент заполнения	x_7
время смешивания	x_8

На основании поисковых опытов и анализа конструкции машины установлено, что такие факторы, как время обработки материала τ (мин), расстояние от ускоряющего патрубка до решета l (мм), диаметр отверстий в решетке D_0 (мм), являются наиболее значимыми, но недостаточно изучены.

В научных исследованиях и на машиноиспытательных станциях широкое распространение получил метод определения качества измельчения зернового материала при помощи классификатора РКФ-1 с набором сит (ОСТ 70.19.2–83). После окончания процесса измельчения зернофуража из готовой смеси отбирают пробы и путем просеивания или промывания на лабораторных ситах определяют массу недостаточно измельченных частиц.

Данный метод оценки качества прост, обеспечивает необходимую точность результатов, доступен для использования как в лабораторных условиях, так и непосредственно в хозяйствах, поэтому был принят при определении качества измельчения зернофуража.

При контрольном отборе проб следует соблюдать условие равенства проб, взятых в разных точках рабочей емкости гидродиспергатора. Для решения этой задачи предложен следующий способ отбора проб.

Объем емкости экспериментального гидродиспергатора разбили на десять равных частей плоскостью, перпендикулярной оси смеси-

теля, а также вертикальной и горизонтальной плоскостями вдоль оси на четыре части. Таким образом, для взятия проб получили 40 равных объемов. По таблице случайных чисел в произвольном месте брали 15 чисел, не превышающих 40. Из объемов, обозначенных этими числами, брали отборщиком пробы, которые затем обрабатывали на сите и взвешивали массу недостаточно измельченных частиц.

По полученным результатам определяли среднее значение в пробе недостаточно измельченных частиц

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^g a_i}{n} \quad (4.35)$$

и дисперсию

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^g (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}, \quad (4.36)$$

где a_i – результат i -го измерения;

$(a_i - \bar{a})$ – отклонение любого отдельного результата измерений от среднеквадратического.

Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^g (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}}. \quad (4.37)$$

Масса навесок для определения степени измельчения зернового материала и распределения по крупности составляла 100 г. Взвешивание навесок и остатка на ситах осуществлялось на электронных весах ВЛК-500 с точностью до 0,01 г.

Согласно ОСТ 70.19.2–83 и методике проведения испытаний машин для измельчения кормов, количество отбираемых проб должно быть равно 15, повторность опытов – трехкратная.

Для проведения многофакторного эксперимента целесообразно использовать центральный композиционный ортогональный план второго порядка 2^3 . Уровни варьирования факторов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Кодирование варьируемых параметров

Варируемые факторы	Время обработки τ	Расстояние от уско- ряющего патрубка до решета l	Диаметр отверстий в решете D_0
Единицы измерения	мин	мм	мм
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3
Основные уровни ($x_i = 0$)	20	70	8
Интервалы варьирования	5	10	2
Нижние уровни ($x_i = -1$)	15	60	6
Верхние уровни ($x_i = +1$)	25	80	10

Основа эксперимента – матрица, содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с намеченным планом (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Построение трехфакторного плана первого порядка

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	Номер опыта	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	5	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1
3	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	8	+1	+1	+1

Экспериментальные исследования выполнялись на специально изготовленной установке, в качестве сырья для которой использовался консервированный тритикале.

Был изготовлен экспериментальный образец гидродиспергатора (рис. 4.7), включающий емкость 1 со всасывающим и нагнетательным трубопроводами, электронасос 2 и раму 12 [65].

Емкость 1 со всасывающим и нагнетательным трубопроводами предназначена для влаготепловой обработки зернофуража и представляет собой цилиндрический бак 3, закрытый сверху крышкой 4, в которой имеется люк 5. Люк 5 служит для загрузки зернофуража. Снизу к емкости присоединен всасывающий трубопровод, на котором крепятся термодатчик 7 и патрубки (один для подсоединения воды (8), другой для ее слива (9) после промывки емкости 1). Термо-

датчик 7 позволяет управлять температурными процессами при изготовлении пасты. Нагнетательный трубопровод соединяет электронасос с емкостью 1 и турболизатором 6.

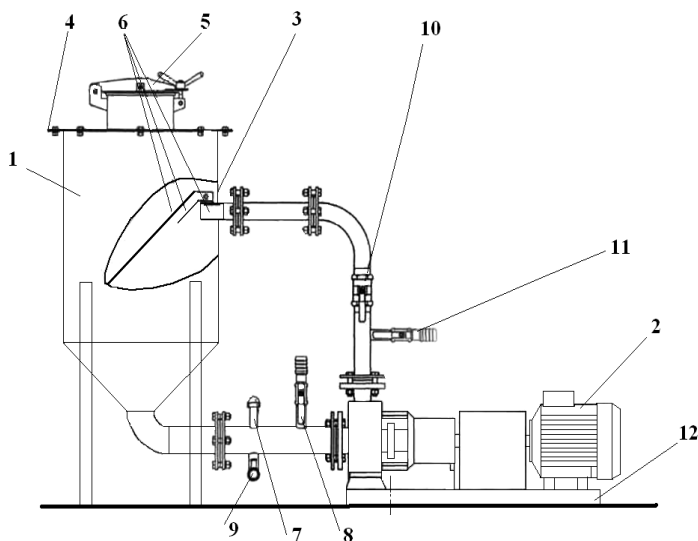


Рис. 4.7. Схема экспериментальной установки:

1 – емкость; 2 – электронасос; 3 – ускоряющий патрубок; 4 – крышка; 5 – люк;
6 – решет; 7 – термодатчик; 8, 9 – патрубки; 10, 11 – краны; 12 – рама

С целью получения эффекта кавитации разработан кавитатор, который предназначен для создания турбулентного движения массы зернофуража с водой, состоящий из конического патрубка и решета. Виды экспериментальных решет, которые отличаются диаметром отверстий, представлены на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Виды экспериментальных решет

Электронасос 2 предназначен для всасывания по трубопроводу из емкости 1 массы воды и зернофуража и транспортирования их по замкнутому кругу (емкость–насос).

Работает установка следующим образом. Воду подают в агрегат влаготепловой обработки и включают в работу электронасос, а затем загружают измельченный продукт в цилиндрическую емкость агрегата. На пульте управления устанавливают температуру нагрева. Во время исследований, не останавливая процесс переработки, можно в любой момент брать измельчаемую и нагреваемую смесь для определения качества получаемого продукта. Гидродиспергатор работает в автоматическом режиме и при достижении установленной температуры автоматически отключается. Останавливать работу установки можно также ручным управлением по достижении необходимой температуры [65].

Описанная установка позволяет проводить исследования процесса гидродинамического измельчения зерна.

Для построения и анализа регрессионной модели используем результаты опытов, полученные согласно плану полного трехфакторного эксперимента и композиционного плана (табл. 4.5, 4.6).

Таблица 4.5

Результаты экспериментов по линейному плану

Номер опыта	y_1	y_2	y_3	Номер опыта	y_1	y_2	y_3
1	5,2	4,4	5,9	5	6,2	7,3	8,1
2	9,0	9,1	10,2	6	12,0	12,5	13,7
3	27,7	28,4	30,9	7	32,3	33,3	35,2
4	19,5	20,1	22,1	8	21,6	24,5	24,1

Таблица 4.6

Результаты дополнительных опытов по плану второго порядка

Номер опыта	y_1	y_2	y_3	Номер опыта	y_1	y_2	y_3
9	8,8	9,7	8,2	13	30,0	27,3	30,1
10	9,7	10,3	11,5	14	7,0	8,1	9,8
11	6,5	6,8	7,8	15	11,3	10,7	11,5
12	5,1	6,5	6,7				

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась в соответствии с принятыми правилами теории вероятностей и математической статистики с помощью математического пакета MathCad. Статистическая обработка проводится с целью проверки адекватности экспериментальных данных.

Находим среднее значение результатов i -го опыта по формуле

$$y_{ci} = \frac{1}{n} \sum_j y_{i,j} . \quad (4.38)$$

В результате обработки экспериментальных данных получены средние значения функции отклика (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Среднее значение результатов эксперимента

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_c	5,167	9,433	29,000	20,567	7,200	12,733	33,600	23,400

По данным результатов параллельных опытов определим построчные выборочные дисперсии с числом степеней свободы $\nu_n = n - 1$:

$$D_i = \frac{\sum_{j=0}^2 (y_{i,j} - y_{ci})^2}{n - 1} . \quad (4.39)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Значения построчной выборочной дисперсии

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
D_i	0,563	0,443	2,830	1,853	0,910	0,763	2,170	2,470

Проверим гипотезу об однородности дисперсий D_i при одинаковом числе повторностей во всех N вариантах опыта используя, критерий Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D)}{\sum D} . \quad (4.40)$$

Произведя необходимые вычисления, получим $G = 0,2358$. Полученное значение должно удовлетворять условию

$$G_k \leq G_{kkp}, \quad (4.41)$$

где G_{kkp} – табличное значение критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числах степеней свободы $\nu_n = 0,1$ и $N = 8$. В данном случае $G_{kkp} = 0,5157$.

Условие (3.41) выполняется, следовательно дисперсии однородны.

По результатам опытов методом наименьших квадратов, решая относительно неизвестных $b_0, b_1, \dots, b_k$, определим систему нормальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$x^T x b = x^T y, \quad (4.42)$$

откуда

$$b = c x^T y, \quad (4.43)$$

где x и x^T – матрица независимых переменных и соответствующая ей транспонированная матрица;

b и y – столбцовые матрицы соответственно коэффициентов регрессии b_j и результатов опытов $\tilde{y}_u$;

$c = (x^T x)^{-1}$ – информационная (ковариационная) матрица, которая является обратной по отношению к матрице системы нормальных уравнений $x^T x$.

В данном случае коэффициенты регрессии

$$b_0 = 17,637; \quad b_2 = 9,004; \quad b_4 = -3,554; \quad b_6 = 0,262.$$

$$b_1 = -1,104; \quad b_3 = 1,596; \quad b_5 = -0,062;$$

Найдем доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb :

$$\Delta b = t_y \sqrt{D_b}, \quad (4.44)$$

где t_y – значение распределения Стьюдента. При доверительном интервале 0,95 значение $t_y = 2,120$;

$$D_b = \frac{D_y}{nN} \text{ – дисперсия, равная } D_b = 0,075.$$

Таким образом, проведя все необходимые вычисления, получим $\Delta b = 0,581$. Сравним полученные ранее значения коэффициента b_i

с Δb . Коэффициенты b_5 и b_6 меньше Δb , поэтому считаем их незначимыми и принимаем равными нулю.

Получим следующее уравнение регрессии:

$$y = 17,637 - 1,104x_1 + 9,004x_2 + 1,596x_3 - 3,554x_1x_2.$$

Уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным, если

$$F < F_{kr}, \quad (4.45)$$

где F – значение критерия Фишера;

F_{kr} – табличное значение критерия Фишера.

Чтобы оценить ошибку расчетных значений в пределах ошибки воспроизводимости опытов, вычисляем отношение

$$F = \frac{D_o}{D_a}, \quad (4.46)$$

где $D_o = \frac{n}{N-1} \sum_i (y_{cp} - y_{ci})^2$ – остаточная дисперсия;

$D_a = \frac{n}{N-1} \sum_i (y_{ci} - y_{pi})^2$ – дисперсия адекватности.

Определить значение y_{pi} можно по формуле $y_{pi} = xb$. По результатам расчета

$$y_p = \begin{matrix} 4,787 \\ 9,812 \\ 29,379 \\ 20,188 \\ 7,579 \\ 12,354 \\ 33,221 \\ 23,779 \end{matrix} \begin{matrix} \circ \\ \div \\ \div \\ \div \\ \div \\ \div \\ \div \\ \div \end{matrix}$$

Произведя все вычисления, получим: $D_o = 334,936$, $D_a = 1,725$, $F = 194,142$.

Сравниваем полученное значение F с табличным ($F_{kp} = 3,63$) и делаем вывод, что полученное уравнение не адекватно экспериментальным данным.

Свободный член линейного уравнения также характеризует сумму коэффициентов при квадратичных членах, которые в случае линейной регрессии являются незначимыми. Обоснованность линейного приближения проверяем постановкой опытов в центре плана.

Линейное уравнение приемлемо, если разность $|y_{oc} - b_0|$ статистически незначима, т. е. справедливо неравенство

$$|y_{oc} - b_0| < s t_y \sqrt{\frac{N+n}{nN}}, \quad (4.47)$$

где $s = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{(N-1)D_b + (n-1)D_{yoc}}{N}}$ – средневзвешенное двух дисперсий с числом степеней свободы $v = N + n - 2$;

$D_b = \frac{D_y}{nN}$ – дисперсия коэффициентов регрессии;

$D_{yoc} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (y_{oc}^T)_j - y_{oc}^2$ – дисперсия среднего значения y_{oc} ;

$t_v = 2,262$ – критическое значение t -распределения при двустороннем ограничении, доверительном уровне γ и числе степеней свободы v .

Проведя все вычисления, получим: $D_b = 0,063$; $D_{yoc} = 0,19$; $v = 9$; $s = 0,301$.

Так как $|y_{oc} - b_0| = 8,737$, то неравенство (4.47) неверное, линейное уравнение неприемлемо.

Обычно почти стационарную область вблизи экстремума на поверхности отклика описывают с помощью полинома второго порядка. Для этого нужно составить и реализовать такой план, в котором каждая переменная принимает хотя бы три разных значения. Следуя идее шагового эксперимента, целесообразно использовать композиционное (последовательное) планирование, дополнив уже реализованный план первого порядка некоторым количеством экспериментальных точек, которые расположены определенным образом, – поставить эксперимент в центре плана и в $2k$ «звездных» точках. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 4.9.

Опыты с комбинациями факторов, которые заданы строками 1...8 табл. 3.5, представляют собой полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 (табл. 4.4). Кроме опыта в центре плана (табл. 4.9, строка 9), дополнительно требуется провести шесть опытов в «звездных» точках (табл. 4.9, строки 10–15).

Таблица 4.9

Матрица ортогонального плана типа 2^3 второго порядка

Номер опыта	Кодовое значение факторов									
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 + \gamma_1$	$x_2^2 + \gamma_1$	$x_3^2 + \gamma_1$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	+1	-1	-1	-1	γ_2	γ_2	γ_2	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	γ_2	γ_2	γ_2	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	γ_2	γ_2	γ_2	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	γ_2	γ_2	γ_2	+1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	γ_2	γ_2	γ_2	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1	+1	γ_2	γ_2	γ_2	-1	+1	-1
7	+1	-1	+1	+1	γ_2	γ_2	γ_2	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	γ_2	γ_2	γ_2	+1	+1	+1
9	+1	0	0	0	γ_1	γ_1	γ_1	0	0	0
10	+1	$-\alpha$	0	0	γ_3	γ_1	γ_1	0	0	0
11	+1	$+\alpha$	0	0	γ_3	γ_1	γ_1	0	0	0
12	+1	0	$-\alpha$	0	γ_1	γ_3	γ_1	0	0	0
13	+1	0	$+\alpha$	0	γ_1	γ_3	γ_1	0	0	0
14	+1	0	0	$-\alpha$	γ_1	γ_1	γ_3	0	0	0
15	+1	0	0	$+\alpha$	γ_1	γ_1	γ_3	0	0	0

Исходные данные для статистической обработки берем из табл. 4.6. По итогам вычислений получим данные, представленные в табл. 4.10, 4.11.

Таблица 4.10

Среднее значение результатов по дополнительным опытам

Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15
$y_{\text{кс}}$	8,9	10,5	7,033	6,1	29,133	8,3	11,167

Таблица 4.11

Среднеквадратическое отклонение результатов

Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15
D_u	0,57	0,84	0,463	0,76	2,523	1,99	0,173

Гипотеза об однородности дисперсий при одинаковом числе повторностей во всех N вариантах опыта проверим с использованием критерия Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D_u)}{\mathring{a} D_u}. \quad (4.48)$$

Получаем $G_k = 0,1465$. Полученное значение сравниваем с табличным значением критерия $G_{k\alpha p} = 0,3578$ при уровне значимости α , числах степеней свободы n и N (N – число опытов, при композиционном планировании равно 15).

Рассчитанный по экспериментальным данным критерий Кохрена меньше табличного значения, следовательно дисперсии однородны.

Вычислим коэффициенты регрессии по формуле

$$b_k = (x^T x)^{-1} x^T Y_c. \quad (4.49)$$

Получим:

$$b_0 = 14,816; \quad b_2 = 9,132; \quad b_4 = -3,554; \quad b_6 = 0,262; \quad b_8 = 7,071;$$

$$b_1 = -1,191; \quad b_3 = 1,484; \quad b_5 = -0,062; \quad b_7 = 1,076; \quad b_9 = 1,73.$$

Уточним первый коэффициент регрессии b_0 с помощью формулы

$$b_0 = b_{k0} + \gamma_1(b_{k7} + b_{k8} + b_{k9}). \quad (4.50)$$

Получим: $b_0 = 7,604$.

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти их доверительный интервал. Произведем следующие вычисления:

$$D_{bk01} = \frac{D_y}{n \mathring{a}_i (x_{i,0})^2}, \quad \mathring{a}_i (x_{i,0})^2 = 15, \quad t_k = 2,120, \quad D_{bk01} = 0,029;$$

$$D_{bk11} = \frac{D_y}{n \mathring{a}_i (x_{i,7})^2}, \quad \mathring{a}_i (x_{i,7})^2 = 4,361, \quad D_{bk11} = 0,098, \quad Db_{k11} = \sqrt{D_{bk11}} \times t_k,$$

$$Db_{k11} = 0,665;$$

$$D_{bk1} = \frac{D_y}{n \mathring{a}_i (x_{i,1})^2}, \quad \mathring{a}_i (x_{i,1})^2 = 10,952, \quad D_{bk1} = 0,039, \quad Db_{k1} = \sqrt{D_{bk1}} \times t_k,$$

$$Db_{k1} = 0,42;$$

$$D_{bk12} = \frac{D_y}{n \hat{a}_i (x_{i,4})^2}, \hat{a}_i (x_{i,4})^2 = 8, D_{bk12} = 0,054, Db_{k12} = \sqrt{D_{bk12}} \times t_k, \\ Db_{k11} = 0,491;$$

$$D_{bko} = D_{bko1} + 3\gamma_1^2 D_{bk11}, D_{bko} = 0,186, Db_{ko} = \sqrt{D_{bko}} \times t_k, Db_{ko} = 0,915.$$

Значения b_5 и b_6 меньше своего доверительного интервала, поэтому примем его равным нулю, а число значимых коэффициентов регрессии – равным восьми. Получим следующее уравнение регрессии:

$$y = 7,904 - 1,191x_1 + 9,132x_2 + 1,484x_3 - \\ - 3,554x_1^2 + 1,076x_1x_2 + 7,071x_1x_3 + 1,73x_2x_3.$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным и статистическую значимость его коэффициентов проверим по уравнению (4.46).

Определить значение y_{pi} можно по формуле $y_{pi} = xb$. Результаты расчета приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Значение параметра y_p								
Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_p	4,502	9,228	29,874	20,384	7,469	12,195	32,842	23,351

Продолжение таблицы 4.12

Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15	
y_p	7,604	10,639	7,745	6,946	29,137	8,356	11,961	

Критическое значение F -распределения при $\alpha = 0,05$ составляет $F_{kr} = 2,33$.

Рассчитанное значение $F < F_{kr}$: $1,922 < 2,33$.

Значение критерия Фишера меньше табличного, следовательно полученное уравнение адекватно.

Уравнение регрессии представлено в закодированном виде, после преобразования которого получим истинное уравнение регрессии:

$$y = 77,68 - 1,65\tau - 0,21l - 19,51D_0 - 0,142\tau^2 + 0,02\tau l + 0,7\tau D_0 + 0,09l D_0.$$

Для анализа полученного уравнения регрессии построены поверхности отклика, представленные на рис. 4.9–4.11.

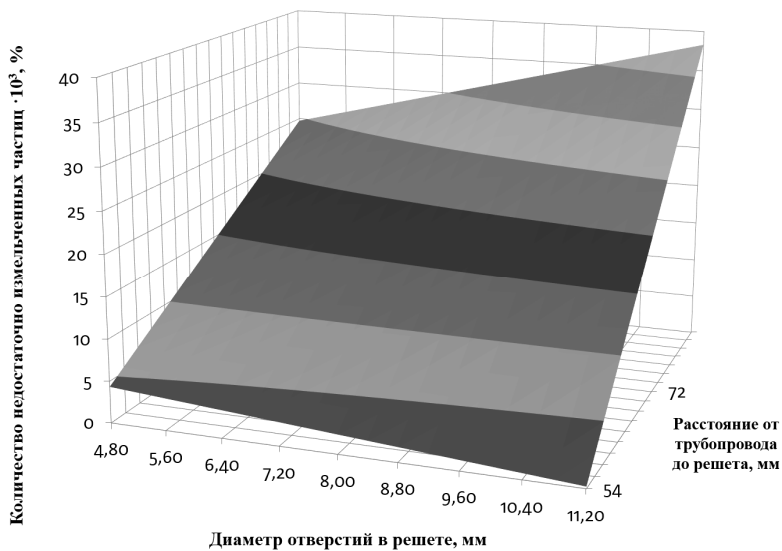


Рис. 4.9. График зависимости качества измельчения от диаметра отверстий в решете и расстояния от ускоряющего патрубка до решета

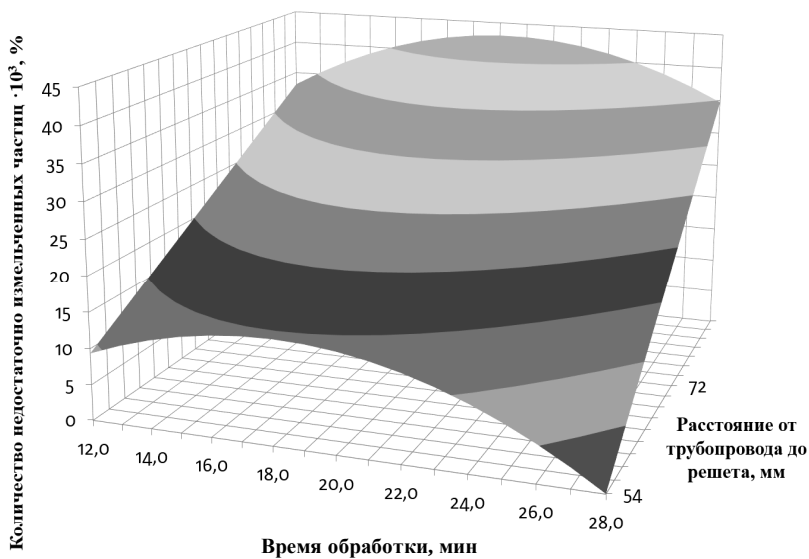


Рис. 4.10. График зависимости качества измельчения от времени обработки сырья и расстояния от ускоряющего патрубка до решета

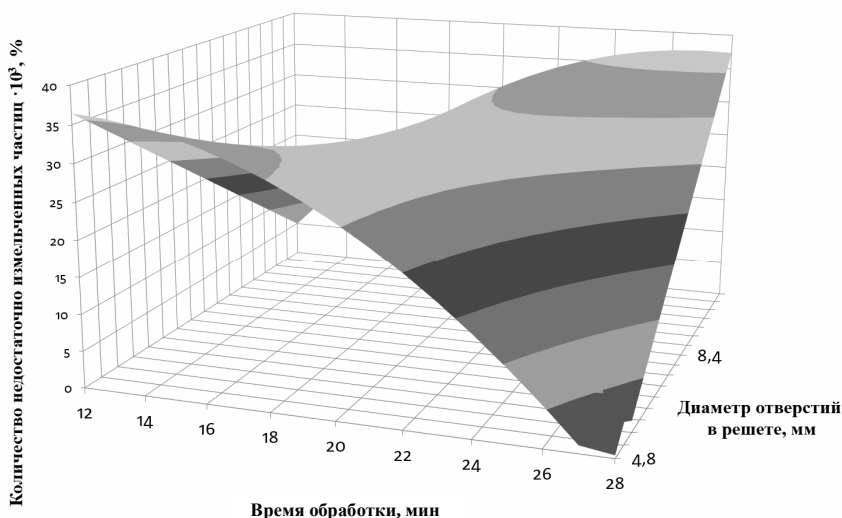


Рис. 4.11. График зависимости качества измельчения от времени обработки сырья и диаметра отверстий в решете

При анализе поверхностей отклика следует учесть, что функция отклика y (количество недостаточно измельченных частиц) должна удовлетворять зоотехническим требованиям: размер измельченной частицы не должен превышать 2,4 мм, а количество недостаточно измельченных частиц не должно превышать $30 \cdot 10^{-3} \%$.

Из данных графика на рис. 4.9 видно, что значение параметра y удовлетворяет зоотехническим требованиям при диаметре отверстий в решете, находящемся в пределах 4,8...11,2 мм, и расстоянии от ускоряющего патрубка до решета 54...78 мм.

Анализ графика на рис. 4.10 показал, что значение параметра y удовлетворяет зоотехническим требованиям при времени обработки сырья, находящемся в пределах 12...28 мин, и расстоянии от ускоряющего патрубка до решета 54...70 мм.

В результате анализа графика на рис. 4.11 установлено, что значение параметра y удовлетворяет зоотехническим требованиям при времени обработки сырья, находящемся в пределах 12...28 мин, и диаметре отверстий в решете 4,8...9,2 мм.

Полученные графики зависимости (рис. 4.9–4.11) позволяют определить рациональные значения факторов для достижения необхо-

димого качества измельчения в соответствии с зоотехническими требованиями. Диаметр отверстий в решетке должен находиться в пределах 4,8...9,2 мм, время обработки сырья – 12...28 мин, а расстояние от ускоряющего патрубка до решета – 54...70 мм.

В соответствии с полученным диапазоном конструктивных размеров установки принимаем диаметр отверстий в решетке равным 8 мм, а расстояние от ускоряющего патрубка до решета – 60 мм.

Эффективность технологического процесса характеризуется двумя показателями – энергоемкостью процесса и качеством измельчения, поэтому была проведена серия дополнительных опытов для определения зависимости качества измельчения от времени обработки для различных культур. По результатам опытов получена зависимость, представленная на рис. 4.12.

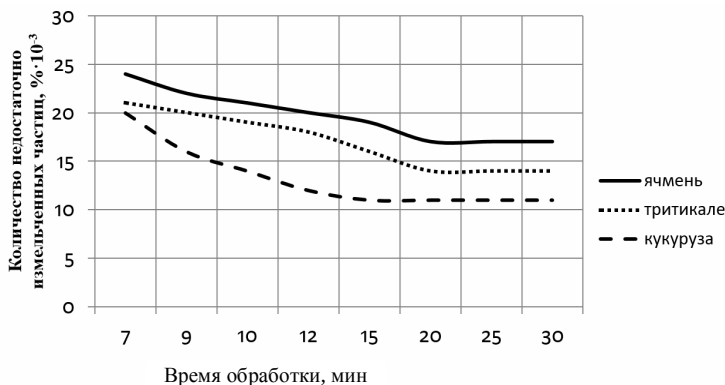


Рис. 4.12. График зависимости качества измельчения от времени обработки зернофуража в гидродиспергаторе

Из данных графика (рис. 4.12) видно, что при увеличении времени обработки зернофуража уменьшается количество недостаточно измельченных частиц, а следовательно, улучшается качество измельчения. Однако высокая степень измельчения может обеспечиваться за счет неоправданно высоких энергозатрат. Поэтому была проведена серия дополнительных опытов для определения зависимости энергозатрат на изготовление зерновой пасты от времени обработки. По результатам опытов получены зависимости, представленные на рис. 4.13.

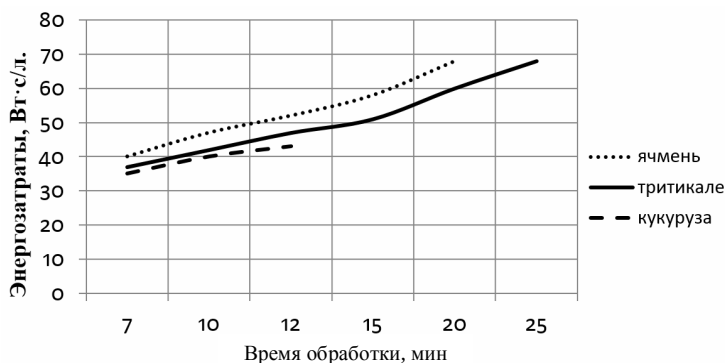


Рис. 4.13. График зависимости энергозатрат на изготовление зерновой пасты от времени обработки

Из данных графика (рис. 4.13) видно, что при увеличении времени обработки зернофуража увеличиваются и энергозатраты. Наименее энергоемкой культурой для приготовления зерновой пасты является консервированная кукуруза. Затраты энергии на ее переработку при выполнении зоотехнических требований составят 42 Вт·с/л, а продолжительность технологического процесса – 12 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зернофураж и корнеклубнеплоды требуют предварительной подготовки. Общей технологической операцией подготовки этих кормов к скармливанию является измельчение.

Известные дробилки не обеспечивают равномерное измельчение зернофуража, вследствие чего нарушается гранулометрический состав конечного продукта. Этот фактор приводит к росту удельной энергоёмкости выполняемого процесса и отрицательно сказывается на эффективности скармливания зернофуража.

Технология плющения, применяемая для заготовки зерна на корм животным на ранних стадиях его спелости, имеет недостатки. Узкая специализация плющилки ограничивает продолжительность её эксплуатации в хозяйстве, что увеличивает себестоимость животноводческой продукции.

С точки зрения снижения затрат энергии и металлоёмкости оборудования для подготовки к хранению зерна молочно-восковой спелости представляет интерес применение многофункционального измельчителя кормов, способного выполнять и функции измельчителя-смесителя. Такая машина позволит упростить технологическую схему подготовки кормов к скармливанию, т. к. в одной машине будут выполняться технологические операции для подготовки к скармливанию животным зернофуража любой влажности и корнеклубнеплодов. Наиболее полно требованиям организации поточного производства отвечает измельчитель-смеситель кормов ИСК-3 с вертикально расположенной рабочей камерой.

Для сепарации измельченного влажного зерна в модуле к измельчителю ИСК-3 под нижним ярусом ножей установлено решето, диаметр цилиндрических отверстий в котором равен 15 мм. В двух верхних ярусах установлено по четыре ножа в каждом, в двух нижних, соответственно, по восемь ножей, при этом зазор между решето и ножами нижнего решета равен 5 мм.

Установлено, что для ножа толщиной 10 мм при мощности электродвигателя 39 кВт угол заточки ножа равен 8°.

При установке по внутреннему периметру рабочей камеры измельчителя ИСК-3 пластин с углом наклона передней грани, равным 12°, и длиной наружной грани 50 мм удельная энергоёмкость процесса измельчения снизилась с 2,68 до 2,59 кВт·ч/т.

Представленная технология подготовки к скармливанию зерна молочно-восковой спелости, как и технология плющения, является неотъемлемой частью индустриальной технологии его возделывания и уборки. Однако, как показали проведенные исследования в РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству», переваримость консервированного зерна составляет 60...65 %, что является недостаточным. Для повышения переваримости и усвояемости консервированного плющеного зерна были проведены исследования по изысканию наиболее рентабельного способа его дальнейшей переработки.

Из известных способов обработки зерна наибольший интерес представляет гидродинамический – малоизученный и наименее энергоемкий. Данный способ реализуется с помощью различных установок. В таких установках обработка зерна осуществляется в водной среде без доступа кислорода в специально спроектированных насадках за счет гидродинамических процессов. Под действием энергии гидравлических ударов и ударных волн от схлопнувшихся кавитационных пузырьков осуществляется разрушение зерна и нагрев водно-зерновой массы. Влаготепловая обработка позволяет осуществить также обеззараживание зернового сырья, инактивацию антипитательных факторов (ингибиторов трипсина, глюкозидов, микотоксинов и т. п.) и преобразование питательных веществ в легкоусвояемые формы.

Ценность такой обработки заключается в том, что на специальной гидродинамической установке можно получить однородную мелкодисперсную пастообразную смесь, что представляет значительный интерес при приготовлении заменителей цельного молока из зерновых компонентов, и пастообразную смесь с более крупными частицами для кормления взрослого поголовья животных.

Известное оборудование для гидродинамической обработки зерна обладает достаточно серьезными недостатками, главными из которых являются высокая энергоемкость и большие рабочие температуры, разрушающие витамины и аминокислоты, что снижает питательность зернофуража. Поэтому было разработано оборудование, способное перерабатывать консервированное зерно в легкоусвояемый жидкий корм с меньшими энергозатратами, сохраняя витаминный комплекс и незаменимые аминокислоты.

В результате поисковых исследований в качестве рабочих органов гидродинамической установки, создающих эффект кавитации, были

выбраны решето и конический патрубок. Функция решета заключается в создании дополнительных течений в сплошном потоке жидкости (усиленного турбулентного течения) и частичном механическом разрушении измельчаемых частиц.

Конический патрубок предназначен для увеличения давления жидкости до порогового значения, после чего парогазовые пузырьки, попадая в область атмосферного давления (в емкость аппарата), начинают схлопываться, разрушая зерновые компоненты смеси.

Оптимальными параметрами гидродиспергатора являются:

- время обработки сырья – 12...28 мин;
- диаметр отверстий в решете – 4,8...9,2 мм;
- расстояние от ускоряющего патрубка до решета 54...70 мм.

При указанных параметрах конечный продукт удовлетворяет зоотехническим требованиям, при этом в корме сохраняются витаминный комплекс и незаменимые аминокислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа возрождения и развития села на 2005–2010 годы : Указ Президента Республики Беларусь, 23 марта 2005 г., № 150. – Минск : Беларусь, 2005. – С. 86.
2. Рекомендации по заготовке и использованию плющеного зерна повышенной влажности / НАН Беларуси, РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству», РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Жодино, 2007. – 15 с.
3. Бычкова, Т. Качественные корма – залог высокой продуктивности / Т. Бычкова, Л. Шарова, Л. Смирнова // Молочное и мясное скотоводство. – 1992. – № 1. – С. 38–39.
4. Вальдман, Э. К. Высокоэффективное скотоводство / Э. К. Вальдман, М. К. Каресон. – М. : Колос, 1982. – 207 с.
5. Калашников, А. П. Задачи науки по развитию промышленных способов производства молока / А. П. Калашников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 2. – С. 30–32.
6. Земсков, В. И. Пути повышения эффективности функционирования кормоцехов / В. И. Земсков // Механизация технологических процессов в животноводстве: сб. науч. тр. Алтайского СХИ. – Барнаул, 1982. – Вып. 46. – 5–9 с.
7. Тищенко, М. А. Результаты опытно-производственной проверки универсального погрузчика силосованных кормов / М. А. Тищенко, С. Ф. Устенко // Совершенствование технологии и технических средств производства в животноводстве: сб. науч. тр. ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1988. – С. 99–102.
8. Шпаков, А. П. Приготовление и использование кормовых смесей и комбикормов в хозяйствах / А. П. Шпаков, М. Ф. Садовский. – Минск : Ураджай, 1988. – 153 с.
9. Калашников, А. П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справ. пособие / А. П. Калашников, Н. И. Клейменов, В. Н. Баканов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 352 с.
10. Венедиктов, А. М. Справочник по кормлению сельскохозяйственных животных / А. М. Венедиктов, П. И. Викторов, А. П. Калашников. – М. : Россельхозиздат, 1983. – 303 с.
11. Иоффе, В. Б. Корма и молоко / В. Б. Иоффе. – Молодечно : Победа, 2002. – 231 с.
12. Трофимов, А. Ф. Интенсивная технология производства молока / А. Ф. Трофимов, А. А. Алешин, М. Г. Залеская. – Минск : Ураджай, 1991. – 142 с.

13. Боярский, Л. Г. Производство и использование кормов / Л. Г. Боярский. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 222 с.

14. Эрнст, Л. К. Эффективность промышленного животноводства и пути ее повышения / Л. К. Эрнст, В. Н. Старых, А. В. Шичалин ; под ред. А. С. Всяких // Индустриализация производства продуктов животноводства. – М. : Колос, 1984. – С. 13–20.

15. Дмитриев, Н. Г. Теоретические основы и практика создания крупных стад высокопродуктивных коров для молочных комплексов / Н. Г. Дмитриев ; под ред. А. С. Всяких // Индустриализация производства продуктов животноводства. – М. : Колос, 1984. – С. 20–28.

16. Огрызкин, Г. С. Животноводство Нечерноземья – ударные темпы развития / Г. С. Огрызкин // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1982. – № 3. – С. 52–54.

17. Калашников, А. П. Проблемы полноценного кормления сельскохозяйственных животных в условиях промышленных технологий / А. П. Калашников // Научные основы полноценного кормления сельскохозяйственных животных: сб. науч. тр. ВАСХНИЛ. – М. : Агропромиздат, 1986. – С. 3–9.

18. Щегов, В. В. Корма: приготовление, хранение и использование / В. В. Щегов, Л. Г. Боярский. – М. : Агропромиздат, 1990. – 222 с.

19. Святогор, А. П. Интенсификация кормопроизводства / А. П. Святогор, Г. Г. Степаненко. – Минск : Ураджай, 1990. – 69 с.

20. Боярский, Л. Г. Технология приготовления силоса / Л. Г. Боярский. – М. : Агропромиздат, 1988. – 48 с.

21. Биологическая полноценность кормов / Н. Г. Григорьев [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1989. – 287 с.

22. К выбору энергосберегающих технологий скормливания кормов / А. Ф. Трофимов [и др.] // Научные основы развития животноводства в Республике Беларусь: междунар. сб. – Минск, 1992. – Вып. 23. – 326 с.

23. Техника для животноводства и кормопроизводства : каталог // под ред. К. А. Белякова. – М. : ВНИИКОМЖ, 1982. – 488 с.

24. Кулаковский, И. В. Машины и оборудование для приготовления кормов : справочник / И. В. Кулаковский, Ф. С. Кирпичников, Е. И. Резник. – М. : Россельхозиздат, 1987. – Ч. 1. – 285 с.

25. Астахов, А. С. Краткий справочник по машинам и оборудованию для животноводческих ферм / А. С. Астахов, А. В. Еленев. – М. : Колос, 1977. – 256 с.

26. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – М. : Колос, 1978. – 566 с.

27. Рабштына, В. М. Эффективность разных технологий переработки и приготовления кормов / В. М. Рабштына, В. И. Сотников // Животноводство. – 1985. – № 6. – С. 23–24.

28. Кирпичников, Ф. С. Анализ конструктивно-технологических схем ударно-центробежных дробилок для измельчения зерна и пути их совершенствования / Ф. С. Кирпичников, В. Е. Храпач // Совершенствование технологических процессов и средств механизации кормоприготовления на фермах и комплексах: сб. науч. тр. Ленинградского СХИ. – Л., 1987. – С. 50–53.

29. Баранов, М. Ф. Совершенствование технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственного производства на базе роторных измельчителей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / М. Ф. Баранов ; Вятская сельскохозяйственная академия. – Киров, 2001. – 41 с.

30. Сирвидис, И. Особенности химического консервирования трав / И. Сирвидис, А. Райлоне // Кормовые культуры. – 1988. – № 2. – С. 37–40.

31. Попов, В. В. Влияние проявлявания, высокотемпературной сушки, гранулирования и брикетирования на питательность кормов, приготовленных из клевера красного / В. В. Попов, А. А. Макаров, А. И. Фицев // Сб. науч. тр. ВНИИ кормов. – 1980. – № 2. – С. 69–77.

32. Передня, В. И. Малоэнергоемкий измельчитель зерна / В. И. Передня, А. И. Пунько // Агропонорама. – 1999. – № 1. – С. 25–27.

33. Мельников, С. В. Исследование на устойчивость относительного движения молотков дробилки / С. В. Мельников, В. С. Панова // Механизация сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Зап. ЛСХИ. – Ленинград : Пушкин, 1970. – Т. 149. – Вып. 2. – 33–38 с.

34. Гришин, М. Е. Влияние параметров решет дробилки на показатели процесса измельчения / М. Е. Гришин, П. М. Рощин // Механизация сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. – Ленинград : Пушкин, 1970. – Т. 149. – С. 131–134.

35. Ревенко, И. И. Распределение перерабатываемого материала в камере измельчителя молотковой дробилки / И. И. Ревенко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1978. – № 7. – С. 24–27.

36. Суднев, А. А. Процесс измельчения фуражного зерна и его развитие / А. А. Суднев // Механизация подготовки кормов в животноводстве: сб. науч. тр. – Воронеж : ВСХИ, 1984. – 5–10 с.

37. Ревенко, И. И. О повышении качества работы молотковых кормодробилок / И. И. Ревенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 8. – 18–21 с.

38. Памятка по использованию и технической настройке дробилки зерна вертикальной ДЗВ / РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси». – Минск, 1998. – 24 с.

39. Китун, А. В. Малозатратная технология машины для приготовления и раздачи кормов / А. В. Китун. – Витебск : Витебская государственная академия ветеринарной медицины, 2005. – 188 с.

40. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М. : Агропромиздат, 1987. – 163 с.

41. Растительные источники протеина и жира в составе ЗЦМ для телят / В. М. Голушко [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. – Минск, 2001. – Т. 36. – С. 176–186.

42. Ментух, Ф. А. Использование семян рапса и продуктов его переработки в кормлении телочек / Ф. А. Ментух // Зоотехнология. – 1998. – № 6. – С. 15–16.

43. Заменители цельного молока из местных источников питательных веществ / В. М. Голушко [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. / Институт животноводства НАН Беларуси ; редкол.: И. П. Шейко [и др.]. – Жодино, 2006. – Т. 41. – С. 159–164.

44. Способ получения пищевого белка из растительного сырья : пат. 2007927C1 RU, МПК A23J1/14 / О. И. Квасенков, А. Ф. Загибалов, Н. И. Бабков, Г. И. Касьянов, Э. В. Соломахина ; заявитель Ассоциация делового сотрудничества «Росинтранс». – № 5065540/13 ; заявл. 09.10.1992 ; опубл. 28.02.1994 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интел. собств., патентам и товарным знакам. – 1994. – № 4. – С. 135–136.

45. Машины и аппараты для пищевых производств : в 2 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков [и др.]. – М. : Высш. шк., 2001. – Кн. 2. – 703 с.

46. Алешкин, В. Р. Механизация животноводства / В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – М. : Агропромиздат, 1985. – 336 с.

47. Способ получения молока из зерна люпина : пат. 2221435C2 RU, МПК A23J1/14, A23C11/00 / В. В. Шевцов, Н. Ф. Романенко, А. В. Зайцев ; заявитель Ассоциация делового сотрудничества «Росинтранс». – № 2002103174/12 ; заявл. 04.02.2002 ; опубл. 20.01.2004 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллект. собств., патентам и товарным знакам. – 2004. – № 1. – С. 150–151.

48. Официальный Интернет-портал ОАО «ТЕКМАШ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tekmash.ua>. – Дата обращения: 21.01.2020.

49. Установка для приготовления кормов : пат. 2322162С2 RU, МПК А23N17/00 / А. В. Бородин, Ю. Д. Мухин ; заявитель ООО «Новосибирский опытно-экспериментальный завод нестандартного оборудования». – № 2005112466/13 ; заявл. 08.04.2005 ; опубл. 20.04.2008 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллек. собств., патентам и товарным знакам. – 2008. – № 6. – С. 142–143.

50. Установка для приготовления кормов : пат. 53538U1 RU, МПК А23N17/00 / А. В. Бородин, Ю. Д. Мухин ; заявитель ООО «Новосибирский опытно-экспериментальный завод нестандартного оборудования». – № 2005134387/22 ; заявл. 27.10.2005 ; опубл. 27.05.2006 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллек. собств., патентам и товарным знакам. – 2006. – № 8. – С. 162–163.

51. Сельхозтехника и оборудование // АгроБаза [Электронный ресурс]. – URL: https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_f60a56c5-b1ae-4684-aabc-7038364c8516. – Дата обращения: 22.06.2020.

52. Теоретическое обоснование параметров режущего элемента к измельчителю вертикального типа ИСК-3 / А. В. Китун [и др.] // Инженерный вестник. – 2008. – № 1. – С. 5–7.

53. Perednia, V. I. Исследование процесса колебания шарнирно-закрепленного ножа от действия внешних сил / V. I. Perednia, W. Romaniuk, A. V. Kitun // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzglednieniem ochrony srodwiska i przepisow UE : mater. IX Miedzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, 27–28 września 2005 r. / Institut Budownictwa, Mechanizacji Rolnictwa. – Warszawa, 2005. – S. 433–436.

54. Тихонов, Н. И. Определение силы резания ножом / Н. И. Тихонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 11. – С. 24–27.

55. Perednia, V. I. Определение величины угла заточки ножа при скользящем резании / V. I. Perednia, W. Romaniuk, A. V. Kitun // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzglednieniem ochrony srodwiska i przepisow UE : mater. IX Miedzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, 27–28 września 2005 r. / Institut Budownictwa, Mechanizacji Rolnictwa. – Warszawa, 2005. – S. 437–440.

56. Павленко, С. И. Повышение качества подготовки консервированной кукурузы доизмельчающими устройствами : дис. ... канд. техн. наук : 05/20/01 / С. И. Павленко. – Минск–Днепропетровск, 1986. – С. 67–135.

57. Китун, А. В. Оптимизация пропускной способности решет / А. В. Китун, В. И. Передня // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 6. – 47 с.

58. Рабочий орган измельчителя кормов : пат. 1523 Респ. Беларусь МПК7 А 01 F 29/00 / А. В. Китун, В. И. Передня ; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. – № u 20040022; заявл. 21.01.04 ; опубл. 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 3. – С. 144.

59. Измельчитель зерна : пат. 5099 Респ. Беларусь, МПК6 А 01 F 29/00 / А. В. Китун, В. И. Передня ; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. – № u 20080608 ; заявл. 29.07.08 ; опубл. 28.02.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 2. – С. 142.

60. Идельчик, Е. И. Справочник по гидросопротивлениям / Е. И. Идельчик. – М. : Наука, 1992. – 354 с.

61. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1971. – 672 с.

62. Милт-Томпсон, Л. М. Теоретическая гидродинамика / Л. М. Милт-Томпсон. – М. : Наука, 1967. – 254 с.

63. Кухлинг, К. Справочник по физике / К. Кухлинг. – 2-е изд. – М. : Мир, 1985. – 520 с.

64. Передня, В. Технологический процесс приготовления влажных кормовых смесей для бычков / В. Передня, С. Пилюк // Сб. науч. тр., посвященный 60-летию зоотехнической науки Беларуси. – Жодино, 2009. – Т. 44. – Ч. 2. – С. 22–24.

65. Устройство для приготовления жидких кормов : пат. 3419 Респ. Беларусь МПК7 А23J 1/00 / В. И. Передня, А. Д. Селезнев, В. И. Хруцкий, С. Н. Пилюк, А. А. Передня ; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – № u 20060454 ; заявл. 06.07.2006 ; опубл. 15.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 12. – С. 136.

Научное издание

Китун Антон Владимирович,
Романович Анастасия Андреевна

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА
МЕХАНИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕРНОФУРАЖА
К СКАРМЛИВАНИЮ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Д. А. Значёнок*
Корректор *Д. А. Значёнок*
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 23.06.2020. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 7,09. Тираж 100 экз. Заказ 284.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.