

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Китун, А. А. Романович

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПОЛНОРАЦИОННЫХ
КОРМОСМЕСЕЙ ЖИВОТНЫМ
МОБИЛЬНЫМИ РАЗДАТЧИКАМИ**

Минск
БГАТУ
2022

УДК 631.363

Китун, А. В. Энергосберегающие технологии приготовления полнорационных кормосмесей животным мобильными раздатчиками / А. В. Китун, А. А. Романович. – Минск : БГАТУ, 2022. – 164 с. – ISBN 978-985-25-0163-7.

Рассмотрена энергосберегающая технология приготовления кормовой смеси из стебельчатых кормов и высокоэнергетической добавки из сыпучих или пастообразных кормов мобильным кормораздатчиком, приведено обоснование параметров модуля для сыпучих высокоэнергетических кормов и модуля для пастообразных кормов, изложена методика экспериментальных исследований по определению их оптимальных параметров.

Для магистрантов, аспирантов, конструкторов и научных работников.
Табл. 37. Ил. 55. Библиогр.: 54 назв..

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 11 января 2022 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации
сельского хозяйства» *В. И. Передня*;

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии
и механизация животноводства» учреждения образования «Белорусский
государственный аграрный технический университет» *Ф. И. Сапожников*

ISBN 978-985-25-0163-7

© БГАТУ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ МАШИН ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ КРУПНОМУ РОГАТОМУ СКОТУ	7
1.1. Анализ рационов крупного рогатого скота	7
1.2. Зоотехнические требования к транспортировке и раздаче кормов крупному рогатому скоту	11
1.3. Способы кормления крупного рогатого скота и анализ конструкций мобильных машин для приготовления и раздачи кормосмесей	12
1.4. Обоснование малозатратных технологий подготовки кормов к скармливанию и раздаче кормосмеси животным	36
1.5. Обоснование выбора конструктивно-технологической схемы мобильного модульного смесителя-раздатчика кормов	39
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ-ДОЗАТОРА СЫПУЧИХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОРМОВ МОБИЛЬНОГО РАЗДАТЧИКА	41
2.1. Определение дальности полета взаимопересекающихся во взвешенном состоянии потоков кормов	41
2.2. Определение глубины проникновения сыпучих высокоэнергетических кормов в слой стебельчатых кормов, перемещающихся по ленте транспортера	50
2.3. Определение угла подъема винтовой линии шнека	52
2.4. Определение площади выгрузного окна смесителя-дозатора высокоэнергетических кормов	55
2.5. Определение мощности на привод горизонтально расположенных шнековых смешивающих рабочих органов	59
2.6. Экспериментальные исследования по определению параметров модуля для приготовления многокомпонентной высокоэнергетической добавки	65
2.6.1. Программа исследований	65

2.6.2. Методика исследований и обработка полученных значений	66
2.6.3. Анализ результатов экспериментальных исследований	81
2.7. Заключение	87
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ-РАЗДАТЧИКА ПАСТООБРАЗНЫХ КОРМОВ	89
3.1. Обоснование способа раздачи пастообразных кормов и конструкции смесителя-раздатчика для его реализации	89
3.2. Определение рациональной вместимости бункера пастообразных кормов	90
3.3. Определение производительности шнекового насоса-дозатора	95
3.4. Определение мощности на привод шнекового насоса-дозатора	99
3.5. Экспериментальные исследования по определению оптимальных режимов работы и параметров шнекового насоса-дозатора пастообразных смесей	103
3.5.1. Программа и методика исследований, обработка полученных экспериментальных данных	103
3.5.2. Результаты исследования шнекового насоса-дозатора пастообразных смесей мобильного смесителя-раздатчика	117
3.6. Описание конструкций разработанной машины	121
3.7. Заключение	123
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	124
4.1. Методика проведения энергетической оценки механизированной технологии скармливания кормов животным	124
4.2. Энергетический анализ участка транспортировки и раздачи кормов	128
5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ	134
5.1. Техничко-экономические требования к машинам и оборудованию	134

5.2. Методы оптимизации машин и оборудования	136
5.3. Оптимизация по критерию энергосбережения	137
5.4. Основы системного подхода к проектированию поточных механизированных процессов на животноводческом предприятии	140
5.5. Компоновка поточных механизированных линий	143
5.6. Определение условия непрерывности работы поточной линии	145
5.7. Организация транспортировки кормов в места подготовки к скармливанию	149
5.8. Организация работы мобильных раздатчиков кормов	150
ВЫВОДЫ	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	158

ВВЕДЕНИЕ

Успех реализации задач в животноводстве во многом будет определяться внедрением в производство новых технологий и технических средств, позволяющих уменьшить энергоемкость выполняемых процессов при одновременном увеличении энергетической отдачи кормов, составляющих в себестоимости животноводческой продукции 55 %–70 %. Повышение продуктивности животных немислимо без эффективного использования кормов.

Общеизвестно, что эффективность скармливания поступающих в организм кормов зависит от сбалансированности их по всему комплексу незаменимых веществ, в соответствии с потребностями животных в питании [1–2].

С целью получения большей отдачи от высокоэнергетических кормов, входящих в состав многокомпонентной высокоэнергетической добавки, наиболее эффективно скармливать их животным в зависимости от группы и продуктивности. Для этого многокомпонентная высокоэнергетическая добавка должна загружаться в отдельный от силосованных стебельчатых кормов модульный бункер мобильного смесителя-раздатчика, имеющий дозирующее устройство. В этом случае силосованные стебельчатые корма и многокомпонентная высокоэнергетическая добавка при пересечении встречных потоков смешиваются без дополнительных механизмов.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о наличии проблемы по эффективному скармливанию кормов и технических средств для выдачи их крупному рогатому скоту.

1. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ МАШИН ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ КРУПНОМУ РОГАТОМУ СКОТУ

1.1. Анализ рационов крупного рогатого скота

Каждый вид используемых в скотоводстве кормов характеризуется питательной ценностью. Она определяется содержанием обменной и продуктивной энергии протеина, клетчатки, жиров и других органических веществ [3–6].

В зависимости от физиологического состояния и продуктивности животных соотношение различных групп и видов скармливаемых кормов бывает неодинаково [7, 8]. Оно является оптимальным, если энергоотдача максимальна и достигается при скармливании кормов в виде кормосмеси. В этом случае сбалансированный рацион полностью отвечает физиологическим требованиям животных и позволяет на 15 %–20 % повысить отдачу корма [9]. Для дойных коров в табл. 1.1 рекомендуется следующий (примерный) состав рациона [10].

Таблица 1.1

Примерная структура кормов для коров в зависимости от уровня продуктивности, %

Корм	Годовой удой, кг						
	2000–2500	2500–3000	3000–3500	3500–4000	4000–4500	4500–5000	5000 и >
Сено	15	14	14	14	13	13	13
Сенаж	19	19	18	18	16	14	11
Силос	29	28	27	27	26	25	24
Солома	6	4	3	–	–	–	–
Корнеклубнеплоды	6	7	8	9	10	11	12
Концентраты	25	28	30	32	35	37	40

Из приведенных в табл. 1.1 данных видно, что при увеличении продуктивности коров в структуре их рационов отмечается тенденция к повышению удельного веса корнеклубнеплодов и концентратов. Одновременно снижается доля других кормов,

особенно соломы. При годовом удое более 3500 кг молока от коровы в состав рациона солома не включается вовсе [11].

В соответствии с данными БелНИИЖа (В. И. Краско и др.), для кормления коров с годовым удоем 4–4,5 тыс. кг молока оптимальным является рацион, включающий по питательности 32,3 %–41 % сенажа, силоса – 7,8 %–16,8 %, корнеклубнеплодов – 12,8 %–13,3 %, концентратов – 37,3 %–38,4 %.

Состав рациона зависит и от стадии лактации коров. В табл. 1.2 приведена примерная структура рациона для данной группы коров. Доминирующую роль в кормлении животных занимают силос (сенаж), сено и концентраты. Солома и корнеклубнеплоды в рационе составляют от 4 % до 12 %, причем при раздое коров солому скормливать не рекомендуется.

Таблица 1.2

Примерная структура рациона для коров по стадиям лактации и стельности в зимний период, в % по питательности

Корм	В сухостойный период	При раздое	В середине лактации	В конце лактации
Сено	25	10	13	14
Сенаж	13	16	19	20
Солома	8	–	4	6
Силос	16	22	25	27
Корнеклубнеплоды	10	12	9	7
Концентраты	28	40	30	26

Молочная продуктивность и экономическая эффективность скотоводства в значительной мере определяются уровнем кормления ремонтных телок и нетелей. Структура рациона для этой группы животных (табл. 1.3) во многом зависит от их возраста.

До 6 месяцев в рационе животных преобладают сенаж, корнеклубнеплоды и концентраты (84,7 %). По достижении 6 месяцев количество концентратов снижается с 32,2 % до 9,7 %, но увеличивается до 70 % объем силоса (сенажа). В соответствии с рационом до 13 месяцев не рекомендуется скормливать солому животным. Таким образом, в рационе данной группы на протяжении всего периода содержания преобладают силос и сенаж.

Таблица 1.3

Структура рациона для ремонтных телок, в % по питательности

Возраст мес.	Сено	Сенаж	Солома	Силос	Корне-клубне-плоды	Концентраты	Молочные корма	Зеленый корм
Среднегодовая								
до 6	10–14	7–9	–	4	4	35	30	6
7–12	10–14	13–17	–	8–12	5	30	–	28
13–18	6–8	15–20	3–5	15–20	5	15–20	–	30–35
19–28	5–7	15–20	2–3	12–16	5	20–25	–	30–35
В зимний период								
до 6	13–17	8–12	–	5	35	35	30	–
7–12	18–22	18–22	–	18–22	30	30	–	–
13–18	8–12	5–35	5–7	5–35	20	20	–	–
19–28	8–12	25–30	4–6	25–27	22	22	–	–

На сельскохозяйственных предприятиях с законченным производственным циклом выращивают телят с 4 до 18-месячного возраста. Для кормления этой группы животных также рекомендуются многокомпонентные рационы (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Примерный рацион на доразивании и откорме животных, кг

Корма	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	2,5	3,7
Минеральный премикс	0,05	0,06	0,07	0,08
Мочевина	0,06	0,07	0,07	0,06
Монокальций фосфат	0,02	0,03	0,03	0,03
Соль	0,03	0,04	0,05	0,06

В отличие от рационов других групп на откорме и дорастивании животных количество скармливаемых кормов на протяжении всего периода не подвергается значительным колебаниям. Основным кормовым компонентом является силос (сенаж) – более 80 % от массы корма.

Важным источником кормления животных являются заменители цельного молока (ЗЦМ) из зернофуража и кормовые отходы переработки сельскохозяйственного сырья, такие как барда, патока и пивная дробина, требующие оборудования для дозированной выдачи.

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.

Значительное количество побочных продуктов образуется в свеклосахарном производстве, спиртовой, пивоваренной и дрожжевой отраслях. В табл. 1.5 приведена характеристика кормов, полученных при переработке пищевого сырья и наиболее широко используемых в животноводстве.

Таблица 1.5

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
Свежий жом	92,5–94,0	6,0–7,5	10	0,5–0,6
Мезга картофельная	80,5	9,5	11	0,5
Меласса	30,1	83,7–69,9	75,0	–

Из данных табл. 1.5 видно, что перечисленные корма содержат от 30 % до 83,7 % воды и 0,5–1,7 (кроме мелассы) переваримого протеина. Однако большое содержание воды в таких кормах затрудняет их транспортировку и нормированную выдачу животным ввиду отсутствия кормораздатчиков с герметичным кузовом для жидких кормов.

Анализ рационов различных групп крупного рогатого скота показывает, что животным скармливаются корма, производство которых можно наладить в каждом хозяйстве. Это силос, сенаж, корнеклубнеплоды, зерновые и грубые корма. Использование перечисленных видов кормов является необходимым условием нормального ведения хозяйства, так как позволяет соблюдать севооборот. Для обогащения и сдобривания рационов применяют мелассу, минеральные и другие добавки. Большой же удельный вес в рационах занимают концентрированные корма, силос (сенаж) и корнеплоды. Дополнительным источником кормов на фермах КРС являются отходы переработки пищевого сырья.

1.2. Зоотехнические требования к транспортировке и раздаче кормов крупному рогатому скоту

Среди многих факторов полноценного кормления животных процесс дозированной раздачи кормов является одним из важных факторов. Степень точности отмеривания заданного количества корма обусловлена зоотехническими и технологическими требованиями, а также экономическими соображениями. Для крупного рогатого скота величина допустимых отклонений дозируемых кормов должна быть в пределах: грубые корма, силос $\pm 15\%$, корнеклубнеплоды $\pm 10\%$, концентрированные корма $\pm 5\%$, питательные растворы $\pm 5\%$, минеральные добавки $\pm 5\%$ [13].

При скармливании корма в виде кормосмеси важным является получение однородности состава. В соответствии с зоотехническими требованиями неравномерность смешивания при приготовлении кормосмесей крупному рогатому скоту должна быть не более 20 %, а при вводе кормовых добавок – не более 10 %. В процессе смешивания частицы корма не должны истираться или превращаться в мезгу. Кормовая смесь не должна иметь посторонних запахов и примесей [14].

При раздаче кормов животным необходимо соблюдать следующие зоотехнические требования. Неравномерность раздачи кормов мобильным кормораздатчиком не должна превышать $\pm 15\%$, потери допускаются в пределах $\pm 1\%$, продолжительность раздачи в одном помещении – не более 10–15 минут.

Таким образом, зоотехнические требования лимитируют качество кормосмеси, транспортировку и раздачу продуктов питания животным.

1.3. Способы кормления крупного рогатого скота и анализ конструкций мобильных машин для приготовления и раздачи кормосмесей

Одним из направлений сокращения энергоемкости машин и оборудования, задействованных в процессе приготовления и раздачи кормов животным, является выбор способа скармливания кормов. Он должен быть проведен с учетом физиологических процессов, происходящих в организме животных при поедании кормов [14].

Широко известны два способа кормления животных на фермах крупного рогатого скота. Первый заключается в раздельной, последовательной выдаче животным грубых, сочных и концентрированных кормов. Данный производственный процесс весьма энергоемок, так как для выдачи кормов необходимо различное оборудование – от механизированных транспортных средств до ручных тележек. При данном способе весьма сложно организовать дозированную выдачу кормов, что отрицательно сказывается на их усвояемости. Такая операция, как выдача концентрированных кормов, сопровождается выделением легкой фракции в окружающую среду, следствием чего являются потери части необходимых животным элементов питания. Существенным недостаткам данного способа является и увеличение периода процесса кормления, что ухудшает аппетит животных.

Другой способ кормления, известный за рубежом под названием «Unifeed», заключается в одновременной раздаче всех видов кормов в виде кормосмеси. Он позволяет повысить продуктивность животных за счет взаимодополняющего действия компонентов смеси и увеличения поедаемости кормов на 5 %–9 % у молочных коров и на 10 %–15 % у молодняка на откорме, а также на 10 %–15 % снизить потери кормов [15].

Скармливая корма в виде кормосмеси, можно увеличить в рационе долю малоценных, грубых кормов, которые в чистом виде поедаются неохотно. В состав кормосмеси можно вводить белковые, минеральные и витаминные добавки [16]. В ряде исследований отмечается повышение на 6,4 %–26,2 % продуктивности животных, получавших кормосмеси по сравнению с раздельным кормлением теми же кормами [17]. Кормосмесь значительно упрощает организацию процесса кормления. В этом случае разные по физико-механическим свойствам корма превращают в однородную смесь, что позволяет механизировать ее раздачу одним типом кормораздатчиков.

Перечисленные преимущества скармливания кормов животным в виде кормосмеси, с учетом зональных особенностей кормовой базы, способствовали широкому внедрению следующих типов кормления: сенажно-концентратного, силосо-концентратного, силосо-корнеплодо-концентратного, сено-сенажно-концентратного.

Данные способы кормления крупного рогатого скота явились основополагающим фундаментом в проведении исследований по организации процесса приготовления кормовой смеси и раздачи ее животным. Вопросом по организации раздачи кормовых смесей занимались В. Н. Groшев [18], А. М. Лапотко [19], Э. Липкович [20], Е. М. Клычёв [21], А. С. Каменский [22], В. И. Передня [23], Р. К. Терещенко [24], Л. Н. Шалягин [25] и другие ученые. В настоящее время применяется большое количество типов раздатчиков, отличающихся рабочими органами и способами их привода. Выбор раздатчика предопределяется преимущественным видом корма, используемого на ферме, и способом содержания животных. Большинство выпускаемых раздатчиков предназначено для одного вида и консистенции корма: грубых, концентрированных, сочных, влажных мешанок, влажных рассыпных или жидких кормосмесей. Встречаются и универсальные раздатчики. С зоотехнической и экономической точек зрения такие раздатчики наиболее целесообразны. Однако они сложны по устройству, малопроизводительны и поэтому требуют больших затрат труда.

По роду использования кормораздатчики можно подразделить на мобильные и стационарные. К первым относятся те, которые имеют бункер для корма, перемещаются вдоль кормушек и равномерно дозируют в них корм. Один вид передвижных раздатчиков может перемещаться вне животноводческих помещений и доставлять корм от мест хранения, другие – перемещаются только внутри помещения. К стационарным раздатчикам относятся те, у которых раздача корма производится подвижным рабочим органом, а сам раздатчик неподвижен. Такие раздатчики раздают корм в одном или двух кормовых проходах одного животноводческого помещения.

По типу рабочих органов раздатчики можно подразделить на ленточные или ленточно-тросовые, платформенные, винтовые (шнековые), спирально-пружинные, штанговые скребковые и шайбовые, цепочно-планчатые, скребковые, шайбовые, тросошайбовые, ковшовые, вибрационные и трубопроводные (гидравлические и пневматические).

По типу привода раздатчики могут быть с приводом от электропривода (все стационарные и часть мобильных) и от двигателя внутреннего сгорания.

Ко всем типам раздатчиков предъявляются определенные требования, которые устанавливаются зоотехнической наукой – равномерность выдачи корма на фермах КРС не должна отклоняться от установленной нормы более чем на $\pm 15\%$ по объемистым кормам и $\pm 5\%$ – по концентрированным; максимальные потери корма не должны превышать 1% от розданного количества.

Условия применения мобильных и стационарных кормораздатчиков различны. Применение мобильных раздатчиков на тракторной тяге требует устройства утепленных тамбуров или устройства воздушных завес возле въездных дверей производственных помещений, чтобы холодный воздух не попадал в помещение для скота во время заезда и выезда кормораздатчика. Для таких раздатчиков требуются кормовые проходы шириной от 1,4 до 2,2 м в зависимости от типа кормораздатчика, подъемной дуги молокопровода для проезда раздатчика, твердого покрытия дорог.

Электрифицированные мобильные кормораздатчики на рельсовом ходу требуют устройства загрузочных средств, которые устанавливаются либо в тамбурах, либо непосредственно в производственном помещении. Использование этих раздатчиков благоприятно сказывается на микроклимате помещения, поскольку не возникает сквозняков и поступления холодного воздуха в зимнее время, как это происходит при въездах и выездах тракторных раздатчиков.

Стационарные кормораздатчики вообще не требуют для своего размещения кормового прохода, поскольку в одном случае они совмещаются с кормушками (ТВК-80), в другом – размещаются над кормушками (тросошайбовые, гидравлические).

Характеристика кормораздатчиков приведена в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Техническая характеристика кормораздатчиков

Показатели	РВК-Ф-74	ТВК-80Б
Производительность, т/ч, при загрузке: механизированной	25	38
ручной	–	10
Мощность привода, кВт	5,5	5,5

Показатели	РВК-Ф-74	ТВК-80Б
Масса, кг	1070	3300
Скорость перемещения рабочего органа, м/с, при загрузке:		
механизированной	0,24	0,52
ручной	–	0,13
Обслуживаемое поголовье	62	62
Время раздачи, мин.	5,1	2,4
Длина фронта кормления, м	75	74

Транспортер-раздатчик кормов ТВК-80Б обеспечивает раздачу всех видов кормов (кроме жидких) при обслуживании крупного рогатого скота и овец. Натяжную станцию с загрузочным бункером располагают за пределами торцевой стенки коровника в тамбуре со сквозным проездом для мобильного кормораздатчика КГУ-10А (РММ-Ф-6).

ТВК-80Б (рис. 1.1) включает в себя кормушки 6, приводную и натяжную станции, рабочий орган (тяговая цепь 8 и лента 7), загрузочный бункер, электрооборудование.

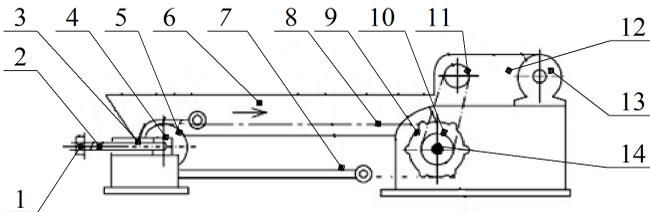


Рис. 1.1. Технологическая схема кормораздатчика ТВК-80Б:

- 1 – гайка; 2 – натяжная станция; 3 – винт натяжной; 4 – ползун;
5 – ведомый барабан; 6 – кормушка; 7 – лента; 8 – цепь; 9, 10, 11 – звездочки;
12 – редуктор; 13 – электродвигатель; 14 – ведущий вал

Кормовой желоб наряду с направляющей для рабочего органа одновременно служит кормушками для животных. Желоб собран из щитов, к которым крепятся кронштейны автопоилок, и досок с направляющими планками. Внизу желоба расположен настил – основание желоба. К настилу крепят опорные ролики, а к ним – привязи для животных.

Приводная станция приводит в движение рабочий орган кормораздатчика, который транспортирует корм по кормовому желобу. Она состоит из рамы, редуктора, электродвигателя, приводных звездочек, устройства для сбрасывания цепи, конечных выключателей. Рама специальными болтами крепится к фундаменту. Ведущий вал привода получает вращение от приводной станции через цепи и звездочки. Цепь натягивается перемещением редуктора станции.

Натяжная станция (рис. 1.2) состоит из опорной рамы, включающей в себя две боковины, ведомого барабана, опорного вала барабана, бункера, регулировочных винтов. Боковины опорной рамы крепятся болтами к фундаменту. Натяжение рабочего органа – перемещением барабана в пазах рамы с помощью винтов. При движении рабочего органа в обратном направлении остатки корма сбрасываются в приямок через открытую дверцу бункера.

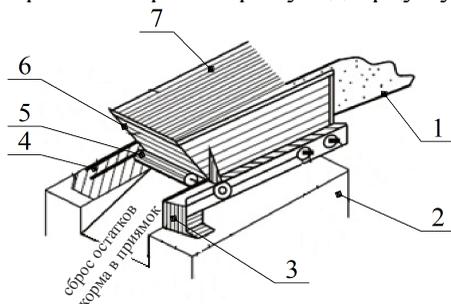


Рис. 1.2. Натяжная станция с загрузочным бункером кормораздатчика ТВК-80Б:
 1 – лента; 2 – фундамент; 3, 4 – боковины опорной рамы; 5 – барабан натяжной;
 6 – дверца бункера; 7 – приемный бункер

Рабочий орган кормораздатчика перемещает корм по желобу. Он представляет собой замкнутый контур, состоящий из ленты и цепи, которые соединены предохранительным устройством. Последнее обеспечивает сбрасывание цепи со звездочки специальным устройством при выходе из строя конечного выключателя. Конечные выключатели останавливают рабочий орган в крайних положениях хода при помощи упоров с лыжами. Лента с тяговой цепью крепится специальным приспособлением.

Электрооборудование размещено в шкафу управления и состоит из двух постов управления, заблокированных между собой; располагается на стене коровника со стороны приводной и натяжной станций. В состав

электрооборудования входят также кабели и коробка ответвления. Управление кормораздатчиком полуавтоматическое: пуск ручной – кнопкой магнитного пускателя, остановка автоматическая – конечными выключателями.

Раздатчик внутри кормушек РВК-Ф-74 создан вместо кормораздатчиков ТВК-80А и ТВК-80Б. Предназначен для полуавтоматизированной раздачи всех видов кормов, кроме жидких, на фермах КРС и овец в животноводческих помещениях типовых и оригинальных конструкций с фронтом кормления не более 75 м.

Выпускается в следующих исполнениях:

– с грузонесущим элементом в виде ленты для монтажа в железобетонных кормушках (РВК-Ф-74-1, РВК-Ф-74-1-V);

– с грузонесущим элементом в виде ленты с деревянным кормовым желобом (РВК-Ф-74-1-I, РВК-Ф-74-V);

– с грузонесущим элементом в виде цепи со скребками с деревянным желобом (РВК-Ф-74-II, РВК-Ф-74-VI).

При механизированной загрузке раздатчик РВК-Ф-74 загружается мобильными кормораздатчиками или вручную. Состоит из приводной и натяжной станций, кормового желоба, рабочего органа и электрооборудования.

Приводная станция обеспечивает реверсивный привод рабочего органа. В нее входят сварная рама, привод, конечные выключатели и устройство для сбрасывания цепи. Эти сборочные единицы унифицированы с аналогичными на ТВК-80А и ТВК-80Б.

Рабочий орган предназначен для перемещения корма по желобу. Представляет собой замкнутый контур, выполненный на половину длины из круглозвенной цепи СК-13х36. Вторая половина контура – оцинкованный трос с прикрепленной к нему при помощи хомутов и планок прорезиненной лентой шириной 500 мм.

Кормовой желоб является кормушкой и одновременно связующим звеном между приводной и натяжной станциями. Вдоль днища желоба размещена деревянная доска с двумя продольными деревянными направляющими. В местах стыка днища с боковыми стенками желоба закреплены деревянные брусья. Деревянные детали устанавливают для уменьшения износа ленты рабочего органа.

Натяжная станция служит для натяжения рабочего органа и загрузки корма. Состоит из рамы, натяжного барабана и бункера, унифицированных с аналогичными единицами машин ТВК-80А и ТВК-80Б. Натяжение рабочего органа раздатчика РВК-Ф-74 проводят перемещением оси натяжного барабана в пазах рамы с помощью винтов и гаек.

Электрооборудование машины – это шкаф управления, установленный со стороны станции, и пульт управления (расположен со стороны натяжной станции на стене возле загрузочного бункера), а также конечные выключатели и кабели.

Раздатчик РВК-Ф-74 унифицирован с ТВК-80Б на 86 %. В новой машине введены следующие изменения, улучшившие ее эксплуатационно-экономические показатели:

- вместо пластинчатой разборной цепи применена круглозвенная цепь СК-13х36, более надежная в работе;
- устройство для сбрасывания пластинчатой цепи заменено таким же устройством для круглозвенной цепи;
- введен лоток для очистки нижней ветви рабочего органа от остатков корма;
- в шкафу управления установлена сигнальная сирена СС-1 и светосигнальная аппаратура;
- конструкция путевого выключателя заменена более совершенной и надежной;
- крепление ленты рабочего органа с накладками выполнено болтами вместо заклепок;
- конечные выключатели срабатывают от рычагов, закрепленных на раме приводной станции.

Рабочий процесс, выполняемый кормораздатчиками РВК-Ф-74 и ТВК-80Б, аналогичен тем, которые описаны выше.

Следует отметить, что стационарные кормораздатчики типа КРС-15 и ТВК-80Б не в полной мере отвечают зоотехническим требованиям. Главной негативной особенностью этих машин является частичное поедание кормов животными в процессе распределения их по фронту кормления. При стационарной раздаче неравномерность выдачи корма на 1 метр фронта кормления коров достигает 9%–11%. Из них около 3% затаскиваются обратной ветвью под транспортер (ТВК-80Б) и 6%–8% сбрасываются в виде несъедобных остатков перед каждой раздачей. Существенным недостатком стационарных кормораздатчиков является недостаточное резервирование необходимой безотказности оборудования. Процесс раздачи кормов по всему фронту кормления прекращается при выходе из строя любого из технических элементов данного кормораздатчика.

Менее чувствителен к техническим неисправностям процесс раздачи кормов мобильными кормораздатчиками. Так, при выходе

из строя кормораздатчика на любой стадии работы раздача кормов увеличится только по времени и производится другими машинами, участвующими в данном процессе. Кроме того, только мобильными кормораздатчиками можно организовать механизированную выдачу кормов на выгульных площадках и в летних лагерях, реализовать которую можно, в том числе, и при помощи раздатчика кормов КРФ-10.

Кормораздатчик предназначен для перевозки и раздачи на ходу в кормушки на одну сторону измельченных листостебельных масс кукурузы, злаковых и бобовых трав, силоса, сена, сенажа или смеси их с другими сыпучими кормами. Раздача кормов производится в летних лагерях для крупного рогатого скота, у выгульных площадок, на фермах и в зданиях с кормовым проходом шириной 2,2 м, высотой прохода не менее 2,6 м и высотой кормушек не более 0,75 м.

Таблица 1.7

Техническая характеристика КРФ-10

Показатели	Значения
Производительность за 1 час эксплуатационного времени, га	не менее 0,6
Грузоподъемность, кг	4000
Вместимость кузова, м ³	10
Транспортная скорость, км/ч	до 25
Дорожный просвет, мм	320
Агрегируется с тракторами класса	1,4
Габаритные размеры, мм	6300 × 2700 × 2600
Масса, кг	2900

Раздатчик КРФ-10 может быть использован для обслуживания кормоуборочных комбайнов и перевозки различных сельскохозяйственных грузов с выгрузкой назад при помощи продольного транспортера.

Раздатчик кормов КРФ-10 состоит из рамы, на которой установлен кузов, на дне которого размещен цепочно-планчатый транспортер, предназначенный для передвижения слоя корма к выгрузному окну, расположенному в передней части кузова (рис. 1.3). Для дозированной подачи кормов, в передней части кузова, перед продольным транспортером, установлен блок битеров, за которым расположен поперечный цепочно-планчатый транспортер.

На раме установлены сница, тормозное устройство и электрооборудование. Сница одним концом соединена с прицепной серьгой.

На задних колесах установлены колодочные тормоза с пневматическим приводом, управление которыми осуществляется из кабины тракториста.



Рис. 1.3. Общий вид раздатчика кормов:

1 – блок битеров; 2 – сница; 3 – прицепная серьга; 4 – поперечный цепочно-планчатый транспортер; 5 – продольный цепочно-планчатый транспортер; 6 – задние колеса; 7 – рама; 8 – кузов

Кузов металлический, с шарнирно подвешенным задним бортом, который при помощи гидроцилиндров, поворачиваясь вокруг осей крепления, поднимает нижнее основание заднего борта в горизонтальное положение. В этом случае при переключении продольного транспортера в противоположное направление вращения, обеспечивается выгрузка корма с кузова на площадку. Продольный транспортер состоит из двух тяговых цепей, к которым посредством хомутов прикреплены штампованные поперечные металлические планки.

В передней верхней части кузова установлен блок битеров, который предназначен для равномерной подачи корма на поперечный транспортер. Битеры (рис. 1.4) установлены друг над другом в вертикальной плоскости, они представляют собой валы с ворошилками, расположенными в шахматном порядке, и вращаются в подшипниках, укрепленных на боковинах кузова.

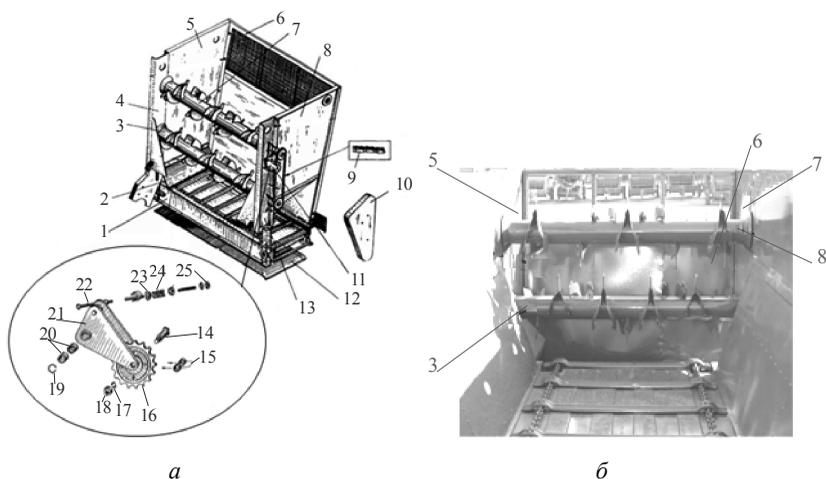


Рис. 1.4. Блок битеров:

а – схема блока битеров; *б* – общий вид;

- 1 – транспортер поперечный; 2 – козырек с уплотнением; 3 – ворошилка нижняя; 4, 13 – стойка; 5, 8 – стенка боковая; 6 – передняя стенка; 7 – ворошилка верхняя; 9 – цепь; 10 – кожух; 11 – устройство натяжное; 12 – днище; 14 – ось; 15, 18, 20, 24 – втулка; 16 – звездочка; 17, 19 – кольцо; 21 – кронштейн; 22 – тяга; 23 – пружина; 25 – гайка

Битер представляют собой закрепленный на валу барабан, на поверхности которого закреплены сектора из полувитков шнека, торцевые смежные грани каждой пары которых совмещены и сварены друг с другом в направлении, противоположном перемещению корма продольным транспортером.

Для ворошения и разрушения слежавшейся части корма, выгружаемого на поперечный транспортер, на полувитках выполнены квадратные пальцы, а между свариваемыми торцевыми гранями установлены вертикальные ножи. Также на внутренних смежных плоскостях полувитков приварены цилиндрические шайбы.

Впереди рамы раздатчика, но несколько ниже продольного транспортера и перпендикулярно ему размещен поперечный выгрузной транспортер, который служит для подачи корма в кормушки.

Работает кормораздатчик следующим образом. Кормораздатчик загружается стебельчатыми кормами или кормосмесью в местах их хранения, приготовления или силосоуборочными комбайнами.

Затем корм перевозят к месту кормления. По приезде в коровник, подъезжая к кормушкам, тракторист включает ВОМ и едет по

кормовому проходу на пониженной скорости – на первой или второй передаче трактора (1,7...2,5 км/ч). Во время движения агрегата продольный цепочно-планчатый транспортер перемещает весь объем корма к битерам. Битеры вращаются снизу-вверх, воздействуют ворошилками на весь слой корма. При этом пальцы на полувитках и вертикальные ножи интенсивно рыхлят корм и отделяют определенный слой, который поступает на поперечный транспортер и далее в кормушки (кормовой стол) животных.

Нижний бiter подает корм на верхний бiter. Последний, вращаясь, подхватывает корм и перебрасывает его обратно в кузов. Кроме того, верхний бiter, отбрасывая лишний корм в кузов, обеспечивает частичное выравнивание слоя.

Норма выдачи корма (в пределах от 6 до 72 кг на 1 м длины кормушки) регулируется скоростью движения агрегата вдоль фронта кормления животных, в пределах 1,89...3,22 км/ч.

Однако такой тип кормораздатчика не может обеспечить приготовление и раздачу полнорационной кормосмеси, которая так необходима для эффективного ведения животноводства.

В настоящее время для раздачи кормов животным широко используются разнообразные модели многофункциональных мобильных смесителей-кормораздатчиков, активно применяемые зарубежными и отечественными животноводами для механизации процессов приготовления и раздачи кормовых рационов. Представляя собой «кормоцех на колесах», эта техника обеспечивает комплексное решение проблем приготовления, транспортировки и раздачи кормов, позволяет обслуживать за смену сразу несколько небольших ферм крупного рогатого скота.

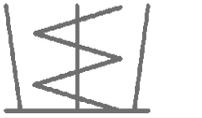
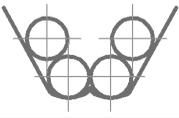
Переход на кормление КРС смесями, приготовленными в мобильных смесителях-кормораздатчиках, позволяет практически полностью исключить ручной труд. При наличии системы весового дозирования смесители-кормораздатчики могут обеспечивать быстрое приготовление и раздачу кормосмесей собственного производства.

Схемы смесителей-раздатчиков разнообразны. По способу агрегатирования они подразделяются на самоходные и прицепные. Наибольшее распространение нашли прицепные смесители-раздатчики [26]. Большинство из них состоит из одноосного шасси, на котором закреплен бункер со смешивающими рабочими органами, поперечный выгрузной транспортер и заслонка выгрузного люка. Привод рабочих органов у этих машин осуществляется от вала отбора мощности трактора.

Рабочими органами, обеспечивающими образование кормосмеси известных смесителей-раздатчиков, являются шнеки. Располагаться внутри бункера они могут в зависимости от схемы машины – горизонтально и вертикально, число смешивающих рабочих органов может колебаться от одного до четырех (табл. 1.8) [27].

Таблица 1.8

Схемы конструкций смесителей-раздатчиков

Одновальная		Четырехвальная
		
Двухвальная		Трехвальная
		
		

Наибольшее распространение смесители-раздатчики нашли в странах Западной Европы и США [28, 29]. Это во многом обусловлено спецификой небольших частных хозяйств в этих странах. В Республике Беларусь также освоен выпуск мобильных раздатчиков.

Смеситель-раздатчик кормов СРК – 11В производства «ЗАПАГРОМАШ» предназначен для измельчения прессованных кормов, корнеклубнеплодов, смешивания их и раздачи в кормушки или на кормовой стол.

Смеситель-раздатчик используется в линии приготовления и раздачи кормов на фермах и комплексах. Загрузка корма осуществляется посредством погрузчика.

Минимальные габаритные размеры СРК-11 В, вписывающиеся в габариты трактора МТЗ-80, МТЗ-82, позволяют применять СРК на всех типовых фермах без дополнительной их реконструкции.

Смеситель-раздатчик кормов состоит из шасси, рамы, на которой установлен бункер (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Раздатчик кормов СРК-11 В:
1 – шасси; 2 – бункер; 3 – рама

Оребренный бункер изготовлен путем многократного сгиба. Повышенная жесткость конструкции увеличивает срок службы изделия на 20 %. Оребровка бункера тормозит корм, что ускоряет процесс приготовления и позволяет измельчать и перемешивать компоненты корма даже без помощи противорезов. Снижается нагрузка на ВОМ, что обеспечивает экономию топлива до 20 %. Такая конструкция обеспечивает экономию времени приготовления и значительное улучшение качества приготовленной кормовой смеси.

Внутри бункера вращается конусообразный шнек, который перемещает массу корма вверх (рис. 1.6).

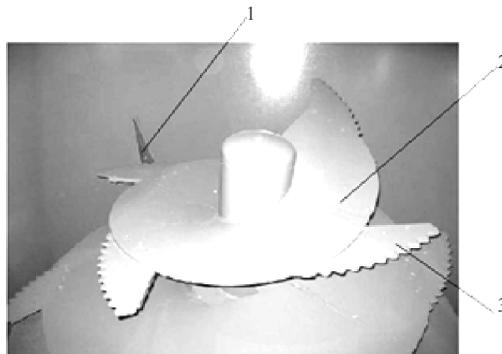


Рис. 1.6. Рабочий орган смесителя-раздатчика кормов СРК-11 В:
1 – противорез; 2 – конусообразный шнек; 3 – нож

Дойдя до крайнего верхнего положения, масса под собственным весом оседает вниз, где встречается с новым потоком перемещающейся массы, которая движется посредством шнека (рис. 1.7). Для измельчения кормовых компонентов на витках шнека установлены

ножи, которые защемяют корм между собой и противорезом, тем самым перерезая его. Перемешанная масса подается шнеком к выгрузному окну, величина которого регулируется шиберной заслонкой. Раздается масса корма поперечным цепочно-планчатным транспортером.

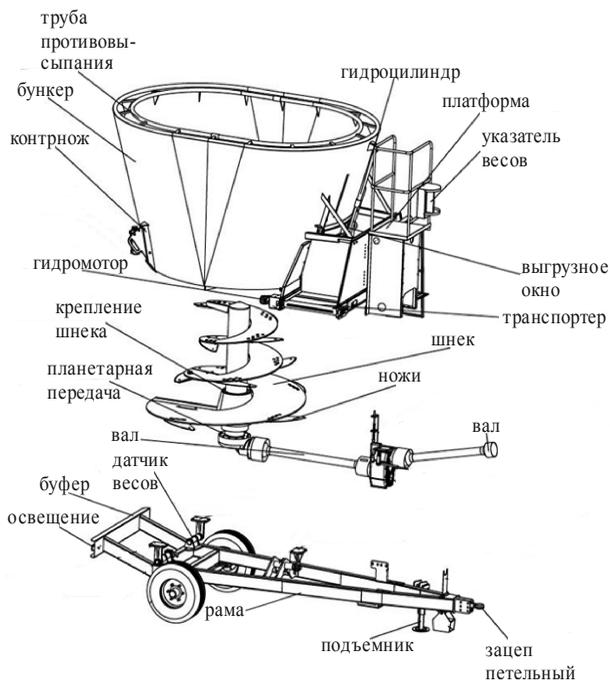


Рис. 1.7. СРК-11 В в разборе

Для более простого осуществления добавления концентрированных кормов на задней стенке бункера выполнена технологическая воронка.

Для взвешивания разных кормовых компонентов на раздатчике-смесителе кормов установлены электронные весы.

Привод шнека осуществляется от вала отбора мощности трактора (от ВОМ трактора вращение передается на двухступенчатый понижающий редуктор, от него на карданный вал кормораздатчика и на планетарный редуктор в масляной ванне).

Привод остальных рабочих органов осуществляется от гидравлической системы трактора:

– раздающий транспортер приводится в движение реверсивным гидромотором, который позволяет производить раздачу на две стороны;

- шиберная заслонка открывается при помощи гидроцилиндра.
- Регулировки:
- частота вращения шнека регулируется переключением скоростей двухступенчатого редуктора, а также изменением передачи трактора;
 - норма выдачи регулируется уровнем открытия шиберной заслонки, а также скоростью перемещения раздатчика.

Измельчитель-смеситель-раздатчик кормов ИСРК-12 предназначен для приготовления (доизмельчения и смешивания) компонентов (зеленая масса, силос, сенаж, рассыпанное и прессованное сено, солома, комбикорма, корнеплоды в измельченном виде, жидкие кормовые добавки) с применением электронной системы взвешивания кормовой смеси, которая обеспечивает возможность программирования 50 рецептов из 30 компонентов.

Машина состоит из бункера, шнековых рабочих органов, весового механизма, блока управления, гидросистемы, выгрузного транспортера (рис. 1.8).

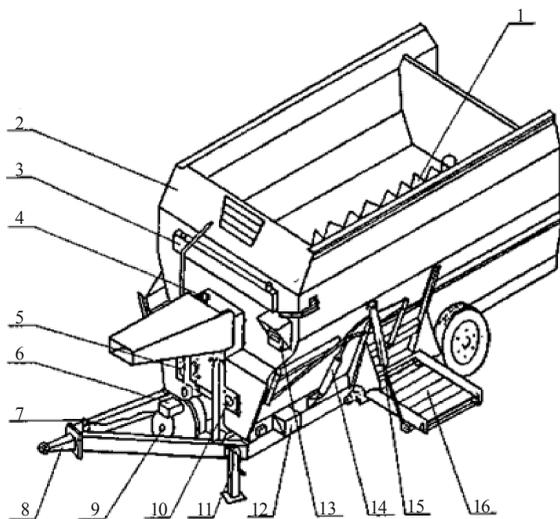


Рис. 1.8. Схема раздатчика кормов ИСРК-12:

- 1* – смешивающе-измельчающие шнеки; *2* – бункер; *3* – гидробак автономной гидросистемы; *4* – шланги гидросистемы; *5* – цели привода шнеков;
- 6* – гидронасос автономной гидросистемы; *7* – арматура подключения тормозной системы; *8* – тягово-сцепное устройство; *9* – главный двухскоростной редуктор;
- 10* – звездочки цепных передач; *11* – стояночный тормоз; *12* – аккумулятор;
- 13* – дисплей весового устройства; *14* – гидроцилиндр открытия шиберной заслонкой выгрузного люка; *15* – гидроцилиндр угла наклона транспортера;
- 16* – выгрузной транспортер

Бункер в горизонтальной плоскости имеет прямоугольную форму, а в вертикальной поперечной плоскости – призматическую с расширением вверх. На передней стенке бункера закреплен масляный бак гидросистемы машины, дисплей весового механизма управления рабочими органами. Имеется также смотровая площадка и лестница для подъема на площадку. Сзади бункера имеется решетчатое окно для возможности загрузки различных рассыпных витаминных добавок.

В нижней призматической части бункера по его оси установлено два смешивающе-измельчающих шнека. Для доизмельчения массы по всей длине витков шнека установлены ножи с волнистой кромкой лезвия. Для смешивания компонентов корма каждый шнек имеет противоположную навивку витков, обеспечивающих транспортирование смешиваемых компонентов в середину и вверх слева и/или справа по ходу раздатчика (рис. 1.9).

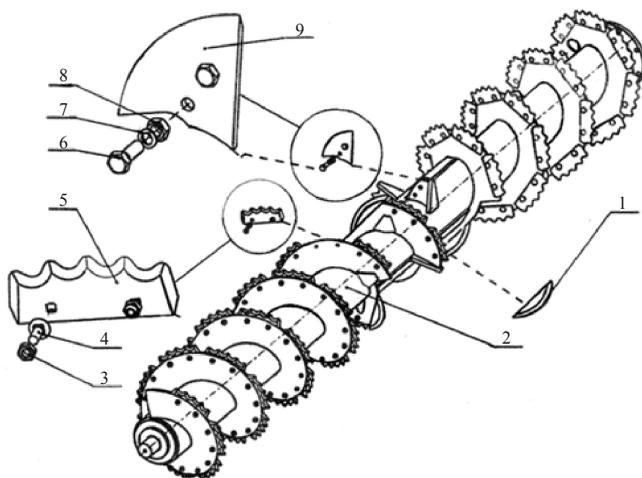


Рис. 1.9. Схема шнека раздатчика кормов ИСРК-12:

1 – нож приварной; 2 – шнек; 3, 8 – гайки; 4 – болт крепления ножа;
5 – нож основной; 6 – болт; 7 – шайба; 9 – нож-секач

В средней части бункера, установлен выгрузной транспортер с гидроприводом. Угол наклона транспортера (высота раздачи в кормушки) регулируется гидроцилиндром. Норма выдачи кормосмеси регулируется шиберной заслонкой выгрузного люка, открываемой

с помощью гидроцилиндра. Величина открытия шибера контролируется визуально по положению рычага, связанного со штоком гидроцилиндра, и меткам, нанесенным на специальной линейке, закрепленной на передней стенке бункера. В транспортном положении транспортер фиксируется в вертикальном положении.

Вместо транспортера может быть установлен выгрузной лоток для раздачи массы по кормовому проходу (на «кормовой стол»). Регулировка нормы выдачи осуществляется так же, как и на выгрузном транспортере.

Весовой механизм состоит из измерительных весовых стержней, электронного дисплея с клавиатурой управления, видимого из кабины трактора, и коммутационных связей. Измерительная система имеет ручной режим настройки, автоматический режим взвешивания с высвечиванием показаний на индикаторе дисплея, звуковую сигнализацию и блокировку системы взвешивания при переездах агрегата к местам дозагрузки.

Привод рабочих органов кормораздатчика осуществляется от ВОМ трактора, через широкоугольный карданный вал.

Двухскоростной редуктор кормораздатчика дает возможность получения в комбинации с двумя скоростями вращения ВОМа трактора (540 и 1000 об/мин.) четыре скорости вращения шнеков. Такая конструкция дает возможность выбирать оптимальные режимы работы в зависимости от плотности и спрессованности кормов.

Управление рабочих органов (включение и выключение, подъем и опускание выгрузного транспортера и шибера) производится с помощью автономной гидросистемы, управляемой дистанционно из кабины трактора.

Машина оборудована бульдозерным ножом, а также механическим стояночным и пневматическим тормозами, заблокированными с тормозами трактора. На задней стенке бункера имеется световая сигнализация, сопряженная с органами управления трактора.

Технологический процесс, выполняемый ИСРК-12, осуществляется следующим образом: в первую очередь в бункер кормораздатчика загружаются сухие гранулированные или мучнистые корма при отключенном ВОМ трактора. После переезда под загрузку других компонентов корма (сено, солома, силос) механизатор включает ВОМ трактора, корма загружаются в бункер, где при помощи шнеков происходит процесс измельчения и смешивания.

Для уменьшения технологического цикла приготовления кормов процесс измельчения и смешивания производится и во время движения кормораздатчика к местам дополнительной погрузки и разгрузки. Масса каждого погруженного компонента корма контролируется механизатором по монитору. После загрузки бункера кормораздатчика всеми компонентами корма агрегат въезжает в животноводческое помещение, механизатор опускает выгрузной транспортер и включает его привод, открывает заслонку и производит выдачу корма в кормушки на одну сторону кормовой линии, после разворота агрегата производится выдача корма на вторую сторону кормовой линии.

При раздаче на кормовой стол (в помещениях без кормушек) возможны выгрузка на обе стороны одновременно. Норма выдачи корма (величина открытия заслонки) контролируется визуально по шкале (со значениями от 1 до 5), нанесенной на передней стенке бункера и по показаниям монитора.

Техническая характеристика некоторых применяемых на животноводческих предприятиях раздатчиков такого типа приведена в табл. 1.9 [30, 31].

Таблица 1.9

Техническая характеристика смесителей-раздатчиков кормов

Наименование фирмы и марка машины	Вместимость бункера, м ³	Масса машины, кг	Установленная мощность, л. с.	Равномерность выдачи кормов, %
1	2	3	4	5
Delaval (Швеция)				
Optimix ST	8	3850	50	75–77
Optimix SC	12	5000	70	75–77
Marmix (Германия)				
Twin 10	10	3000	70	76
Twin 12	12	3500	80	76
Twin 15	15	4300	90	76

Наименование фирмы и марка машины	Вместимость бункера, м ³	Масса машины, кг	Установленная мощность, л. с.	Равномерность выдачи кормов, %
Strautman (Германия)				
Multi-Mix-700	7,0	3500	60	75
Multi-Mix-900	9,0	3900	70	75
Himel (Германия)				
Futtermischer F-5	5,5	1740	40	76
Futtermischer G-12	12,8	4320	65	76
Futtermischer G-17	17,0	5750	85	76
Seco (Италия)				
SAM 5 400/50	5	2600	30	74–77
SAM 5 500/110	11	4900	60	74–77
SAM 5 700/300	30	11100	200–220	74–77
Luclar (Франция)				
Star system mix-: Centaurus 5	5	3100	62	75
Pegasus 7	7	3800	68	75
Orion 9	9	4600	75	75
Taurus 12	12	5500	80	75
Hercules 15	15	6600	90	75
ИСПК-12 (Беларусь)	12	4400	60	75
ПР-Ф-8	8	3600	60	90
СПК-10	10	4000	7,5	90

Анализ данных табл. 1.9 показывает, что мобильные смесители-раздатчики типа ИСПК-12 имеют низкую равномерность раздачи высокоэнергетических кормов.

Для кормления животных при беспривязном содержании предлагается использовать автоматизированную систему, главным функциональным узлом которой является робот Pellon TMR (Финляндия), способный выполнять как приготовление кормосмеси, так и раздачу корма.

Робот-кормосмеситель-кормораздатчик (рис. 1.10) состоит из подвешенного на монорельсе, посредством двух пар колес с тензодатчиками, бункера. Монорельс расположен вдоль кормового стола животных.

Для смешивания кормовых компонентов внутри бункера установлены шнек и цепной транспортер. Выравнивание верхнего слоя кормов (кормосмеси) производится установленной на верхнем основании гребенкой.

Кормовая смесь выгружается на кормовой стол животных непрерывным потоком через выгрузной транспортер.

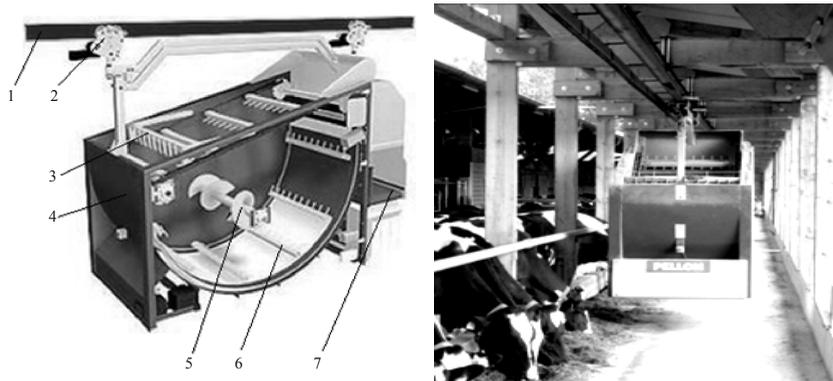


Рис. 1.10. Робот-кормораздатчик Pellon TMR:

1 – монорельс; 2 – колесо с тензодатчиками; 3 – гребенка;
4 – бункер; 5 – шнек; 6 – цепной транспортер; 7 – выгрузной транспортер

Перед началом работы робота в бункер загружаются предварительно измельченные кормовые компоненты рациона животного.

При движении робота по монорельсу, посредством двух пар колес с тензодатчиками, кормовые компоненты в бункере смешиваются шнеком и цепочным транспортером, и готовая кормосмесь по выгрузным транспортерам подается на выгрузной стол животных.

При движении робота корм автоматически подается выгрузным транспортером на кормовой стол непрерывным потоком.

Так как робот содержит тензодатчики, то обеспечивается возможность подачи отмеренного по весу корма определенным группам животных.

Задачу ежедневного кормления стада теперь выполняют автоматические системы кормления и оборудование для его осуществления, которое производит Lely, что обеспечивает высочайшую эффективность процесса и способствует улучшению состояния здоровья животных. Такая система включает в себя не только кормораздатчик, но и систему частичного складирования кормовых компонентов, так называемую «кухню» (рис. 1.11).

Кухня представляет собой открытое пространство без препятствий, где можно хранить различные виды кормов. Для каждого вида корма предусмотрено отдельное место, которое можно легко определить и загрузить нужный компонент. Правильно силосованный грубый корм сохраняет свою свежесть в течение нескольких дней, так как хранится в блоках; на кормовой кухне достаточно места для хранения запасов корма на срок до трех дней.



Рис. 1.11. Система частичного складирования кормовых компонентов

При помощи кормового грейфера или силосной башни в робот-кормораздатчик можно загрузить все виды кормов, даже небольшими порциями для малых групп животных. Кормовой грейфер всегда захватывает корм с самой высокой точки, оценивает его вес. Он загружает различные компоненты в оптимальном порядке, чтобы достичь точных результатов смешивания при минимальных временных и энергозатратах. Затем происходит перемещение кормораздатчика в зону кормления и дозированная выдача кормосмеси животным (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Дозированная раздача кормов автоматической системы кормления Lely

После завершения процесса раздачи кормов смеситель-раздатчик проезжает по мере необходимости вдоль кормового стола для того, чтобы подвинуть корма к животным. В то время как корм подвигается, робот сканирует его оставшееся количество на кормовом столе с помощью датчика высоты корма. Если показания средней высоты ниже предварительно заданного уровня, кормораздатчик загружает необходимое количество свежего корма и доставляет его туда, куда нужно. Кормление, основанное на высоте корма, вместо кормления по времени, предотвращает чрезмерное или недостаточное количество корма на кормовом столе.

Семейство автономных роботов-кормораздатчиков Triomatic серии Т для смешивания и раздачи кормов. Triomatic рассчитано на обслуживание стада от 100 до 400 голов. Для кормления можно использовать любые тюки и рулоны, а не только силосную массу (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Дозирование кормов для автоматических систем кормления Triomatic

Triomatic измельчит подаваемый корм до нужного размера. Система состоит из следующих элементов: приемные бункера с дозирующей системой, миксер-кормораздатчик с вертикальными шнеками – подвешивается на опорную балку, по которой перемещается автоматически, согласно программе, компьютер, управляющий работой системы (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Дозированная раздача кормов автоматической системы кормления Triomatic

Миксер-кормораздатчик имеет два вертикальных перемешивающих шнека, электронную систему смешивания, поперечный транспортер для выгрузки влево и вправо, скользящий механизм отбора мощности и страховочный бампер, надежный привод с системой позиционирования и рабочий объем 3 м³. Кормовой бункер произведен из высококачественных материалов, что делает его стабильным и устойчивым. Закрытый механизм предотвращает его засорение и обеспечивает более длительный срок службы.

Тем не менее, даже такие автоматические системы кормления КРС не обеспечивают нормированную выдачу животным высокоэнергетических кормов, поскольку смешивают кормовые компоненты в емкости и выдают их всем животным в одинаковом соотношении.

В этом случае проблематичной является и организация нормированного кормления животных. Кормосмесь для определенной группы животных приводит к снижению продуктивности других групп. Особенно это ощутимо при включении в рацион сахарной свеклы. Ввод этого вида корма в состав кормосмеси без учета продуктивности

коров может вызвать расстройство пищеварения у животных. Неадекватность по питательности скармливаемых кормов потребностям животных является также причиной снижения общего уровня удоев.

К недостаткам следует отнести и неравномерное попадание в организм животных включаемых в состав рациона белково-витаминных добавок, премиксов и других добавок. Следствием этого может быть нарушение обменных процессов в организме животных, отравление и снижение продуктивности.

Трудность получения однородности кормосмеси заключается в различии физико-механических свойств сенажа, корнеклубнеплодов и способов их подготовки. Сенаж используется в виде травяной резки, а корнеклубнеплоды в виде стружки или кубиков. В этом случае получить однородную по составу кормосмесь мобильным смесителем-раздатчиком затруднительно. При более мелком измельчении корнеклубнеплодов происходит интенсивная потеря сока, а вместе с ним и ценных питательных веществ, быстрое его закисление.

Кроме того, вводимые в кормосмесь в малых количествах микродобавки (около 1 %–3 %) и концентраты (около 10 %–15 %) в таких смесителях-раздатчиках представляется трудным равномерно распределить в стебельчатой массе силоса (или сенажа), составляющего в рационе около 60 %–70 %. Отсутствие в технической характеристике этих машин показателей степени измельчения кормов позволяет усомниться в качестве подготавливаемых кормосмесей известными смесителями-раздатчиками [31].

При анализе технологических схем всех известных мобильных кормораздатчиков, предназначенных для получения и раздачи многокомпонентных кормосмесей, было установлено, что в соответствии с рассмотренными технологиями кормосмесь готовится из силосованных стебельчатых кормов, зернофуража, корнеклубнеплодов и микродобавок. Перечисленные корма смешиваются мобильным смесителем-раздатчиком и выдаются в кормушки животных. Приготавливаемая данным способом кормосмесь, кроме высоких затрат энергии на выполняемый технологический процесс, не обеспечивает индивидуальное кормление животных. В данном случае высокоэнергетические корма скармливались животным без учета их продуктивности. Такая неравномерность раздачи кормов снижает их энергетическую отдачу, а, следовательно, и рентабельность отрасли.

Используемые на животноводческих фермах мобильные смесители-раздатчики кормов не обеспечивают дозированную раздачу

пастообразных кормов и кормовых отходов, полученных от переработки растительного сырья в процессе раздачи стебельчатых и сыпучих концентрированных кормов, что вызывает необходимость в проведении исследований по обоснованию параметров устройства для дозированной выдачи пастообразных высокоэнергетических смесей.

Для решения проблемы по энергоресурсосбережению и эффективному использованию кормов и технических средств в технологических процессах приготовления и скармливания кормов животным необходимы принципиально новые механизированные технологии, позволяющие рационально использовать электроэнергию, топливо, трудовые и финансовые ресурсы.

1.4. Обоснование малозатратных технологий подготовки кормов к скармливанию и выдачи кормосмеси животным

Потребность в механизированной малозатратной технологии приготовления и выдачи кормосмесей неизмеримо возрастает при переводе стада на круглосуточное однотипное кормление заготовленными впрок кормами.

При решении задачи по повышению эффективности использования кормов выделены два направления в нормированном кормлении животных:

- обеспечение индивидуального кормления на базе сложных автоматизированных систем;
- кормление животных одной группы.

Система индивидуального кормления животных впервые была разработана в США. В ее состав входил управляемый электронно-разрешающим устройством кормораздатчик. Данная система позволяла распознавать сигнал, идущий от закрепленного на каждом животном мини-передатчика.

Аналогичная система разработана и шведской фирмой «Альф-Лаваль-Уникар». Она позволяет организовать индивидуальное кормление и нормирование кормов в зависимости от продуктивности и физиологического состояния животного. Несмотря на преимущества, автоматизированные системы нормированного, индивидуального кормления животных очень сложны и дороги.

Наиболее практичным в ближайшей перспективе является групповой способ нормированного кормления животных. В качестве главного и необходимого условия при данном способе кормления предлагается комплектование стада в однородные группы животных со сходными потребностями в питательных веществах. Групповой способ кормления может быть механизирован и автоматизирован. Он широко распространен за рубежом, главным образом, при беспривязном содержании скота. Опыт группового, нормированного кормления КРС, внедряется в хозяйствах России и Республике Беларусь [32].

При групповом способе, для удобства нормирования и возможности механизации раздачи кормов, грубые корма, силос и сенаж выдаются вволю коровам всех групп, а концентраты – в зависимости от их продуктивности. Анализ известных способов скармливания кормов животным и поиск технологий, исключающих повторную подготовку кормов, позволили выявить другой, наиболее приемлемый вариант.

Предложен способ, при котором в качестве объемных компонентов используются грубые и силосованные корма [33]. Предварительно подготовленные корнеклубнеплоды, зернофураж и различные добавки авторы предлагают скармливать в виде многокомпонентной высокоэнергетической добавки. Она формируется при смешивании измельченных корнеклубнеплодов и двух других кормовых компонентов. В этом случае устраняется пылеобразование при раздаче зернофуража и потери питательного сока корнеклубнеплодов.

Интересен и способ раздачи кормов. Первоначально в кормушки выдаются стебельчатые корма, а верхним слоем укладывается многокомпонентная высокоэнергетическая добавка. По мнению авторов, верхний слой способствует слюновыделению у животных, а, значит, поедаемости и переваримости всех кормов. При этом способе скармливания кормов можно дозировать выдачу стебельчатых кормов и многокомпонентной высокоэнергетической добавки. При данном способе выполняются два очень важных мероприятия по снижению энергоемкости и металлоемкости подготовки кормов к скармливанию:

- во-первых, повторному измельчению не подвергаются силосованные стебельчатые корма, занимающие в рационе животных до 70 % от общего объема кормов;

- во-вторых, обеспечивается скармливание дорогих высокоэнергетических кормов в зависимости от продуктивности животных.

Недостатком рассмотренной технологии раздельного скармливания стебельчатых и высокоэнергетических кормов является последовательная выдача их в кормушки животных. Авторы предлагают раздавать первоначально стебельчатые корма, а вторым проходом раздатчика – многокомпонентную высокоэнергетическую добавку. Так как физико-механические свойства стебельчатых кормов отличны от зернофуража и корнеклубнеплодов, то для раздачи этих кормов необходимы разномарочные мобильные раздатчики, а, следовательно, технологическая операция раздачи кормов выполняется дважды. Раздельная раздача кормов не обеспечивает приготовление кормосмеси. Практически корма выдаются на кормовой стол животных слоями.

Таким образом, при явных биологических и энергетических преимуществах, технология раздельного скармливания стебельчатых кормов и многокомпонентной высокоэнергетической добавки имеет существенные недостатки. Практически не обеспечивается скармливание кормов в виде кормосмеси, что снижает их энергетическую отдачу [33]. Для выдачи стебельчатых кормов и зернофуража необходимы два вида разномарочных кормораздатчиков, что увеличивает процесс кормления животных по времени, повышает энергозатраты процесса, усложняет организацию обслуживания и ремонта машин.

Для приготовления кормосмеси животным предложен способ, при котором объемные корма и многокомпонентная высокоэнергетическая добавка смешиваются путем пересечения их потоков в воздухе и при перемещении выгрузным транспортером кормораздатчика. Формирование кормосмеси осуществляется без участия механических устройств. Дополнительно, для лучшего скармливания кормов, часть высокоэнергетической добавки покрывает верхний слой кормосмеси на кормовом столе, что вызывает у животных аппетит и обильное слюновыделение, способствующие поеданию всех кормов и их лучшей усвояемости.

Предложенный способ исключает повторное измельчение силосованных стебельчатых кормов, занимающих в рационе животных до 70 % от общего объема кормов, и обеспечивает нормированное скармливание дорогих высокоэнергетических кормов, позволяет сократить энергетические, материальные, трудовые и финансовые затраты на подготовку кормов к скармливанию и приготовление кормосмеси, повысить энергетическую отдачу кормов [34].

Уменьшить энергозатраты процесса раздачи и формирования кормосмеси можно, объединив две технологические операции в одной машине. Для этого мобильный смеситель-раздатчик должен содержать два бункера – для объемных стебельчатых кормов и многокомпонентной высокоэнергетической добавки. Раздача и смешивание этих кормов животным должны производиться одновременно, при движении кормораздатчика вдоль кормушек.

В соответствии с малозатратной технологией стационарным комплектом машин к скармливанию подготавливаются только зернофураж и корнеклубнеплоды.

Таким образом, на основании проведенного анализа сделан вывод о целесообразности применения для раздачи кормов мобильных кормораздатчиков, обеспечивающих скармливание высокоэнергетических кормов в зависимости от группы и продуктивности животных. Для этого высокоэнергетические корма должны загружаться в отдельный от силосованных стебельчатых кормов бункер-дозатор мобильного смесителя-раздатчика. Кормовую смесь из высокоэнергетических и силосованных стебельчатых кормов можно готовить в процессе дозированной выдачи их животным. В данном случае корма смешиваются при пересечении в воздухе кормовых потоков без дополнительных механизмов. Для создания мобильного раздатчика, обеспечивающего выполнение указанного условия, необходимо провести поисковые и теоретические исследования.

1.5. Обоснование выбора конструктивно-технологической схемы мобильного модульного смесителя-раздатчика кормов

Важной технологической операцией при реализации предлагаемой малозатратной технологии приготовления и раздачи кормов животным является раздача кормов, в соответствии с которой в кормушки КРС выдается кормосмесь, формируемая из двух групп кормов – объемных силосованных стебельчатых кормов и многокомпонентной высокоэнергетической добавки.

Стебельчатые и высокоэнергетические корма выдаются животным в заданном количестве, которое должно сохраняться на протяжении выполнения технологической операции. В соответствии с предлагаемой малозатратной технологией кормления животных составлена пооперационная технологическая схема рабочего процесса мобильного модульного смесителя-раздатчика (рис. 1.15).



Рис. 1.15. Пооперационная технологическая схема рабочего процесса мобильного модульного смесителя-раздатчика кормов

Из технологической схемы видно, что ряд операций может выполняться с применением одних и тех же технических средств. Так, операция взвешивания кормов может быть выполнена последовательно, по мере их загрузки в бункер. Выдача в кормушки кормосмеси из двух дозированных групп кормов одним агрегатом отвечает зоотехническим требованиям кормления животных.

Существенно отличается погрузка двух видов кормосмесей. Многокомпонентная высокоэнергетическая добавка загружается в бункер выгрузным транспортером в местах ее приготовления или готовится из компонентов в модуле, а погрузка стебельчатых кормов – в местах их хранения.

С целью сокращения числа машин, а, следовательно, и энергоёмкости операции погрузки кормов эффективно комплектовать мобильный смеситель-раздатчик соответствующим оборудованием. Совмещение отдельных технических систем в одном смесителе-кормораздатчике позволяет уменьшить число машин для реализации технологического процесса при сохранении зоотехнических требований и сократить до минимума время на раздачу кормов. При создании конструкторско-технологической схемы мобильного смесителя-раздатчика кормов необходимо учесть мировые тенденции создания машин данного назначения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ-ДОЗАТОРА СЫПУЧИХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОРМОВ МОБИЛЬНОГО РАЗДАТЧИКА

2.1. Определение дальности полета взаимопересекающихся во взвешенном состоянии потоков кормов

Приготавливаемые животным кормовые смеси должны отвечать зоотехническим требованиям по составу и распределению кормовых компонентов в смеси. В смесителе кормов это достигается рабочими органами, действием которых частицы взаимно перераспределяются в общем объеме.

В соответствии с предлагаемой механизированной технологией кормосмесь формируется из пересекающихся в воздухе потоков силосованных стебельчатых и сыпучих высокоэнергетических кормов, выгружаемых на транспортер кормораздатчика из соответствующих бункеров (рис. 2.1).

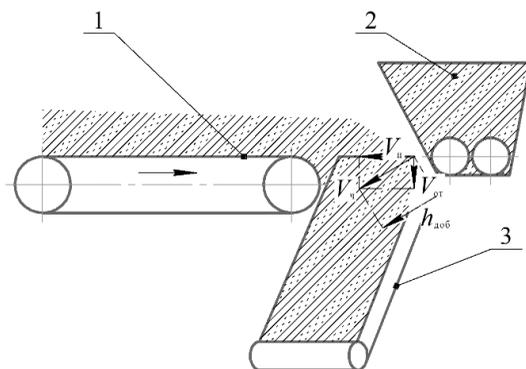


Рис. 2.1. Схема к расчету дальности полета взаимопересекающихся во взвешенном состоянии потоков кормов:

1 – транспортер стебельчатых кормов; 2 – смеситель-дозатор многокомпонентной сыпучей высокоэнергетической добавки; 3 – выгрузной транспортер кормосмеси

Особенностью этих кормов являются различные физико-механические свойства. Рассредоточение при выгрузке из накопительного бункера силосованных стебельчатых кормов обеспечивает

встречное проникновение в этот поток частиц сыпучей многокомпонентной высокоэнергетической добавки, образуя при этом кормовую смесь. При этом время полета частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки определяет момент завершения процесса перемещения частицы в потоке стебельчатых кормов. Этот промежуток времени можно определить из соотношения [35]:

$$t = \frac{\sigma_R}{\sigma}, \quad (2.1)$$

где σ_R – текущее значение времени полета частицы, с;

σ – среднее квадратическое отклонение при максимально возможном смешивании кормов.

Параметр σ_R можно определить расчетным путем, воспользовавшись дискретным счетом контрольного компонента в кормосмеси:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\varepsilon_H (1 - \varepsilon_H) [\varepsilon_H x + (1 - \varepsilon_H)] y}{q_K}}, \quad (2.2)$$

где ε_H – соотношение компонентов корма в пробе, $\varepsilon_H = m_x / m_y$, m_x , m_y – математическое ожидание содержания по массе компонентов кормосмеси;

q_K – количество смешиваемых кормовых компонентов, шт.;

x , y – содержание кормовых компонентов в порции кормосмеси, равной норме питания животных.

Среднее квадратическое отклонение содержания кормовых компонентов можно определить по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_c^2}, \quad (2.3)$$

где σ_d , σ_c – среднее квадратическое отклонение содержания кормовых компонентов до и после смешивания.

Определим значения σ_d , σ_c . Для этого дисперсию содержания кормовых компонентов после дозирования с бункера-смесителя определим по формуле [36]

$$D[\varepsilon_D] = D\left[\frac{x}{y}\right], \quad (2.4)$$

причем $x : y = xu$, где $u = y^{-1}$.

В соответствии с теорией вероятностей уравнение (2.4) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} D\left[\frac{x}{y}\right] &= D[xu] = D[x]D[u] + m^2 D[u] + m_u^2 D[x] = \\ &= D[x]D\left[\frac{1}{y}\right] + m_x^2 D\left[\frac{1}{y}\right] + m_{\frac{1}{y}}^2 D[x], \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $m_{1/y}$ – математическое ожидание обратных величин содержания корма в порции кормосмеси.

Выразив дисперсии в уравнении (2.5) через среднее квадратическое отклонение, а затем через коэффициенты вариации, получим:

$$\sigma_D^2 = \sigma\left[\frac{x}{y}\right]^2 = \sigma_x^2 \sigma_{\frac{1}{y}}^2 + m_x^2 \frac{1}{y}^2 + m_{\frac{1}{y}}^2 \sigma_x^2$$

или в натуральном виде:

$$\sigma_D^2 = \frac{m_x^2 v_x^2}{100^2} + \frac{m_{\frac{1}{y}}^2 v_{\frac{1}{y}}^2}{100^2} + \frac{m_x^2 m_{\frac{1}{y}}^2 v_{\frac{1}{y}}^2}{100^2} + \frac{m_{\frac{1}{y}}^2 m_x^2 v_x^2}{100^2}.$$

После преобразования получим:

$$\sigma_D = \frac{m_x m_{\frac{1}{y}}}{100} \sqrt{\frac{v_x^2 v_{\frac{1}{y}}^2}{100^2} + v_{\frac{1}{y}}^2 + v_x^2}, \quad (2.6)$$

где $v_x, v_{1/y}$ – коэффициенты вариации, характеризующие неравномерности распределения кормов в смеси, %.

Среднее квадратическое отклонение содержания компонентов в кормосмеси после смешивания:

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_H v_c}{100} = \frac{m_x v_x}{100 \cdot m_y}, \quad (2.7)$$

где v_c – коэффициент вариации, характеризующий неоднородность смешивания.

Подставив значение (2.6) и (2.7) в уравнение (2.3), получим

$$t = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_H (1 - \varepsilon_H) [\varepsilon_H x + (1 - \varepsilon_H)] y}{q_k}}}{\left(\frac{m_x}{100}\right)^2 \left[\left(m_1 \frac{1}{y}\right)^2 \left(\frac{v_x^2 v_1^2}{100^2} + v_1^2 + v_x^2 \right) + v_x^2 \right]}. \quad (2.8)$$

Анализ уравнения (2.8) показывает, что время полета сыпучей частицы корма зависит от числа и соотношения компонентов корма в кормосмеси, неравномерности смешивания кормов, среднего размера частиц смешиваемых кормовых компонентов. При установленных зоотехническими требованиями размерах частиц стебельчатых (80–120 мм) и высокоэнергетических (2–3 мм) кормов получена зависимость (рис. 2.2) указанных показателей и времени перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки во взвешенном состоянии, позволяющая определить оптимальные значения временного диапазона для расчета дальности полета частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки в слой стебельчатых кормов.

На основании анализа полученной зависимости установлено, что для средних значений размеров частиц стебельчатых и высокоэнергетических кормов оптимальное время полета частиц высокоэнергетических кормов в слой стебельчатых кормов равно 2 секунды.

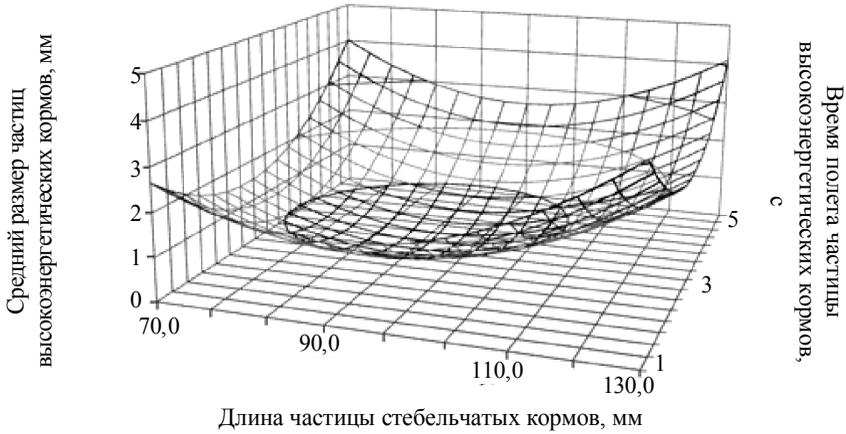


Рис. 2.2. Зависимость времени полета частиц высокоэнергетических кормов от длины частиц смешиваемых стебельчатых и высокоэнергетических кормов

Важным параметром, характеризующим качество кормосмеси, является определение дальности полета частиц сыпучей многокомпонентной высокоэнергетической добавки $h_{доб}$. Данный параметр зависит от скорости движения частиц, определить которую можно, разложив ее на два независимых – равномерное прямолинейное движение $V_{п}$ и свободное падение с относительной скоростью $V_{от}$ (рис. 2.1). Тогда абсолютную скорость движения частиц стебельчатых кормов можно определить по формуле

$$V_{ч}^2 = V_{п}^2 + V_{от}^2 \quad (2.9)$$

В формуле (2.9)

$$V_{п} = h_{гор} \varphi'$$

где $\varphi' = d\varphi/dt$ – угловая скорость перемещения частицы многокомпонентной добавки в течение промежутка времени; c^{-1} . При поступлении через выгрузное окно смесителя-дозатора $V_{п}$ равна угловой скорости шнека;

$h_{гор}$ – расстояние перемещения частицы многокомпонентной добавки, м.

Относительную скорость перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки определим по формуле

$$V_{от} = dh_{вер} / dt, \quad (2.10)$$

где $h_{вер}$ – высота падения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки, м.

Тогда абсолютную скорость перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки можно определить по формуле

$$V_{ч}^2 = h_{гор}^2 \varphi'^2 + h_{вер}'^2. \quad (2.11)$$

Из формулы (2.11) определим расстояние перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки в горизонтальной плоскости. Для решения уравнения воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{доб}}{\partial h'_{вер}} \right) - \frac{\partial E_{доб}}{\partial h_{гор}} = Q_h, \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{доб}}{\partial \varphi} \right) - \frac{\partial E_{доб}}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \quad (2.13)$$

где Q_h , Q_{φ} – обобщенные силы, действующие на частицу многокомпонентной высокоэнергетической добавки, Н;

$E_{доб}$ – работа, затрачиваемая при перемещении частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки, кг м²/с².

Преобразовав уравнения (2.12) и (2.13), получим:

$$Q_h = m_{ч} (h''_{вер} - h_{гор} \varphi'^2), \quad (2.14)$$

$$Q_{\varphi} = m_{ч} (2 h_{гор} - h'_{вер} \varphi'). \quad (2.15)$$

Работу, затрачиваемую при перемещении частицы корма на элементарном пути возможных перемещений, определим по формулам:

$$\delta T_h = Q_h \delta h_{гор} = (m_{ч} g - fN) \delta h_{гор}, \quad (2.16)$$

$$\delta T_{\varphi} = Q_{\varphi} \delta \varphi = (N - m_{ч} g) h_{гор} \delta \varphi, \quad (2.17)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент трения многокомпонентной высокоэнергетической добавки по металлу;

$m_{ч}$ – масса частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки, кг.

Откуда

$$Q_h = m_{\text{ч}}g - fN, \quad (2.18)$$

$$Q_{\varphi} = (N - m_{\text{ч}}g) h_{\text{гор}}. \quad (2.19)$$

Так как в уравнениях (2.14), (2.15) и (2.18), (2.19) левые части равны, то справедливо равенство:

$$m_{\text{ч}} (h''_{\text{вер}} - h_{\text{гор}}\varphi'^2) = m_{\text{ч}}g - fN, \quad (2.20)$$

$$2m_{\text{ч}}h_{\text{гор}}h'_{\text{вер}}\varphi' = (N - m_{\text{ч}}g) h_{\text{гор}}, \quad (2.21)$$

или после преобразования получим:

$$h_{\text{вер}}'' - h_{\text{гор}}'\varphi'^2 = g - fNm_{\text{ч}}^{-1}, \quad (2.22)$$

$$2fh_{\text{вер}}'\varphi' = fNm_{\text{ч}}^{-1} - gf. \quad (2.23)$$

Из уравнения (2.23) выразим $fNm_{\text{ч}}^{-1}$, и полученное значение подставим в уравнение (2.22). После преобразования получим:

$$h_{\text{вер}}'' + 2fh_{\text{вер}}'\varphi' - h_{\text{гор}}'\varphi'^2 = g(1 - f). \quad (2.24)$$

Так как $\varphi = \omega t$, а $\varphi' = \omega = \text{const}$, то уравнение (2.24) примет вид:

$$h_{\text{вер}}'' + 2fh_{\text{вер}}'\omega_{\text{ш}} - h_{\text{гор}}\omega_{\text{ш}}^2 = g(1 - f). \quad (2.25)$$

Полученное уравнение (2.25) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Представим его как общее решение однородного уравнения:

$$h_{\text{доб}} = h_{\text{част}} + h_{\text{общ}}. \quad (2.26)$$

Соответствующее однородное уравнение примет вид:

$$h_{\text{вер}}' + 2f\omega_{\text{ш}}h_{\text{вер}}' - h_{\text{гор}}\omega^2 = 0. \quad (2.27)$$

Характеристическим уравнением дифференциального уравнения (2.27) будет:

$$h_{\text{вер}}^2 + 2f\omega_{\text{ш}}h_{\text{вер}} - \omega_{\text{ш}}^2 = 0. \quad (2.28)$$

Корни уравнения:

$$h_1 = \omega_{\text{ш}} \left(f + \sqrt{f^2 + 1} \right), \quad (2.29)$$

$$h_2 = \omega_{\text{ш}} \left(f - \sqrt{f^2 + 1} \right). \quad (2.30)$$

Тогда общее решение уравнения (2.27) выразится формулой

$$h_{\text{общ}} = C_1 e^{h_1 t} + C_2 e^{h_2 t}, \quad (2.31)$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные;

t – время перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки во взвешенном состоянии, с;

e – основание натурального логарифма.

Частное решение уравнения (2.25) имеет вид:

$$0 + 0 - \omega_{\text{ш}}^2 = g(1 - f), \quad (2.32)$$

откуда

$$C = -\frac{g(1-f)}{\omega_{\text{ш}}^2}. \quad (2.33)$$

Общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (2.26) будет иметь вид:

$$h_{\text{доб}} = C_1 e^{h_1 t} + C_2 e^{h_2 t} - \frac{g(1-f)}{\omega_{\text{ш}}^2}. \quad (2.34)$$

Из начальных условий $t=0$, $dh/dh = 0$ и $h' = 0$ находим постоянные:

$$h_0 = C_1 + C_2 - \frac{g(1-f)}{\omega_{\text{ш}}^2}; \quad (2.35)$$

$$h'(0) = C_1 \omega_{\text{ш}} \left(f + \sqrt{1+f^2} \right)_1 + C_2 \omega_{\text{ш}} \left(f - \sqrt{1+f^2} \right). \quad (2.36)$$

Решая систему относительно C_1 и C_2 , получим:

$$C_1 = \frac{g(1-f)}{\omega_{\text{ш}}^2} \left(1 - \frac{f + \sqrt{1+f^2}}{2\sqrt{1+f^2}} \right). \quad (2.37)$$

$$C_2 = \frac{g(1-f) \left(f + \sqrt{1+f^2} \right)}{2 \omega_{\text{ш}}^2 \sqrt{1+f^2}}. \quad (2.38)$$

Частное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (2.34) будет иметь вид:

$$h_{\text{доб}} = \frac{g(1-f)}{\omega_{\text{ш}}^2} \left(\left(1 - \frac{f + \sqrt{1+f^2}}{2\sqrt{1+f^2}} \right) e^{\omega_{\text{ш}} t (f + \sqrt{f^2+1})} + \right. \\ \left. + \frac{(f + \sqrt{1+f^2})}{2\sqrt{1+f^2}} e^{\omega_{\text{ш}} t (f - \sqrt{f^2+1})} - 1 \right). \quad (2.39)$$

Из формулы следует, что в воздухе дальность полета частицы многокомпонентной сыпучей высокоэнергетической добавки зависит от физико-механических свойств кормов, угловой скорости шнека и времени полета частицы корма. На основании полученного уравнения получена зависимость дальности полета частицы сыпучих высокоэнергетических кормов от времени ее полета и угловой скорости выгрузного шнека (рис. 2.3).

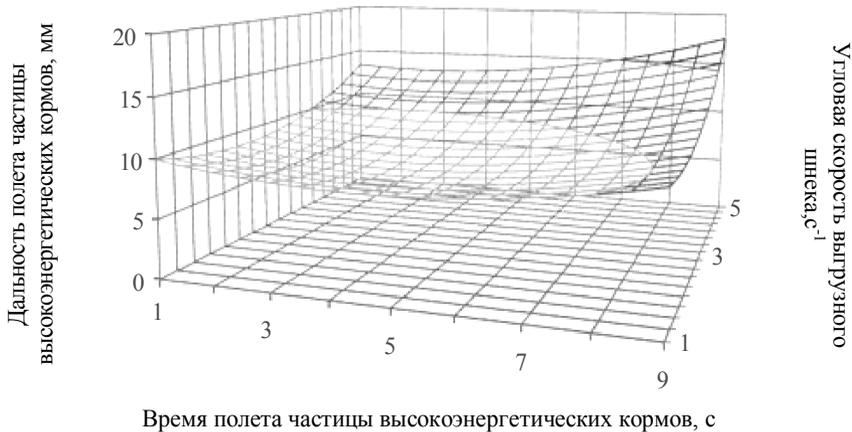


Рис. 2.3. Зависимость дальности полета частицы сыпучих высокоэнергетических кормов от времени полета и угловой скорости шнека

Анализ зависимости позволил установить, что при расчетном времени полета частиц сыпучих высокоэнергетических кормов (2–3 сек.), угловая скорость выгрузного шнека равна $\omega = 4,4 \text{ с}^{-1}$. При указанных параметрах дальность полета в слой стебельчатых кормов частицы многокомпонентной сыпучей высокоэнергетической добавки равна 8 мм.

2.2. Определение глубины проникновения сыпучих высокоэнергетических кормов в слой стебельчатых кормов, перемещающихся по ленте транспортера

Силосованные стебельчатые корма и сыпучая многокомпонентная высокоэнергетическая добавка поступают дозированно на выгрузной транспортер, на котором часть многокомпонентной высокоэнергетической добавки поглощает влагу из покрытого ими силосованного стебельчатого корма. Следовательно, возникает условие, при котором влажность этой части силосованного стебельчатого корма и многокомпонентной высокоэнергетической добавки выравниваются. Так как подача стебельчатых кормов на выгрузной транспортер осуществляется после воздействия на них активных рабочих органов, то между частицами образуются разрывы, что при одинаковой влажности кормов обеспечивает перемещение под действием силы тяжести частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки в нижние слои силосованного стебельчатого корма [37].

Таким образом, на выгрузном транспортере происходит смешивание кормов с различной плотностью и степенью измельчения путем хаотичного поглощения сыпучих частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки потоком силосованного стебельчатого корма. Чтобы определить глубину проникновения в слой стебельчатых кормов частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки, рассмотрим силы, действующие на частицу этого корма в период перемещения выгрузным транспортером кормораздатчика.

Перемещение частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки в слое стебельчатых кормов высотой l_8 на глубину $l'_ч$ осуществляется под действием силы тяжести, определить которую можно по формуле

$$F_{\text{тяж. ч.}} = \frac{f_{\text{доб}} m_k g l'_ч}{l_8}, \quad (2.40)$$

где m_k – масса частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$l'_ч$ – глубина перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки, м;

l_8 – высота слоя стебельчатых кормов на ленте транспортера, м;

$f_{\text{доб}}$ – коэффициент внутреннего трения частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки.

Частица многокомпонентной высокоэнергетической добавки будет перемещаться до момента противодействия слоя частиц стебельчатых кормов. Таким образом, перемещению частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки в слой стебельчатых кормов противодействует сила трения, величина которой зависит от вертикального давления частиц слоя стебельчатых кормов:

$$F_{\text{тр}} = P_{\text{д}} S, \quad (2.41)$$

где $P_{\text{д}}$ – вертикальное давление стебельчатых кормов на ленту транспортера, Па;

S – площадь стебельчатых кормов находящихся на ленте транспортера, м².

Величину вертикального давления можно определить по формуле [38]:

$$P_{\text{д}} = \rho_{\text{стеб}} l_{\delta} g k, \quad (2.42)$$

где $\rho_{\text{стеб}}$ – плотность стебельчатых кормов, кг/м³;

l_{δ} – высота слоя стебельчатых кормов, м;

k – коэффициент подвижности материала, зависящий от его физических свойств, $k = (1 - \sin j_0) / (1 + \sin j_0)$;

j_0 – угол естественного откоса корма в условиях покоя, град.

Тогда сила трения:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{стеб}} \rho_{\text{стеб}} l_{\delta} g k S, \quad (2.43)$$

где $f_{\text{стеб}}$ – коэффициент внутреннего трения стебельчатых кормов.

Полученные уравнения (2.40) и (2.43) позволяют определить глубину проникновения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки в слой стебельчатых кормов:

$$\frac{f_{\text{доб}} m_{\text{к}} g l'_{\text{ч}}}{l_{\delta}} - f_{\text{стеб}} \rho_{\text{стеб}} l_{\delta} g k S = 0. \quad (2.44)$$

Откуда

$$f_{\text{доб}} m_{\text{к}} g l'_{\text{ч}} = (f_{\text{стеб}} \rho_{\text{стеб}} l_{\delta} g k S) l_{\delta}. \quad (2.45)$$

$$l'_ч = \frac{f_{стеб} \rho_{стеб} l_{\delta}^2 k S}{f_{доб} m_k}. \quad (2.46)$$

Путем расчета установлено, что для частиц высокоэнергетических кормов массой $m_k = 0,0028$ кг (модуль помола 2,6 мм) глубина их проникновения в слой стебельчатых кормов высотой 150 и 250 мм, соответственно, равна 26 и 120 мм. Ограниченное перемещение в слой стебельчатых кормов частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки обеспечивает раздачу последних непосредственно на поверхность кормового стола животных. В данном случае при поедании кормосмеси нет потерь дорогих высокоэнергетических кормов.

2.3. Определение угла подъема винтовой линии шнека

В модуле для сыпучих высокоэнергетических кормов мобильно-го смесителя-раздатчика в качестве рабочих органов установлены шнеки, одним из важных параметров которых является угол подъема винтовой линии шнека. При транспортировке кормов за счет возникающих сил трения происходит деформация перемещаемого потока. Данный фактор не учитывался при определении угла подъема винтовой линии шнека, а, следовательно, эксплуатационные показатели шнека не соответствовали расчетным значениям.

Для определения угла подъема винтовой линии шнека рассмотрим винтовую поверхность шнека и действующие на нее силы при перемещении кормов (рис. 2.4).

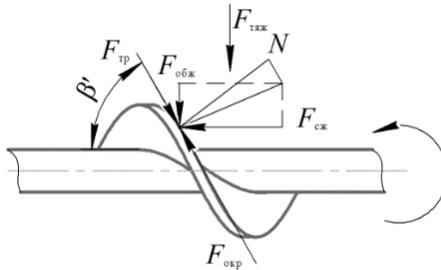


Рис. 2.4. Схема к определению угла подъема винтовой линии шнека

При вращении шнека на его виток действуют силы обжатия корма $F_{обж}$ и сжатия $F_{сж}$. Проекцией указанных сил является нормальная сила, которую можно выразить через угол трения и определить по формуле

$$N^2 = (F_{\text{обж}}^2 + F_{\text{сж}}^2) \cos \varphi_{\text{тр}}, \quad (2.47)$$

где $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения, град.

От нормальной силы возникает сила трения:

$$F_{\text{тр}} = N f_{\text{доб}}, \quad (2.48)$$

где $f_{\text{доб}}$ – коэффициент трения высокоэнергетических кормов по металлу, $f_{\text{доб}} = \text{tg } \varphi_{\text{тр}}$.

$$F_{\text{тр}} = \sqrt{F_{\text{обж}}^2 + F_{\text{сж}}^2} \sin \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.49)$$

При перемещении витком шнека корма сжимаются от действия сил $F_{\text{обж}}$ и $F_{\text{сж}}$ до величины $h_{\text{сж}}$. Относительное сжатие $\varepsilon_{\text{сж}}$ можно выразить через относительную деформацию:

$$\varepsilon_{\text{сж}} = \mu \frac{h_{\text{сж}}}{h}, \quad (2.50)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Силу сжатия можно определить по формуле

$$dF_{\text{сж}} = E \frac{h_{\text{сж}}}{h} dh_{\text{сж}} \text{tg} \beta^1. \quad (2.51)$$

$$F_{\text{сж}} = \frac{E}{h} \text{tg} \beta^1 \int_0^{h_{\text{сж}}} h_{\text{сж}} dh_{\text{сж}} = \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \text{tg} \beta^1. \quad (2.52)$$

Силу обжатия корма можно определить по формуле

$$\begin{aligned} dF_{\text{обж}} &= \varepsilon E dh_{\text{сж}} = \mu \frac{h_{\text{сж}}}{h} E dh_{\text{сж}}; \\ F_{\text{обж}} &= \mu \frac{E}{h} \int_0^{h_{\text{сж}}} h_{\text{сж}} dh_{\text{сж}} = \mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h}, \end{aligned} \quad (2.53)$$

где E – модуль деформации корма, Н/м².

Силу трения после определения составляющих определим по формуле

$$F_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \text{tg} \beta^1\right)^2 + \left(\mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h}\right)^2} \sin \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.54)$$

Величина окружного усилия зависит от частоты вращения шнека $\omega_{\text{ш}}$, массы частицы корма, находящейся на плоскости витка шнека $m_{\text{в}}$ и радиуса приложения окружного усилия $r_{\text{ш}} = (0,7 - 0,8) D_{\text{ш}} / 2$ [38]:

$$F_{\text{окр}} = r_{\text{ш}} m_{\text{в}} \omega_{\text{ш}}^2, \quad (2.55)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса корма, находящегося на плоскости витка шнека, кг.

Уравнение равновесия частицы корма будет иметь вид:

$$F_{\text{окр}} - F_{\text{тр}} = 0. \quad (2.56)$$

В уравнение (2.56) подставим составляющие сил и определим угол подъема витка шнека:

$$r_{\text{ш}} m_{\text{в}} \omega_{\text{ш}}^2 - \sqrt{\left(\frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \text{tg} \beta^1\right)^2 + \left(\mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h}\right)^2} \sin \varphi_{\text{тр}} = 0.$$

Откуда

$$\beta^1 = \arctg \left(\sqrt{\frac{r_{\text{ш}} m_{\text{в}} \omega_{\text{ш}}^2 - \mu \frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \sin \varphi_{\text{тр}}}{\frac{E}{2} \frac{h_{\text{сж}}^2}{h} \sin \varphi_{\text{тр}}}} \right). \quad (2.57)$$

Из формулы (2.57) видно, что угол подъема винтовой линии шнека зависит от физико-механических свойств кормов, геометрических параметров шнека и частоты его вращения. На основании полученной зависимости угла подъема винтовой линии шнека от его диаметра и угловой скорости определены параметры шнека, устанавливаемого в модуле для многокомпонентной высокоэнергетической добавки (рис. 2.5).

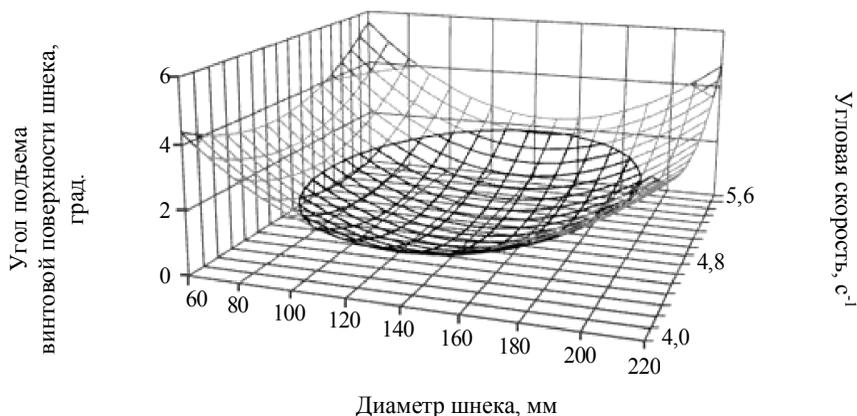


Рис. 2.5. Зависимость угла подъема винтовой линии шнека в зависимости от его диаметра и угловой скорости

Для диаметра шнека 140 мм и угловой скорости $4,4 \text{ с}^{-1}$ угол наклона винтовой линии равен 3 градуса относительно вертикальной плоскости.

2.4. Определение площади выгрузного окна смесителя-дозатора высокоэнергетических кормов

Во время раздачи кормов животным витки шнека перемещают корм к выгрузочному окну. Достигнув выгрузного окна, корм перемещается через отверстие на лоток и далее поступает на выгрузной транспортер или в кормушку животных. В общем виде площадь выгрузного окна можно определить по формуле [39]

$$S_{\text{ок}} = \frac{Q}{V_{\text{к}} \rho}, \quad (2.58)$$

где Q – заданная максимальная норма выдачи кормов животным в единицу времени, кг/с;

$V_{\text{к}}$ – скорость движения корма по витку шнека в рабочей зоне выгрузного окна, м/с;

ρ – плотность корма, кг/м³.

Заданную максимальную норму выдачи кормов животным в единицу времени можно определить по формуле

$$Q = \frac{V_{\text{раз}} m_{\text{к}}}{l_{\text{раз}}}, \quad (2.59)$$

где $V_{\text{раз}}$ – скорость движения агрегата при раздаче кормов, м/с;
 $m_{\text{к}}$ – масса скармливаемых кормов, кг;
 $l_{\text{разд}}$ – длина фронта кормления одного животного, м.

Скорость движения корма по витку шнека в рабочей зоне выгрузного окна можно определить по формуле

$$V_{\text{к}} = (R_{\text{ш}} - l_{\text{ш}}) \omega_{\text{ш}}, \quad (2.60)$$

где $R_{\text{ш}}$ – радиус шнека, м;

$l_{\text{ш}}$ – расстояние от частицы корма до края лопасти витка шнека в рабочей зоне выгрузного окна, м;

$\omega_{\text{ш}}$ – частота вращения шнека, с^{-1} .

В формуле (2.60) неизвестной величиной является расстояние $l_{\text{ш}}$. Для его определения рассмотрим силы, действующие на частицу корма в момент схода с витка шнека (рис. 2.6):

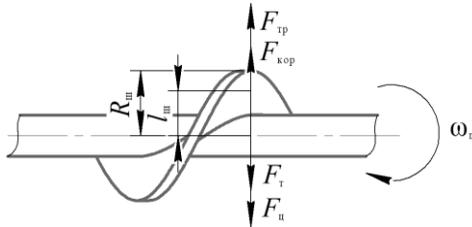


Рис. 2.6. Схема к определению площади выгрузного окна

– сила тяжести:

$$F_{\text{т}} = m_{\text{к}}g, \quad (2.61)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса частицы корма, находящегося на плоскости витка шнека, кг;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

– сила трения корма о плоскость витка шнека:

$$F_{\text{тр}} = f m_{\text{к}} g, \quad (2.62)$$

где f – коэффициент трения частицы корма о плоскость лопасти витка шнека;

– центробежная сила:

$$F_{\text{ц}} = m_{\text{к}} \omega_{\text{ш}}^2 l_{\text{ш}}, \quad (2.63)$$

где $\omega_{\text{ш}}$ – частота вращения витка шнека, с^{-1} ;

$l_{\text{ш}}$ – расстояние от оси вращения витка шнека до частицы, м;

– Кориолисова сила:

$$F_{\text{кор}} = 2m_{\text{к}} \omega_{\text{ш}} \frac{dl_{\text{ш}}}{dt_{\text{ш}}}, \quad (2.64)$$

где $dl_{\text{ш}} / dt_{\text{ш}}$ – скорость перемещения частицы в радиальном направлении, м/с;

$t_{\text{ш}}$ – время перемещения частицы корма витком шнека в радиальном направлении, с.

Сила трения частицы о виток шнека:

$$F_{\text{тр.л}} = f (F_{\text{кор}} + F_{\text{тр}}). \quad (2.65)$$

Тогда с учетом перечисленных сил получим дифференциальное уравнение относительного движения частицы корма:

$$-m_{\text{к}} \frac{d^2 l_{\text{ш}}}{d t_{\text{ш}}^2} + m_{\text{к}} \omega_{\text{ш}}^2 l_{\text{ш}} - f m_{\text{к}} g - f \left(2 m_{\text{к}} \omega_{\text{ш}} \frac{d l_{\text{ш}}}{d t_{\text{ш}}} + f m_{\text{к}} g \right) = 0. \quad (2.66)$$

После преобразования уравнение (2.66) имеет вид:

$$\frac{d^2 l_{\text{ш}}}{d t_{\text{ш}}^2} - \omega_{\text{ш}}^2 l_{\text{ш}} + 2 f \omega_{\text{ш}} \frac{d l_{\text{ш}}}{d t_{\text{ш}}} = f g. \quad (2.67)$$

Полученное выражение (2.67) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение этого уравнения равно сумме общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного.

Общее решение однородного дифференциального уравнения имеет вид:

$$l_{\text{ш1}} = C_1 e^{(f \omega_{\text{ш}} + \omega_{\text{ш}} \sqrt{f^2 + 1}) t_{\text{ш}}} + C_2 e^{(f \omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{ш}} \sqrt{f^2 + 1}) t_{\text{ш}}}, \quad (2.68)$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные.

Частное решение уравнения (2.67) ищем в подобии правой части $l_{\text{ш}} = C$, отсюда $\frac{d^2 l_{\text{ш}}}{dt_{\text{ш}}^2} = 0$ и $\frac{dl_{\text{ш}}}{dt_{\text{ш}}} = 0$. Тогда уравнение (2.67) будет иметь вид:

$$0 + 0 - \omega_{\text{ш}}^2 C = f \cdot g.$$

Откуда

$$C = - \frac{fg}{\omega_{\text{ш}}^2}.$$

Искомое решение уравнения (2.68) будет иметь вид:

$$l_{\text{ш}} = l_{\text{ш1}} + l_{\text{ш2}} = C_1 e^{(f \omega_{\text{ш}} + \omega_{\text{ш}} \sqrt{f^2 + 1}) t_{\text{ш}}} + C_2 e^{(f \omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{ш}} \sqrt{f^2 + 1}) t_{\text{ш}}} - \frac{fg}{\omega_{\text{ш}}^2}. \quad (2.69)$$

При начальных условиях $t_{\text{ш}} = 0$; $\frac{dl_{\text{ш}}}{dt_{\text{ш}}} = 0$; $l_{\text{ш}} = 0$, получим:

$$\begin{cases} l_{\text{ш0}} = C_1 + C_2 - \frac{fg}{\omega_{\text{ш}}^2} = 0 \\ l_{\text{ш0}} = C_1 \omega_{\text{ш}} (f + \sqrt{f^2 + 1}) + C_2 \omega_{\text{ш}} (f - \sqrt{f^2 + 1}) = 0. \end{cases} \quad (2.70)$$

Решая систему (2.70), получим:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{fg}{\omega_{\text{ш}}^2} \left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2 \sqrt{f^2 + 1}} \right) \\ C_2 = fg \frac{(f + \sqrt{f^2 + 1})}{2 \omega_{\text{ш}}^2 \sqrt{f^2 + 1}} \end{cases}. \quad (2.71)$$

Полученные значения (2.71) подставим в уравнение (2.69):

$$l_{ш} = \frac{fg}{\omega_{ш}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{t_{ш}\omega_{ш}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{t_{ш}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right]. \quad (2.72)$$

Подставив значения (2.72) в уравнение (2.59), определим необходимую площадь выгрузного окна:

$$S_{ок} = \frac{V_{раз} m_k}{\omega_{ш} \rho l_{раз} \left[R_{ш} - \left(C_1 e^{(f\omega_{ш} + \omega_{ш}\sqrt{f^2 + 1})t_{ш}} + C_2 e^{(f\omega_{ш} - \omega_{ш}\sqrt{f^2 + 1})t_{ш}} - \frac{fg}{\omega_{ш}^2} \right) \right]}. \quad (2.73)$$

Из формулы (2.73) видно, что размеры окна, предназначенного для выгрузки кормов с бункера, зависят от физико-механических свойств корма, параметров выгрузного шнека, нормы выдачи корма животным и времени перемещения частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки по витку шнека в момент ее поступления в выгрузное окно смесителя-дозатора. При известных параметрах смесителя-раздатчика и физико-механических свойствах корма неизвестной величиной является время поступления частицы многокомпонентной добавки в выгрузное окно смесителя-дозатора. Этот показатель можно определить по уравнению (2.39). Для шнека диаметром 140 мм, суточной норме скармливания кормов одним животным 4 кг и угловой скорости шнека $4,4 \text{ с}^{-1}$, площадь выгрузного окна равна 120 мм^2 . Для изменения нормы скармливания кормов выгрузное окно перекрывается подвижной заслонкой.

2.5. Определение мощности на привод горизонтально расположенных шнековых смешивающих рабочих органов

Для приготовления животным многокомпонентной высокоэнергетической добавки использованы горизонтально расположенные шнеки. Эти рабочие органы, перемещая кормовые компоненты в бункере, обеспечивают за счет взаимного пересечения кормовых потоков получение кормосмеси. Шнеки также обеспечивают транспортировку кормосмеси к выгрузному окну, что обуславливает установку этих

рабочих органов у днища бункера смесителя. С целью уменьшения громоздкости расчетов для определения потребной мощности на привод шнеков исследуем работу одного из них.

В бункере смесителя-дозатора высокоэнергетические корма движутся витками шнека с осевой и окружной скоростями. Величина скорости движения корма определяется зависимостью [40]:

$$V_{\text{ш}} = V_a \cdot \cos \beta' = \frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} \cos \beta', \quad (2.74)$$

где V_a – осевая скорость движения частицы корма по винтовой поверхности шнека, м/с;

$S_{\text{ш}}$ – шаг витков шнека, м;

$\omega_{\text{ш}}$ – частота вращения шнека, с⁻¹;

β' – угол подъема винтовой линии шнека, град.

Вследствие возникновения трения корма о витки шнека направленные скорости $V_{\text{ш}}$ отклонятся на угол трения $\varphi_{\text{тр}}$. С учетом этого угла осевую скорость движения частицы можно определить по формуле

$$V_a = \frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} (\cos^2 \beta' - f \sin \beta' \cdot \cos \beta'). \quad (2.75)$$

Величину окружной скорости можно определить из выражения:

$$V_{\text{ок}} = V_a \cdot \text{tg}(\beta' + \varphi_{\text{тр}}) = \frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} (\cos \beta' \cdot \sin \beta' + f \cos^2 \beta'). \quad (2.76)$$

Характер перемещения кормов в бункере различен, поэтому затраты энергии на выполняемый процесс будут зависеть от отдельных рабочих зон шнека. Так как шнек расположен у днища бункера, то часть энергии будет затрачиваться на преодоление силы трения корма по этой поверхности (рис. 2.7).

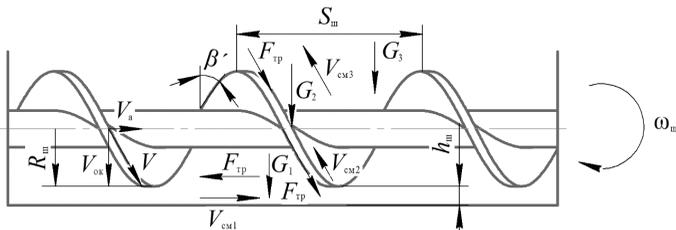


Рис. 2.7. Схема для определения мощности на привод шнека в режиме смешивания кормов

В общем виде часть затрачиваемой мощности можно определить по формуле

$$N_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} V_{\text{см1}}, \quad (2.77)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения корма о днище бункера, Н;

$V_{\text{см1}}$ – скорость перемещения корма вдоль оси днища бункера, м/с.

Сила трения $F_{\text{тр}}$ возникает под действием силы тяжести корма, находящегося в рабочей части шнека. Тогда

$$F_{\text{тр}} = G_1 f = m_{\text{кор}} g f, \quad (2.78)$$

где $m_{\text{кор}}$ – масса корма, перемещаемая шнеками по днищу бункера, кг, $m_{\text{кор}} = W_{\text{к}} \rho$;

$W_{\text{к}}$ – объем корма, м³;

ρ – плотность корма, кг/м³.

Так как шнек охвачен только нижней стенкой бункера на ограниченном участке, то объем перемещаемого корма можно определить по формуле

$$W_{\text{к}} = \frac{\pi R_{\text{ш}} h_{\text{ш}} \alpha_{\text{ш}}^{\circ} L_{\text{ш}}}{360^{\circ}}, \quad (2.79)$$

где $R_{\text{ш}}$ – радиус шнека, м;

$h_{\text{ш}}$ – зазор между витками шнека и нижней стенкой бункера, м;

$\alpha_{\text{ш}}^{\circ}$ – угол охвата шнека нижней стенкой бункера, град.;

$L_{\text{ш}}$ – длина шнека, м.

Скорость перемещения корма вдоль оси днища бункера $V_{\text{ш}}$ ввиду малого зазора между витками шнека и стенкой будет равна осевой скорости, определяемой по формуле (2.75). Тогда, подставив в формулу (2.77) значения (2.75), (2.78) и (2.79), определим $N_{\text{тр}}$:

$$N_{\text{тр}} = \frac{\pi R_{\text{ш}} h_{\text{ш}} \alpha_{\text{ш}}^{\circ} L_{\text{ш}} r}{360^{\circ}} g f \frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} (\cos^2 \beta' - f \cdot \sin \beta' \cos \beta'). \quad (2.80)$$

При вращении шнека кормовая масса перемещается по плоскостям его витков. На такое перемещение затрачивается энергия, величина

которой зависит от рабочей зоны шнека. Можно выделить часть поверхности шнека, охваченной днищем бункера и перемещающей нижние слои кормов. Для этой части шнека величину затрат энергии на преодоление трения о витки, в общем виде, можно определить по формуле

$$N_{\text{тр1}} = F_{\text{тр1}} V_{\text{см2}}, \quad (2.81)$$

где $F_{\text{тр}}^1$ – сила трения корма о поверхность витков шнека, охваченных днищем бункера, Н.

Силу трения $F_{\text{тр}}^1$ определим по формуле

$$F_{\text{тр1}} = G_2 f \cdot \cos \beta' = m_{\text{к1}} g f \cdot \cos \beta', \quad (2.82)$$

где $m_{\text{к1}}$ – масса корма в межвитковом пространстве, кг,

$$m_{\text{к1}} = W_1 \rho \frac{\alpha_{\text{ш}}^0}{360^0};$$

W_1 – объем корма в межвитковом пространстве, м³.

Действительный объем корма в межвитковом пространстве на длине, равной одному шагу, определим по формуле

$$W_1 = 0,785 (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2) S_{\text{ш}} K_V, \quad (2.83)$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр шнека, м;

$d_{\text{в}}$ – диаметр вала шнека, м;

K_V – коэффициент, учитывающий использование межвиткового пространства.

Тогда силу трения $F_{\text{тр1}}$ можно определить по формуле

$$F_{\text{тр1}} = 0,785 (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2) S_{\text{ш}} K_V \rho \frac{\alpha_{\text{ш}}^0}{360^0} g f \cdot \cos \beta'. \quad (2.84)$$

Так как витки шнека ограничены днищем бункера, то корма перемещаются преимущественно в осевом направлении. Тогда можно принять, что $V_{\text{см}}^2 = V_{\text{а}} \cdot \cos \alpha_{\text{ш}}$. Подставив в формулу (2.81) значения (2.75) и (2.84), определим затраты энергии на перемещение кормов по виткам шнека:

$$N_{\text{тр}2} = 0,785 \left(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2 \right) S_{\text{ш}}^2 K_{\nu} \rho \frac{\alpha_{\text{ш}}^0}{360^0} g f \cdot \cos \beta' \frac{\omega_{\text{ш}}}{60} \left(\cos^2 \beta' - f \cdot \sin \beta' \cdot \cos \beta' \right) \quad (2.85)$$

Для части шнека, не ограниченной днищем бункера, затраты энергии на перемещение кормов по виткам в общем виде можно определить по формуле

$$N_{\text{тр}3} = F_{\text{тр}2} V_{\text{см}3}, \quad (2.86)$$

где $F_{\text{тр}2}$ – сила трения, возникающая при перемещении корма по виткам шнека, не ограниченного днищем бункера, Н.

Силу трения, вызванную силой тяжести, можно определить по формуле

$$F_{\text{тр}2} = G_3 f = (W_{\delta} - W_{\text{ш}}) \rho g f, \quad (2.87)$$

где W_{δ} – объем бункера, м³;

$W_{\text{ш}}$ – объем шнека, м³.

Так как верхняя часть шнека не ограничена вспомогательными плоскостями, то скорость перемещения корма по виткам будет равна сумме осевой и окружной скоростей. В общем виде ее можно определить по формуле

$$V_{\text{см}3} = \sqrt{V_{\text{а}}^2 + V_{\text{ок}}^2}. \quad (2.88)$$

Подставим в формулу (2.88) значения скоростей из формул (2.75) и (2.76). Тогда результирующая скорость перемещения кормов:

$$V_{\text{см}3} = \sqrt{\left(\frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} \right)^2 (1 + f) \left[\cos^4 \beta' (\sin \beta' \cdot \cos \beta')^2 \right]}. \quad (2.89)$$

Подставив в уравнение (2.86) значения (2.87) и (2.89), получим:

$$N_{\text{тр}3} = (W_{\delta} - W_{\text{ш}}) \rho \cdot g \cdot f \sqrt{\left(\frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} \right)^2 (1 + f) \left[\cos^4 \beta' (\sin \beta' \cdot \cos \beta')^2 \right]}. \quad (2.90)$$

Суммировав затраты энергии на преодоление сил трения, возникающих при транспортировке кормов шнековыми рабочими органами, определим результирующую мощность на их привод:

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{тр}} + N_{\text{тр1}} + N_{\text{тр2}} + N_{\text{тр3}}$$

или, подставив соответствующие значения, получим:

$$N = \frac{\alpha_{\text{ш}}^{\circ}}{360^{\circ}} \cdot \rho g f \frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{30} (\cos^2 \beta' - f \sin \beta' \cos \beta') \times \\ \times \left[\pi R_{\text{ш}} h_{\text{ш}} L_{\text{ш}} + 0,785 (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в}}^2) S_{\text{ш}} K_{\nu} \right] + \\ + (W_{\delta} - W_{\text{ш}}) \rho g f \sqrt{\left(\frac{S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}}{60} \right)^2 (1+f) [\cos^4 \beta' + (\sin \beta' - \cos \beta')^2]} \quad (2.91)$$

Анализ формулы (2.91) показывает, что мощность на привод шнековых рабочих органов зависит от физико-механических свойств кормов и геометрических параметров бункера и шнеков. В соответствии с полученным уравнением построена графическая зависимость потребляемой мощности в зависимости от шага витков шнека и его угловой скорости (рис. 2.8).

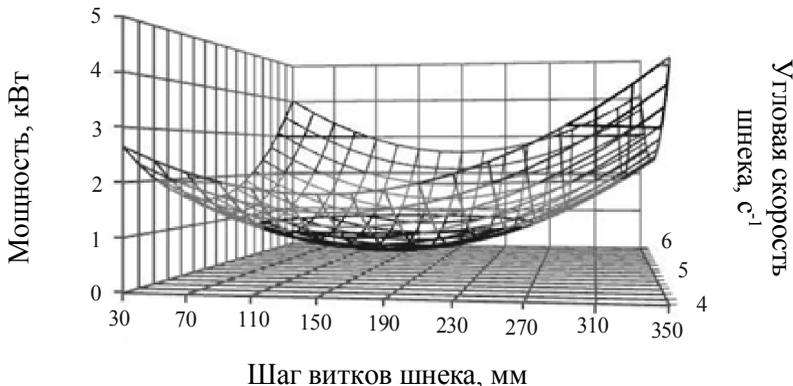


Рис. 2.8. Зависимость потребляемой мощности в зависимости от шага витков шнека и его угловой скорости

Анализ зависимости показывает, что наименьшая мощность на привод одного шнека, без затрат энергии на промежуточные передачи, равна 0,5 кВт при шаге шнека 190 мм и угловой скорости 5,1 с⁻¹.

2.6. Экспериментальные исследования по определению параметров модуля для приготовления многокомпонентной высокоэнергетической добавки

2.6.1. Программа исследований

При оптимизации конструкции смесителя кормов необходимо рассматривать большое число факторов. Поэтому для поиска оптимальных решений 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 может характеризоваться несколькими показателями – энергоемкостью процесса и качеством смешивания. Однако координаты экстремумов этих функций обычно не совпадают. Поэтому в качестве целевых функций была принята удельная энергоемкость процесса смешивания при неравномерности смеси, которая должна находиться в пределах зоотехнических требований.

Известно, что на процесс смешивания влияет ряд факторов: физико-механические свойства кормов, технологические условия проведения процесса смешивания и технические параметры смесителя.

Так как физико-механические свойства смешиваемых кормов достаточно изучены, то при проведении поисковых экспериментов учитываем уже известные показатели. На процесс смешивания также влияет и ряд параметров смесителя: диаметр рабочих органов, длина смесительной камеры, шаг шнека, угол установки витка шнека к плоскости, перпендикулярной оси вала, частота вращения шнека, время смешивания и другие. Многие из перечисленных технических параметров достаточно изучены и использованы при создании экспериментального смесителя. Недостаточно известно оптимальное значение частоты вращения шнека. Для определения оптимума этого параметра необходимо проведение экспериментальных исследований.

В соответствии с поисковыми исследованиями, проведенными в главе 2, время смешивания кормов для большинства смесителей периодического действия находится в пределах 8–12 минут. Однако приведенное значение времени смешивания кормов является

ориентировочным. Определение оптимума этого показателя для разрабатываемого модуля, содержащего шнековые рабочие органы, требует проведения экспериментальных исследований.

К технологическим факторам, влияющим на энергетическую эффективность работы смесителя кормов, относятся: неравномерность дозированной выдачи кормов, коэффициент заполнения бункера смесителя, соотношение компонентов кормов. Из перечисленных факторов неравномерность дозирования кормов не должна превышать 1,5 %, а соотношение смешиваемых компонентов – не ниже 0,01.

На основании анализа, проведенного в главе 2 и теоретических исследований в главе 3, установлено, что такие факторы как частота вращения смешивающих шнеков, время смешивания и коэффициент заполнения бункера для разбрасываемого смесителя изучены недостаточно.

В связи с этим необходимо произвести экспериментальные исследования для определения оптимальных параметров: частоты вращения смешивающих шнеков; времени смешивания кормовых компонентов; коэффициента заполнения бункера смесителя.

2.6.2. Методика исследований и обработка полученных значений

Для выделенных трех факторов использован центральный композиционный ортогональный план второго порядка 2^3 . Кодирование факторов проводим по известным формулам [41, 42]. Принятые и рассчитанные значения действительных (натуральных) значений приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исследуемые факторы в действительных значениях

Уровни	Факторы		
	Частота вращения шнеков, мин ⁻¹	Время смешивания кормовых компонентов, мин	Коэффициент заполнения емкости смесителя
Верхний	80	6	1
Нижний	40	4	0,6
Основной	60	5	0,8
Интервал варьирования	20	1	0,2

Основой эксперимента является матрица, содержащая условия проведения опытов в соответствии с планом. Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями, план проведения исследований рандомизируем во времени (табл. 2.2).

Таблица 2.2

План 2^3 проведения опытов

Номер опыта	Порядок реализации	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			U_{cp}
		X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	8	+	+	+	80	6	1	
2	2	+	+	-	80	6	0,6	
3	6	+	-	-	80	4	0,6	
4	1	+	-	+	80	4	1	
5	4	-	+	-	40	6	0,6	
6	3	-	-	-	40	4	0,6	
7	5	-	+	+	40	6	1	
8	7	-	-	+	40	4	1	

Адекватность полученных уравнений регрессии с экспериментальными данными проверяем по критерию Фишера. Если $F_{расч} < F_{табл}$, то уравнение регрессии адекватно описывает процесс.

План эксперимента реализован в горизонтальном смесителе периодического действия. Время смешивания изменялось от 1 до 8 минут. Частота вращения смешивающих шнеков изменялась от 20 до 90 мин⁻¹ при помощи сменных передач.

Установка (рис. 2.9) состоит из бункера 1 с расположенными внутри смесительными шнеками 2 и 3. Загрузка смесителя осуществляется через загрузочную горловину, а выгрузка – через разгрузочный канал 4.

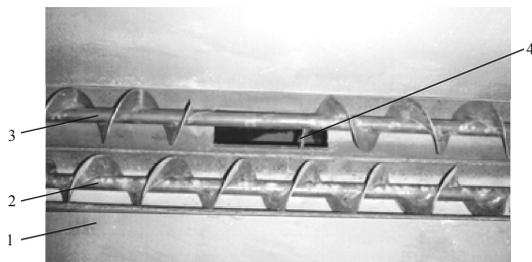


Рис. 2.9. Экспериментальная установка:
1 – бункер; 2, 3 – шнеки; 4 – разгрузочный канал

Процесс приготовления смеси следующий. В бункер смесителя загружаются зернофураж и микродобавка. Модуль помола продуктов смешивания – 1,8 мм, влажность – 14,2 %. Вращаясь, витки шнеков перемешивают компоненты смеси между собой. Вследствие встречных кормовых потоков, создаваемых витками шнека, происходит равномерное распределение частиц компонентов между собой. Выгрузка смеси, после взятия контрольных проб, производилась через разгрузочный канал смесителя.

В ходе проведения эксперимента коэффициент заполнения смесителя определяется как отношение объема смеси, находящейся в смесителе, к объему емкости. Коэффициент заполнения выразится соотношением:

$$k_3 = \frac{V_1}{V_2}, \quad (2.92)$$

где V_1 – объем поперечного сечения смеси, м³;

V_2 – объем поперечного сечения емкости смесителя, м³.

Оценка качества смешивания определяется различными методами. Известны радиометрический, фотографический, кондуктометрический, химический, оптический и другие методы. В исследованиях используется ситовой анализ определения неравномерности смешивания с использованием контрольного компонента. Его сущность заключается в следующем. При загрузке кормов в смеситель одновременно добавляют контрольный компонент. В его качестве можно использовать семена зерновых культур, близкие по своим физико-механическим свойствам к смешиваемым компонентам, но отличающиеся по цвету, форме и другим признакам. По окончании процесса смешивания из смеси отбираются пробы, из которых просеиванием, промыванием на ситах или отбором выделяются смеси. По их количеству в пробах определяется степень неоднородности.

При отборе контролируемых проб следует соблюдать условие равенства отбора проб в разных точках бункера. Равномерность распределения компонентов смеси можно оценить, используя коэффициент неоднородности смеси, который определяется по результатам экспериментального определения количества контрольного компонента в пробах:

$$K = \frac{I}{y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1}}, \quad (2.93)$$

где $y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ – среднее случайной выборки n проб.

При оценке качества смеси важно определить массу пробы. Ю. И. Макаров рекомендует формулу для определения массы отбираемой пробы:

$$C_{\min} = \frac{1,26 \cdot 10^4 \cdot d_{\kappa} \cdot \rho_{\kappa}}{C_{\kappa}}, \quad (2.94)$$

где d_{κ} – среднеарифметический размер контрольного компонента, см;
 ρ_{κ} – насыщенная плотность контрольного компонента г/см³;
 C_{κ} – концентрация контрольного компонента в смеси, %.

Тогда требуемую концентрацию контрольного компонента определим по формуле

$$C_{\min} = \frac{1,26 \cdot 10^4 \cdot d_{\kappa} \cdot \rho_{\kappa}}{C_{\kappa}} = \frac{1,26 \cdot 10^4 \cdot 0,65^3 \cdot 0,67}{1500} = 1,5 \%. \quad (2.95)$$

Таким образом, в смешиваемую зерновую массу необходимо вводить 1,5 % контрольного компонента от общего количества и отобрать контрольные пробы массой 1,5 кг.

Обработка результатов эксперимента проводилась в следующей последовательности. Для крутого восхождения используем линейное уравнение регрессии, которое будет иметь вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (2.96)$$

где y – параметр оптимизации процесса смешивания;
 b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Значение коэффициентов регрессии находим по формуле

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i, \quad (2.97)$$

где N – число опытов в матрице планирования;
 x_i – кодированное значение (± 1) i -го фактора;
 y_i – значения параметра оптимизации в i -м опыте.

В соответствии с формулой (2.97) вычислим значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = \frac{2,71+2,48+2,51+2,45+3,21+2,32+2,95+3,44}{8} = 2,76;$$

$$b_1 = \frac{2,71+2,48-2,51-2,45-3,21+2,32-2,95+3,44}{8} = -0,02;$$

$$b_2 = \frac{-2,71+2,48-2,51+2,45+3,21-2,32-2,95+3,44}{8} = 0,14;$$

$$b_3 = \frac{2,71-2,48-2,51-2,45+3,21-2,32+2,95+3,44}{8} = 0,32. \quad (2.98)$$

Рассчитав коэффициенты регрессии, получим следующее уравнение регрессии:

$$y = 2,76 - 0,02x_1 + 0,14x_2 + 0,32x_3. \quad (2.99)$$

Дисперсию S^2 параметра оптимизации вычисляем по результатам трех опытов в центре плана. Расчет дисперсии приведен в табл. 2.3.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии находим дисперсию коэффициентов:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S^2}{N m} = \frac{0,003}{8 \times 3} = 0,000125, \quad (2.100)$$

где m – число повторностей, $m = 3$.

Таблица 2.3

Расчет дисперсий S^2

Номер опыта	y_i	\bar{y}_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
9	2,85		0,04	0,0016	

Номер опыта	y_i	\bar{y}_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
10	2,84	2,81	0,03	0,0009	$S^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - l} =$ $= \frac{0,0061}{3 - 1} = 0,003$
11	2,75		-0,06	0,0036	

Определим доверительный интервал:

$$\Delta b_i = \pm t \times S_{b_i} = \pm 2,12 \times 0,000125 = \pm 0,000265, \quad (2.101)$$

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

В полученном линейном уравнении регрессии (2.99) все коэффициенты больше доверительного интервала, поэтому все они являются статистически значимыми. Для проверки гипотезы адекватности модели представленным уравнением (2.99) находим дисперсию адекватности:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{m - 1}, \quad (2.102)$$

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

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

Рассчитав значения параметра оптимизации, в уравнение регрессии подставляем кодированные значения факторов:

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 &= 2,76 - 0,02(1) + 0,14(-1) + 0,32(1) = 2,92; \\ \bar{y}_2 &= 2,76 - 0,02(1) + 0,14(1) + 0,32(-1) = 2,56. \end{aligned} \quad (2.103)$$

Остальные значения параметров оптимизации приведены в табл. 2.4.

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

Номер опыта	y_i	\bar{y}_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
1	2,71	2,92	-0,21	0,044	0,022
2	2,48	2,56	-0,08	0,0064	0,0032
3	2,51	2,32	0,1	0,361	0,018
4	2,45	2,60	-0,15	0,0225	0,0112
5	3,21	3,24	-0,03	0,0009	0,00045
6	2,32	2,28	0,04	0,0016	0,0008
7	2,95	2,9	-0,01	0,0001	0,00005
8	3,44	3,2	0,24	0,0576	0,0288
				$\sum = 0,1692$	$\sum = 0,0845$

Однородность ряда дисперсий S_y^2 проверяем по критерию Кохрена σ :

$$\sigma = \frac{S_{y_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_y^2} = \frac{0,0288}{0,0845} = 0,3408. \quad (2.104)$$

Табличное значение σ_T при 5 %-ном уровне значимости, при $N=8$ и $m-1 = 2$, равно $\sigma_T = 0,5157$. Так как расчетное значение меньше табличного, то гипотеза однородности дисперсий принимается.

Дисперсию адекватности определим по выражению:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - (K + 1)} = \frac{0,1692}{8 - (3 + 1)} = 0,0423, \quad (2.105)$$

где K – число факторов, $K = 3$.

Проверку гипотезы адекватности модели производим по F -критерию Фишера. Для этого находим расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^0} = \frac{0,0423}{0,069} = 0,613. \quad (2.106)$$

При 5 %-ном уровне значимости и числах свободы, для числителя $f_1 = 4$ и знаменателя $f_2 = 2$, табличное значение F -критерия равно $F_T = 19,3$. Так как $F_p < F_T$, то модель, представленная уравнением (2.99), адекватна.

Убедившись в адекватности уравнения (2.99), переходим к крутому восхождению. Центральный композиционный ротационный 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 приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Матрица планирования и результаты экспериментов

Номер опыта	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			U_{cp} , кВт ч/т
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	+	+	+	80	6	1	2,71
2	+	+	–	80	6	0,6	2,48
3	+	–	–	80	4	0,6	2,51
4	+	–	+	80	4	1	2,45
5	–	+	–	40	6	0,6	3,21
6	–	–	–	40	4	0,6	2,32
7	–	+	+	40	6	1	2,95
8	–	–	+	40	4	1	3,44
9	+1,682	0	0	90	5	0,8	3,72
10	-1,682	0	0	30	5	0,8	3,69
11	0	+1,682	0	60	7	0,8	3,21
12	0	-1,682	0	60	2	0,8	1,86
13	0	0	+1,682	60	5	1	2,92
14	0	0	-1,682	60	5	0,2	1,56
15	0	0	0	60	5	0,8	2,85
16	0	0	0	60	5	0,8	2,84
17	0	0	0	60	5	0,8	2,85
18	0	0	0	60	5	0,8	2,83
19	0	0	0	60	5	0,8	2,75
20	0	0	0	60	5	0,8	2,82

Для крутого восхождения используем линейное уравнение регрессии вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (2.107)$$

Коэффициенты регрессии при ротабельном планировании рассчитываем по формулам:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (K + 2) \sum_{i=1}^N y_i - 2\lambda C \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ij} \right] = \\ &= 0,16666 \sum_{i=1}^{20} y_i - 0,05694 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij} = \\ &= 0,16666 \cdot 41,88 - 0,05694 \cdot 114,18 = 0,478; \\ b_1 &= \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} y_i = 0,07322 \cdot (-1,719) = -0,1258; \\ b_2 &= \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N x_{2j} y_i = 0,07322 \cdot 2,9 = 0,213; \\ b_3 &= \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N x_{3j} y_i = 0,07322 \cdot 3,32 = 0,243; \\ b_{12} &= \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} y_i = 0,125 \cdot (-0,12) = -0,0148; \\ b_{13} &= \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{3j} y_i = 0,125 \cdot (-0,69) = -0,086; \\ b_{23} &= \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{2j} x_{3j} y_i = 0,125 \cdot (-1,09) = -0,136; \\ b_{11} &= \frac{A}{N} \{ C^2 [(K + 2)\lambda - K] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + C^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda C \sum_{i=1}^N y_i \} = \\ &= 0,06254 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 y_j + 0,00695 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 y_j - 0,05694 \sum_{i=1}^N y_i = \\ &= 0,06254 \cdot 43,03 + 0,00695 \cdot 114,18 - 0,05694 \cdot 41,88 = 1,10; \\ b_{22} &= 0,06254 \cdot 36,41 + 0,00695 \cdot 114,18 - 0,05694 \cdot 41,88 = 0,686; \\ b_{33} &= 0,06254 \cdot 34,74 + 0,00695 \cdot 114,18 - 0,05694 \cdot 41,88 = 0,582, \end{aligned} \quad (2.108)$$

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

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. 2.6.

Таблица 2.6

Расчет дисперсий S_y^2

Номер опыта	y_i	\bar{y}_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
15	2,85	2,82	0,03	0,0009	$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1} = \frac{0,0072}{5} = 0,0014$
16	2,84		0,02	0,0004	
17	2,85		0,03	0,0009	
18	2,83		0,01	0,0001	
19	2,75		-0,07	0,0049	
20	2,82		0	0	

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, определим по формулам:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda(K+2)}{N} S_y^2 = 0,16666 \cdot S_y^2 = 0,0002;$$

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

$$S_{l_i}^2 = \frac{C^2}{N\lambda} S_y^2 = 0,125 \cdot S_y^2 = 0,0001;$$

$$S_{ii}^2 = \frac{AC^2[(K+1)\lambda - (K-1)]}{N} S_y^2 = 0,0695 \cdot S_y^2 = 0,001.$$

Определим доверительный интервал:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm t \times S_{b_j} = \pm 2,57 \cdot 0,0141 = \pm 0,0362; \\ \Delta b_i &= \pm 2,57 \cdot 0,01 = \pm 0,0257; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 2,57 \cdot 0,01 = \pm 0,0257, \end{aligned} \quad (2.110)$$

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

Все коэффициенты, кроме b_{12} , больше рассчитанных значений доверительного интервала, поэтому их можно считать статистически значимыми. Тогда уравнение регрессии (2.107) примет вид:

$$\begin{aligned} y &= 0,478 - 0,1258 x_1 + 0,213 x_2 + 0,243 x_3 - \\ &- 0,086 x_1 x_3 - 0,136 x_2 x_3 + 1,10 x_1^2 + 0,686 x_2^2 + 0,582 x_3^2. \end{aligned} \quad (2.111)$$

Для проверки гипотезы адекватности модели представленным уравнением (2.109) находим дисперсию адекватности:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{m - 1}, \quad (2.112)$$

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

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

Значения параметров оптимизации приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

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	2,71	3,93	-1,22	1,49	0,75
2	2,48	3,89	-1,41	1,99	0,99

Номер опыта	y_i	\bar{y}_i	$y_i - \bar{y}_i$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	S^2
3	2,51	3,19	-0,68	0,46	0,23
4	2,45	3,77	-1,33	1,76	0,88
5	3,21	3,97	-0,76	0,58	0,29
6	2,32	3,27	-0,95	0,90	0,45
7	2,95	4,35	-1,4	1,96	0,98
8	3,44	4,2	-0,76	0,58	0,29
				$\Sigma=9,72$	$\Sigma S_y^2=4,86$

Однородность ряда дисперсий S_y^2 , проверяем по критерию Кохрена σ :

$$\sigma = \frac{S_{y_{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_y^2} = \frac{0,99}{4,86} = 0,203. \quad (2.113)$$

Табличное значение σ_T при 5 %-ном уровне значимости, при $N=8$ и $m-1 = 2$, равно $\sigma_T = 0,5157$. Так как расчетное значение меньше табличного, то гипотеза однородности дисперсий принимается.

Дисперсию адекватности определим по выражению

$$S_{ал}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - (K + 1)} = \frac{0,1692}{8 - (3 + 1)} = 0,0423, \quad (2.114)$$

где K – число факторов, $K = 3$.

Проверку гипотезы адекватности модели производим по F -критерию Фишера. Для этого находим расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{S_{ал}^2}{S^0} = \frac{2,43}{4,86} = 0,5. \quad (2.115)$$

При 5 %-ном уровне значимости и числах свободы, для числителя $f_1=4$ и знаменателя $f_2=2$, табличное значение F -критерия равно = 19,3. Так как $F_p < F_T$, то модель, представленная уравнением (2.111), адекватна.

Определяем координаты центра поверхности дифференцированием уравнения (2.111):

$$\frac{\partial y}{\partial X_1} = -0,1255 - 0,086 X_3 + 2 \cdot 1,1 X_1 = 0;$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_2} = +0,213 - 0,136 X_3 + 2 \cdot 0,686 X_2 = 0;$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_3} = +0,243 - 0,086 X_1 - 0,136 X_2 + 2 \cdot 0,582 X_3 = 0. \quad (2.116)$$

Из уравнений (2.116) определим X_1, X_2 и X_3 :

$$X_1 = \frac{0,1255 + 0,086 X_3}{2,2};$$

$$X_2 = \frac{0,136 X_3 - 0,213}{1,372};$$

$$0,243 - 0,086 X_1 - 0,136 X_2 + 2 \cdot 0,582 X_3 = 0.$$

Откуда

$$X_1 = 0,039 X_3 - 0,057;$$

$$X_2 = 0,0099 X_3 - 0,155;$$

$$X_3 = \frac{0,243 + 0,086 X_1 + 0,136 X_2}{1,164}.$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$X_3 = \frac{0,2716}{-1,164} = -0,233; \quad X_2 = -0,1573; \quad X_1 = -0,066;$$

$$0,243 - 0,086(0,039 X_3 - 0,057) - 0,136 (0,099 X_3 - 0,155) + \\ + 1,164 X_3 = 0;$$

$$0,2691 - 0,003354 X_1 - 0,0135 X_2 + 1,164 X_3 = 0.$$

Подставив в уравнение (2.111) значения X_1, X_2 и X_3 , определим значение удельной энергоемкости:

$$\begin{aligned}
 y_{\min} &= 0,478 - 0,1258(-0,066) + 0,213(-0,157) + \\
 &+ 0,243(-0,233) - \\
 &- 0,086(-0,066)(-0,2333) - 0,136(-0,157)(-0,2333) + (2.117) \\
 &+ 1,10(-0,066)^2 + \\
 &+ 0,686(-0,1573)^2 + 0,582(-0,2333)^2 = 0,449 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}.
 \end{aligned}$$

Для анализа полученного уравнения регрессии составлена программа, в соответствии с которой построены поверхности отклика. Из зависимости удельной энергоёмкости от коэффициента заполнения бункера и времени смешивания кормов следует, что минимальная энергоёмкость процесса смешивания кормов 0,5–0,7 кВт·ч/т обеспечивается при коэффициенте заполнения бункера 0,8, времени смешивания кормов 5 мин (рис. 2.10).

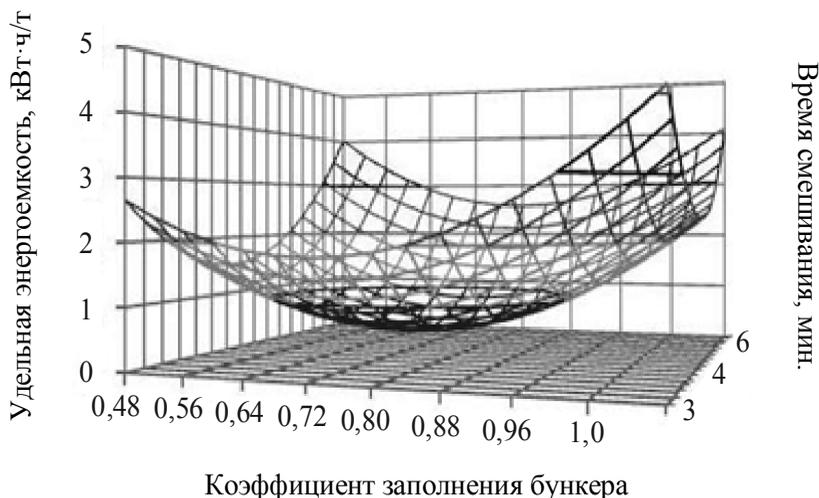
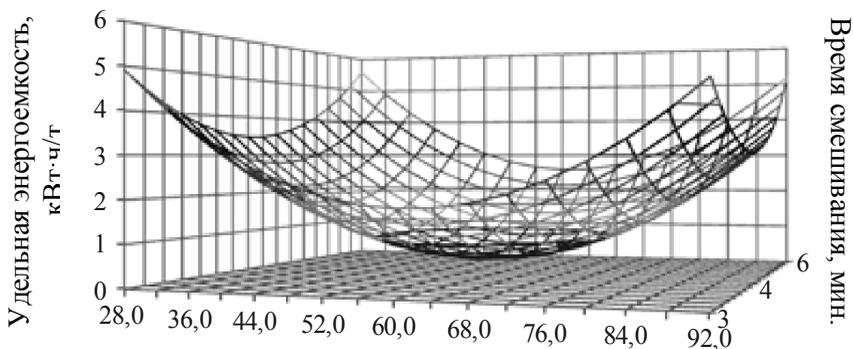


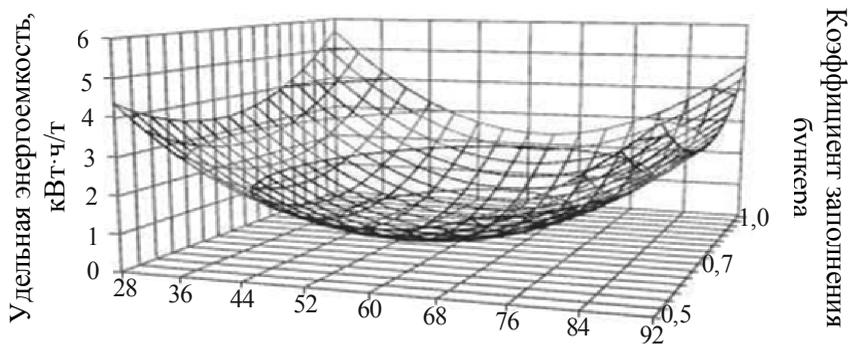
Рис. 2.10. Зависимость удельной энергоёмкости от коэффициента заполнения бункера и времени смешивания кормов

Из зависимости удельной энергоёмкости от частоты вращения смешивающих шнеков и времени смешивания кормов установлено, что минимальная энергоёмкость процесса образования кормосмеси 0,5–0,7 кВт·ч/т равна при частоте вращения смешивающих шнеков, находящейся в пределах 52–65 мин⁻¹ (рис. 2.11).



Частота вращения смешивающих шнеков, об./мин.
 Рис. 2.11. Зависимость удельной энергоёмкости от частоты вращения смешивающих шнеков и времени смешивания кормов

Установлено, что минимальная удельная энергоёмкость процесса смешивания 0,5 кВт·ч/т получена при частоте вращения шнеков $n = 60 \text{ мин}^{-1}$ и допустимой неравномерности смешивания 12 % (рис. 2.12).



Частота вращения смешивающих шнеков, об./мин.
 Рис. 2.12. Зависимость удельной энергоёмкости от частоты вращения смешивающих шнеков и коэффициента заполнения бункера

С увеличением частоты вращения шнеков больше указанного значения возрастает скорость циркулирующих потоков кормов и изменяется характер дисперсии распределения смешивающих компонентов. В этом случае величина инерционных и гравитационных

сил снижается, а, следовательно, группы смежных частиц кормов только перемещаются витками шнека из одного места в другое, что ведет к росту затрат энергии на процесс смешивания.

Исследования показали, что по мере заполнения бункера кормами коэффициент неравномерности смешивания уменьшается. Наименьшее значение рассматриваемого параметра не превышает 9,5 % при полном заполнении бункера и времени смешивания, равном 5 мин, что объясняется возникновением большего количества циркулирующих потоков кормов.

По результатам экспериментально-теоретических исследований определены оптимальные конструктивно-технологические параметры модуля для смешивания высокоэнергетических кормов: угол подъема винтовой линии шнека относительно вертикальной плоскости равен 3 градусам, диаметр шнека – 140 мм, площадь окна для выгрузки кормов из бункера – 120 мм², время смешивания – 5 мин, угловая скорость смешивающих шнеков – 4,4 с⁻¹. При этих параметрах удельная энергоёмкость процесса равна 0,5 кВт·ч/т, коэффициент неравномерности смешивания – 9,4 %, что соответствует зоотехническим требованиям. Для проверки полученных расчетным путем данных проведем анализ полученных результатов экспериментальных исследований.

2.6.3. Анализ результатов экспериментальных исследований

Данные, полученные в результате исследований экспериментального смесителя кормов, позволяют определить оптимальные значения выделенных факторов. Интерпретировать влияние параметров на процесс смешивания проще, если представить их зависимость совокупностью параметров от каждого фактора в отдельности. Полученные графические зависимости позволяют наглядно проследить влияние факторов на процесс смешивания.

На основании экспериментальных данных построены графические зависимости удельной энергоёмкости, производительности и потребляемой мощности от числа оборотов шнеков. Для анализа качества смешивания построены зависимости коэффициента смешивания от времени смешивания и коэффициента заполнения бункера смесителя кормов.

На рис. 2.13 представлена графическая зависимость удельной энергоёмкости, производительности и мощности от частоты вращения шнеков, установленных в бункере модуля. Из опытов следует,

что удельная энергоёмкость процесса смешивания уменьшается в диапазоне частоты вращения смешивающих шнеков от 40 до 60 мин⁻¹. Кривая энергоёмкости монотонно убывает в исследуемом диапазоне вращения смешивающих шнеков. В то же время при частоте вращения шнеков от 60 до 80 мин⁻¹ вид кривой меняется – удельные затраты энергии при смешивании кормовых компонентов возрастают.

Полученные результаты позволяют определить оптимум удельных затрат энергии при различных частотах шнеков. Минимальная удельная энергоёмкость процесса смешивания 0,52 кВт ч/т получена при частоте вращения шнеков $n = 60$ мин⁻¹. Результаты эксперимента показывают, что увеличение частоты вращения шнеков больше указанного значения не приводит к снижению затрат энергии на процесс смешивания. При смешивании происходит рассредоточение объемов меньшего компонента в большем. Непрерывное движение продуктов предполагает: чем сильнее они рассредоточились, тем большим будет рассеивание значений времени пребывания частиц в смешиваемого кормового компонента. В результате происходит процесс перераспределения частиц на уровне микрообъемов. С увеличением частоты вращения шнеков изменяется характер дисперсии распределения смешивающих компонентов – в движение вовлекаются слои кормов, что ведет к росту затрат энергии на процесс смешивания.

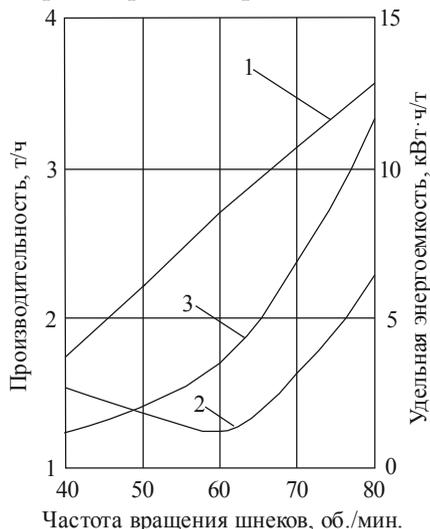


Рис. 2.13. Зависимость производительности (1), удельной энергоёмкости (2) и мощности (3) от частоты вращения шнеков

С увеличением частоты вращения смешивающих шнеков скорость циркулирующих потоков возрастает. Результаты исследований показали, что при допустимой неравномерности смешивания – 12 %, время смешивания, с увеличением скорости потоков, уменьшается. В результате производительность при указанной допустимой неравномерности смешивания возрастает.

Качественный показатель процесса смешивания определяли по коэффициенту неравномерности смешивания. На рис. 2.14 представлены графические зависимости коэффициента неравномерности смешивания в зависимости от времени смешивания и коэффициента заполнения бункера.

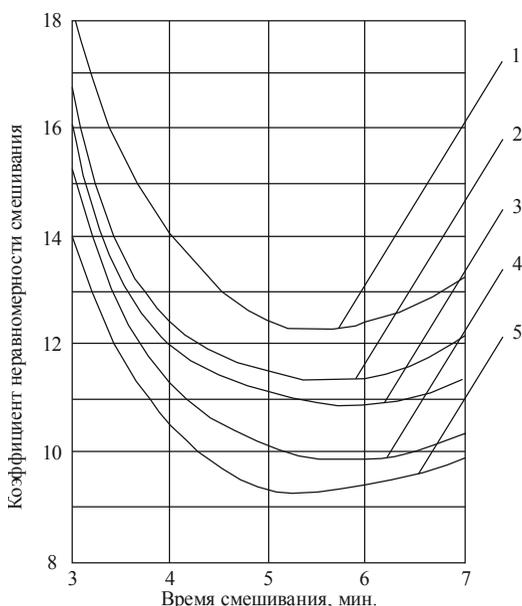


Рис. 2.14. Зависимость коэффициента неравномерности смешивания от времени смешивания при коэффициенте заполнения бункера, $K=0,2$ (зависимость 1), $K=0,4$ (зависимость 2), $K=0,6$ (зависимость 3), $K=0,8$ (зависимость 4), $K=1$ (зависимость 5)

Зависимости изменения коэффициента неравномерности смешивания от указанных параметров свидетельствует о влиянии времени смешивания на указанный параметр. Если условно время смешивания разделить на два этапа, то из графических зависимостей видно, что первоначально коэффициент неравномерности

смешивания интенсивно уменьшается, а в дальнейшем снижение указанного параметра замедляется. В экспериментальном смесителе интенсивный процесс смешивания продолжается в течение 3–5 мин. С увеличением времени смешивания более 5 мин смешивание кормовых компонентов замедляется.

Вид графической зависимости коэффициента неравномерности смешивания от коэффициента заполнения бункера различен. По мере заполнения бункера коэффициент неравномерности смешивания уменьшается. Наименьшее значение рассматриваемого параметра не превышает 9,5 % при полном заполнении бункера и времени смешивания, равном 5–6 мин. С увеличением времени смешивания более 6 мин неравномерность смешивания возрастает.

Улучшение качества смешивания с увеличением коэффициента заполнения бункера объясняется возникновением большего количества циркулирующих потоков. В результате время пребывания частиц во вновь образуемых потоках отличается от времени в уже имеющихся. Разность скоростей частиц приводит к более активному внедрению смешиваемых компонентов друг в друга.

С уменьшением заполнения бункера скорость частиц смешиваемых кормовых компонентов выравнивается. В результате образуются циркулирующие потоки с одинаковыми скоростями, а, следовательно, коэффициент неравномерности смешивания возрастает.

Полученные в результате проведения эксперимента данные позволяют определить оптимальные значения исследуемых факторов для смесителя высокоэнергетических кормов рассматриваемой конструкции модуля. Наименьшая удельная энергоёмкость процесса смешивания 0,52 кВт ч/т получена при частоте вращения шнеков 60 мин⁻¹ и времени смешивания, равном 5 мин. В табл. 2.8 выделены оптимальные параметры рассмотренных факторов.

Таблица 2.8

Оптимальные значения параметров модуля смесителя-дозатора высокоэнергетических кормов

Время смешивания, мин	Частота вращения шнеков, мин ⁻¹	Удельная энергоёмкость процесса смешивания, кВт ч/т	Коэффициент неравномерности смешивания
5	60	0,52	9,4

Полученные значения параметров смесителя соответствуют расчетным.

На основании теоретических исследований и многофакторного эксперимента изготовлен мобильный смеситель-раздатчик кормов (рис. 2.15).

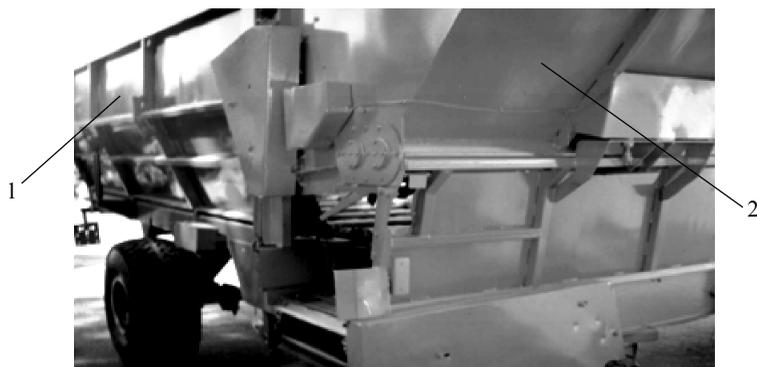


Рис. 2.15. Общий вид мобильного смесителя-раздатчика кормов:
1 – бункер для стебельчатых кормов;
2 – модуль для многокомпонентной высокоэнергетической добавки

Машина состоит из колесной базы, на которой закреплен бункер для стебельчатых кормов. Внутри его, по днищу, движется выгрузной цепочно-планчатый транспортер, перемещающий стебельчатые корма к выгрузному окну. Дозирование стебельчатых кормов осуществляется установленными перед выгрузным окном отбойными битерами.

Транспортировка, смешивание и выдача животным многокомпонентной высокоэнергетической добавки осуществляются в модуле, расположенном с противоположной стороны бункера стебельчатых кормов. Модуль для многокомпонентной высокоэнергетической добавки представляет собой бункер, внутри которого, в одной горизонтальной плоскости, расположены два шнека. Эти технические элементы смесителя выполняют две технологические операции – смешивание высокоэнергетических кормовых компонентов и подачу кормосмеси навстречу находящимся во взвешенном состоянии стебельчатым кормам.

При раздаче кормов животным дозированные стебельчатые корма поступают с бункера на поперечный выгрузной транспортер (рис. 2.16). Второе окно выполнено в рабочей зоне витков шнека, около боковой стенки бункера.



Рис. 2.16. Рабочий процесс подачи кормов на выгрузной транспортер:
 1 – подача на выгрузной транспортер стебельчатых кормов; 2 – подача на выгрузной транспортер многокомпонентной высокоэнергетической добавки

Высокоэнергетические корма через данное выгрузное окно (рис. 2.17), по направляющему лотку, поступают на поток сходящих с выгрузного транспортера стебельчатых кормов. Дозирование потока кормов через данное окно осуществляется регулировочной заслонкой.



Рис. 2.17. Выгрузное окно подачи многокомпонентной высокоэнергетической добавки в поток стебельчатых кормов:
 1 – выгрузной транспортер; 2 – лоток для выгрузки многокомпонентной высокоэнергетической добавки на кормосмесь

Новизна конструкции смесителя-раздатчика кормов и его технических элементов защищена патентами Республики Беларусь [53, 54].

2.7. Заключение

Теоретическими исследованиями получено уравнение (2.39) для определения дальности проникновения во взвешенном состоянии взаимопересекающихся потоков кормов, позволившее определить, что при расчетном времени полета частиц высокоэнергетических кормов (2–3 сек) угловая скорость выгрузного шнека равна $\omega = 4,4 \text{ с}^{-1}$. При указанных параметрах дальность полета в слой стебельчатых кормов частицы многокомпонентной высокоэнергетической добавки равна 8 мм.

Уравнением (2.46) для определения глубины взаимного проникновения различных потоков кормов при перемещении их выгрузным транспортером установлено, что при постоянном значении массы частицы сыпучей многокомпонентной высокоэнергетической добавки глубина ее проникновения в слой стебельчатых кормов высотой 150 и 250 мм, соответственно, равна 26 и 120 мм. Таким образом, формирование кормосмеси из силосованных стебельчатых кормов и многокомпонентной высокоэнергетической добавки происходит на ленте выгрузного транспортера без дополнительных механических устройств. Ограниченное перемещение частиц многокомпонентной высокоэнергетической добавки в слой стебельчатых кормов обеспечивает раздачу последних непосредственно на поверхность кормового стола животных. В данном случае, при поедании кормосмеси, нет потерь дорогих высокоэнергетических кормов.

На основании аналитической зависимости (2.73) угла подъема винтовой линии шнека от его диаметра и угловой скорости определены параметры шнека – для шнека диаметром 140 мм и угловой скоростью $4,4 \text{ с}^{-1}$ угол подъема винтовой линии относительно вертикальной оси равен трем градусам.

Для шнека диаметром 140 мм суточной норме скармливания кормосмеси одним животным, равном 4 кг, и угловой скорости шнека $4,4 \text{ с}^{-1}$ (уравнение 2.73) площадь выгрузного окна равна 120 мм^2 .

Анализ зависимости (2.91) показывает, что наименьшая мощность на привод одного шнека равна 0,5 кВт и получена при шаге шнека 190 мм и его угловой скорости $5,1 \text{ с}^{-1}$.

Экспериментально-теоретическим исследованием, включающим полученную аналитическую модель и лабораторные опыты, установлены оптимальные конструкторско-технологические параметры смесителя высокоэнергетических кормов с горизонтально установленными смешивающими шнеками. Угол подъема винтовой линии относительно вертикальной оси равен трем градусам; диаметр шнека – 140 мм; площадь окна для выгрузки кормов с бункера – 120 мм^2 ; время смешивания 5 мин; угловая скорость смешивающих шнеков $4,4 \text{ с}^{-1}$. При этих параметрах удельная энергоёмкость процесса равна 0,5 кВт ч/т.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ-РАЗДАТЧИКА ПАСТООБРАЗНЫХ КОРМОВ

3.1. Обоснование способа раздачи пастообразных кормов и конструкции смесителя-раздатчика для его реализации

Анализ известных способов скармливания кормов животным позволил предложить способ приготовления кормосмеси, при котором объемные корма, корнеклубнеплоды и зерновая паста смешиваются путем пересечения их потоков в воздухе и при перемещении выгрузным транспортером кормораздатчика. В этом случае формирование кормосмеси осуществляется без участия механических устройств. Дополнительно, для лучшего скармливания кормов, зерновая паста покрывает верхний слой кормосмеси на кормовом столе, что вызывает у животных аппетит и обильное слюновыделение, способствующие поеданию всех кормов и их лучшую усвояемость.

Предложенный способ обеспечивает нормированное скармливание высокоэнергетических легкоусвояемых пастообразных кормов, позволяет сократить энергетические, материальные, трудовые и финансовые затраты на приготовление кормосмеси, повысить энергетическую отдачу кормов. Для реализации предложенного способа необходимо, чтобы мобильный смеситель-раздатчик содержал бункера – для объемных стебельчатых кормов и зерновой пасты или других жидких кормов. Раздача и смешивание этих кормов животным должны производиться одновременно, при движении кормораздатчика вдоль кормушек.

Задача нормированной раздачи жидких или пастообразных кормов при использовании мобильного смесителя раздатчика достаточно сложная, так как необходимо поддерживать их постоянный напор, иметь возможность регулировать расход и не допустить расслоения.

В результате теоретических исследований применяемых дозирующих устройств была выдвинута гипотеза о целесообразности установки внутри бункера для пастообразных кормов шнекового насоса-дозатора, выполненного в виде горизонтального шнека, проходящего вдоль бункера. На конце шнека должен быть установлен насос, образованный

шнеком и крышкой. Такой комбинированный рабочий орган исключит сегрегацию пастообразной смеси, а также обеспечит однородность и необходимый постоянный напор, даже при регулировании расхода корма.

3.2. Определение рациональной вместимости бункера пастообразных кормов

Вместимость бункера смесителя-раздатчика зависит от количества обслуживаемых животных, скорости его передвижения, а также производительности загрузочных, выгрузных и смешивающих устройств.

Увеличив грузоподъемность смесителя-раздатчика, можно увеличить число обслуживаемых животных. Но с увеличением вместимости возрастают металлоемкость машины, расход топлива на привод рабочих органов, эксплуатационные расходы и стоимость машины в целом [43].

Проанализировав технико-экономические показатели смесителей-раздатчиков ведущих зарубежных фирм, построили графики (рис. 3.1) роста металлоемкости и стоимости машин в зависимости от вместимости их бункеров [45].

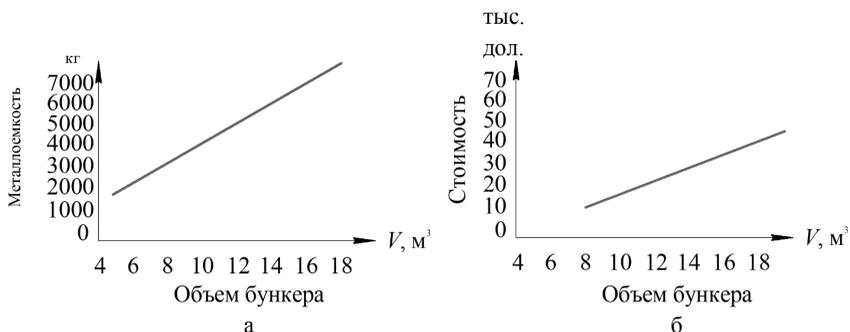


Рис. 3.1. Зависимости металлоемкости (а) и стоимости смесителей-раздатчиков (б) от вместимости их бункеров

Как видно из графиков (рис. 3.1), с увеличением вместимости бункеров рост металлоемкости и стоимости машин осуществляется по прямой линии типа

$$(G, C) = AV + C_0,$$

где G – металлоемкость машины, кг;

C – стоимость, тыс. долл.;

A – коэффициент пропорциональности, для смесителей-раздатчиков по стоимости равен 2560 долл./м³, а по металлоемкости – 360 кг/м³;

V – вместимость бункера смесителя-раздатчика, м³;

C_0 – постоянная величина, не зависящая от вместимости бункера, по стоимости равна 2280 долл., по металлоемкости – 730 кг.

Суточную массу кормов на ферме, необходимую для обеспечения животных питательными веществами, можно определить по формуле

$$M_c = \sum q_i n_j, \quad (3.1)$$

где q_i – суточная норма i кормов для j животных, кг;

n_j – количество животных.

Поскольку на животноводческих фермах, особенно для дойного стада, раздачу кормов осуществляют два или три раза в день, то разовую массу кормов, которую необходимо раздать животным, можно вычислить по формуле

$$M_p = \frac{\sum q_i n_j}{k_k}, \quad (3.2)$$

где k_k – кратность кормления животных на ферме.

Чтобы обеспечить разовую раздачу кормов, необходимо иметь вместимость бункера смесителя-раздатчика, равную

$$V_p = \frac{M_p}{\rho_k} = \frac{\sum q_i n_j}{k_k \rho_k}, \quad (3.3)$$

где ρ_k – плотность кормов, находящихся в бункере смесителя-раздатчика, кг/м³.

Для эффективного использования смесителя-раздатчика вместимость бункера должна быть такой, чтобы животные обеспечивались кормами в течение установленного зоотехническими требованиями времени [46, 47].

С учетом количества рейсов вместимость бункера смесителя-раздатчика можно определить по формуле

$$V_m = \frac{V_p}{m_{\text{ц}}} = \frac{\sum q_i n_j}{\frac{k_{\text{к}} \rho_{\text{к}}}{m_{\text{ц}}}}, \quad (3.4)$$

где m – число циклов раздачи кормов животным, определяемое по формуле

$$m_{\text{ц}} = \frac{\tau_c}{\sum_{i=1}^n \tau_i}, \quad (3.5)$$

где τ_c – сменное время работы смесителя-раздатчика, ч;

$\sum_{i=1}^n \tau_i$ – время, необходимое для выполнения всех технологических операций за один цикл работы машины, ч, определяемое по формуле

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_6 + \tau_7, \quad (3.6)$$

где τ_1 – время, затрачиваемое на проведение технического ухода и других вспомогательных операций, ч;

τ_2 – время, затрачиваемое на проезд машины до места погрузки кормов, ч;

τ_3 – время, затрачиваемое на загрузку стебельчатых кормов, ч;

τ_4 – время, затрачиваемое на проезд машины до места хранения высокоэнергетических кормов, ч;

τ_5 – время, затрачиваемое на загрузку высокоэнергетических кормов, ч;

τ_6 – время, затрачиваемое на смешивание кормов, ч;

τ_7 – время, затрачиваемое на раздачу кормосмеси, ч.

Тогда необходимую вместимость бункера смесителя-раздатчика кормов при выполнении m -го числа циклов можно определить по формуле

$$V_m = \frac{\sum q_i n_j (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_6 + \tau_7)}{k_k \rho_k \tau_c} \quad (3.7)$$

Согласно приведенным выше зависимостям произведен технико-экономический расчет показателей смесителей-раздатчиков с разной вместимостью бункеров (табл. 3.1, 3.2) [48].

Таблица 3.1

Возможное количество обслуживаемого поголовья животных смесителями-раздатчиками с различной вместимостью бункера

Показатели	Вместимость бункеров смесителей-раздатчиков, м ³				
	6	10	12	14	20
Максимальная масса кормов, кг	1512	2520	3024	3780	5040
Масса кормов за смену, кг	27 216	35 280	36 288	37 800	40 300
Количество обслуживаемого поголовья: КРС	560	735	756	787	840
	1330	1350	1390	1450	1550

Из данных табл. 3.1 видно, что увеличением вместимости бункера смесителя-раздатчика в 2 раза обслуживаемое поголовье увеличивается на 35 %, в 3 раза – только на 50 %. В то же время стоимость машины увеличится в 2,6 и 5,8 раз соответственно (рис. 3.1, б).

Таблица 3.2

Технико-экономические показатели смесителей-раздатчиков кормов при обслуживании ферм с годовым удоем 6000 литров

Показатели для фермы на 600 коров, долл./т	Вместимость бункеров смесителей-раздатчиков, м ³				
	6	10	12	14	20
Удельные капитальные вложения	0,97*	0,74	1,28	1,44	2,85

Показатели для фермы на 600 коров, долл./т	Вместимость бункеров смесителей-раздатчиков, м ³				
	6	10	12	14	20
Прямые затраты	4,52*	2,26	3,21	3,54	5,92
Приведенные затраты	4,71*	2,41	3,47	3,83	6,49

* – показатели с применением двух смесителей-раздатчиков.

На основании данных табл. 3.2 построен график зависимости приведенных удельных затрат от объема бункера (рис. 3.2), из которого видно, что рациональная вместимость бункера смесителя-раздатчика для молочно-товарной фермы на 600 коров равна 11 м³.

Исходя из рационов кормления животных, количество пастообразных смесей в рационе КРС не превышает 10 % стебельчатых кормов, и поэтому вместимость бункера для жидких кормов можно определить по формуле

$$V_{ж} = 0,1 \cdot V_m = 0,1 \frac{\sum q_i n_j (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_6 + \tau_7)}{k_k \rho_k \tau_c}, \quad (3.8)$$

где V_m – объем бункера стебельчатых кормов мобильного смесителя-раздатчика кормов (определяется по выражению (3.7)), м³.

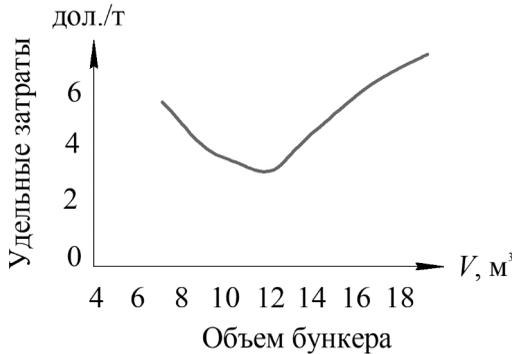


Рис. 3.2. Зависимость удельных приведенных затрат от вместимости бункера мобильного смесителя-раздатчика кормов

Таким образом, вместимость бункера для жидких кормов рассчитывается исходя из нормы скармливания и физико-механических свойств кормов.

Результаты исследований показали, что для ферм на 400 и более голов КРС целесообразно устанавливать бункер жидких кормов со шнековым насосом-дозатором объемом в пределах 0,5–0,8 м³.

3.3. Определение производительности шнекового насоса-дозатора

Основным рабочим элементом шнекового насоса-дозатора является шнек, объемную производительность которого можно определить по формуле (3.9) [49]:

$$Q_v = \frac{\pi(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{4} S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}} k_v, \quad (3.9)$$

где k_v – коэффициент заполнения шнека;

$S_{\text{ш}}$ – шаг витков шнека, м;

$\omega_{\text{ш}}$ – частота вращения шнека, с⁻¹;

$\frac{\pi(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{4}$ – площадь, занимаемая кормосмесью, м².

Так как раздаче подвергается жидкий корм, то при работе шнекового насоса-дозатора кормосмесь, находящаяся в пространстве между витками и кожухом шнека, частично движется в направлении, обратном поступательному вращению шнека. Поэтому его производительность будет равна

$$Q_v = \left(\frac{\pi D_{\text{ш}}^2}{4} - \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{4} + S_{\text{кол}} x_{\text{ш}} \right) S_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}} k_v, \quad (3.10)$$

где $S_{\text{кол}}$ – площадь кольца между шнеком и кожухом шнека. Определяется по выражению (3.11):

$$S_{\text{кол}} = \frac{\pi(D_{\text{ш}} + 2\delta)^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{ш}}^2}{4} = \pi\delta(D_{\text{ш}} + \delta), \quad (3.11)$$

где δ – зазор между кожухом шнека и шнеком, м;

$x_{\text{ш}}$ – коэффициент, равный отношению сил, спроецированных на ось X, направленных по ходу движения основной массы кормосмеси к силам, направленным против движения корма [49].

Для определения коэффициента рассмотрим силы, действующие на частицу кормосмеси в горизонтально расположенном шнеке (рис. 3.3).

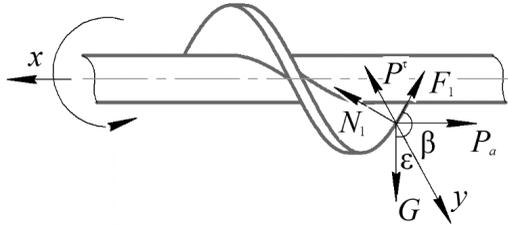


Рис. 3.3. Схема сил, действующих на частицу пастообразного корма

На частицу жидкого корма, движущуюся по витку шнека, действуют следующие силы:

– касательная сила:

$$P^{\tau} = m R \frac{d^2 \varphi}{dt^2}, \quad (3.12)$$

где m – масса частицы, кг;

R – радиус шнека, м;

$\frac{d\varphi}{dt}$ – угловая скорость шнека, с^{-1} ;

– аксиальная сила инерции:

$$P_a = m a \frac{d^2 \varphi}{dt^2}, \quad (3.13)$$

где a – ширина витка шнека, м;

– сила трения частицы корма о винтовую поверхность шнека:

$$F_1 = f_1 N_1, \quad (3.14)$$

где f – коэффициент трения корма о винтовую поверхность шнека;

N_1 – нормальная реакция поверхности шнека, Н;

– сила тяжести:

$$G_T = mg, \quad (3.15)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Начало координат поместим в точку приложения сил и спроецируем действующие силы на эти оси. В результате получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P_a = -F_1 \sin \beta + N_1 \cos \beta \\ P^r = -F_1 \cos \beta - N_1 \sin \beta + G_0 \sin \varepsilon, \end{cases} \quad (3.16)$$

где β – угол наклона витка шнека, град.;

ε – угол наклона шнека, град.

Подставим выражения для определения сил, входящих в систему дифференциальных уравнений (3.19):

$$\begin{cases} ma \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -f_1 N_1 \sin \beta + N_1 \cos \beta \\ mR \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -f_1 N_1 \cos \beta - N_1 \sin \beta + mg \sin \varepsilon. \end{cases} \quad (3.17)$$

Из второго уравнения системы дифференциальных уравнений, выразив $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$, получим:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{-f_1 N_1 \cos \beta - N_1 \sin \beta + mg \sin \varepsilon}{mR}. \quad (3.18)$$

Полученное выражение (3.18) подставим в первое уравнение системы дифференциальных уравнений (3.17), упростив которое и выразив N_1 , получим следующее отношение:

$$N_1 = \frac{m g a \sin \varepsilon}{-f_1 a - a \sin \beta + f_1 R \sin \beta - R \cos \beta}. \quad (3.19)$$

Коэффициент $x_{ш}$, учитывающий, какое количество кормосмеси будет возвращаться обратно, равен отношению спроецированных на ось X сил, направленных по ходу движения основной массы кормосмеси к силам, направленным против движения корма. Проекция сил на ось X позволяет получить уравнение

$$x_{ш} = \frac{P_a + F_1 \sin \beta}{N_1 \cos \beta}. \quad (3.20)$$

Подставив значение сил в уравнение (3.20) и преобразовав его, получим искомое выражение для нахождения коэффициента:

$$x_{ш} = -2 f_1 \frac{a}{R} - 2 \frac{a}{R} \operatorname{tg} \beta + f_1 \operatorname{tg} \beta - 1. \quad (3.21)$$

Из выражения (3.21) видно, что количество корма, движущегося в направлении, обратном поступательному вращению шнека, будет зависеть от геометрических особенностей шнека и физико-механических свойств кормосмеси.

Тогда выражение (3.10) для определения производительности шнекового насоса-дозатора будет иметь вид:

$$Q_v = \left[\frac{\pi D_{ш}^2}{4} - \frac{\pi d_{ш}^2}{4} + \pi \delta (D_{ш} + \delta) \left(-2 f_1 \frac{a}{R} - 2 \frac{a}{R} \operatorname{tg} \beta + f_1 \operatorname{tg} \beta - 1 \right) \right] S_{ш} \omega_{ш} k_v. \quad (3.22)$$

Из уравнения (3.22) видно, что производительность шнекового насоса-дозатора жидких кормов зависит от геометрических параметров рабочего органа, зазора между навивкой и кожухом шнека, физико-механических свойств кормосмеси.

В результате расчета по полученному выражению (3.22) установлено рациональное значение производительности шнекового насоса-дозатора, равное 4 л/с, при этом зазор между навивкой шнека и его кожухом равен 10 мм, а частота вращения шнека – 300 мин⁻¹.

3.4. Определение мощности на привод шнекового насоса-дозатора

При выполнении технологического процесса витки шнека перемещают кормовую массу, то есть захватывают частицу корма A массой m , в результате чего та движется со скоростью v . Для определения мощности на привод шнека рассмотрим движение этой элементарной частицы по плоскости одного его витка. Траектория движения частицы представлена на рис. 3.4.

Спроектировав количество движения тела mv на направление, перпендикулярное к лучу, проведенному к частице A из точки O , и умножив полученную проекцию на расстояние $OA = R$ (рис. 3.5), получим момент количества движения частицы относительно точки O :

$$L = m v \cos \alpha R. \quad (3.23)$$

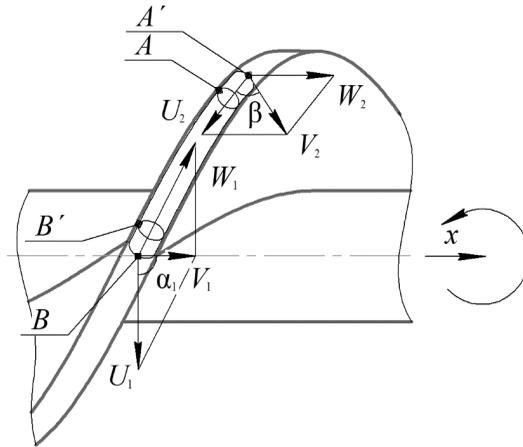


Рис. 3.4. Траектория движения частицы пастообразного корма по витку шнека

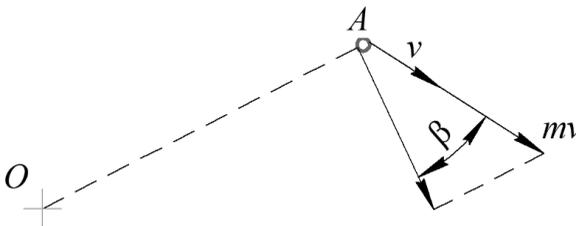


Рис. 3.5. Схема скоростей для определения момента количества движения

Если на тело действует сила, то за счет изменения его скорости количество движения, а, следовательно, и момент количества движения изменяются. По теореме о моменте количества движения, его производная по времени равна моменту M действующих на частицу зерновой пасты внешних сил:

$$\frac{dL}{dt} = M. \quad (3.24)$$

Применим уравнение моментов количества движения к установившемуся потоку жидкости в равномерно вращающемся канале (рис. 3.4). Выделим объем жидкого корма контрольными поверхностями A и B , образующими элементарную струю. Через промежуток времени dt объем жидкости AB переместится в положение $A'B'$.

Изменение момента количества движения жидкого корма за время dt :

$$dL = L_{A'B'} + L_{AB}. \quad (3.25)$$

Объем $A'B'$ состоит из объемов $A'A$ и AB' . Момент количества движения жидкости в объеме $A'B'$ равен сумме моментов количества движения жидкости в объемах $A'A$ и AB' :

$$L_{A'B'} = L_{A'A} + L_{AB'}. \quad (3.26)$$

Аналогично объем AB состоит из объемов AB' и BB' .

Тогда

$$L_{AB} = L_{AB'} + L_{BB'}. \quad (3.27)$$

При установившемся движении жидкого корма момент количества движения жидкости в объеме AB' как в уравнении для $L_{A'B'}$ (момент времени $t + dt$), так и в уравнении для L_{AB} (момент времени t) одинаков, поэтому

$$AL = L_{A'B'} - L_{AB} = (L_{A'A} + L_{AB'}) - (L_{AB'} + L_{BB'}) = L_{A'A} - L_{BB'}. \quad (3.28)$$

Объемы $A'A$ и $B'B$ равны объемам жидкости, протекающей через поверхности A и B за время dt . Следовательно, массы жидкого корма в этих объемах равны $Q_m dt$, где Q_m – массовый расход, который при установившемся движении жидкости одинаков для сечений A и B элементарной струи жидкого корма.

Отсюда

$$dL = Q_m dt v_2 \cos \alpha_2 R - Q_m dt v_1 \cos \alpha_1 r = Q_m dt (v_{u2} R - v_{u1} r), \quad (3.29)$$

где $v_{u1} = v_1 \cos \alpha_1$ и $v_{u2} = v_2 \cos \alpha_2$ – окружные составляющие абсолютной скорости потока на входе в канал и на выходе из него, равные геометрической сумме $\vec{v} = \vec{u} + \vec{\omega}$ (см. рис. 3.4).

Допустим, что в начальный период времени частица находится в месте соединения витка шнека с валом, а затем с течением времени под действием центробежной силы частица корма стремится переместиться ближе к кромке витка шнека. Тогда $r = 0$, а R – высота витка шнека, $R = \frac{D_{ш} - d_{ш}}{2}$. Тогда выражение (3.29) примет вид:

$$dL = Q_m dt v_{u2} \frac{D_{ш} - d_{ш}}{2} = Q_m dt v_2 \cos \beta \frac{D_{ш} - d_{ш}}{2}, \quad (3.30)$$

где v_2 – скорость частицы корма по витку шнека, м/с;

β Ошибка! Источник ссылки не найден. – угол наклона витка шнека, град.

Тогда изменение момента количества движения жидкого корма будет равно

$$dL = Q_m dt v_2 \cos \beta \frac{D_{ш} - d_{ш}}{2}. \quad (3.31)$$

Производная по времени от момента количества движения жидкости, находящейся в канале, равна моменту M действующих на нее внешних сил:

$$\frac{dL}{dt} = Q_m v_2 \cos \beta \frac{D_{ш} - d_{ш}}{2} = M, \quad (3.32)$$

где Q_m – массовая производительность шнекового насоса-дозатора, выразив ее через объемную производительность $Q_m = Q_v \rho$ и, подставив в выражение (3.32), получим

$$M = Q_v \rho v_2 \cos \beta \frac{D_{\text{ш}} - d_{\text{ш}}}{2}, \quad (3.33)$$

где ρ – плотность зерновой пасты, кг/м³;

Q_v – объемная производительность шнекового насоса-дозатора, м³/с.

Полученное уравнение будет моментом внешних сил, действующих на один виток шнека. На весь шнек будет действовать момент внешних сил, равный

$$M_{\text{шн}} = M k_{\text{ш}}, \quad (3.34)$$

где $k_{\text{ш}}$ – число витков шнека, $k_{\text{ш}} = L_{\text{ш}}/S_{\text{ш}}$ [55];

$L_{\text{ш}}$ – длина шнека, м;

$S_{\text{ш}}$ – шаг витков шнека, м.

Тогда уравнение (3.34) примет вид:

$$M_{\text{шн}} = Q_v \rho v_2 \cos \beta \frac{D_{\text{ш}} - d_{\text{ш}}}{2} \frac{L_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}}. \quad (3.35)$$

Мощность, потребляемая для вращения шнека, определяется уравнением

$$N_{\text{ш}} = M_{\text{шн}} \omega_{\text{ш}}, \quad (3.36)$$

где $\omega_{\text{ш}}$ – угловая скорость шнека, с⁻¹.

Тогда искомое выражение для определения мощности, потребляемой для вращения шнека, имеет вид:

$$N_{\text{ш}} = Q_v \rho v_2 \cos \beta \frac{D_{\text{ш}} - d_{\text{ш}}}{2} \frac{L_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}} \omega_{\text{ш}}. \quad (3.37)$$

Из уравнения (3.37) видно, что мощность, потребляемая для вращения шнека, зависит как от геометрических параметров рабочего органа, так и от физико-механических свойств материала.

3.5. Экспериментальные исследования по определению оптимальных режимов работы и параметров шнекового насоса-дозатора пастообразных смесей

3.5.1. Программа и методика исследований, обработка полученных экспериментальных данных

Смешивание пастообразной смеси из фуражного зерна с остальными компонентами кормосмеси является важным технологическим процессом, так как существенно влияет на качество и стоимость кормосмеси. Поэтому для поиска оптимальных параметров шнекового насоса-дозатора необходимо использовать метод математического планирования эксперимента. Движение к оптимуму возможно, если выбрать один параметр оптимизации, а другие характеристики процесса принять в качестве ограничений [50–52].

Важнейшим показателем работы шнекового насоса является развиваемое им давление на выходе из трубопровода, поэтому выбираем его в качестве параметра оптимизации.

С целью обоснования конструктивных и режимных параметров шнекового насоса-дозатора проведены экспериментальные исследования, программой которых предусматривалось:

- 1) выявление априорным ранжированием факторов, оказывающих наибольшее влияние на развиваемое шнековым насосом давление;
- 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 развиваемого шнековым насосом давления от факторов, установленных в результате априорного ранжирования.

На первом этапе исследований осуществлен отбор факторов, предположительно наиболее сильно влияющих на параметр оптимизации процесса (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Факторы, влияющие на развиваемое шнековым насосом-дозатором давление

Обозначение факторов	Наименование фактора
<i>Физико-механические свойства сырья</i>	
x_1	Влажность зерновой пасты

Обозначение факторов	Наименование фактора
x_2	Средний размер измельченных частиц
x_3	Температура пасты
<i>Параметры экспериментальной установки</i>	
x_4	Зазор между навивкой и кожухом шнека
x_5	Шаг витка шнека
x_6	Частота вращения шнека
<i>Технологические факторы</i>	
x_7	Коэффициент заполнения бункера

На основании анализа литературных источников установлено, что такие факторы, как зазор между навивкой и кожухом шнека δ (мм), влажности кормосмеси (%), а также частота вращения шнека, при транспортировке влажных кормов $\omega_{ш}$ (c^{-1}) являются наиболее значимыми и недостаточно изучены.

В связи с этим необходимо провести экспериментальные исследования для определения параметров и режимов работы шнекового насоса-дозатора.

Для выделенных трех факторов использован центральный композиционный ортогональный план второго порядка 2^3 . Уровни варьирования факторов показаны в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Кодирование варьируемых факторов

Показатель	Варьируемые факторы		
	$\omega_{ш}$, частота вращения, $мин^{-1}$	δ , зазор между навивкой и кожухом шнека, мм	Влажность пастообразной смеси, %
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3
Основные уровни ($x_i = 0$)	320	10	86
Интервалы варьирования	60	5	10

Показатель	Варьируемые факторы		
	$\omega_{ш}$, частота вращения, мин ⁻¹	δ , зазор между навивкой и кожухом шнека, мм	Влажность пастообразной смеси, %
Нижние уровни ($x_i = -1$)	260	5	76
Верхние уровни ($x_i = +1$)	380	15	96

Основой эксперимента является матрица (табл. 3.5), содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с намеченным планом.

Таблица 3.5

Построение трехфакторного плана первого порядка

№ опыта	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, монтируемой на смесителе-раздатчике кормов, который состоит из бункера для стебельчатых кормов, бункера для сухих высокоэнергетических кормов, сборного транспортера и двух емкостей с дозирующими устройствами для пастообразных смесей. Над сборным транспортером, со стороны выгрузки кормосмеси, установлено распределяющее устройство в виде патрубков, соединенных с распылителем. В нижней части каждой емкости установлены шнеки, на конце которых установлены крышки, образуя тем самым шнековые насосы-дозаторы, к которым прикреплены дозирующие устройства. На конце патрубков находятся распылители, выполненные в виде трубы с отверстиями. Распылители патрубков расположены над сборным транспортером в месте выгрузки кормосмеси (рис. 3.6).

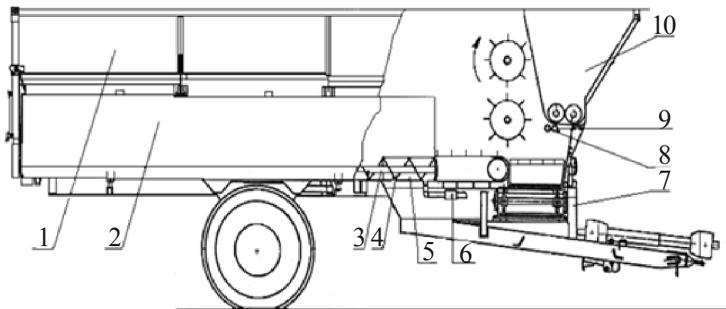


Рис. 3.6. Смеситель-раздатчик кормов со шнековым насосом-дозатором для пастообразных кормов:

1 – бункер стебельчатых кормов; 2 – бункер пастообразных смесей; 3 – шнек; 4 – крышка насоса; 5 – насос-дозатор; 6 – дозирующее устройство; 7 – сборный транспортер; 8, 9 – патрубки; 10 – бункер сухих высокоэнергетических кормов

Смеситель-раздатчик кормов работает следующим образом. После загрузки бункера 1 стебельчатыми кормами и бункера 10 сухими высокоэнергетическими кормами смеситель-раздатчик доставляет к месту загрузки пастообразных смесей (очередность загрузки не играет роли) и загружают емкости 2. Количество загружаемых пастообразных кормов контролируется по показаниям электронной системы взвешивания.

Загрузив пастообразные смеси в емкости 2 и доставив смеситель-раздатчик к месту выдачи кормов, устанавливают их норму выдачи посредством дозирующих устройств 6. Первоначально включают в работу механизмы подачи стебельчатых и сухих высокоэнергетических кормов, а потом пастообразных кормов. Двигаясь вдоль фронта кормления, смеситель-раздатчик выдает животным приготовленную кормосмесь. Когда включаются в работу механизмы подачи стебельчатых и сухих высокоэнергетических кормов, одновременно с ними включаются в работу шнеки 3, которые перемешивают жидкие компоненты и не дают возможности расслаиваться жидким кормам на фракции.

Шнеки 3, на конце которых имеются насосы 5, начинают равномерно, нормировано подавать пастообразные смеси, независимо от их уровня в емкостях 2 в дозирующее устройство 6, и затем выдавливаются в виде струй.

Поскольку кормосмесь рыхлая длинноволокнистая, то пастообразные смеси проникают в слой корма и частично прилипают к

верхнему слою кормосмеси, делая ее привлекательной и вкусной для животных. В ходе проведения опытов изменяли зазор между навивкой и кожухом шнека, а также частоту вращения шнека.

Опыты проводились на кормосмеси различной влажности с трехкратной повторностью.

Для определения давления, развиваемого шнековым насосом-дозатором на выходе из трубопровода, был установлен манометр ММП-160Кс. При проведении опыта в бункер жидких кормов загружали зерновую пасту, объем которой позволял выйти на установившийся режим работы шнекового насоса-дозатора и обеспечить создание давления на выходе из трубопровода и его регистрацию.

Для построения и анализа регрессионной модели используем результаты опытов, выполняемых по плану полного трехфакторного эксперимента и композиционному плану. Результаты экспериментов представлены в табл. 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6

Результаты экспериментов по линейному плану

№ опыта	y_1	y_2	y_3	№ опыта	y_1	y_2	y_3
1	6,2	6,0	5,8	5	5,2	5,5	5,3
2	11,5	11,7	11,9	6	10,7	10,9	11,1
3	4,5	4,7	4,9	7	4,2	4,0	3,8
4	8,0	8,2	8,4	8	7,8	7,5	7,2

Таблица 3.7

Результаты дополнительных опытов по плану второго порядка

№ опыта	y_1	y_2	y_3	№ опыта	y_1	y_2	y_3
9	5,3	5,7	6,1	13	4,5	4,0	5,0
10	3,0	3,1	3,2	14	6,0	6,2	6,4
11	11,5	11,7	11,9	15	4,7	5,0	5,3
12	8,0	8,3	8,6				

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась в соответствии с принятыми правилами теории вероятностей и математической статистики и использованием математического пакета MathCad.

Статистическая обработка проводилась с целью проверки адекватности экспериментальным данным.

Находим среднее значение результатов i -го опыта по формуле

$$y_{ci} = \frac{1}{n} \sum_j y_{i,j}. \quad (3.38)$$

Результаты вычислений по формуле (3.38) представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Среднее значение результатов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_c	6,0	11,7	4,7	8,2	5,3	10,9	4,0	7,5

По данным параллельных опытов вычисляем построчные выборочные дисперсии с числом степеней свободы $\nu_n = n-1$ по выражению

$$D_i = \frac{\sum_{j=0}^2 (y_{i,j} - y_{ci})^2}{n-1}. \quad (3.39)$$

Построчные выборочные дисперсии для первых восьми опытов приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Построчные выборочные дисперсии

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
D_i	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,09

Гипотезу об однородности дисперсий D_i при одинаковом числе повторностей во всех вариантах опыта проверяем, используя критерий Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D)}{\sum D}. \quad (3.40)$$

Произведя необходимые вычисления, получим $G_k = 0,2547$. Данное значение должно удовлетворять условию

$$G_k < G_{kkr}, \quad (3.41)$$

где G_{kkr} – табличное значение критерия при уровне значимости α , числах степеней свободы ν_n и N . В данном случае $G_{kkr} = 0,5157$.

Условие выполняется, а, следовательно, дисперсии однородны.

Определяем по результатам опытов методом наименьших квадратов, решая относительно неизвестных b_0, b_1, \dots, b_k , систему нормальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$x^T x b = x^T y, \quad (3.42)$$

откуда

$$b = c x^T y, \quad (3.43)$$

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}_i ;

$c = (x^T x)^{-1}$ – информационная (ковариационная) матрица, которая является обратной по отношению к матрице системы нормальных уравнений $x^T x$.

По результатам расчета коэффициенты регрессии равны:

$$\begin{aligned} b_0 &= 7,292; & b_4 &= -0,533; \\ b_1 &= 2,283; & b_5 &= -0,017; \\ b_2 &= -1,192; & b_6 &= -8,3 \cdot 10^{-3}. \\ b_3 &= -0,358; \end{aligned}$$

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb :

$$\Delta b = t_y \sqrt{D_b}, \quad (3.44)$$

где t_y – значение распределения Стьюдента;

$$D_b = \frac{D_y}{n N} - \text{дисперсия, равная } D_b = 0,0184.$$

Таким образом, проведя все необходимые вычисления, получим $\Delta b = 0,091$. Сравнивая полученные ранее значения коэффициента b_i с Δb , видим, что коэффициенты b_5 и b_6 меньше Δb , поэтому считаем их незначимыми и принимаем равными нулю.

Получаем следующее уравнение регрессии:

$$y = 7,292 + 2,283 x_1 - 1,192 x_2 - 0,358 x_3 - 0,533 x_1 x_2.$$

Уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным, если

$$F < F_{kr}. \quad (3.45)$$

Чтобы оценить ошибку расчетных значений в пределах ошибки воспроизводимости опытов, вычисляем отношение

$$F = \frac{D_0}{D_a}, \quad (3.46)$$

где $D_0 = \frac{n}{N-1} \sum_i (y_{cp} - y_{ci})^2$ – дисперсия воспроизводимости;

$D_a = \frac{n}{N-1} \sum_i (y_{ci} - y_{pi})^2$ – дисперсия адекватности.

Определить значение y_{pi} можно по формуле $y_{pi} = x b$. Результаты расчета приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Значение параметра y_p

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_p	6,017	11,683	4,683	8,217	5,317	10,917	4,017	7,483

Проведя все вычисления, получим: $D_0 = 24,162$, $D_a = 0,0022$, $F = 1,087 \cdot 10^4$.

Сравнивая полученное значение F с табличным ($F_{kr} = 3,24$), делаем вывод, что полученное уравнение неадекватно экспериментальным данным.

Свободный член линейного уравнения также характеризует сумму коэффициентов при квадратичных членах, которые в случае линейной регрессии полагаем незначимыми. Обоснованность линейного приближения проверяем постановкой опытов в центре плана.

Линейное уравнение приемлемо, если разность $|y_{oc} - b_0|$ статистически незначима, т. е. выполняется неравенство

$$|y_{oc} - b_o| \leq s \cdot t_y \sqrt{\frac{n + N}{nN}}, \quad (3.47)$$

где $s = \frac{1}{\nu} [(N-1)D_b + (n-1)D_{yoc}]$ – средневзвешенное двух дисперсий с числом степеней свободы $\nu = N + n - 2$;

$D_b = \frac{D_y}{nN}$ – дисперсия коэффициентов регрессии;

$D_{yoc} = \frac{1}{n(n-1)} \sum [(y_0^T)_j - y_{oc}]^2$ – дисперсия среднего значения y_c ;

$t_\nu = 2,262$ – критическое значение t -распределения при двустороннем ограничении, доверительном уровне γ и числе степеней свободы ν .

Проведя все вычисления, получим:

$$D_b = 0,0184;$$

$$D_{yoc} = 0,053;$$

$$\nu = 9;$$

$$s = 0,115.$$

Так как $|y_{oc} - b_o| = 1,592$, то неравенство (3.47) неверное, линейное уравнение неприемлемо.

Описание почти стационарной области вблизи экстремума на поверхности отклика обычно достигается использованием полинома второго порядка, для чего надо составить и реализовать такой план, в котором каждая переменная принимает хотя бы три разных значения. Следуя идее шагового эксперимента, целесообразно использовать так называемое композиционное (последовательное планирование), дополнив уже реализованный план первого порядка некоторым количеством экспериментальных точек, которые расположены определенным образом, а именно, – поставив эксперимент в центре плана и в $2k$ «звездных» точках.

Опыты с комбинациями факторов заданы строками 1–8 в табл. 3.11 и представляют собой ПФЭ типа 2^3 . Кроме опыта в центре плана (строка 9), дополнительно требуется провести 6 опытов в «звездных» точках (строки 10–15, табл. 3.11).

Таблица 3.11

Матрица ортогонального плана типа 2^3 второго порядка

№ 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	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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
$\sum_u (x_{ju})^2$	15	10,9524 5		4,36139				8		

Исходные данные для статистической обработки берутся из табл. 3.11. По итогам вычислений получены данные среднего значения по результатам дополнительных опытов (табл. 3.12) и среднеквадратические отклонения (табл. 3.13).

Таблица 3.12

Среднее значение результатов по дополнительным опытам

№ опыта	9	10	11	12	13	14	15
$y_{кс}$	5,7	3,1	11,7	8,3	4,5	6,2	5,0

Таблица 3.13

Среднеквадратические отклонения результатов

№ опыта	9	10	11	12	13	14	15
D_u	0,16	0,01	0,04	0,09	0,25	0,04	0,09

Гипотеза об однородности дисперсий при одинаковом числе повторностей во всех N вариантах опыта проверяется с использованием критерия Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D_u)}{\sum D_u}. \quad (3.48)$$

Значение критерия Кохрена равно $G_k = 0,2419$. Сравниваем полученное значение с табличным $G_{kkp} = 0,3578$,

где G_{kkp} – табличное значение критерия при уровне значимости α , числа степеней свободы n и N ;

N – число опытов при композиционном планировании равно 15;
 n – степень свободы.

Расчитанный по экспериментальным данным критерий Кохрена меньше табличного значения, следовательно, дисперсии однородны.

Вычисление коэффициентов регрессии производим по формуле

$$b_k = (x^T x)^{-1} x^T Y_c. \quad (3.49)$$

В результате расчета были получены следующие коэффициенты регрессии:

$$\begin{array}{lll} b_0 = 6,856; & b_4 = -0,533; & b_8 = 0,491; \\ b_1 = 2,622; & b_5 = -0,017; & b_9 = -0,051. \\ b_2 = -1,292; & b_6 = 8,3 \cdot 10^{-3}; & \\ b_3 = -0,395; & b_7 = 1,168; & \end{array}$$

$$b_0 = b_{k0} + \gamma_1 (b_{k7} + b_{k8} + b_{k9}), \quad (3.50)$$

получаем $b_0 = 5,682$.

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии. Производим следующие вычисления:

$$D_{bk01} = \frac{D_y}{n \sum_i (x_{i,0})^2}, \quad \sum_i (x_{i,0})^2 = 15, \quad t_k = 2,120, \quad D_{bk01} = 0,0015;$$

$$D_{bk11} = \frac{D_y}{n \sum_i (x_{i,7})^2}, \quad \sum_i (x_{i,7})^2 = 4,361, \quad D_{bk11} = 0,005, \quad \Delta b_{k11} = \sqrt{D_{bk11}} t_k,$$

$$\Delta b_{k11} = 0,154;$$

$$D_{bk1} = \frac{D_y}{n \sum_i (x_{i,1})^2}, \quad \sum_i (x_{i,1})^2 = 10,952, \quad D_{bk1} = 0,002, \quad \Delta b_{k1} = \sqrt{D_{bk1}} t_k,$$

$$\Delta b_{k1} = 0,097;$$

$$D_{bk12} = \frac{D_y}{n \sum_i (x_{i,4})^2}, \quad \sum_i (x_{i,4})^2 = 8, \quad D_{bk12} = 0,0028, \quad \Delta b_{k12} = \sqrt{D_{bk12}} t_k,$$

$$\Delta b_{k12} = 0,114;$$

$$D_{bko} = D_{bko1} + 3 \cdot \gamma_1^2 D_{bk11}, \quad D_{bko} = 9,952,$$

$$\Delta b_{ko} = \sqrt{D_{bko}} t_k, \quad \Delta b_{ko} = 0,211.$$

Так как коэффициенты b_5 , b_6 , и b_9 меньше своего доверительного интервала, принимаем их равными нулю, число значимых коэффициентов регрессии – равным семи.

Получаем следующее уравнение регрессии:

$$y = 5,682 + 2,622x_1 - 1,292x_2 - 0,395x_3 - 0,533x_1^2 + 1,168 x_1x_2 + 0,491x_1x_3.$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным и статистическую значимость его коэффициентов проверяем так же, как в случае уравнения регрессии первого порядка:

$$F = \frac{D_o}{D_a}, \quad (3.51)$$

где $D_o = \frac{n}{N-1} \sum_i (y_{cp} - y_{ci})^2$ – дисперсия воспроизводимости;

$D_a = \frac{n}{N-n_1} \sum_i (y_{ci} - y_{pi})^2$ – дисперсия адекватности.

Определить значение y_p можно по формуле $y_p = x b$, результаты расчета приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Значение параметра u_p

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
u_p	5,835	12,145	4,318	8,495	5,045	11,356	3,528	7,705
№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	
u_p	5,644	4,183	10,554	7,938	4,799	6,124	5,164	

Критическое значение F -распределения для $a = 0,05$, равно $F_{kr} = 2,27$.

Рассчитанное значение $F = 2,045 < F_{kr} = 2,27$.

Так как значение критерия Фишера меньше табличного значения, то полученное уравнение адекватно.

Полученное уравнение регрессии представлено в закодированном виде, преобразовав которое, получим истинное уравнение регрессии

$$y = 14,1 + 0,04 \cdot \omega_{ш} - 1,54 \cdot \delta - 0,24 \cdot B - 0,0002 \cdot \omega_{ш}^2 + \\ + 0,004 \cdot \omega_{ш} \cdot \delta + 0,0008 \cdot \omega_{ш} \cdot B.$$

Для анализа полученного уравнения построены поверхности отклика, представленные на рис. 3.7, 3.8, 3.9. При анализе поверхностей отклика учитываем, что функция отклика y – давление, развиваемое шнековым насосом-дозатором на выходе из трубопровода, должно быть таким, чтобы частица зерновой пасты могла достичь стенки бункера для смешивания компонентов кормосмеси, т. е. напор на выходе должен быть равен 0,6 м. Давление, развиваемое насосом-дозатором, связано с напором зависимостью, представленной в выражении (3.52):

$$p = H\gamma, \quad (3.52)$$

где $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес жидкости, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}^2$;

ρ – плотность жидкого корма, $\rho = 980 \text{ кг/м}^3$.

Тогда

$$p = 0,6 \cdot 980 \cdot 9,81 = 5,7 \text{ кПа.}$$

На рис. 3.7 представлена зависимость развиваемого шнековым насосом-дозатором давления от влажности пастообразной смеси и частоты вращения шнека.

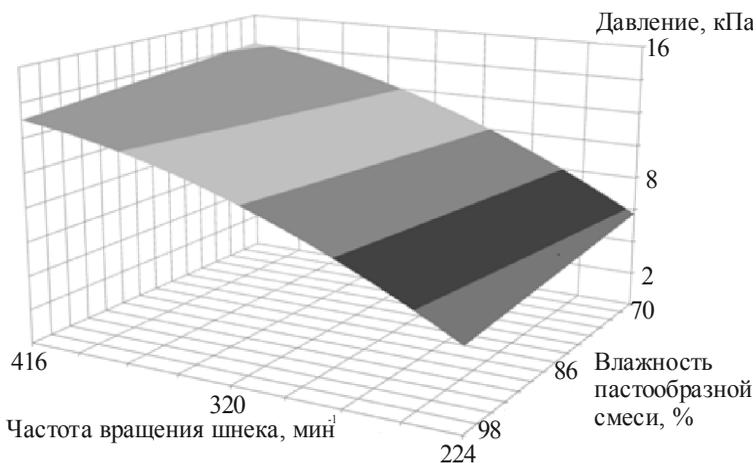


Рис. 3.7. Зависимость развиваемого насосом давления от влажности пастообразной смеси и частоты вращения шнека

Из графика на рис. 3.7 видно, что значение параметра y выше 5,7 кПа достигается при минимальной частоте вращения шнека 248 мин⁻¹, при влажности пастообразной смеси 70 %–98 %.

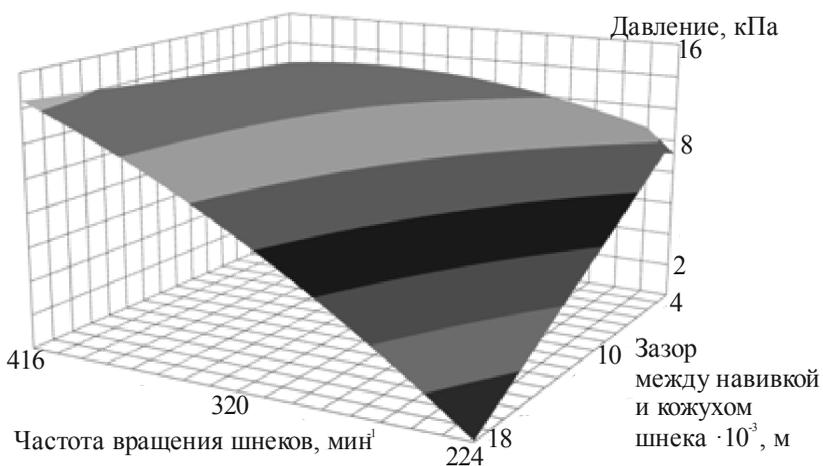


Рис. 3.8. Зависимость развиваемого шнековым насосом-дозатором давления от зазора между навивкой и кожухом шнека и частоты вращения шнека

Анализ графика на рис. 3.8 показал, что при частоте вращения шнека 248 мин^{-1} давление выше $5,7 \text{ кПа}$ достигается при зазоре между навивкой и кожухом шнека $2\text{--}11 \text{ мм}$.

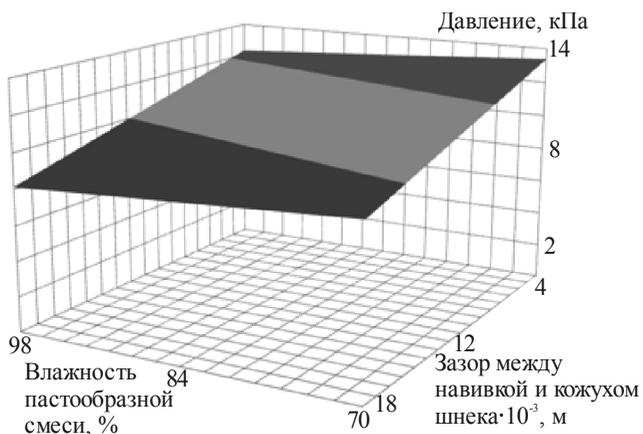


Рис. 3.9. Зависимость развиваемого шнековым насосом-дозатором давления от зазора между навивкой и кожухом шнека и влажности пастообразной смеси

Из графика на рис. 3.9 видно, что при зазоре между навивкой и кожухом шнека $2\text{--}11 \text{ мм}$ необходимое давление будет достигнуто при влажности пастообразной смеси 70% – 98% . Так как наименьшие энергозатраты будут при наименьшей частоте вращения шнека, принимаем $\omega_{\text{ш}} = 248 \text{ мин}^{-1}$, зазор между навивкой и кожухом шнека – 8 мм , влажность пастообразной смеси – 70% – 98% .

3.5.2. Результаты исследования шнекового насоса-дозатора пастообразных смесей мобильного смесителя-раздатчика

Важнейшим показателем работы любой машины является энергоемкость ее процесса, которая характеризует значение потребляемой мощности насоса при заданной производительности в распылителе. При этом необходимо учитывать влажность кормосмеси и размер зазора между навивкой и кожухом шнека. С учетом этого была проведена серия опытов по определению мощности, потребляемой на привод комбинированного рабочего органа, установленного в бункере пастообразных смесей. Испытания проводились по ГОСТ Р 52777–2007 «Техника сельскохозяйственная.

Методы энергетической оценки» с использованием тензоусилителя ТТ01 и тахометра. Выходные параметры исследований представлены в табл. 3.15–3.17.

Таблица 3.15

Потребляемая мощность при заданной производительности в распылителе и влажности кормосмеси 96 %

Зазор δ , мм	Среднее значение потребляемой мощности, Вт, при заданной производительности (л/с)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	360	540	780	1150	1380
5	270	510	710	1030	1280
10	310	560	800	1060	1350
15	400	840	1170	1560	1900

По результатам полученных экспериментальных данных на рис. 3.10 представлена зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности зерновой пасты 96 %.

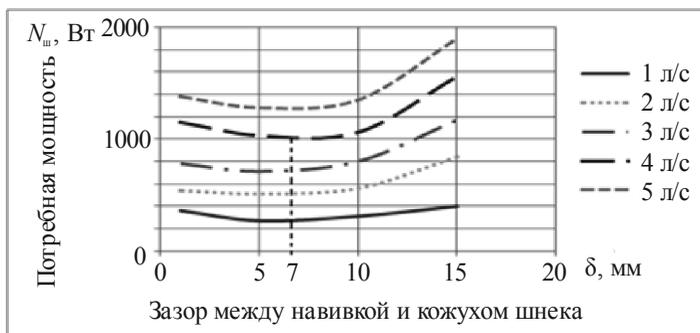


Рис. 3.10. Зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности пастообразной смеси 96 %

Из графика, представленного на рис. 3.10, видно, что при влажности пастообразной смеси, равной 96 %, независимо от производительности шнекового насоса-дозатора в распылителе, минимальные затраты энергии наблюдаются при зазоре между навивкой и кожухом шнека, равном 7 мм. При заданной производительности, равной 4 л/с, минимальные затраты энергии на выдачу пастообразной смеси составят 1 кВт.

Экспериментальные данные для влажности жидкого корма, равной 86 %, представлены в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Потребляемая мощность при заданной производительности в распылителе и влажности пастообразной смеси, равной 86 %

Зазор δ , мм	Среднее значение потребляемой мощности, Вт, при заданной производительности (л/с)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	385	790	1160	1570	1950
5	340	680	1010	1335	1660
10	360	710	1030	1320	1640
15	490	970	1440	1929	2370

На рис. 3.11 представлена зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности пастообразной смеси 86 %.

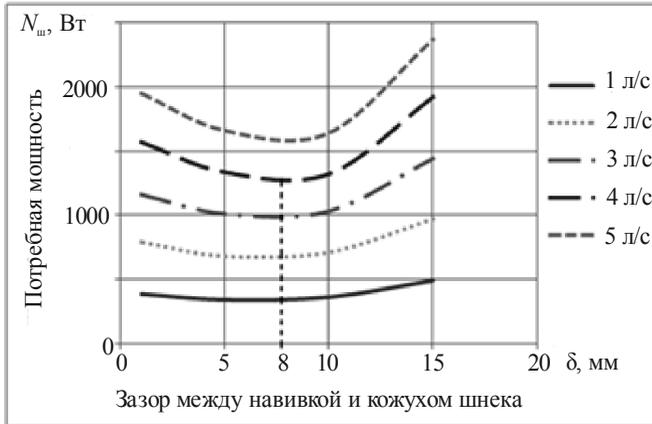


Рис. 3.11. Зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности пастообразной смеси 86 %

Из графика, представленного на рис. 3.11, видно, что при влажности пастообразной смеси, равной 86 %, независимо от производительности шнекового насоса-дозатора, минимальные затраты энергии наблюдаются при зазоре между навивкой и кожухом шнека, равном 8 мм. При заданной производительности, равной 4 л/с, минимальные затраты энергии на выдачу пастообразной смеси составят 1,2 кВт. Экспериментальные данные для влажности пастообразной смеси, равной 76 %, представлены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Потребляемая мощность при заданной производительности в распылителе и влажности пастообразной 76 % смеси

Зазор δ , мм	Среднее значение потребляемой мощности, Вт, при заданной производительности (л/с)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	530	1060	1560	2110	2610
5	430	840	1240	1640	2030
10	430	740	1100	1370	1720
15	570	1130	1660	2200	2740

На рис. 3.12 представлена зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности пастообразной смеси 76 %.

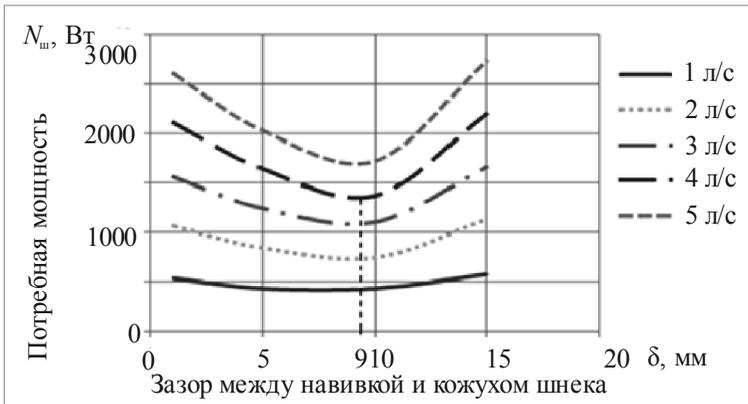


Рис. 3.12. Зависимость потребляемой мощности от зазора между навивкой и кожухом шнека при влажности пастообразной смеси 76 %

Из графика, представленного на рис. 3.12, видно, что при влажности кормосмеси, равной 76 %, независимо от производительности шнекового насоса-дозатора, минимальные затраты энергии наблюдаются при зазоре между навивкой и кожухом шнека, равном 9 мм. При заданной производительности, равной 4 л/с, минимальные затраты энергии на выдачу пастообразной смеси составят 1,4 кВт.

Для обеспечения заданной нормы выдачи корма с учетом его влажности на кормораздатчике установлено дозирующее устройство (рис. 3.13).

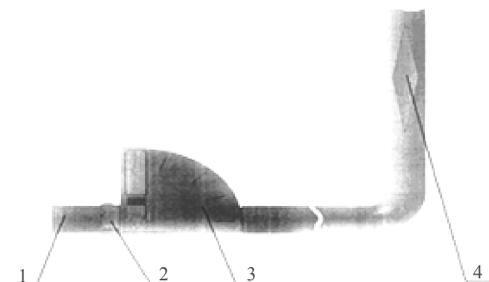


Рис. 3.13. Дозирующее устройство пастообразных смесей:
1 – трубопровод; 2 – кран; 3 – лимб; 4 – распределитель

Устройство для дозированной выдачи пастообразной смеси выполнено в виде крана 2 с лимбом 4 и трубопровода 1 с распределителем 3. Распределитель устанавливается выше уровня пастообразной смеси, находящейся в бункере.

3.6. Описание конструкций разработанной машины

Кормораздатчик представляет собой модификацию серийно выпускаемого кормораздатчика СРК-10, на котором установлены два бункера с шнековыми насосами-дозаторами для раздачи пастообразных кормов и устройства для дозированной выдачи и распределения их во встречных потоках стебельчатых кормов (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Смеситель-раздатчик кормов СРК-10А:
1 – бункер для стебельчатых кормов; 2 – бункер для пастообразных кормов со шнековым насосом-дозатором; 3 – дозирующее устройство; 4 – устройство контроля загрузки кормов

Бункеры для пастообразных кормов (рис. 3.15) представляют собой баки, расположенные с обеих сторон кормораздатчика. На дне каждого бункера расположены шнековые насосы-дозаторы, с помощью которых осуществляется подача жидкого корма в распределитель. Привод шнековых насосов-дозаторов осуществляется от ВОМ трактора через механическую передачу.

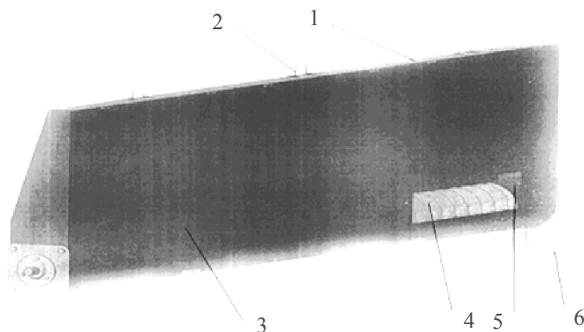


Рис. 3.15. Бункер для пастообразных кормов:
1 – крышка; 2 – ручка; 3 – емкость; 4 – шнек; 5 – шнековый насос;
6 – дозирующее устройство

Норма выдачи стебельчатых кормов регулируется изменением скорости продольного транспортера и поступательной скоростью трактора.

Норма выдачи пастообразных смесей регулируется поворотом рукояток кранов согласно указаниям лимба, установленного на трубопроводе подачи пастообразных смесей.

Новизна конструкции модернизированного смесителя-раздатчика защищена патентами. Разработанная машина обеспечивает дозированную выдачу пастообразных кормов поверх стебельчатых кормов и частичное смешивание их без механических устройств.

Смеситель-раздатчик кормов СРК-10А работает следующим образом. После загрузки бункера стебельчатых кормов и бункера сухих высокоэнергетических кормов смеситель-раздатчик перемещается к месту загрузки пастообразных смесей, где заполняются емкости пастообразными кормами. Количество загружаемых кормов контролируется по показаниям электронной системы взвешивания.

Загрузив и доставив корма к месту выдачи, устанавливают норму их выдачи животным посредством дозирующих устройств. Затем

включают в работу механизмы подачи стебельчатых и сухих высокоэнергетических кормов и затем – пастообразных. Двигаясь вдоль фронта кормления, смеситель-раздатчик выдает животным приготовленную кормосмесь.

Установленные в бункере шнековые насосы-дозаторы начинают равномерно подавать пастообразные корма, независимо от уровня заполнения бункера, в дозирующее устройство, а затем по патрубкам – в распылители, из которых они выдавливаются на кормосмеси из стебельчатых и сухих концентрированных кормов в виде струй.

Поскольку кормосмесь из стебельчатых и сухих концентрированных кормов рыхлая, то пастообразный корм свободно проникает в слой корма и частично прилипает к верхнему слою кормосмеси, делая ее привлекательной и вкусной для животных.

3.7. Заключение

Теоретическими исследованиями получено уравнение (3.8), позволяющее определить вместимость бункера пастообразных смесей исходя из соответствия объему бункера объемных стебельчатых кормов – на фермах для 400 голов КРС целесообразно устанавливать бункер для пастообразной смеси объемом, находящимся в пределах 0,5–0,8 м³.

В результате анализа полученной зависимости (3.22) установлено значение производительности для шнекового насоса-дозатора, равное 4 л/с, при этом зазор между навивкой шнека и его кожухом равен 0,01 м, а частота вращения шнека – 300 мин⁻¹.

По результатам проведения экспериментально-теоретических исследований были получены зависимости, позволяющие определить рациональные значения параметров шнекового насоса-дозатора, развивающего давление жидкого корма на выходе из трубопровода не менее 5,7 кПа. Зазор между навивкой и кожухом шнека должен быть равен 0,008 м, частота вращения шнека – 248 мин⁻¹, а влажность кормосмеси – в пределах 70 %–98 %. При указанных значениях потребляемая мощность шнекового насоса-дозатора находится в пределах 1,0–1,4 кВт.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Методика проведения энергетической оценки механизированной технологии скармливания кормов животным

Для оценки эффективности механизированной технологии скармливания кормов животным предлагается использовать в качестве измерителя полную энергоемкость. Этот показатель позволяет оценить каждый элемент системы и отдельные технологические процессы.

Полная энергоемкость является комплексным показателем, состоящим из эксплуатационных и инвестиционных затрат. Эти затраты включают в себя расход топлива, электро- и тепловой энергии, затраты на машины, оборудование, транспортные средства, здания и сооружения. Они позволяют учитывать затраты живого труда на каждом участке технологического процесса. Для расчета энергии, затрачиваемой системой, используются энергетические эквиваленты. Они представляют собой суммарные затраты энергии, израсходованной непосредственно на производство.

На основании изложенного можно предложить формулу для определения энергоемкости процесса транспортировки, приготовления и раздачи кормов животным:

$$E_t = E_{t\text{трансп}} + E_{t\text{разд}} + E_{t\text{погр}}, \quad (4.1)$$

где $E_{t\text{трансп}}$ – энергоемкость транспортного участка, МДж;

$E_{t\text{разд}}$ – энергоемкость участка, обеспечивающего мобильную раздачу кормосмеси, МДж;

$E_{t\text{погр}}$ – энергоемкость участка, обеспечивающего погрузку кормов, МДж.

Важным участком системы производственного процесса является транспортный. Он обеспечивает доставку кормов в участок подготовки к скармливанию и раздачу кормосмеси животным. Соответственно, для выполнения работ используются транспортные средства общего назначения (автомобили, трактора с прицепами) и мобильные смесители-раздатчики кормов. Энергоемкость выполняемых транспортных работ определяется по формуле

$$E_{\text{трансп}} = E_{\text{тракт}}^{\text{трансп}} + E_{\text{трансп}}^{\text{прицепа}} + E_{\text{трансп}}^{\text{разд}} . \quad (4.2)$$

Затраты на топливо при выполнении транспортных работ определяются по формуле

$$E_{\text{тракт}} = P_{\text{ч}} T_{\text{маш}} \alpha_{\text{топ}} n_{\text{маш}} , \quad (4.3)$$

где $P_{\text{ч}}$ – часовая норма расхода топлива, кг/ч;

$T_{\text{маш}}$ – продолжительность работы транспортного средства, ч;

$\alpha_{\text{топ}}$ – энергетический эквивалент тракторного топлива, МДж/кг;

$n_{\text{маш}}$ – количество транспортных средств, шт.

Если трактор эксплуатируется со смесителем-раздатчиком кормов, то необходимо учитывать дополнительные затраты топлива на раздачу кормосмесей животным. В этом случае формула (4.3) будет иметь вид:

$$E_{\text{тракт}} = (P_{\text{ч}} T_{\text{маш}} + P_{\text{разд}} T_{\text{разд}}) \alpha_{\text{топ}} n_{\text{маш}} , \quad (4.5)$$

где $P_{\text{разд}}$ – часовая норма расхода топлива при раздаче кормосмеси, кг/ч;

$T_{\text{разд}}$ – продолжительность цикла раздачи кормосмеси, ч.

Затраты на приобретение транспортных средств можно определить по формуле

$$E_{\text{тракт}} = \frac{\alpha_{\text{маш}} M_{\text{маш}}}{T_{\text{маш}}^{\text{л}}} n_{\text{маш}} , \quad (4.6)$$

где $M_{\text{маш}}$ – масса транспортного средства, кг;

$T_{\text{маш}}^{\text{л}}$ – нормативный срок службы транспортного средства, лет;

$\alpha_{\text{маш}}$ – энергетический эквивалент транспортного средства, МДж/кг.

Энергозатраты живого труда определим по формуле

$$E_{\text{змаш}} = N_{\text{труд}} \alpha_{\text{труд}} , \quad (4.7)$$

где $N_{\text{труд}}$ – затраты живого труда, чел.;

$\alpha_{\text{труд}}$ – энергетический эквивалент живого труда, МДж/кг.

Сложив (4.4), (4.6), (4.7), определим энергоёмкость выполняемых транспортных работ:

$$E_{t_{\text{транс}}}^{\text{тракт}} = \left[P_{\text{ч}} T_{\text{маш}} \alpha_{\text{топ}} + \frac{\alpha_{\text{маш}} M_{\text{маш}}}{T_{\text{маш}}^1} \right] n_{\text{маш}} + N_{\text{труд}} \alpha_{\text{маш}}. \quad (4.8)$$

Если трактор эксплуатируется с раздатчиком-смесителем кормов, то энергоёмкость определяется уравнениями 4.5–4.7. Тогда

$$E_{t_{\text{транс}}}^{\text{тракт}} = \left[\left(P_{\text{ч}} T_{\text{маш}} + P_{\text{разд}} T_{\text{разд}} \right) \alpha_{\text{топ}} + \frac{\alpha_{\text{маш}} M_{\text{маш}}}{T_{\text{маш}}} \right] n_{\text{маш}} + N_{\text{труд}} \alpha_{\text{маш}}. \quad (4.9)$$

Энергоёмкость прицепов, задействованных на перевозке кормов, определяется по формуле

$$E_{t_{\text{транс}}}^{\text{прицеп}} = \frac{\alpha_{\text{пр}} M_{\text{приц}}}{T_{\text{приц}}} i_{\text{приц}}, \quad (4.10)$$

где $M_{\text{приц}}$ – масса прицепа, кг;

$T_{\text{приц}}$ – срок службы прицепа, лет;

$i_{\text{приц}}$ – число прицепов, шт.;

$\alpha_{\text{пр}}$ – энергетический эквивалент прицепа, МДж/кг.

Энергоёмкость смесителей-раздатчиков, задействованных в технологическом процессе, определяется по формуле

$$E_{t_{\text{транс}}}^{\text{разд}} = \frac{\alpha_{\text{разд}} M_{\text{разд}}}{T_{\text{разд}}} i_{\text{разд}}, \quad (4.11)$$

где $M_{\text{разд}}$ – масса смесителя-раздатчика, кг;

$T_{\text{разд}}$ – срок службы смесителя-раздатчика, лет;

$\alpha_{\text{разд}}$ – энергетический эквивалент смесителя-раздатчика, МДж/кг;

$i_{\text{разд}}$ – число раздатчиков кормов, шт.

Полученные формулы позволяют определить энергоёмкость транспортных работ при транспортировке кормов, транспортировке

и раздаче кормосмесей, с учетом разномарочности применяемого подвижного состава.

Погрузка кормов в местах их хранения может производиться мобильными погрузчиками. Независимо от типа погрузчика энергоемкость определяется по формуле

$$E_{\text{погр}} = E_{\text{епогр}} + E_{\text{ипогр}} + E_{\text{зпогр}}. \quad (4.12)$$

Затраты топлива при выполнении погрузочных работ определяются по формуле

$$E_{\text{епогр}} = H_{\text{погр}} \rho_{\text{топ}} m_{\text{к}} T_{\text{погр}} \alpha_{\text{топ}}, \quad (4.13)$$

где $H_{\text{погр}}$ – норма расхода топлива на погрузку кормов, л/т;

$m_{\text{к}}$ – масса загружаемого корма, т;

$T_{\text{погр}}$ – продолжительность работы погрузчика за год, ч;

$\alpha_{\text{топ}}$ – энергетический эквивалент топлива, МДж/кг;

$\rho_{\text{топ}}$ – плотность топлива, кг/л.

Затраты на приобретение мобильного погрузчика определяются по формуле

$$E_{\text{ипогр}} = \frac{\alpha_{\text{погр}} M_{\text{погр}}}{T_{\text{погр}}}, \quad (4.14)$$

где $M_{\text{погр}}$ – масса погрузчика кормов, кг;

$T_{\text{погр}}$ – нормативный срок службы, лет;

$\alpha_{\text{погр}}$ – энергетический эквивалент погрузчика кормов, МДж/кг.

Энергозатраты живого труда определяются по формуле

$$E_{\text{зпогр}} = N_{\text{погр}} \alpha_{\text{погр}}, \quad (4.15)$$

где $N_{\text{погр}}$ – затраты труда.

Подставив в формулу (4.1) значение формул (4.3–4.15), определим энергоемкость выполнения погрузочных работ мобильными погрузчиками кормов:

$$E_{\text{погр}} = H\rho_{\text{топ}} M_k T_{\text{погр}} \alpha_{\text{топ}} + \alpha_{\text{погр}} + \frac{\alpha_{\text{погр}} M_{\text{погр}}}{T_{\text{погр}}} + N_{\text{погр}} \alpha_{\text{погр}} . \quad (4.16)$$

Определив энергоемкость каждого участка, можно рассчитать совокупные затраты энергии на выполнение технологического процесса. Полученные значения энергоемкости производственных участков позволяют рассчитать коэффициент энергоемкости:

$$K_e = \frac{E_t^h}{E_t^c}, \quad (4.17)$$

где E_t^h – энергоемкость предлагаемого технологического процесса, МДж;

E_t^c – энергоемкость сравниваемого технологического процесса, МДж.

Полученное значение дает возможность определить коэффициент интенсификации:

$$U_e = (1 - K_e) 100 \% . \quad (4.18)$$

В соответствии с предложенной методикой разработана программа к ПЭВМ, позволяющая определить необходимые коэффициенты для каждого производственного участка или технологической линии. Чем выше полученные значения, тем эффективнее предлагаемая техническая система кормления животных.

4.2. Энергетический анализ участка транспортировки и раздачи кормов

Для проведения энергетического анализа необходимо рассчитать энергозатраты на транспортный процесс при выдаче животным всех видов кормов, скармливаемых животным как кормосмесь. С целью сокращения разномарочности транспортных средств, для доставки корнеклубнеплодов, зернофуража и грубых кормов, предпочтительно использовать прицепы общего назначения 2 ПТС-4. При перевозке зернофуража в кузове этих транспортных средств заделываются щели для исключения потерь, а при доставке грубых кормов – устанавливаются дополнительные борта. Для погрузки кормов использован погрузчик ПЭ-0,8 Б.

Технологическая схема транспортного процесса при реализации малозатратной механизированной технологии представлена на рис. 4.1.

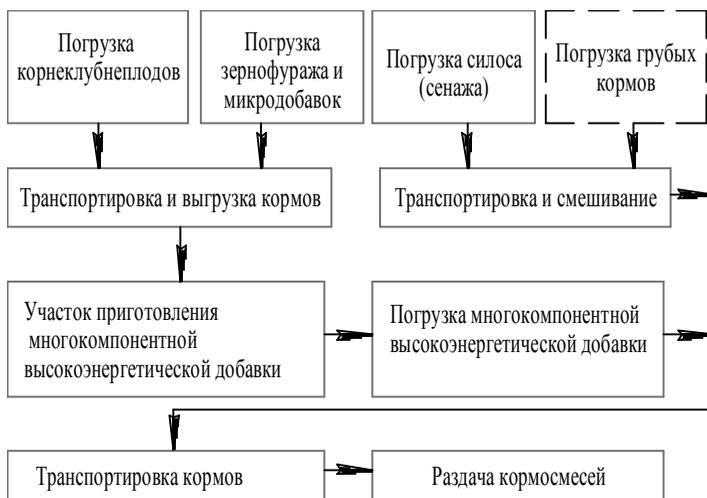


Рис. 4.1. Технологическая транспортная схема для реализации малозатратной механизированной технологии

Из схемы видно, что корнеклубнеплоды и зернофураж, формирующие многокомпонентную высокоэнергетическую добавку, доставляются на участок приготовления транспортными средствами общего назначения. Расчеты показывают, что для доставки заданного суточного объема кормов необходимо задействовать четыре транспортных агрегата ($n_{\text{корн}} = 3$ агрегата; $n_{\text{зерноф}} = 1$ агрегат) и один погрузчик кормов. Для доставки грубых кормов потребуется 4 агрегата.

Для транспортировки и раздачи кормосмеси животным используется мобильный модульный смеситель-раздатчик кормов. Эта машина обеспечивает одновременную выдачу животным многокомпонентной высокоэнергетической добавки и стебельчатых кормов, объем бункера машины равен 9 м^3 , грузоподъемность 4 т. Бункер раздатчика-смесителя разделен на две части, причем 70 % его предназначены для стебельчатых кормов, а 30 % – для многокомпонентной высокоэнергетической добавки. По результатам расчета установлено, что для рассмотренного транспортного участка потребуется восемь смесителей-раздатчиков кормов.

Схема организации транспортного маршрута для сравниваемой механизированной технологии представлена на рис. 4.2.

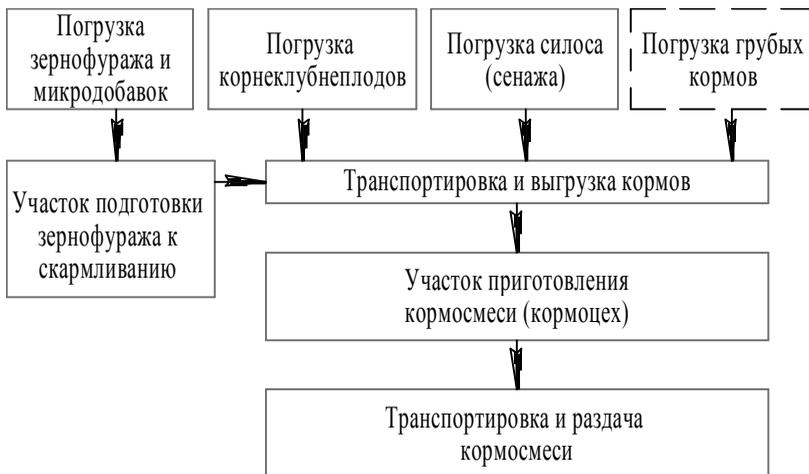


Рис. 4.2. Технологическая транспортная схема для реализации сравниваемой технологии скармливания кормов

Транспортировка всех видов кормов от мест хранения до кормоцеха осуществляется прицепами 2 ПТС-4, а зернофураж готовится к скармливанию комплектом отдельно установленных машин и оборудования.

По результатам расчета установлено, что для доставки грубых кормов, корнеклубнеплодов и зернофуража, соответственно, требуется: $n_{\text{груб}} = 5$ агрегатов; $n_{\text{корн}} = 3$ агрегата; $n_{\text{зерноф}} = 2$ агрегата. Число транспортных средств, необходимых для доставки силоса, составит 5 агрегатов. Погрузка силоса производится погрузчиком периодического действия ПЭ-0,8Б.

Для транспортировки и раздачи кормосмеси крупному рогатому скоту используется кормораздатчик КР-Ф-10. В соответствии с расчетом для транспортировки и раздачи кормосмеси потребуется 17 кормораздатчиков.

Полученные результаты расчета позволяют провести энергетический расчет двух транспортных участков. Данные к энергетическому расчету приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Энергетический расчет транспортных средств для сравниваемых технологий подготовки и раздачи кормов

Показатели	Транспортное подразделение для подготовки 3-компонентной добавки и ее раздачи	Транспортное подразделение для приготовления кормосмеси и ее раздачи
1	2	3
Затраты топлива трактором МТЗ-82 на доставку кормов	$W=101606,4$	$W=152409,6$
Часовая норма расхода топлива трактором МТЗ-82, кг/ч	4,41	4,41
Норма расхода топлива трактором МТЗ-82, л/г	4,9	4,9
Плотность топлива, кг/л	0,9	0,9
Продолжительность работы трактора МТЗ-82, ч	7 ч 20 мин	7 ч 20 мин
Число рабочих дней в году, дней	320	320
Затраты топлива на раздаче кормов, МДж	81285,1	172730,8
Часовая норма расхода топлива, кг/ч	4,41	4,41
Продолжительность работы трактора МТЗ-82, ч	7,2	7,2
Затраты топлива на погрузку кормов, МДж	2819,5	2819,5
Норма расхода топлива на погрузке кормов, л/г	0,11	0,11
Плотность топлива, кг/л	0,9	0,9
Масса загружаемого корма погрузчиком ПЭ-0,8 Б, кг	40	89
Масса корма, загружаемая самогрузчиком, кг	49	
Число рабочих дней в году	320	320

1	2	3
Энергетический эквивалент, МДж/кг	10	10
Энергоемкость тракторов МТЗ-82, МДж	582336	1035264
Энергетический эквивалент МТЗ-82, МДж/кг	86,4	86,4
Масса машин, кг	$3370 \times 18 = 60660$	$3370 \times 32 = 107840$
Нормативный срок службы МТЗ-82, лет	9	9
Энергоемкость прицепов для доставки кормов, МДж	132192	198288
Энергетический эквивалент, МДж/кг	86,4	86,4
Масса машин, кг	1530	1530
Срок службы, лет	10	10
Энергоемкость раздатчиков кормов, МДж	80640	80325
Энергетический эквивалент, МДж/кг	18,9	18,9
Срок службы, лет	9	9
Энергоемкость погрузчиков кормов, МДж	44472	62208
Энергетический эквивалент, МДж/кг	86,4	86,4
Масса погрузчика ПЭ-0,8 Б, кг	$2400 \times 2 = 4800$	$2400 \times 3 = 7200$
Срок службы погрузчика ПЭ-0,8 Б, лет	10	10

Примечание – учтены затраты топлива на транспортировку кормов, не требующих подготовки.

Расчет энергоемкости подсистем для транспортировки и раздачи кормов проводим в соответствии с разработанной программой. Коэффициент снижения энергоемкости:

$$K_e = \frac{6792790,7 + 806400}{7082923,7 + 1365525} = 0,89.$$

Полученное значение дает возможность определить коэффициент интенсификации:

$$U_e = (1 - K_e)100 \% = (1 - 0,89)100 = 10,1 \%$$

Результаты энергетического анализа транспортных участков показали, что при организации работ в соответствии с предлагаемой малозатратной технологией энергоемкость снижается на 10,1%. Эффективность достигнута за счет меньшего числа транспортных средств, занятости погрузчиков кормов и снижения затрат труда на выполняемые работы.

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. Техничко-экономические требования к машинам и оборудованию

Машинам и оборудованию в животноводстве в условиях функционирования сельскохозяйственного производства принято давать следующие оценки: экономическую, энергетическую, экологическую, социальную и другие, определяемые соответствующими критериями эффективности.

Важное значение имеют комплексные энергоэкономические требования, хотя для аграрного производства все возрастающее значение приобретают экологические, инженерно-психологические и эргономические оценки.

Определим наиболее важные технико-экономические требования, предъявляемые к машинам и оборудованию в животноводстве:

- целесообразная специализация и унификация машин и оборудования, связанные с перспективами развития сельскохозяйственного производства;
- установление оптимальной частоты параметрического ряда однородных машин и оборудования;
- определение степени сборности, агрегативности и унификации стандартных узлов и деталей машин и оборудования;
- установление новых путей совершенствования технологии и конструктивных решений машин и оборудования;
- оптимальное импортозамещение и освоение отечественного машиностроения и др.

Для современного периода развития машин и оборудования в животноводстве характерна тенденция развития технико-экономических исследований с оптимизацией значений технических параметров, рационального вида технологической схемы и типов оборудования на стадии их предпроектной разработки.

При этом выделяют три иерархических уровня оптимизации машин и оборудования:

- выбор принципа действия машин и оборудования;
- поиск наилучшей структуры и технологической схемы процесса в рамках выбранного принципа действия машин и оборудования (задача структурной оптимизации);

– определение наилучших значений параметров выбранной структуры (задача параметрической оптимизации).

Такую задачу называют комплексной оптимизацией структуры, устройства и параметров машин и оборудования.

Наибольший эффект дает первый уровень, связанный с поиском новых, более рациональных принципов работы и технических идей. В меньшей мере дают эффект методы структурной и параметрической оптимизации. Но, тем не менее, наибольший результат дает только комплексная оптимизация.

Технико-экономический анализ предполагает выбор (обоснование) объективных критериев эффективности (предпочтение).

Достаточно полно и правильно всякая техническая система характеризуется тогда, когда удастся выяснить, от каких частных показателей качества (критериев эффективности) системы зависит основной результирующий показатель (один или несколько) эффективности.

В рыночных условиях к таким показателям относят чистую приведенную ценность, соотношение выгод и издержек на всех этапах жизненного цикла системы: проектирования, освоения производства, эксплуатации и уничтожения, срока окупаемости капиталовложений, внутренней ставки дохода, дефицита ресурсов и замещения импорта.

При комплексной оптимизации машин и оборудования рассматриваются, как правило, только стационарные режимы работы установок, а при составлении математической модели установки в целом и большинства элементов оправдано описание процессов с сосредоточенными параметрами, выражаемые обыкновенными алгебраическими и дифференциальными уравнениями, хотя иногда более уместно математическое описание элементов в частных производных.

С учетом сказанного, задача комплексной оптимизации системы, как правило, требует декомпозиции системы и решения вопросов для отдельных элементов с последующей координацией таких решений.

Для сложных машин и оборудования характерны выделение четырех иерархических уровней декомпозиции: технологическая схема в целом, энергетические агрегаты, группы элементов оборудования, элементы оборудования.

Наиболее эффективным способом взаимодействия между подзадачами на отдельных уровнях иерархии является применение принципа иерархии для любого значения исходной информации на входе в задачу j -го уровня, полученный от верхнего (+1)-го уровня,

выдается оптимальное решение задачи j -го уровня. Данный принцип сокращает до минимума количество информации, передаваемой от одного уровня к другому, обеспечивает достаточную самостоятельность решения подзадач на отдельных уровнях, позволяет осуществить локальную обработку информации на подсистемах.

5.2. Методы оптимизации машин и оборудования

Задачу оптимизации по заданному результирующему экономическому критерию эффективности K_p , называемому целевой функцией, формулируют в виде $K_p(K_1 \dots K_n) = \min$ при $Z_{\min}^k \leq Z_i^k \leq Z_{i_{\max}}^k$, $Z_{\min_i} \leq Z_i \leq Z_{i_{\max}}$, где $K_i(Z_i, Z_i^k)$ – частные i -е показатели эффективности, зависмые от параметров связей Z_i и конструктивных параметров Z_{lk} – системы.

В механизации задачи оптимизации сложных систем, конструкций или процессов, сформулированные математически, в общем случае могут быть объединены под общим названием нелинейного программирования.

При классификации задач нелинейного программирования по характерным чертам метода оптимизации выделяются методы, использующие производные величины переменных, называемые градиентными методами, и методы поиска, которые, как правило, используют ЭВМ.

Градиентные методы во многих случаях ускоряют решение задач оптимизации в сравнении с методами поиска, однако имеют два главных недостатка:

- в сложных математических моделях с большим числом переменных трудно получить производные в виде аналитических функций, а табличные данные использовать неудобно;
- как правило, времени для подготовки задачи к решению необходимо больше, чем в методах поиска.

В свою очередь, методы направленного поиска не требуют регулярности или непрерывности условий функции и существования производных, проще учитывать ограничения.

Существенным недостатком методов направленного поиска является неопределенность решения при наличии локальных экстремумов функции. Последнее требует достаточно обоснованных диапазонов шагов поиска, а, следовательно, и увеличения времени решения задачи.

Большими потенциальными возможностями для эквивалентного описания и оптимизации машин и оборудования большой сложности имеют методы теории планирования экспериментов для построения упрощенных математических моделей:

- построение аппроксимационных зависимостей, связывающих технико-экономический показатель энергетического объекта в целом с небольшим числом интересующих нас параметров;

- то же для отдельных элементов машин и оборудования с координатией решения для всей системы.

В целом проблема решения задач оптимизации сложных машин и оборудования требует использования ЭВМ и пока недостаточно формализована. Многое зависит от знаний в реальных процессах и от разработки программного продукта.

5.3. Оптимизация по критерию энергосбережения

Энергосбережение является важнейшим критерием энергоэффективности на всех уровнях и во всех элементах машин и оборудования, применяемого в животноводстве.

Под критерием эффективности любой системы следует понимать совокупность социальных и технических параметров и показателей, которые позволяют оценивать степень их соответствия удовлетворяемой ими потребности на двух уровнях:

- качественном – показатели производительности, характеризующие уровень: жизнеобеспечения населения; экономического развития аграрного производства; экологического благополучия; наличия и совершенствования нормативно-правовой базы; метрологического обеспечения; образовательных программ для населения и отраслей АПК и др.;

- количественном – показатели: производительности; удельных расходов на единицу конечной продукции; валового внутреннего продукта (ВВП) и валового дохода агропромышленного предприятия; надежность и энергобезопасность комплексного использования и т. п.

Обычно такие задачи являются многокритериальными и включают несколько параметров оптимизации: по капитальным вложениям, энерго- и материалоемкости, срокам окупаемости, срокам ввода в эксплуатацию, закупкам за рубежом, трудовым ресурсам и т. д., но главной целевой функцией служит энергоемкость конечной сельскохозяйственной продукции.

При разработке системы мероприятий по энергосбережению, обычно в результате аудита размечают следующие стадии жизненного цикла каждого мероприятия: предпроектный анализ, этап проектирования, наладку технологии производства, производственные испытания, коррекцию проекта и, наконец, этап эксплуатации проекта.

Предпроектный анализ позволяет сравнительно в короткий срок отобрать приоритетный ряд мероприятий, которые должны с максимальной эффективностью решить оптимизационную задачу.

В предпроектном анализе ставится и решается задача декомпозиции подсистем на отдельные элементы и формирование целевых последовательностей элементов, которые подвергаются исследованию.

Наиболее простой и пока наиболее плодотворной считается разработка и изучение экспертной модели предпроектного анализа, основанной на принципах и методах теории множеств с привлечением квалифицированных специалистов в данной области – экспертов как источников информации для априорного оценивания путей решения частных или глобальных проблем и подготовки решения для этапа проектирования.

После установления приоритетного ряда энергосберегающих мероприятий по элементам машин и оборудования разрабатываются и оптимизируются расчетные модели этих элементов.

Наиболее простыми являются детерминированные физические модели элементов машин и оборудования, если они получены как результат применения физических или физико-химических законов, определяющих сущность изучаемого объекта. Оптимизация таких моделей не вызывает серьезных трудностей при определении параметров с использованием вычислительной техники (методами градиентного или направленного спуска).

Предварительное физическое моделирование всегда желательно, так как позволяет хотя бы качественно определить характер и силу взаимодействия между элементами подсистемы и оптимизируемыми параметрами.

На практике трудно оценить и учесть влияние эксплуатационных факторов производства, поэтому более предпочтительными являются статистические методы исследования оптимизируемых объектов.

Общими для всех статистических методов является наличие самого объекта (процесса) и то, что исследуемые параметры рассматриваются как случайные величины, поэтому такие характеристики

случайных величин, как закон распределения, математическое ожидание, дисперсия и другие статистические показатели играют в любом из этих методов важную, а зачастую и определяющую роль.

Применение статистических методов для определения количественной связи между исследуемыми переменными предполагает эксперимент на существующем оптимизируемом объекте, анализ статистического материала, (статистическая оценка параметров) и установление статистической зависимости между параметрами (статистическая оценка гипотез).

Статистическая оценка параметров необходима для установления теоретического закона распределения случайной величины (нормального (Гаусса), редких событий (Пуассона)), равной вероятности и других с определением их параметров (математического описания, среднеквадратического отклонения и т. д.).

Из методов определения статистической связи между параметрами распределение находят: корреляционный, регрессионный, дисперсионный и техноценологический. Корреляционный анализ позволяет устанавливать линейную причинно-следственную связь между статистическими параметрами и, как правило, используется при наличии связи между структурой и выходными параметрами системы (например, влияние частотного регулятора автоматизированного объекта на расход энергии).

Регрессионный анализ применяют при отсутствии априорной причинно-следственной связи между параметрами (например, срока службы от исследуемых параметров воздействия на объект и др.).

Дисперсионный анализ применяют обычно, когда независимая переменная не измеряется, хотя может принимать различные значения (например, влияние человека-оператора на точность поддержания режима и расхода энергии на неавтоматизированном объекте).

Наконец, на уровне техноценологического анализа выполняют статистические исследования совокупности большого числа однотипных машин и оборудования (их технической популяции) методом гиперболических распределений и установлении закономерности их распределения на отраслевом и региональном уровне АПК.

Влияние результатов исследований, экспериментов и производственных испытаний учитывается в корректировке документации проекта мероприятий и наладке технологии производства.

Следующим шагом в системе мероприятий энергосбережения после проектной подготовки является наладка технологии производства.

Современные методы проектирования объекта и технологии производства служат по своей сути также системными методами с использованием систем автоматизированного проектирования и технологии производства машин и оборудования, применяемого в животноводстве, методы функционально-системного анализа, эвристического проектирования и другие.

5.4. Основы системного подхода к проектированию поточных механизированных процессов на животноводческом предприятии

В производственный процесс на животноводческом предприятии вовлечены различные производственные элементы, взаимодействующие друг с другом и образующие материалопроводящие системы. Функционирование систем характеризуется наличием сложных связей внутри этих систем.

Системный подход предполагает последовательный переход от общего к частному, когда в основе рассмотрения лежит конечная цель, ради которой создается система (рис. 5.1). Последовательность формирования системы при системном подходе включает в себя несколько этапов.

Первый этап. Определяются и формулируются цели функционирования системы.

Второй этап. На основании анализа цели функционирования системы и ограничений внешней среды определяются требования, которым должна удовлетворять система.

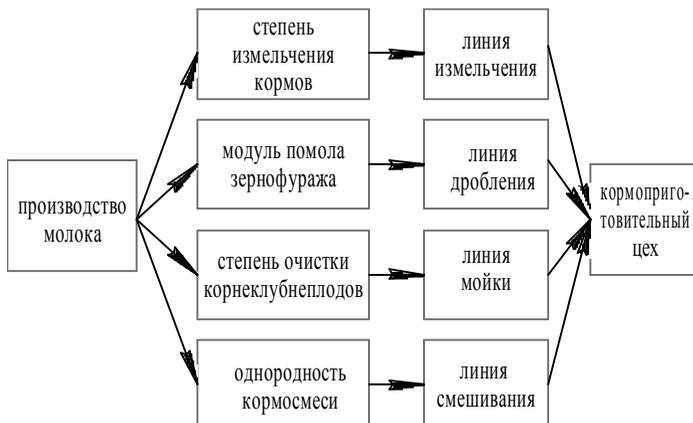


Рис. 5.1. Последовательность формирования систем при системном подходе

Третий этап. На базе этих требований формируются, ориентировочно, некоторые подсистемы.

Четвертый этап. Анализ различных вариантов и выбор подсистем, организация их в единую систему. При этом используются критерии выбора.

Таким образом, при формировании поточных механизированных процессов на животноводческом предприятии должен учитываться принцип последовательного продвижения по этапам создания системы. Соблюдение этого принципа означает, что система сначала должна исследоваться на макроуровне, а затем на микроуровне.

Макроуровень (макрологистика) рассматривает вопросы, связанные с анализом конъюнктуры рынка поставщиков и потребителей, выработкой общей концепции распределения, размещением производств на ферме, выбором вида транспорта и транспортных средств.

Основные задачи макрологистики:

- выбор схемы распределения материального потока;
- определение оптимального количества распределительных центров (складов) на обслуживаемой территории;
- определение оптимального места расположения распределительного центра (склада) на обслуживаемой территории, а также ряд других задач, связанных с управлением процессом прохождения материального потока по территории фермы, хозяйства.

На макроуровне цепь, через которую последовательно проходит некоторый материальный поток, состоит из нескольких самостоятельных предприятий. Управление каждым из этих предприятий осуществляется собственником обособленно.

При формировании макрологистической системы необходимо учитывать трудности, связанные с неодинаковыми условиями поставки машин и оборудования для механизации технологических процессов, экономическими особенностями межхозяйственных экономических отношений, а также ряд других барьеров.

На уровне макрологистики выделяют три вида логистических систем.

Логистические системы с прямыми связями. В этих логистических системах материальный поток проходит непосредственно от производителя продукции к ее потребителю, минуя посредников (рис. 5.2, а).

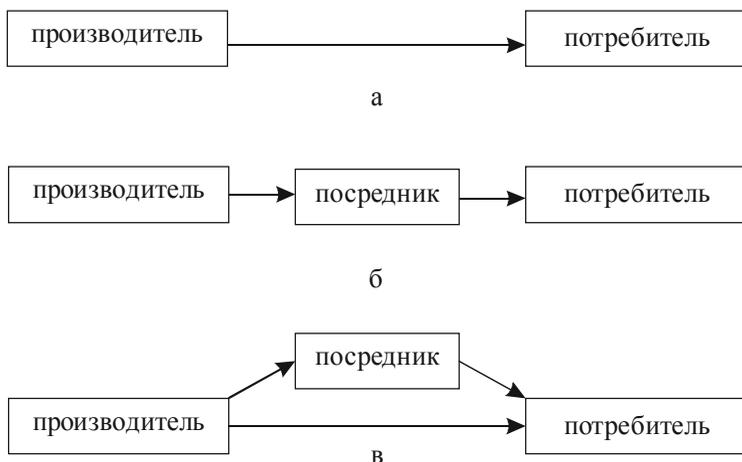


Рис. 5.2. Принципиальные схемы логистических систем различных видов

Эшелонированные логистические системы. В таких системах на пути материального потока есть хотя бы один посредник (рис. 5.2, б).

Гибкие логистические системы. Здесь движение материального потока от производителя продукции к ее потребителю может осуществляться как напрямую, так и через посредников (рис. 5.2, в).

Локальные вопросы в рамках отдельных производственных подразделения животноводческого предприятия решает *микроуровень (микрологистика)*.

Микрологистические системы представляют собой класс внутрипроизводственных логистических систем, в состав которых входят технологически связанные производства, объединенные единой инфраструктурой.

К ним относят технологические линии подготовки кормов к скармливанию, транспортирования и раздачи кормов, доения и первичной обработки молока в условиях животноводческого предприятия и другие производственные подразделения.

Логистика, разрабатывая в каждом звене общей цепи методы минимизации и оптимизации, формирует конкретные задачи, решение которых обеспечивает минимальные издержки при производстве продукции в условиях животноводческого предприятия. При этом все звенья материалопроводящей цепи, то есть все элементы макрологистических и микрологистических систем, должны работать как единый слаженный механизм.

Для решения этой задачи необходимо с системных позиций подходить к выбору техники, к проектированию взаимосвязанных технологических процессов на различных участках движения материалов, к вопросам согласования зачастую противоречивых экономических интересов и к другим вопросам, касающимся организации материальных потоков.

Таким образом, системный подход позволяет увидеть изучаемый объект как комплекс взаимосвязанных подсистем, объединенных общей целью, раскрыть его интегративные свойства, внутренние и внешние связи.

5.5. Компоновка поточных механизированных линий

Под поточной механизированной линией следует иметь в виду комплект машин и оборудования, расположенных в порядке последовательности выполнения технологических операций с необходимой (заданной) производительностью. Для характеристики поточной линии важное значение имеет вид связи между машинами или участками линии, которая может быть нескольких типов:

– жесткая (рис. 5.3), когда все машины от первой до последней должны работать с производительностью, одинаковой или кратной основной машине комплекта машин, например, при приготовлении комбикормов или при раздаче кормов, удалении навоза и т. д.

$$Q_A = Q_1 \leq Q_2 \leq Q_3 \dots \leq Q_n . \quad (5.1)$$

При жесткой связи выход из строя любого механизма или устройства приводит к остановке сразу всей линии.



Рис. 5.3. Принципиальная схема жесткой связи соединения машин в поточных линиях

Технологическая линия с жесткой связью характеризуется последовательным соединением элементов. Надежность работы такой линии или комплекта машин определяется как вероятностью P_i безотказной работы i -й машины и определяется в общем виде по формуле

$$P_c = \prod_1^k P_n, \quad (5.2)$$

где k – число машин, входящих в состав технологической линии;
 P_n – вероятность безотказной работы n -й машины.

Из формулы (5.2) видно, что надежность работы технологической линии с жесткой связью определяется аналогичным показателем каждой входящей в ее состав машины:

– гибкая (рис. 5.4), когда после каждой машины имеется накопительная емкость. Следовательно, работа каждой машины строго зависит от производительности стоящей впереди или последующей машины. Допускается некоторое, порой значительное, отклонение, так как наличие оперативных емкостей должно компенсировать разницу в производительности.



Рис. 5.4. Принципиальная схема гибкой связи соединения машин в поточных линиях

В такой технологической линии все машины, расположенные до первой накопительной емкости, составляют первую секцию, за ней – вторую и т. д. При таком расположении машин отказ предыдущей секции вызывает отказ последующей только тогда, если за время его устранения исчерпывается запас кормов, находящихся в промежуточной емкости.

Вероятность безотказной работы линии с данной связью машин:

$$P_c = 1 - \prod_1^k (1 - P_n). \quad (5.3)$$

При параллельном соединении машин полный отказ наступит в случае остановки всех участков линии. Надежность работы линий с гибкой связью выше, чем с жесткой.

Линии с гибкой связью на практике громоздки, металлоемкие и дорогостоящие. В их состав включены оперативные емкости больших объемов, вызывающие отказы линии:

– смешанная (рис. 5.5), когда комплект оборудования делят на отдельные линии (участки), состоящие из группы машин с жесткими

связями между ними. В свою очередь, линии (участки) соединены между собой гибкими связями в виде накопителей-дозаторов.



Рис. 5.5. Принципиальная схема смешанной связи соединения машин в поточных линиях

В линиях со смешанной связью при возникновении неполадок в работе какой-либо машины останавливаются не все, а лишь жестко связанные с ней, остальные машины продолжают работать. Если неисправность быстро устраняется, линия может работать практически без остановок, т. е. простои соседних машин и участков взаимно компенсируются.

Безотказность работы комплектов машин со смешанным соединением машин можно определить по формуле

$$P_c = 1 - \prod_1^m \left[1 - \prod_1^k (1 - P_n) \right], \quad (5.4)$$

где m – число последовательных групп, соединенных параллельно.

Из выражений (5.2), (5.3), (5.4) видно, что надежность комплекта машин со смешанной связью выше, чем двух предыдущих. При остановке одной из машин нарушается ритм работы связанных жестко с ней машин. Остальное оборудование продолжает выполнять рабочий процесс. Если неисправность незначительна, то комплект машин может работать практически без остановок.

5.6. Определение условия непрерывности работы поточной линии

При поточной организации производственного процесса продукт, полученный в результате работы предыдущей машины, является исходным материалом для последующей. В этом случае операции на всех рабочих местах выполняются в промежутки времени, равные или кратные ритму потока при непрерывном движении обрабатываемого продукта.

При оценке работы машин и технологического оборудования *производительность* рассматривается в качестве основного

технико-экономического показателя, позволяющего судить об эффективности использования технических средств в данном технологическом процессе.

Производительность поточной линии можно представить в виде, удовлетворяющем условию потока:

$$Q_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \eta_{ij} \leq \sum_{j=1}^{n_{i+1}} q_{(i+1)j} \eta_{(i+1)j} \quad (5.5)$$

или в приведенном виде для расчета каждого звена потока получаем:

$$Q_{\text{пр}} = k_m q \eta, \quad (5.6)$$

где k_m – число машин, шт.;

q – производительность машин, т/час;

η – коэффициент использования рабочего времени машины.

Зная производительность поточной линии и машин звена потока, определяем потребность в них:

$$k_m = \frac{Q_{\text{пр}}}{q\eta}. \quad (5.7)$$

Для вновь проектируемых поточных линий производительность машин находим из уравнения

$$q = \frac{Q_{\text{пр}}}{k_m \eta}. \quad (5.8)$$

Так как производительность машин в звеньях потока не всегда удастся уравнять, то следует придерживаться ее кратности производительности основного базового звена.

Наивыгоднейшее использование производительности машин в звене потока получаем в том случае, когда коэффициент потока равен 1:

$$K_n = \frac{Q_{\text{пр}}}{k_{ij} q_{ij} \eta_{ij}} \approx 1. \quad (5.9)$$

Используются также показатели, характеризующие надежность машин и технологического процесса, – *коэффициенты готовности и технического использования машин и оборудования.*

Вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается, называется *коэффициентом готовности:*

$$K_r = \frac{t}{t + t_b}, \quad (5.10)$$

где t – наработка на отказ, час;

t_b – среднее время вынужденных простоев на ремонт отказов, час.

Так как коэффициент готовности является величиной случайной, зависящей от фактического времени работы производственных звеньев, то для определения, можно воспользоваться понятием геометрической вероятности. Интегральный закон распределения этой случайной величины можно определить из выражения:

$$F(K_u) = P(K_r \leq K_{rj}) = \begin{cases} 0, T_\phi < 0 \\ \frac{T_\phi^2}{T_p^2}, 0 \leq T_\phi < T_p, \\ 0, T_\phi > T_p \end{cases} \quad (5.11)$$

где P – вероятность разрыва технологического цикла;

K_r – коэффициент готовности совокупности машин технологического цикла;

K_{rj} – коэффициент готовности машин производственного звена;

T_ϕ – фактическое время работы совокупности машин технологического цикла;

T_p – расчетное время работы совокупности машин технологического цикла.

Плотность распределения коэффициента готовности:

$$f(K_r) = \begin{cases} 0, T_\phi < 0 \\ \frac{2T_\phi}{T_p}, 0 \leq T_\phi < T_p \\ 0, T_\phi > T_p \end{cases} \quad (5.12)$$

Тогда вероятность разрыва технологического процесса можно определить по формуле

$$P_{T.ц} = 1 - \left\{ C_{kj}^{K_{jp}} (K_r \leq K_{rj})^{K_j} [1 - P(K_r \leq K_{rj})]^{K_j - K_j} \right\}, \quad (5.13)$$

где C_{kj} – стоимость простоя машин;

k_j – число машин, каждого производственного звена;

K_{rj} – минимальное допустимое число машин в производственном звене, обеспечивающее непрерывность технологического цикла.

Анализ формулы (5.13) показывает, что вероятность разрыва технологического процесса кормления животных зависит от числа машин в каждом производственном звене и коэффициента их готовности.

Учитывая вышесказанное, фактическую производительность любого комплекта оборудования на стадии проектирования можно определить:

$$Q = \frac{B_\phi}{t} \cdot \eta_{T.ц}, \quad (5.14)$$

где B_ϕ – продукция, полученная за смену, кг;

t – сменное время, час.

Принимая это во внимание, условие непрерывности поточной линии можно записать так:

$$\frac{B_{\phi i}}{\sum_{j=1}^{K_i} q_{ij} \cdot \eta_{ij}} \geq \frac{B_{\phi(i+1)}}{\sum_{j=1}^{K_{i+1}} q(i+1) \cdot j \eta(i+1) j}, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (5.15)$$

Из формулы видно, что время пребывания продукта, тормозящего процесс внутри машины каждого последующего звена, должно быть меньше или равно времени предыдущего звена потока. Для оценки технологических линий необходимо знать фактическую

производительность. Особенно важно знать фактическую производительность при концентрации отрасли, что объясняется большими ущербами в случае отказов оборудования, сложностью его эксплуатации и т. п.

5.7. Организация транспортировки кормов в места подготовки к скармливанию

Потребное число транспортных средств для перевозки кормов с мест хранения на кормоприготовительные площадки можно определить по формуле

$$n_{\Gamma} = \frac{Q_{л} T_{ц}}{W_{\Gamma} \eta_{\Gamma}}, \quad (5.16)$$

где $Q_{л}$ – часовая производительность технологической линии подготовки кормов к скармливанию, т/ч;

$T_{ц}$ – длительность транспортного цикла, ч;

W_{Γ} – грузоподъемность транспортного средства, т;

η_{Γ} – коэффициент использования времени смены.

Транспортный цикл состоит из следующих основных частей:

$$T_{ц} = T_1 + T_2 + T_3, \quad (5.17)$$

где T_1 – время пробега транспортного средства, ч;

T_2 и T_3 – соответственно, время, затраченное на загрузку и выгрузку кормов из транспортного средства, ч.

Время пробега транспортного средства можно определить по формуле

$$T_1 = \frac{2L}{v_{ср}}, \quad (5.18)$$

где L – длина пути, км;

$v_{ср}$ – средняя скорость движения транспортного средства, км/ч.

Максимум производительности транспортного средства будет достигнут, когда

$$L = \frac{W_T v_{cp}}{Q_{3-в}}. \quad (5.19)$$

Из формулы (5.19) можно получить значение грузоподъемности транспортного средства, когда комплексный показатель производительности имеет максимум:

$$W_T = \frac{LQ_{3-в}}{v_{cp}}. \quad (5.20)$$

5.8. Организация работы мобильных раздатчиков кормов

Механизация раздачи кормов на фермах и промышленных комплексах осуществляется кормораздатчиками, отличающимися по принципу действия и конструкции. Число мобильных кормораздатчиков, необходимых для обслуживания фермы, определяют исходя из времени раздачи корма в одном помещении режима работы кормоцеха и наличия или отсутствия накопительной емкости готовой кормосмеси.

Число кормораздатчиков, необходимых для обслуживания поголовья животных:

$$k_p = \frac{m_{ж} q}{Q_c}, \quad (5.21)$$

где $m_{ж}$ – число животных на ферме;

Q_c – производительность кормораздатчика за 1 ч сменного времени, кг/ч.

Производительность кормораздатчика за 1 ч сменного времени, кг/ч:

$$Q_c = Q k_p, \quad (5.22)$$

где Q – производительность кормораздатчика за 1 ч чистого времени, кг/ч:

$$Q = qv_a K_v, \quad (5.23)$$

где k_p – коэффициент использования рабочего времени:

$$k_p = \frac{t}{t + t_0}, \quad (5.24)$$

где t – время, затрачиваемое на непосредственную раздачу корма, ч;
 t_0 – время, затрачиваемое на непроизводительные (вспомогательные) операции, ч.

Тогда

$$t_0 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7, \quad (5.25)$$

где t_1 – время доставки пустого кормораздатчика от места содержания животных к месту загрузки и обратно, ч;

t_2 – время загрузки, ч;

t_3 – время на раздачу кормов, ч;

t_4 – время, затрачиваемое на простой по технологическим причинам, ч;

t_5 – время, затрачиваемое на техническое обслуживание, ч;

t_6 – время, затрачиваемое на ремонт машины, ч;

t_7 – время переезда от одной линии раздачи к другой, если вместимость кузова (бункера) обеспечивает раздачу корма в нескольких линиях, ч.

Время пробега транспортного средства можно определить по формуле

$$t_1 = \frac{2L}{v_{cp}}, \quad (5.26)$$

где L – длина пути, км;

v_{cp} – средняя скорость движения транспортного средства, км/ч.

Время на выполнение погрузочно-разгрузочных работ определим по формуле

$$t_2 = \frac{W_T k_T}{Q_{3-в}}, \quad (5.27)$$

где k_T – коэффициент использования грузоподъемности транспортного средства;

W_T – грузоподъемность транспортного средства;

$Q_{3-в}$ – средняя гармоническая производительность погрузочно-разгрузочного процесса, т/ч.

$$Q_{3-в} = \frac{2Q_{загр} Q_{выгр}}{Q_{загр} + Q_{выгр}}. \quad (5.28)$$

Полезная грузоподъемность транспортного средства:

$$W_T = \frac{V_{раз} - V_{шнека}}{\rho}, \quad (5.29)$$

где $V_{раз}$ – объем кузова раздатчика, м³;

$V_{шнека}$ – рабочих органов, установленных в кузове раздатчика, м³;

ρ – плотность кормосмеси, кг/м³.

Для случая, когда в кузове раздатчика установлен шнек, его объем определяется по формуле

$$V_{шнека} = \frac{\pi(D_{ш}^2 - d_{в}^2)}{4} L_{ш}, \quad (5.30)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шнека, м;

$d_{в}$ – диаметр вала шнека, м;

$L_{ш}$ – длина шнека, м.

Задавшись величиной диаметра $D_{ш}$, определим $L_{ш}$ из соотношения:

$$L_{ш} = D_{ш} (0,25 \dots 0,35). \quad (5.31)$$

Производительность погрузчика можно определить по формуле

$$Q_{загр} = m_{п} k_{ц}, \quad (5.32)$$

где $m_{п}$ – масса груза при подъеме, т;

$k_{ц}$ – число циклов машины за 1 ч непрерывной работы зависит от продолжительности одного цикла:

$$k_{\text{ц}} = \frac{3600}{T'_{\text{ц}}},$$

где $T'_{\text{ц}}$ – время цикла работы, ч,

$$T'_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^{k_n} t_{\text{оп}i}; \quad (5.33)$$

$t_{\text{оп}}$ – время, затрачиваемое на выполнение отдельных операций при погрузке, час;

k_n – число элементов работы погрузчика.

Время, затрачиваемое на раздачу кормов животным, можно определить по формуле

$$t_3 = \frac{m_{\text{ж}} \cdot L_{\text{разд}}}{v_{\text{разд}}}, \quad (5.34)$$

где $m_{\text{ж}}$ – количество животных, обслуживаемых за один цикл, шт.;

$L_{\text{разд}}$ – длина фронта раздачи кормов на одно животное, $L_{\text{разд}} = 1$ м;

$v_{\text{разд}}$ – скорость движения агрегата при раздаче кормов, $v_{\text{разд}} = 5,2$ км/ч.

Число кормораздатчиков, необходимых для обслуживания поголовья животных:

$$m_{\text{р}} = \frac{m_{\text{ж}} q t_{\text{раз}}}{W_{\text{Т}} (t_{\text{движ}} + t_{\text{погр}})}, \quad (5.35)$$

где $m_{\text{ж}}$ – число животных на ферме, гол.;

q – норма кормосмеси на одно животное, кг;

$t_{\text{погр}}$ – время на погрузку раздатчика, $t_{\text{погр}} = 0,5 \dots 2$ часа.

Согласно приведенной методике произведен технико-экономический расчет самоходных смесителей-раздатчиков (табл. 5.1) для различных размеров ферм.

Таблица 5.1

Технико-экономические характеристики самоходных смесителей-раздатчиков кормов при годовом удое коров 6000 литров

Показатель	Вместимость бункеров смесителей-раздатчиков				
	6	10	12	14	20
Ферма 200 коров					
Удельные капитальные вложения, долл./т	1,46	2,23	3,86	4,36	8,62
Прямые затраты, долл./т	3,38	4,36	7,33	8,42	15,51
Приведенные затраты, долл./т	3,67	4,92	7,8	9,07	17,23
Ферма 400 коров					
Удельные капитальные вложения, долл./т	0,73	1,11	1,92	2,16	4,28
Прямые затраты, долл./т	2,33	2,74	4,14	4,43	7,22
Приведенные затраты, долл./т	2,47	2,96	4,52	4,86	8,08
Ферма 600 коров					
Удельные капитальные вложения, долл./т	0,97*	0,74	1,28	1,44	2,85
Прямые затраты, долл./т	4,52*	2,26	3,21	3,54	5,92
Приведенные затраты, долл./т	4,71*	2,41	3,47	3,83	6,49
Ферма 800 коров					
Удельные капитальные вложения, долл./т	-	1,11*	1,98*	2,30*	2,14
Прямые затраты, долл./т	-	2,94*	4,00*	4,74*	4,84
Приведенные затраты, долл./т	-	3,16*	4,40*	5,10*	5,27

* Показатели с применением двух смесителей-раздатчиков.

На основании данных таблицы 5.1 можно сделать выводы:

– для молочно-товарных ферм до 200 голов и до 1000 голов откормочного поголовья вместимость бункера смесителя-раздатчика должна быть не более 6 м³;

– для ферм с большим поголовьем целесообразно выпускать смесители-раздатчики с вместимостью бункера около 11 м³;

– сочетание двух смесителей-раздатчиков с бункерами 6 м³ и 11 м³ позволит обслужить любые молочно-товарные фермы, имеющиеся в республике, с наименьшими эксплуатационными затратами.

Для минимизации транспортных издержек могут быть применены различные варианты организации маршрутов движения автотранспорта. Наиболее простым из них является *маятниковый маршрут* движения с обратным загруженным пробегом транспортного средства. При данном варианте организации транспортировки кормов транспортное средство загружено наполовину.

Эффективность использования транспортного средства возрастает при его *частично или полностью груженом обратном пробеге*. Для этого случая склады хранения кормов должны быть расположены на незначительном расстоянии от других сельскохозяйственных объектов. При расчете числа транспортных средств необходимо учитывать затраты времени на выполнение дополнительной транспортной работы.

Наиболее эффективно организовывать транспортный процесс с обратным полностью груженым транспортным средством. В этом случае коэффициент использования пробега равен единице. Холостой пробег транспортное средство совершает только перед началом и в конце рабочего процесса.

Маршрут движения транспортных средств, доставляющих одновременно несколько видов кормов, отличается наличием нескольких мест погрузки груза. Практически транспортное средство в данном случае движется по кольцевому маршруту.

Таким образом, для транспортировки кормов могут быть составлены различные варианты маршрутов. *Проблема планирования перевозок включает определение маршрута с минимумом холостого пробега транспортного средства, распределение подвижного состава и погрузочных средств по маршрутам работы, которые должны быть тесно увязаны с производительностью стационарных машин и оборудования.*

При организации движения транспортного средства необходимо минимизировать формулу

$$L_x = \sum_{i=1}^{n_i} (L_x^1 - L_{гп}) k_i, \quad (5.36)$$

где L_x^1 – расстояние, преодолеваемое транспортным средством без груза, км;

k_i – число маршрутов.

При решении задачи нумеруются маршруты в порядке возрастания разностей $(L_x^1 - L_{гр})$. В этом случае справедлива формула

$$(L_{x_1}^1 - L_{гр1}) \leq (L_{x_2}^1 - L_{гр2}) \leq \dots \leq (L_{x_n}^1 - L_{грn}). \quad (5.37)$$

Тогда оптимальное решение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} x_1 &= \min(m_{к1}, k_T), \\ x_2 &= \min(m_{к2}, k_T - x_1), \\ x_3 &= \min(m_{к3}, k_T - x_1 - x_2), \\ x_n &= \min(m_{км}, k_T - \sum_{i=1}^{n-1} x_i). \end{aligned} \quad (5.38)$$

Для решения задачи исходные данные заносятся в табл. 5.2.

Решая задачу, получим данные, позволяющие определить наиболее рациональный маршрут движения транспортного средства. Наилучшее значение будет при минимальной разности $L_{хn} - L_{грn}$.

Таблица 5.2

Исходные данные для определения рационального маятникового маршрута

Склад хранения кормов	Количество груженых ездов	Столбец разностей
Б ₁	L_{x1} m_{r1}	$L_{гр1}$ $L_{x1} - L_{гр1}$
Б ₂	L_{x2} m_{r2}	$L_{гр2}$ $L_{x2} - L_{гр2}$
Б ₃	L_{x3} m_{r3}	$L_{гр3}$ $L_{x3} - L_{гр3}$
Б _n	L_{xn} $m_{r n}$	$L_{грn}$ $L_{xn} - L_{грn}$

Выбирая скорость движения, необходимо учитывать характер дорожного покрытия – на дорогах с твердым покрытием среднее значение скорости агрегата увеличивается. При $l < 200$ м скорость движения агрегата должна быть не более 7,2 км/ч. С увеличением расстояния транспортировки кормов ($l > 1000$ м) этот показатель целесообразно увеличить до 22 км/ч. Скорость движения агрегата при раздаче кормов рекомендуется до 5 км/ч.

ВЫВОДЫ

Наиболее эффективней скармливать кормосмеси в зависимости от продуктивности животных, а для механизации этого процесса организовывать групповое содержание животных.

Снизить расход и себестоимость технологического процесса раздачи кормов животным можно путем внедрения новой малозатратной механизированной технологии нормированной раздачи кормов в виде кормосмеси животным, которая позволяет исключить ряд энергоемких специальных операций и машин для их выполнения.

С целью нормированной раздачи высокоэнергетических кормов целесообразно разработать двухбункерный мобильный смеситель-раздатчик кормов. Данная машина должна обеспечивать дозированную выдачу стебельчатых и высокоэнергетических кормов, формировать из них кормосмесь без специальных энергоемких смешивающих рабочих устройств. Установлено, что скорость машины при раздаче кормосмеси должна быть 5 км/ч, а объемы бункеров – в зависимости от соотношения кормов в рационе животных.

Наиболее эффективным техническим средством смешивания сыпучих высокоэнергетических кормов является смеситель-дозатор с горизонтально расположенными шнеками. С целью нормированной раздачи жидких высокоэнергетических кормов целесообразно разработать двухбункерный мобильный смеситель-раздатчик кормов. Данная машина должна обеспечивать дозированную выдачу стебельчатых и жидких высокоэнергетических кормов, формировать из них кормосмесь без специальных энергоемких смешивающих рабочих устройств.

На дне бункера для жидких кормов расположены шнековые насосы-дозаторы, с помощью которых осуществляется подача жидкого корма в распределитель. Привод шнековых насосов осуществляется от ВОМ трактора через механическую передачу. Разработанная машина обеспечивает дозированную выдачу жидких кормов во встречный поток стебельчатых кормов и смешивание их без механических устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычкова, Т. Качественные корма – залог высокой продуктивности / Т. Бычкова, Л. Шарова, Л. Смирнова // Молочное и мясное скотоводство. – 1992. – № 1. – С. 38 – 39.
2. Калашников, А. П. Задачи науки по развитию промышленных способов производства молока / А. П. Калашников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 2. – С. 30– 32.
3. Шпаков, А. П. Приготовление и использование кормовых смесей и комбикормов в хозяйствах / А. П. Шпаков, М. Ф. Садовский. – Минск : Ураджай, 1988. – 153 с.
4. 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.
5. Иоффе, В. Б. Корма и молоко / В. Б. Иоффе. – Молодечно : УП «Типография "Победа"», 2002. – 231 с.
6. Трофимов, А. Ф. / Интенсивная технология производства молока / А. Ф. Трофимов, А. А. Алешин, М. Г. Залеская. – Минск : Ураджай, 1991. – 142 с.
7. Боярский, Л. Г. Производство и использование кормов / Л. Г. Боярский. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 222 с.
8. 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.
9. Калашников, А. П. Проблемы полноценного кормления сельскохозяйственных животных в условиях промышленных технологий /сб. науч. тр. ВАСХНИЛ / А. П. Калашников // Научные основы полноценного кормления сельскохозяйственных животных. – М. : Агропромиздат, 1986. – С. 3–9.
10. Щегов, В. В. Корма: приготовление, хранение и использование / В. В. Щегов, Л. Г. Боярский. – М. : Агропромиздат, 1990. – 222 с.
11. Святогор, А. П. Интенсификация кормопроизводства / А. П. Святогор, Г. Г. Степаненко. – Минск : Ураджай, 1990. – 69 с.
12. Майонов, В. В. Механизация переработки картофеля на кормовые цели / В. В. Майонов [и др.]. – Минск : Ураджай, 1987. – 120 с.

13. Передня, В. И. Механизация приготовления кормосмесей / В. И. Передня. – Минск : Ураджай, 1982. – С. 9–10.

14. Завражнов, А. И. Механизация приготовления и хранения кормов / А. И. Завражнов, Д. И. Николаев. – М. : ВО «Агропромиздат», 1990. – С. 136–214.

15. Гершенгорен, Л. Р. Кормоцех для приготовления полнорационных кормосмесей / Л. Р. Гершенгорен, А. Н. Серов, В. Ф. Сичкар // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – № 11. – С. 28–29.

16. Алехин, А. В. К оценке технологий приготовления кормов / сб. науч. тр. Алтайского СХИ / А. В. Алехин // Механизация технологических процессов в животноводстве. – Барнаул, 1987. – С. 51–57.

17. Денисов, Н. И. Нормированное кормление коров / Н. И. Денисов, Т. С. Мельников. – М. : Колос, 1973. – 207 с.

18. Грошев, В. Н. Выбор системы раздачи кормов / В. Н. Грошев, Ю. Л. Муромцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1979. – № 8. – 19 с.

19. Лапотко, А. М. Пути снижения энергозатрат в скотоводстве / А. М. Лапотко, Н. И. Плященко. – Минск : Ураджай, 1998. – 61 с.

20. Липкович, Э. Система комплексной организации уборочно-транспортных и заготовительных работ / Э. Липкович // Сельское хозяйство России. – 1980. – № 8. – С. 17–20.

21. Клычев, Е. М. Эффективность механизации приготовления и раздачи кормов на молочных фермах / Е. М. Клычев, Е. А. Вагин, А. А. Мансуров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 9. – 26 с.

22. Каменский, А. С. Математические модели в управлении уборочно-транспортными процессами / А. С. Каменский // ВНИИТЭИСХ, Земледелие и растениеводство. – 1984. – № 11. – С. 39–47.

23. Передня, В. И. Поточные линии приготовления и раздачи кормов / В. И. Передня, П. Г. Веракса. – Минск : Ураджай, 1980. – 104 с.

24. Терещенко, Р. К. Обоснование производительности перспективных средств механизации приготовления и раздачи кормов на фермах КРС / Р. К. Терещенко, Л. В. Кривенко // сб. науч. тр. / Совершенствование механизации и электрификации технологических процессов в животноводстве. – зерноград, 1986. – С. 10–17.

25. Шалягин, Л. Н. Определение областей эффективного применения транспортных средств / Л. Н. Шалягин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 6. – 3 с.
26. Милев, А. Д. «Agritechnica 99»: современные средства для подготовки и раздачи кормов / А. Д. Милев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 5. – С. 48–52.
27. Рыжов, С. В. Зарубежная техника для животноводства и кормопроизводства / С. В. Рыжов, В. С. Рыжов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – № 12. – С. 51–54.
28. Рыжов, С. В. Новая техника для молочного животноводства: сегодня и завтра / С. В. Рыжов // Техника и оборудование для села. – 2000. – № 5. – С. 7–12.
29. Рыжов, С. В. Развитие средств механизации для животноводства / С. В. Рыжов // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – № 2. – С. 16–19.
30. Милев, А. Д. Универсальные средства для подготовки и раздачи кормов на фермах КРС / А. Д. Милев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 4. – С. 11–13.
31. Амерханов, Х. А. Стратегия и основные направления развития животноводства России [Электронный ресурс] / Х. А. Амерханов. – URL: www.dki.ru, свободный.
32. Девяткин, А. И. Рациональное использование кормов / А. И. Девяткин. – М. : Россельхозиздат. – 1990. – С. 13 – 23.
33. Способ приготовления и раздачи кормов для крупного рогатого скота: а. с. 1836007 СССР, МКИ³ А01 К5/00. / В. И. Передня, В. Б. Иоффе, Ю. А. Башко. Заявлено 20.05.91; опуб. 23.08.93; бюл. № 12.
34. Китун, А. В. Энергосберегающая технология использования кормов на фермах крупного рогатого скота / А. В. Китун // Агронарама. – 2004. – № 4. – С. 27–29.
35. Марков, Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Марков. – М. : Машиностроение. – 1973. – С. 216.
36. Голиков, В. А. Вероятность сохранения кормосмеси / В. А. Голиков, Т. Абилжаков, О. Б. Пашевкин, М. Г. Хабибулин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1976. – № 10. – С. 21–27.
37. Марков, Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Марков. – М. : Машиностроение, – 1973. – 216 с.
38. Калашников, В. Т. Обоснование типа и параметров дозатора стебельчатых кормов / В. Т. Калашников // Механизация, электрификация и автоматизация животноводства. – 1978. – № 9. – С. 25–27.

38. Моисеев, В. И. Расход энергии на экструдирование АКД / В. И. Моисеев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1982. – № 8. – С. 15–19.

39. Китун, А. В. Определение рациональной вместимости бункера-питателя кормов / А. В. Китун, В. И. Передня // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 3. – С. 132–135.

40. Передня, В. И. Определение мощности на привод горизонтально установленных шнековых смешивающих рабочих органов смесителя кормов / В. И. Передня, А. В. Китун, А. Л. Передня // Инженерный вестник. – 2007. – № 1. – С. 27–29.

41. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешин, П. М. Рошин. – Л. : Колос. – 1980. – 164 с.

42. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : БГУ им. Ленина. – 1982. – С. 5–293.

43. Богомягих, В. А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов / В. А. Бокомягих. – Ростов н/Д : из-во Ростовского университета, 1973. – 152 с.

44. Милев, А. Д. Универсальные средства для подготовки и раздачи кормов на фермах КРС / А. Д. Милев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 4. – С. 11–13.

45. К вопросу вместимости мобильных смесителей-раздатчиков кормов // В. И. Передня [и др.]. – Инженерный вестник. – 2010. – № 1.

46. Передня, В. И. Вместимость раздатчика смесителя / В. И. Передня, А. В. Мацуковик // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 7. – С. 69–74.

47. Вторый, В. Ф. Интенсификация производства говядины путем совершенствования технологий и технических средств : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.20.01 / В. Ф. Вторый. – СПб., 2003. – 120 с.

48. Романович, А. / Исследование рациональной вместимости бункера мобильного смесителя-раздатчика кормов / В. Передня, В. Самосюк, В. Романюк, А. Романович. Problemy intensyfikacji produkcji zwerzece jzuwzgliedni eniemochlony srodowiska IstandortowUE, Warszawa, 2009.

49. Техническое обеспечение процессов в животноводстве : учебник / В. К. Гриб, Л. С. Герасимович, С. С. Жук [и др.]; под общ. ред. В. К. Гриба. – Минск : Бел. наука, 2004. – 831 с.

50. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1967. – 154 с.

51. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1971. – 283 с.

52. Василенко, П. М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований / П. М. Василенко. – М. : ВИМ, 1958. – 329 с.

53. Смеситель-раздатчик кормов : пат. 1688 Респ. Беларусь МПК7 А 01 К 5/02 / В. И. Передня, А. В. Китун, А. А. Передня, А. А. Китун, В. М. Глецевич; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. № и 20040176; заявл. 12.04.04; опубл. 30.12.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 7. – С. 125.

54. Способ приготовления кормосмеси : пат. 14472 Респ. Беларусь, МПК7 С 1 А23К 1/16 / В. Г. Самосюк, В. И. Передня, А. В. Китун, А. Л. Тимошук, А. М. Тарасевич, А. А. Романович; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – № а 200881547; заявл. 04.12. 08; опубл. 10. 03.11. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 74.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Китун Антон Владимирович,
Романович Анастасия Андреевна

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
ПОЛНОРАЦИОННЫХ КОРМОСМЕСЕЙ ЖИВОТНЫМ
МОБИЛЬНЫМИ РАЗДАТЧИКАМИ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Г. В. Анисимова*
Корректор *Г. В. Анисимова*
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 30.06.2022. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 9,53. Уч.-изд. л. 7,45. Тираж 100 экз. Заказ 251.

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, 99–1, 220023, Минск.