

ИНСТИТУТ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА - ФИЛИАЛ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»  
(ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

На правах рукописи



**Авакимянц Евгений Вячеславович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ  
КОРМОВЫХ ДОБАВОК ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ**

4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент  
Гордеев В.В.

Санкт-Петербург – Пушкин, 2023

## Оглавление

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                | 4  |
| 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....                                                              | 10 |
| 1.1 Анализ рационов для кормления КРС .....                                                                  | 10 |
| 1.2 Анализ технологических схем приготовления кормосмесей.....                                               | 17 |
| 1.3 Анализ технических средств для смешивания БМВД .....                                                     | 25 |
| 1.4 Анализ методов оценки качества смешивания .....                                                          | 38 |
| 1.4.1 Методы отбора проб .....                                                                               | 38 |
| 1.4.2 Методы оценки качества смешивания.....                                                                 | 40 |
| 1.5 Общие выводы, цель и задачи исследования.....                                                            | 43 |
| 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОБОСНОВАНИЯ                                                                     |    |
| ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ.....                                                                   | 46 |
| 2.1 Предпосылки к разработке смесителя БМВД.....                                                             | 46 |
| 2.2 Определение параметров смесителя .....                                                                   | 51 |
| 2.3 Определение энергетических и мощностных показателей процесса<br>смешивания в псевдооживленном слое ..... | 59 |
| 2.4 Выводы по главе .....                                                                                    | 69 |
| 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ                                                                    |    |
| ИССЛЕДОВАНИЙ.....                                                                                            | 70 |
| 3.1 Методика определения физико-механических свойств БМВД<br>и их смесей.....                                | 72 |
| 3.2 Методика определения рациональных параметров смесителя<br>БМВД.....                                      | 75 |
| 3.2.1 Обоснование факторов, подлежащих исследованию<br>и уровней их варьирования .....                       | 75 |
| 3.2.2 Методика отбора и определения эффективности<br>смешивания.....                                         | 78 |
| 3.2.3 Экспериментальная установка смесителя БМВД.....                                                        | 82 |
| 3.3 Перечень используемых приборов и оборудования .....                                                      | 83 |
| 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....                                                           | 84 |
| 4.1 Результаты определения физико-механических свойств БМВД ...                                              | 84 |
| 4.2 Результаты определения физико-механических свойств смесей<br>кормовых добавок для КРС.....               | 89 |

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3 Обоснование выбора модельного материала для экспериментальных исследований по смешиванию БМВД .....                      | 92         |
| 4.4 Результаты экспериментальных исследований по обоснованию интервала варьирования времени смешивания.....                  | 96         |
| 4.5 Результаты экспериментальных исследований параметров и режимов работы смесителя БМВД.....                                | 98         |
| 4.6 Выводы по главе .....                                                                                                    | 104        |
| <b>5. ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА .....</b>                                     | <b>105</b> |
| 5.1 Исследования смесителя в производственных условиях .....                                                                 | 105        |
| 5.2 Оценка экономической эффективности .....                                                                                 | 107        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                                                                                      | <b>110</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>                                                                                 | <b>113</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Сертификаты участника конференций .....</b>                                                                  | <b>133</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство к золотой медали 30-ой Международной агропромышленной выставки «Агрорусь-2021».....</b>        | <b>135</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Диплом правительства Санкт-Петербурга ПСП №21201 .....</b>                                                   | <b>136</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Диплом победителя программы УМНИК .....</b>                                                                  | <b>137</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты определения физико-механических свойств БМВД. ....</b>                                            | <b>138</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е Зависимость коэффициента неоднородности смеси от исследуемых факторов.....</b>                               | <b>143</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Зависимость энергоемкости смешивания от исследуемых факторов .....</b>                                       | <b>144</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ И Решение задачи оптимизации параметров и режимов работы смесителя БМВД.....</b>                               | <b>145</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ К Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ .....</b> | <b>147</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Л Патент на изобретение № 2743924 «Смеситель» ...</b>                                                          | <b>148</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ М Патент на изобретение № 2780319 «Смеситель»... </b>                                                          | <b>149</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач сельскохозяйственного производства является обеспечение населения нашей страны молочными продуктами в необходимом количестве и качестве, в соответствии с требованиями, отвечающими современным нормам здорового питания [1]. В России этот показатель на сегодня, в соответствии с рекомендациями Министерства здравоохранения РФ, составляет 325 кг молока и молочных продуктов в пересчете на молоко в год на душу населения [2]. За 2020 год фактический показатель потребления молока и молочных продуктов, по данным службы государственной статистики, составил 240 кг на душу населения, что обеспечивает около 70% от рекомендуемой нормы потребления [3].

Одним из ключевых показателей продовольственной безопасности России является самообеспечение внутреннего потребления молока и молочных продуктов на 90% за счет отечественного производства [1]. По данным Национального союза производителей молока в 2021 году этот показатель составил всего 84% [4]. Учитывая вышесказанное очевидно актуальность повышения объемов производства молока и обеспечения его доступности для населения нашей страны.

Снижение потребления молока происходит одновременно с ростом себестоимости его производства, которая напрямую влияет на формирование потребительских цен и доступность молочных продуктов для населения. По данным службы государственной статистики средняя цена молока, реализуемого сельскохозяйственными организациями, в 2020 году составила 25,8 тысяч рублей за тонну, а в 2021 году – 27,4 тысячи рублей за тонну [5]. При этом затраты на кормление составляют более 60% издержек при производстве молока [6, 7]. Снижение затрат на кормление является актуальной социально-экономической задачей как для обеспечения здорового питания, так и для развития молочно-товарной отрасли в целом [6].

Перспектива развития отрасли молочного животноводства в большей степени будет связана со строительством крупных предприятий (от 800 до 3000 коров), базирующихся на круглогодичном кормлении сбалансированными полнорационными кормосмесями [7]. Концентрация поголовья коров от 100 – 150 голов до 800 – 1000 голов и более позволяет эффективно применять инновационные технологии, современные средства автоматизации и роботизации производства [8].

Молочная продуктивность животного определяется на 70% качеством кормления, на 20% генотипом и на 10% условиями содержания [9]. В каждом хозяйстве по производству молока разрабатывается система кормления на основе анализа имеющейся кормовой базы, с учетом детализированных норм кормления, питательности кормов и систем содержания [7, 8]. В условиях хозяйств приготавливаются полнорационные кормовые смеси в соответствии с индивидуальными потребностями в кормлении различных технологических групп животных, обеспечивается собственный контроль качества кормов. Это позволяет существенно снизить себестоимость кормов за счет минимизации транспортных расходов и широкого использования местных сырьевых ресурсов [10, 11].

Обеспечение наиболее полного использования питательности кормов, сбалансированность рационов достигается включением в состав кормосмеси белково-минерально-витаминных добавок (БМВД). Большой спектр производимых добавок позволяет специалистам составлять оптимальные рационы по питательности, макро-микроэлементам и витаминам в зависимости от условий содержания, продуктивности и прочих факторов [12-17].

Основной проблемой при использовании БМВД является точность кормления. Это связано с тем, что добавки включаются в общую кормосмесь в доле менее 1% (10 – 300 г/гол.) от общей массы. Это требует совершенствования технологий и технических средств приготовления кормосмеси. Одним из направлений совершенствования является разработка смесителя для приготовления предварительной смеси БМВД [10, 18]. В связи с чем

обоснование рациональных параметров и режимов работы смесителя для внутрихозяйственного приготовления предварительной смеси БМВД, обеспечивающих снижение удельной энергоемкости при высоких показателях качества смеси, отвечающих зоотехническим требованиям, является актуальной народно-хозяйственной задачей.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в изучение процесса кормления и разработку новых эффективных технических средств для приготовления кормосмесей внесли: И.Н. Краснов, В.И. Пахомов, А.Н. Глобин, С.В. Брагинец, В.А. Сысуев, П.А. Савиных, С.Ю. Булатов, Д.А. Зырянов, В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, А.Н. Чупшев, В.В. Коновалов, А.И. Завражнов, С.М. Ведищев, Н.В. Хольшев, А.А. Кажияхметова, А.П. Иванова, Т.И. Пискарева, Д.Е. Каширин, В.В. Утолин, А.А. Полякова.

**Цель исследований.** Повышение эффективности приготовления смеси БМВД для КРС путем обоснования параметров и режимов работы смесителя.

**Задачи исследований:**

- провести анализ структуры рационов, технологических линий приготовления кормосмесей на фермах КРС по производству молока и технических средств для смешивания порошкообразных материалов;

- определить физико-механические свойства БМВД и их смесей;

- разработать теоретические зависимости энергетических и мощностных показателей процесса смешивания с учетом физико-механических свойств БМВД;

- провести экспериментальные исследования смесителя в лабораторных условиях и определить влияние параметров и режимов его работы на качество смеси и энергоемкость процесса смешивания;

- провести экспериментальные исследования смесителя в производственных условиях;

- определить экономическую эффективность.

**Объект исследований.** Смеситель, белково-минерально-витаминные добавки.

**Предмет исследований.** Физико-механические свойства белково-минерально-витаминных добавок, процесс смешивания.

**Методы исследований.** Применялись общепринятые и частные методы и методики исследований с последующей их обработкой на персональном компьютере с помощью программных пакетов Statgraphics 19, Microsoft Office, Excel 2016, КОМПАС-3D 18.

**Научную новизну работы составляют** теоретическая зависимость, характеризующая величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств БМВД и параметров смесителя; регрессионная зависимость энергоемкости процесса смешивания от параметров и режимов работы смесителя; регрессионная зависимость качества смешивания БМВД от параметров и режимов работы смесителя.

**Теоретическую значимость работы составляют** зависимости энергетических показателей от структурно-механических характеристик смешиваемого материала и параметров смесителя.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты позволяют обосновать параметры и режимы работы смесителя кормовых добавок при модернизации и проектировании технологических линий кормоприготовления с учетом свойств применяемых кормовых добавок и производственно-хозяйственных условий молочно-товарных ферм.

**Положения, выносимые на защиту:**

- теоретические зависимости энергетических показателей процесса смешивания с учетом физико-механических свойств БМВД;
- экспериментально установленные зависимости влияния параметров и режимов работы смесителя на качество получаемой смеси и энергоемкость процесса смешивания;
- результаты исследований смесителя в производственных условиях.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных положений подтверждается результатами теоретических и

экспериментальных исследований. Достоверность экспериментальных данных, полученных в лабораторных и производственных условиях, с применением современных средств измерений, при достаточном количестве повторностей опытов подтверждается использованием утвержденных программ и методик экспериментальных исследований.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, прошли широкую апробацию в печати. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 5 международных научно-практических конференциях (Приложение А):

– Выступление с докладом «Анализ технологических линий приготовления кормосмесей для КРС и возможность их совершенствования» на международной научно-практической конференции «Инновационная техника и цифровые технологии в животноводстве», 2020 г.

– Выступление с докладом «Определение физико-механических свойств кормовых добавок для молочных коров» на международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся «Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК», 2021 г.

– Выступление с докладом «Физико-механические свойства смесей кормовых добавок для коров» на 12-й международной научно-практической конференции «Агроэкология и цифровые сельскохозяйственные технологии», 2021 г.

– Выступление с докладом «Определение параметров смесителя белково-минерально-витаминных добавок для КРС» на VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам», 2022 г.

– Выступление с докладом «Результаты экспериментальных исследований параметров и режимов работы смесителя кормовых добавок для КРС» на 13-ой Международной научно-практической конференции



«Агроэкология и цифровые технологии в сельскохозяйственном производстве», 2023 г.

Получена золотая медаль на 30-ой Международной агропромышленной выставке «Агрорусь-2021» за разработку «Смеситель витаминных добавок для использования на молочно-товарных фермах КРС» (Приложение Б).

По итогам конкурса грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, 2021 года получен диплом правительства Санкт-Петербурга ПСП №21201 победителя конкурса грантов для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (Приложение В).

По итогам конкурса УМНИК 2020 Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) получен диплом победителя программы УМНИК и выполнен проект в рамках договора № 644ГУЦЭС8-D3/63744 от 02.12.2020 (Приложение Г).

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Анализ рационов для кормления КРС

Кормление является важнейшим фактором в обеспечении здоровья и продуктивности молочных коров. Качество кормления обеспечивается совокупностью технологий и технических средств для подготовки, переработки, приготовления и раздачи кормосмеси.

Применение рационов, сбалансированных по питательности, белку, минеральным добавкам, макро- и микроэлементам, витаминам обеспечивают на 60 – 70% реализацию потенциала продуктивности животных, в то время как генетический фактор – на 25 – 30% и условия содержания – на 10 – 15% [7, 9]. Прогресс повышения продуктивности и снижения себестоимости продукции молочного животноводства на 50 – 60% зависит от научно обоснованного кормления [7].

Сбалансированность рационов достигается за счет включения в них специальных функциональных компонентов – БМВД, направленных, например, на нейтрализацию микотоксинов, поддержание кислотно-щелочного баланса в пищеварительной системе и крови, нормализацию процессов рубцового пищеварения [19, 20]. Применение добавок стимулирует повышение удоев и жирности молока, а также содержание в нем белка и конверсию корма [20, 24-26]. Кроме того, применяют БМВД, направленные на сглаживание последствий теплового стресса у коров [22]. Отдельного внимания заслуживает применение БМВД, действие которых направлено на снижение негативного воздействия на окружающую среду [23, 27]. Применение таких добавок в рационах молочных коров позволяет снизить выбросы углекислого газа на 10%, а метана на 30 – 40% [28].

Качество рациона для кормления КРС определяется сбалансированностью по всем значимым компонентам. В реальных производственных условиях добиться сбалансированности рационов по 15 – 25 показателям практически не представляется возможным. Поэтому в производственных условиях в качестве определяющего фактора

руководствуются соотношением в рационе грубых, сочных, концентрированных кормов и БМВД, добиваясь того, чтобы оно обеспечивало потребность животного в основных питательных, биоактивных веществах и микроэлементах [7, 29]. Формирование правильной структуры рациона обеспечивает получение коровой необходимого количества энергии [30].

Специалистами ВНИИГРЖ разрабатываются системы детализированных кормовых рационов в зависимости от уровня молочной продуктивности коров (таблица 1.1) [7].

Таблица 1.1 Система кормовых рационов для высокопродуктивных коров

| № п/п | Наименование                    | При среднесуточном удое, кг |       |       |           |
|-------|---------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-----------|
|       |                                 | 25-29                       | 30-34 | 35-39 | 40 и выше |
| 1     | Сено                            | 2                           | 2     | 2     | 2         |
| 2     | Силос                           | 25                          | 25    | 30    | 30        |
| 3     | Комбикорм                       | 5                           | 6     | 7     | 8         |
| 4     | Ячмень                          | 1,5                         | 2     | 2,5   | 3         |
| 5     | Отруби пшеничные                | 1,5                         | 1,5   | 2     | 2         |
| 6     | Пивная дробина                  | 6                           | 6     | 8     | 8         |
| 7     | Патока                          | 1,2                         | 1,2   | 1,5   | 1,5       |
| 8     | Жом сухой                       | 2,5                         | 3     | 3,5   | 3,5       |
| 9     | Поваренная соль                 | 0,075                       | 0,075 | 0,1   | 0,1       |
| 10    | Минерально-витаминная подкормка | 0,05                        | 0,1   | 0,1   | 0,1       |
| 11    | <b>ИТОГО</b>                    | 44,8                        | 46,9  | 56,7  | 58,2      |
| 12    | <b>В рационе содержится:</b>    |                             |       |       |           |
| 13    | ЭКЕ                             | 21,5                        | 23,7  | 28,3  | 30        |
| 14    | Обменной энергии, МДж           | 215                         | 237   | 283   | 300       |
| 15    | Сухого вещества, кг             | 20                          | 21,7  | 26    | 27,3      |

Система рационов учитывает, что в последние годы во многих хозяйствах не выращивают кормовые корнеплоды. С целью восполнения углеводистых кормов в рацион вводятся патока и свекловичный жом. Свекловичный жом содержит пектиновые вещества, которые оказывают положительное влияние на усвоение протеина.

Рацион включает в себя девять компонентов, суммарная масса которых составляет 45 – 58 кг, в зависимости от среднесуточного удоя коров. В качестве

БМВД в рацион входят поваренная соль и минерально-витаминная подкормка. При этом в рационе используется покупной комбикорм, который обогащен микроэлементами и витаминами.

Специалисты из ФГБНУ ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста на основе определения потребностей в питательных веществах по результатам проведения научно-хозяйственных и физиологических экспериментов, обобщения и анализа существующих исследований и опыта отечественных и зарубежных научных учреждений в области питания молочного скота разрабатывают рекомендации по детализированному кормлению [31]. В таблице 1.2 представлены примерные рационы кормления коров с удоем 10000 кг молока в год живой массой 700 кг при привязном содержании.

При суточном удое 16 кг рацион состоит из 12 компонентов и включает в себя наибольшее количество объемистых кормов. При этом высококонцентрированные кормовые компоненты и БМВД входят в рацион в минимальном количестве. С увеличением суточного удоя до 36 – 40 кг рацион включает в себя уже 19 компонентов. Масса объемистых кормов в рационе уменьшается, их место занимают высококонцентрированные корма насыщенные протеином, жиром и углеводами. В кормосмесь входит уже пять БМВД в расчете 50 – 220 г/гол.

Таблица 1.2 – Рационы кормления коров

| № п/п | Корма и кормовые добавки, кг | Суточный удой, кг |       |       |       |       |
|-------|------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|       |                              | 40                | 36    | 30    | 22    | 16    |
| 1     | Сено злаково-бобовое         | 2                 | 2     | 2,5   | 3     | 4     |
| 2     | Сенаж в вакуумн. упаковке    | 3                 | 3,5   | 4     | 4     | 4     |
| 3     | Сенаж из трав                | 4                 | 4,5   | 6     | 8     | 10    |
| 4     | Силос кукурузный             | 11                | 12    | 14    | 15    | 10    |
| 5     | Пшеница                      | 0,6               | 0,8   | 0,6   | 1,2   | 1     |
| 6     | Ячмень                       | 0,8               | 1     | 0,8   | 1,8   | 1,2   |
| 7     | Ячмень плющенный             | 2                 | 2     | 2     | 2     | 2     |
| 8     | Овёс                         | 0,3               | 0,4   | 0,3   | 0,6   | 0,5   |
| 9     | Кукуруза                     | 3,5               | 2,8   | 2     | -     | -     |
| 10    | Отходы шоколадные            | 1,5               | 1     | 0,9   | -     | -     |
| 11    | Барда пшеничная сухая        | 1,5               | 1,2   | 0,8   | 0,5   | -     |
| 12    | Жмых подсолнечный            | 4                 | 3,8   | 3     | 1,5   | -     |
| 13    | Жмых рапсовый                | 0,5               | 0,5   | -     | -     | -     |
| 14    | Меласса                      | 1,4               | 1,2   | 1     | 0,8   | 0,4   |
| 15    | Сода пищевая                 | 0,15              | 0,1   | 0,1   | -     | -     |
| 16    | Монокальцийфосфат            | 0,08              | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  |
| 17    | Мел кормовой                 | 0,22              | 0,18  | 0,13  | -     | -     |
| 18    | Соль поваренная              | 0,16              | 0,15  | 0,12  | 0,1   | 0,08  |
| 19    | Премикс                      | 0,12              | 0,11  | 0,08  | -     | -     |
| 20    | Премикс                      | -                 | -     | -     | 0,06  | 0,04  |
| 21    | <b>ИТОГО</b>                 | 36,83             | 37,29 | 38,38 | 38,61 | 33,27 |
| 22    | <b>В рационе содержится:</b> |                   |       |       |       |       |
| 23    | ЭКЕ                          | 26,1              | 25,5  | 22,3  | 20,5  | 17,3  |
| 24    | Обменной энергии, МДж        | 266,1             | 255,1 | 234,3 | 205,5 | 172,6 |
| 25    | Сухого вещества, кг          | 23,4              | 22,8  | 21,8  | 20,3  | 18    |

На основе разрабатываемых рекомендаций и опыта специалистами по кормлению в хозяйствах составляются рационы с учетом местных условий. В таблице 1.3 представлен рацион дойных коров на 40 – 120 дни лактации одного из хозяйств Ленинградской области. Рацион рассчитан на среднесуточный удой 40 кг молока.

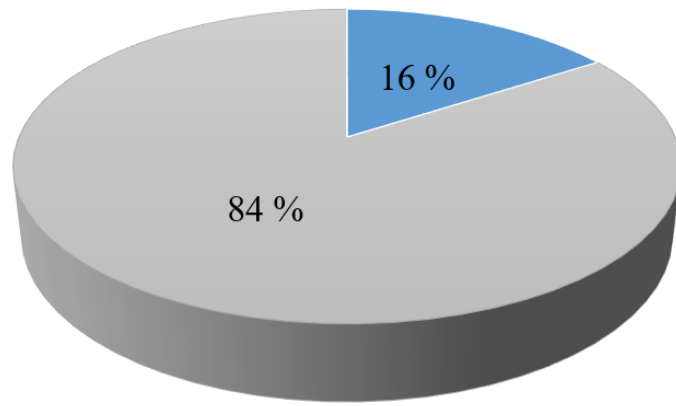
Таблица 1.3 – Рацион для дойных коров на 40 – 120 дни лактации

| №<br>п/п | Количество голов в секции          |         | 80               |                      |
|----------|------------------------------------|---------|------------------|----------------------|
|          | Наименование                       | кг/гол. | Общий<br>вес, кг | В % к<br>общей массе |
| 1        | Силос траншея № 4 (СВ 30%)         | 18,0    | 1440,0           | 33,1                 |
| 2        | Силос траншея № 1 (СВ 18%)         | 14,0    | 1120,0           | 25,7                 |
| 3        | Вода                               | 5,0     | 400,0            | 9,2                  |
| 4        | Кукуруза дробленая                 | 4,4     | 352,0            | 8,1                  |
| 5        | Зерно дробленое (ячмень)           | 3,0     | 240,0            | 5,5                  |
| 6        | Сено                               | 2,5     | 200,0            | 4,6                  |
| 7        | Дробина пивная сухая               | 2,0     | 160,0            | 3,7                  |
| 8        | Шрот соевый                        | 1,3     | 104,0            | 2,4                  |
| 9        | Жом свекловичный                   | 1,2     | 96,0             | 2,2                  |
| 10       | Шрот рапсовый                      | 1,1     | 88,0             | 2,0                  |
| 11       | Оболочка соевая<br>гранулированная | 1,0     | 80,0             | 1,8                  |
| 12       | Полисахариды сухие                 | 0,3     | 24,0             | 0,55                 |
| 13       | Премикс П-60                       | 0,21    | 16,8             | 0,39                 |
| 14       | Фунгистат                          | 0,15    | 12,0             | 0,28                 |
| 15       | Мел                                | 0,13    | 10,4             | 0,24                 |
| 16       | Соль                               | 0,1     | 8,0              | 0,18                 |
| 17       | ИТОГО                              | 54,39   | 4351,2           | 100                  |

В данном рационе не используются покупные комбикорма. Вместо этого комбикорм приготавливается силами хозяйства по собственному рецепту. В состав кормосмеси входят пять компонентов в доле менее 1% от общей, а их суммарный вес составляет 890 г/гол.

На рисунке 1.1 показана структура затрат на кормление по рациону, представленному в таблице 1.3. Расчет произведен на основании предоставленных хозяйством закупочных цен на июнь 2020 года.

На приобретение БМВД приходится 16% всех затрат на корма. Учитывая, что корма составляют порядка 60% затрат при производстве молока, то на БМВД приходится около 10% в структуре себестоимости молока. На сегодняшний день затраты хозяйств на БМВД возрастают. Стоимость отдельных БМВД для молочных коров может достигать полутора тысяч рублей за килограмм.



■ Затраты на БМВД    ■ Затраты на прочие корма

Рисунок 1.1 – Структура затрат на кормление

Это связано еще и с тем, что сфера производства и применения высококачественных БМВД для КРС имеет высокую степень зависимости от импорта материалов. Из-за рубежа импортируется около 90% применяемых в России кормовых добавок. По данным Минсельхоза РФ, наибольшая импортная составляющая кормовых добавок – это витамины (100%), микроэлементы (90%), антибиотики – стимуляторы роста (85 – 95%), адсорбенты микотоксинов (80 – 85%), кормовые аминокислоты (80%) и ферменты (70 – 90%) [32].

В таблице 1.4 показан рацион высокоудойных коров еще одного хозяйства Ленинградской области. Из таблицы следует, что в рационе имеется семь компонентов, представленных в доле менее 1,0% от общей. При этом следует отметить, что суммарная масса этих компонентов составляет 1,14 кг/гол., а суммарная доля в общей смеси составляет 2,1%.

В ходе анализа рационов видно, чем выше молочная продуктивность коров, тем более сложный и многокомпонентный состав имеет кормосмесь. В кормосмесь для высокоудойных коров входит 5 – 7 БМВД в расчете 10 – 300 г на голову, доля отдельных добавок может составлять 0,02% от общей массы кормосмеси.

Таблица 1.4 – Рацион для дойных коров

| № п/п | Количество голов в секции |                | 77            |                   |
|-------|---------------------------|----------------|---------------|-------------------|
|       | Наименование              | Масса, кг/гол. | Общий вес, кг | В % к общей массе |
| 1     | Силос Тр№5                | 25,0           | 1925,00       | 45,75             |
| 2     | Кукуруза дробленая        | 5,8            | 446,60        | 10,61             |
| 3     | Комбикорм КК-60           | 5,0            | 385,00        | 9,15              |
| 4     | Силос Тр№2 (сенаж)        | 4,0            | 308,00        | 7,32              |
| 5     | Вода                      | 4,0            | 308,00        | 7,32              |
| 6     | Шрот рапсовый             | 2,5            | 192,50        | 4,58              |
| 7     | Шрот Соевый               | 2,0            | 154,00        | 3,66              |
| 8     | Ячмень дробленый          | 2,0            | 154,00        | 3,66              |
| 9     | Жом свекловичный          | 1,5            | 115,50        | 2,75              |
| 10    | Сироп 0,3кг+вода0,7кг     | 1,0            | 77,00         | 1,83              |
| 11    | Сено                      | 0,7            | 53,90         | 1,28              |
| 12    | Сода                      | 0,3            | 23,10         | 0,55              |
| 13    | Защищенный жир            | 0,3            | 23,10         | 0,55              |
| 14    | Мел                       | 0,25           | 19,25         | 0,46              |
| 15    | Соль                      | 0,16           | 12,32         | 0,29              |
| 16    | Премикс МВ6               | 0,1            | 7,70          | 0,18              |
| 17    | Элитокс                   | 0,02           | 1,54          | 0,04              |
| 18    | Левисел                   | 0,01           | 0,77          | 0,02              |
| 19    | Итого                     | 54,64          | 4207,28       | 100,00            |

При такой массовой доле становится практически сложным обеспечение высокой точности кормления, которая является залогом здоровья и высокой продуктивности животных. БМВД представляют собой высококонцентрированные элементы, малая масса которых может оказать значительное воздействие на организм животного, в том числе и вызвать патологии вследствие передозировок.

Совершенствование технологий и технических средств приготовления кормовых смесей позволит повысить эффективность кормления путем исключения перерасхода дорогостоящих БМВД и повышения точности кормления.



## 1.2 Анализ технологических схем приготовления кормосмесей

Работа по приготовлению полнорационной кормовой смеси, в зависимости от параметров используемых агрегатов и систем, может быть реализована на стационарном кормовом центре, с использованием мобильных смесителей-раздатчиков, оснащенных весоизмерительной системой, системой контроля и управления и комбинированным способом.

Наибольшим распространением сегодня пользуется система с применением мобильных смесителей-раздатчиков различных модификаций (рис. 1.2) [33-42]. При использовании мобильных смесителей-раздатчиков загрузка компонентов производится фронтальным или грейферным погрузчиком.

Также к мобильным смесителям следует отнести самоходные смесители-раздатчики, оснащенные измельчителем в виде фрезы, агрегатированной с системой загрузки в виде ленточного или планочного конвейера (рис. 1.3). Самоходный смеситель включает в себя все функции мобильного смесителя-раздатчика, обеспечивая при этом самостоятельную загрузку компонентов. Преимущества его применения характеризуются качественной выемкой силосованных кормов, снижающей потери. В остальном преимущества использования самоходных смесителей-раздатчиков такие же, как и у всех мобильных смесителей-раздатчиков в целом: малая капиталоемкость и металлоемкость, достигаемые отсутствием необходимости в сложных постройках и объединением функций смешивания и раздачи; возможность быстрой смены рациона. К недостаткам следует отнести сложность конструкции, невысокую точность дозирования компонентов. Также необходимо отметить, что усложнение конструкции для самоходных смесителей-раздатчиков не дает полного исключения необходимости в дополнительном грейферном или фронтальном погрузчике.



Рисунок 1.2 – Мобильный смеситель-раздатчик



Рисунок 1.3 – Самоходный смеситель-раздатчик

Особо следует отметить такой недостаток использования мобильных смесителей-раздатчиков для приготовления полнорационной кормовой смеси как низкая эффективность смешивания, связанная с неудовлетворительным распределением в объеме смеси компонентов, представленных в малых долях относительно общей массы смеси. Такими компонентами являются БМВД, находящиеся в доле менее 1% от массы готовой смеси. При использовании мобильных смесителей-раздатчиков БМВД дозируются вручную на напольных весах и поочередно загружаются в мобильный смеситель-раздатчик через специально предусмотренный лоток (рис. 1.4). В ходе анализа

кормоприготовления в хозяйствах выявлено, что специалистам приходится завышать массовую долю БМВД сверх необходимого для обеспечения более равномерного смешивания компонентов. В противном случае внесенный в малой доле компонент вообще не распределяется по объему смеси. В некоторых хозяйствах прибегают к разбрасыванию добавок над кормовым столом (рис. 1.5). Процесс этот производится вручную, ведет к перерасходу дорогостоящих компонентов и не обеспечивает качества кормления.



Рисунок 1.4 – Загрузка БМВД в мобильный смеситель-раздатчик



Рисунок 1.5 – Разбрасывание БМВД над кормовым столом

Технологическая схема приготовления полнорационных кормовых смесей с использованием мобильных смесителей-раздатчиков показана на рисунке 1.6. Схема хорошо подходит для хозяйств с большими расстояниями

переездов между местами хранения различных компонентов и в случае удаленности кормового центра от места содержания животных.

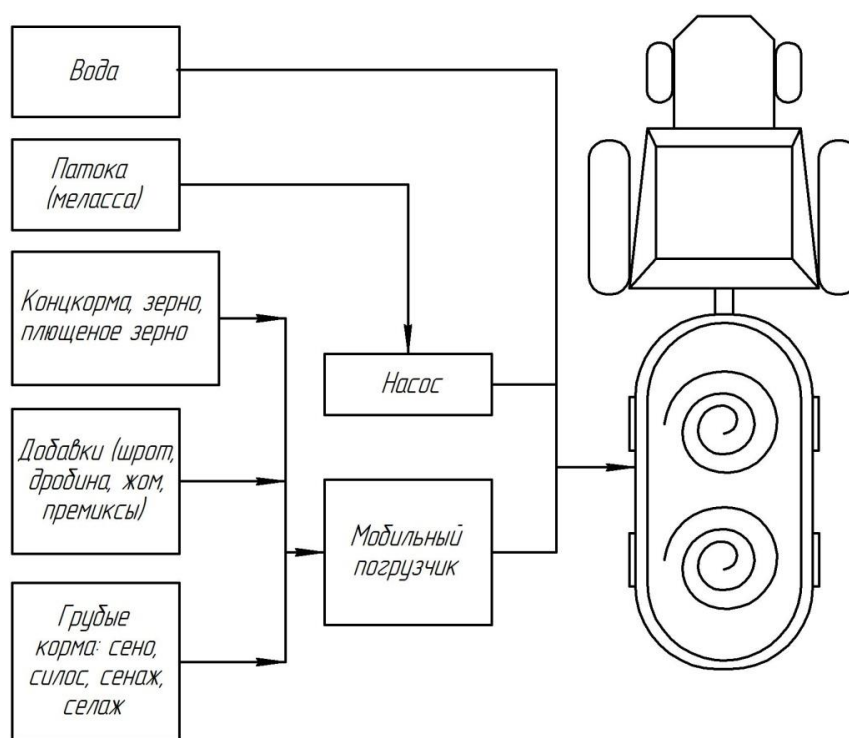


Рисунок 1.6 – Технологическая схема приготовления полнорационных кормовых смесей с использованием мобильных смесителей-раздатчиков

Для достижения большей точности и лучшего качества приготовления кормосмеси прибегают к разделению функций приготовления и раздачи. Для этого реализуют систему стационарного кормоприготовления, в которую встраивают стационарные смесители различных модификаций. В качестве стационарного смесителя могут быть использованы мобильные смесители на шасси прицепа.

На стационарном кормовом центре реализуется полный цикл приготовления полнорационной кормовой смеси. В том числе производится прием и измельчение грубых кормов, имеются бункеры для хранения, устройства подачи, дозирования и смешивания концентрированных кормов и БМВД.

В Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, с целью улучшения качества получаемой кормовой смеси и снижения продолжительности смешивания, была разработана технологическая схема работы стационарного кормового центра (рис. 1.7). Приготовление полнорационной кормосмеси, в соответствии с этой схемой, подразделяется на два блока. В первом блоке приготавливается предварительная смесь высокоценных компонентов, включая БМВД. Во втором блоке располагается основной смеситель, в который подаются грубые корма. После того как грубые корма смешиваются, в основной смеситель подается смесь высокоценных компонентов.

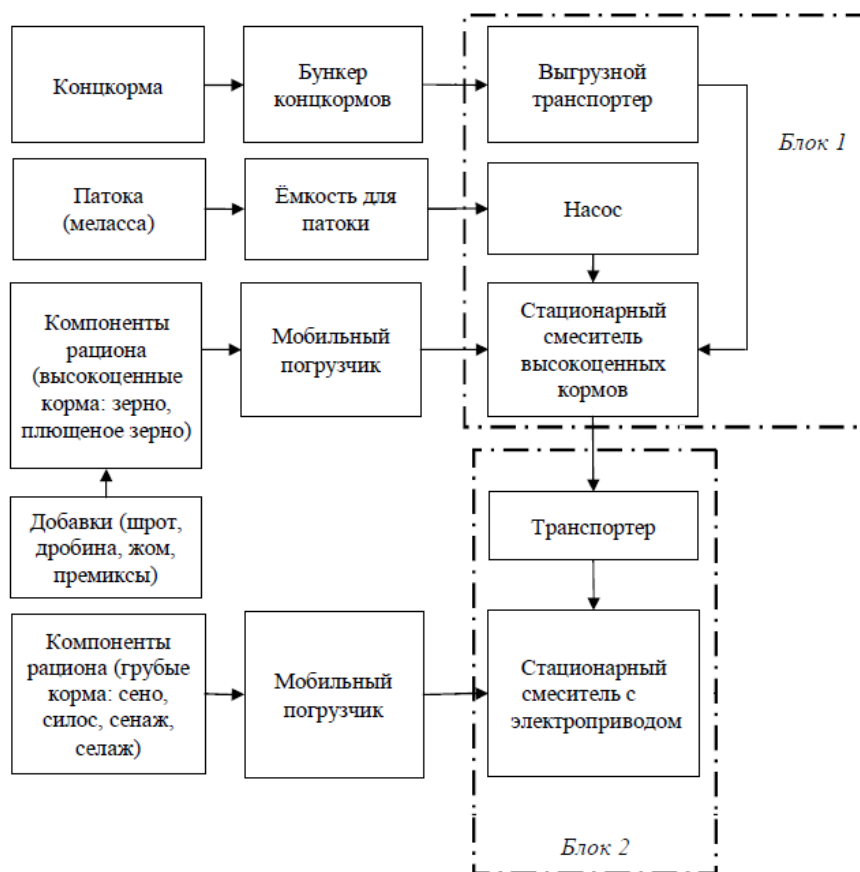


Рисунок 1.7 – Структурная схема приготовления кормосмеси на стационарном кормовом центре

Готовая полнорационная смесь с помощью выгрузного транспортера загружается в стационарный кормораздатчик – транспортёр или робот-кормораздатчик.

Преимуществом этой схемы является приготовление предварительной смеси высокоценных кормов. Далее эта смесь компонентов, представленных в малых долях относительно доли грубых кормов, в конечной смеси вступает в основную фазу смешивания как единый отдельный компонент. Недостатки такой системы обусловлены тем, что в процесс приготовления высокоценной смеси включаются одновременно компоненты, представленные в рациионе в массе 1 – 5 кг/гол. и компоненты представленные в массе 0,01 – 0,3 кг/гол., в частности БМВД. Одним из возможных решений является выделение предварительного смешивания БМВД в отдельную операцию с дальнейшим добавлением в основной процесс смешивания.

С повышением стоимости покупных готовых комбикормов и требований к их качеству многие хозяйства отказываются от их приобретения. В таких случаях комбикорма приготавливаются силами хозяйства по собственным рецептам. Технологическим обеспечением в таком случае выступает постройка мини-комбикормового завода в рамках хозяйства [43, 44, 45]. На рисунке 1.8 показана схема работы такого мини-комбикормового завода.

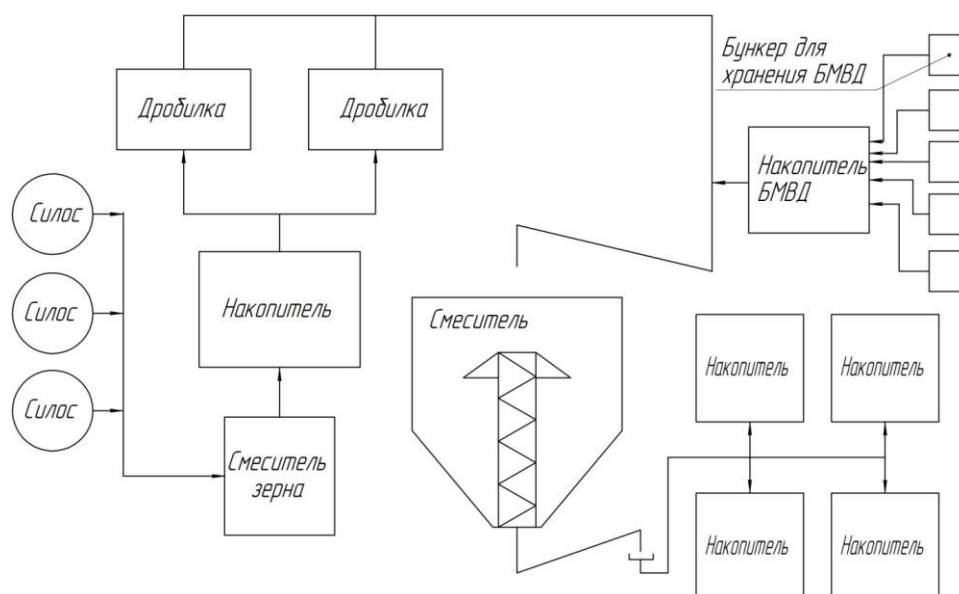


Рисунок 1.8 – Схема работы мини-комбикормового завода



Такой способ можно назвать комбинированным, так как часть смеси, включая БМВД, приготавливается на стационарном смесителе с дальнейшей выгрузкой в мобильный смеситель. При этом все остальные компоненты, в частности объемистые корма, загружаются поочередно в мобильный смеситель-раздатчик, в котором после добавления комбикормовой смеси происходит основная фаза смешивания.

Наиболее распространенными являются мини-комбикормовые заводы фирм «Gruber» (Австрия), «MillMix» (Германия), Агрогранд (Россия), «Доза-Агро» (Россия).

Зерно из силосов подается в смеситель, оснащенный весоизмерительной системой для дозирования, где выполняется первая фаза смешивания. После чего зерновая смесь через накопитель поступает в дробилки, которые могут работать как отдельно, так и параллельно. Далее смесь дробленого зерна перемещается с помощью шнекового транспортера в основной смеситель. БМВД подаются поочередно в накопитель, оснащенный дозирующей системой, действующей по принципу исключения набранной массы. Системой не предусмотрено предварительное смешивание БМВД. Из накопителя вся масса БМВД подается в основной смеситель, где происходит основная фаза смешивания. Готовую комбикормовую смесь помещают в накопители. Наличие нескольких накопителей дает возможность приготавливать комбикорм по разным рецептам для различных технологических групп животных. Из накопителей смесь подается в мобильные смесители-раздатчики где происходит приготовление полнорационной кормовой смеси.

Преимуществом такой схемы является возможность самостоятельного подбора рецептов и контроля качества комбикормов в рамках хозяйства. Недостатки такой схемы обусловлены большими капитальными вложениями.

Повышения эффективности смешивания БМВД, в рамках представленных технологических схем, возможно добиться путем применения смесителя, предназначенного для приготовления предварительной смеси кормовых добавок. Предварительная смесь БМВД будет иметь достаточно

высокую степень однородности и массу более 1,5% от массы конечной кормосмеси для внесения ее в процесс основного смешивания как полноценного компонента.

В некоторых хозяйствах предпринимаются попытки реализовать предлагаемый подход повышения эффективности с помощью смесителей сухих строительных смесей, которые приспособливают к предварительному смешиванию БМВД. Как показали исследования, такое решение не обеспечивает желаемого результата, и применение их нецелесообразно по причине несоблюдения зоотехнических требований к качеству получаемой смеси [46].

На основе анализа существующих технологических схем приготовления кормосмесей разработана схема возможного применения смесителя БМВД для различных технологических схем кормоприготовления (рис. 1.9). Схема предусматривает встраивание смесителя БМВД в линию кормоприготовления на фермах КРС при различной технической оснащённости хозяйств. В том числе и для хозяйств, оснащённых мини-комбикормовыми заводами.

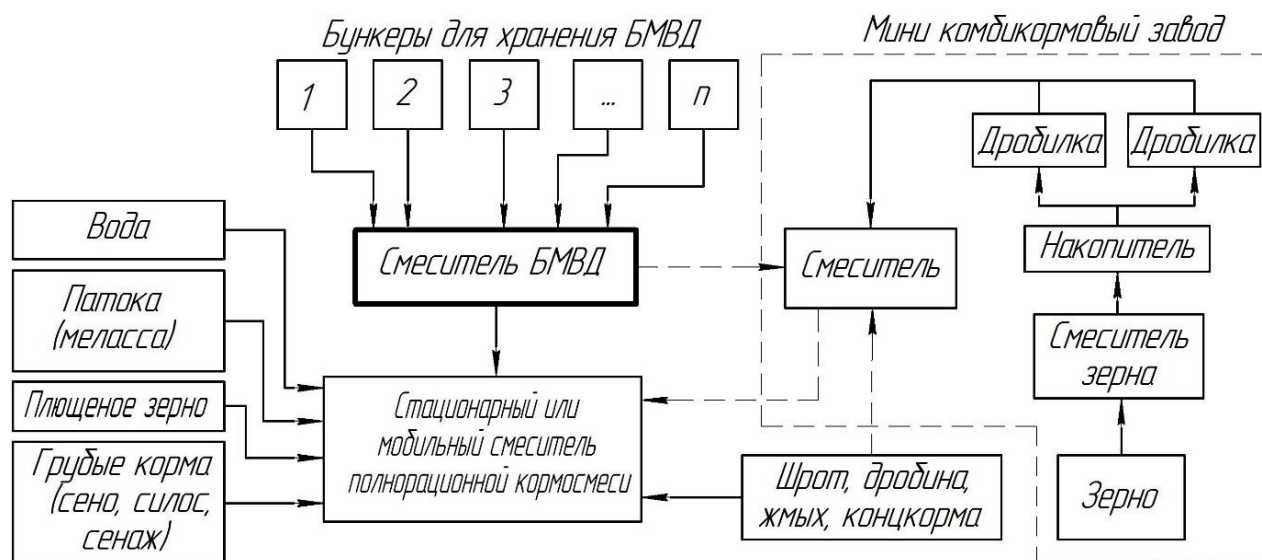


Рисунок 1.9 – Технологическая схема приготовления кормосмесей с применением смесителя БМВД



При этом применяемый смеситель не заменяет и не дублирует функции имеющихся технических средств, а дополняет их, повышая эффективность приготовления кормосмеси путем приготовления предварительной смеси из компонентов, представленных в основной смеси в малых долях.

### 1.3 Анализ технических средств для смешивания БМВД

Все выпускаемые и применяемые сегодня БМВД представляют собой сыпучие материалы в виде порошков или мелких порошкообразных материалов, гранул. В связи с чем, хозяйства, в которых предусматривается приготовление предварительной смеси БМВД, закупают для этой цели смесители порошкообразных материалов различных модификаций. В большинстве случаев такие смесители заимствуются из пищевой, химической и других отраслей промышленности.

В качестве таких смесителей часто используют смесители конусные вертикальные серии СКВ и смесители лопастные горизонтальные серии СВГ. Среди горизонтальных смесителей также получили распространение смесители с бункером в виде усеченного цилиндра содержащие выгрузное отверстие, вал с радиально установленными на нем стержнями, на которых крепятся лопатки и элементы ленточной спирали (рис. 1.10) [47].

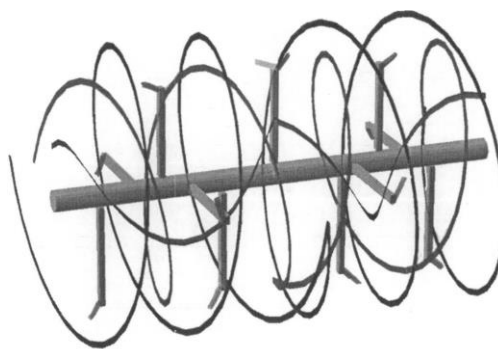


Рисунок 1.10 – Общий вид комбинированного шнека

Ленточные спирали, образуя шнеки, устанавливаются в два или три уровня радиально относительно приводного вала. Шнеки имеют различное

направление навивки. Комбинация шнеков в объеме смесителя реализуется таким образом, чтобы обеспечивать как осевое, так и радиальное перемещение частиц смешиваемого материала. Комбинация шнеков также обеспечивает выгрузку готовой смеси через специальное отверстие в дне смесителя оснащенное затвором. Конструктивная схема и общий вид смесителя для приготовления зерносмесей, разработанного в ФАНЦ Северо-Востока, показана на рисунке 1.11. Смеситель содержит корпус 1, корытообразную камеру смешивания 2, ленточный шнек 3, загрузочный патрубок 4, выгрузной патрубок 5, электродвигатель 6, редуктор 7, загрузочный шнек 8 и шнек выгрузки 9.

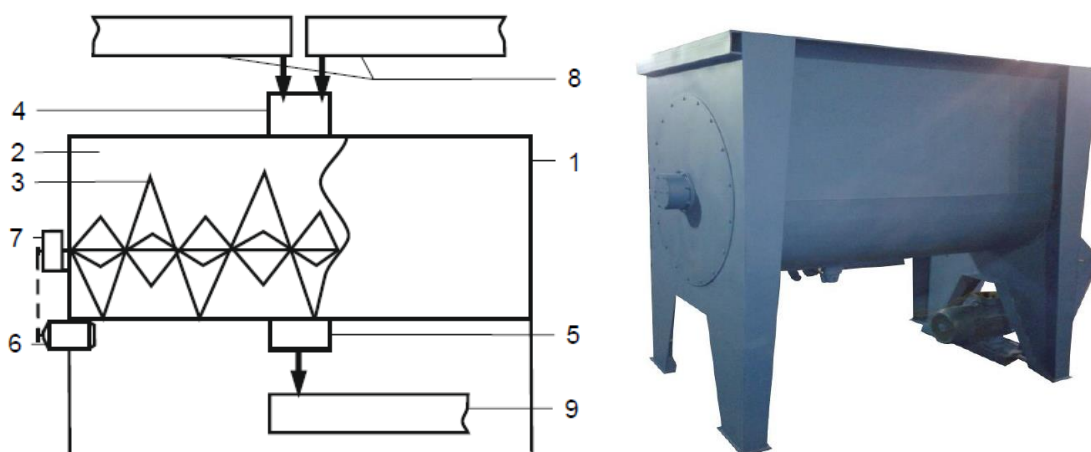


Рисунок 1.11 – Конструктивная схема и общий вид смесителя

Такой тип смесителей хорошо зарекомендовал себя при приготовлении смесей зерна. Наилучшее качество смеси – 89,9% однородности достигается при продолжительности смешивания 13 минут и величине удельной энергоёмкости 3,8 кВт·ч/т [48, 49]. Недостатком устройства является невозможность получения качественной смеси при малой доле отдельных компонентов смеси.

На рисунке 1.12 показан двухвальный горизонтальный шнеколопастной смеситель периодического действия [50, 51]. Смеситель состоит из бункера 1, двух приводных мотор-редукторов 2 и двух шнеколопастных валов. Валы

состоят из двух частей 3 и 4, вращающихся в разные стороны. На первой части вала расположена шнековая навивка и лопатки 6. На второй части вала расположены лопатки 7 и 8.

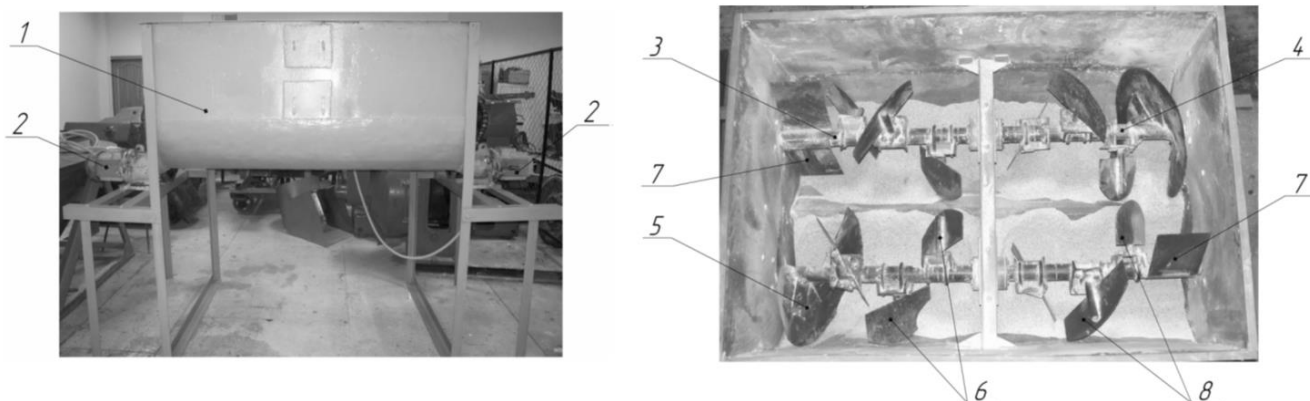
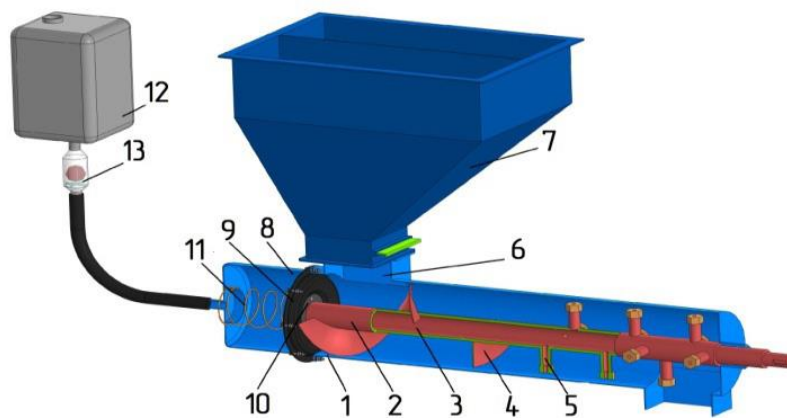


Рисунок 1.12 – Общий вид комбинированного шнека

Испытания горизонтального шнеколопастного смесителя показали высокую эффективность его работы. При доле ключевого компонента 1% наилучшее качество приготавливаемой смеси составило 93,6% при продолжительности смешивания 360 с и коэффициенте заполнения 0,3 [52]. Смеситель предназначен для приготовления влажных кормосмесей и имеет тихоходный режим работы, что в случае с порошкообразными материалами не обеспечит достаточной циркуляции смеси.

Известен шнеколопастной смеситель обеспечивающий возможность использования жидких компонентов в процессе кормоприготовления (рис. 1.13) [53, 54]. Смеситель показал высокую эффективность смешивания при приготовлении корма из побочных продуктов крахмального производства. Однородность смеси при смешивании отжаты кукурузной мезги и сгущенного экстракта составила 92-94%, что достигается за счет подачи экстракта непосредственно в зону смешивания [55].



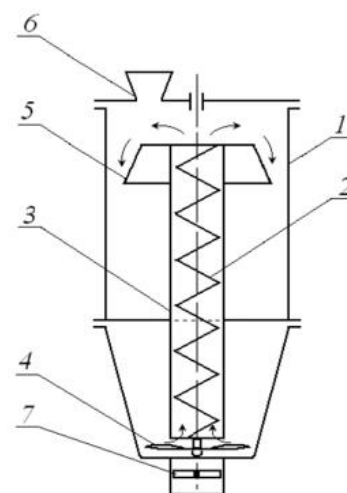
1 – корпус; 2 – рабочий орган; 3 – вал полый; 4 – конвейер шнековый;  
5 – лопасть полая; 6 – входная горловина; 7 – бункер; 8 – камера экстракта

Рисунок 1.13 – Схема шнеколопастного смесителя.

На рисунке 1.14 представлена схема вертикального шнекового смесителя [56, 57, 58, 59]. Смеситель состоит из бункера 1, шнека 2, установленного в корпусе 3. Лопастная мешалка 4 установлена в нижней части шнека и вращается вместе с ним. В верхней части корпуса шнека 3 закреплен рассеиватель 5.



а)



б)

а) Общий вид вертикального шнекового смесителя;

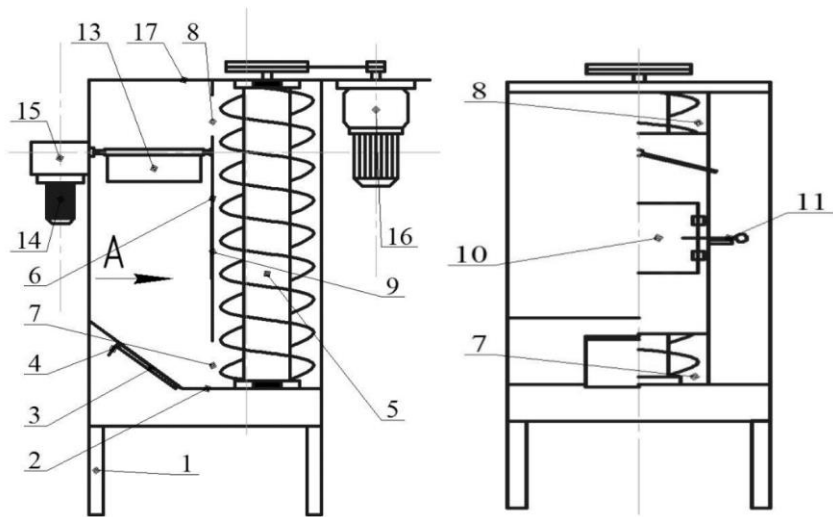
б) Схема вертикального шнекового смесителя по патенту № 119641.

Рисунок 1.14 – Вертикальный шнековый смеситель

Перед началом работы осуществляется заполнение бункера через приемник 6, после чего включается привод и начинается процесс смешивания. Материал захватывается шнеком из нижней части и перемещается вверх, где разбрасывается рассеивателем. После окончания смешивания материал выгружается через окно выгрузки 7. Однородность в таких смесителях достигается за несколько циклов смешивания, при этом за один цикл принимается время за которое весь объем смеси пройдет через шнек 2. Однородность смешивания в вертикальных шнековых смесителях с применением конусных рассеивателей может достигать 94-96% при длительности смешивания 350 с и концентрации ключевого компонента 10% [60]. При меньших концентрациях ключевого компонента в смесителе высокое качество смешивания будет уже не достижимо.

На рисунке 1.15 показан смеситель-обогадитель концентрированных кормов [61]. Смешивание происходит за счет совместной работы вертикального шнека и электромеханического активатора. Активатор приводится посредством электродвигателя с редуктором и кривошипно-шатунного механизма, который сообщает активатору колебательное движение.

Смешиваемый материал загружается в рабочую камеру 2 через горловину 17. После заполнения рабочей камеры включается шнек и начинается процесс смешивания. Материал перемещается вверх по шнеку и поступает на лопасти активатора 13. Воздействие активатора разрушает поток материала и тем самым достигается интенсификация процесса смешивания. Совместная работа шнека и активатора позволяет за 4 минуты приготовить порцию корма массой 50 кг и однородностью более 85%, при доле ключевого компонента 15% [62]. К недостаткам смесителя следует отнести сложность конструкции, а также невозможность получения качественных смесей при низкой концентрации отдельных компонентов.



1 – рама; 2 – рабочая камера; 3 – выгрузное окно; 4 – шиберная заслонка; 5 – шнек; 6 – труба; 7 – загрузочное окно; 8 – выгрузное окно; 9 – перепускное окно; 10 – заслонка; 11-ручка; 12 – фиксирующее устройство; 13 – активатор; 14 – электродвигатель; 15 – редуктор; 16 – мотор-редуктор; 17 – загрузочная горловина.

Рисунок 1.15 – Схема вертикального шнекового смесителя

На рисунке 1.16 показана конструктивная схема горизонтального смесителя кормов с рабочим органом в виде винтовой спирали [63, 64]. Смеситель состоит из корпуса 1, горловины 2, окна для выгрузки готовой смеси 3, бункера 4, состоящего из отдельных секторов 5, разделенных перегородками 6, под которыми расположены дозирующие заслонки 7. Внутри корпуса по всей его длине размещена винтовая спираль 8, которая одним концом соединена с ведущей цапфой 9 посредством шарнира 10, а другим закрепится к ведомой цапфе 11. Корпус смесителя установлен на раме 14. Винтовой механизм 15 позволяет осуществить осевой перемещение ведомой цапфы 11, что обеспечивает изменение прогиба спирали и влияет на производительность смесителя.

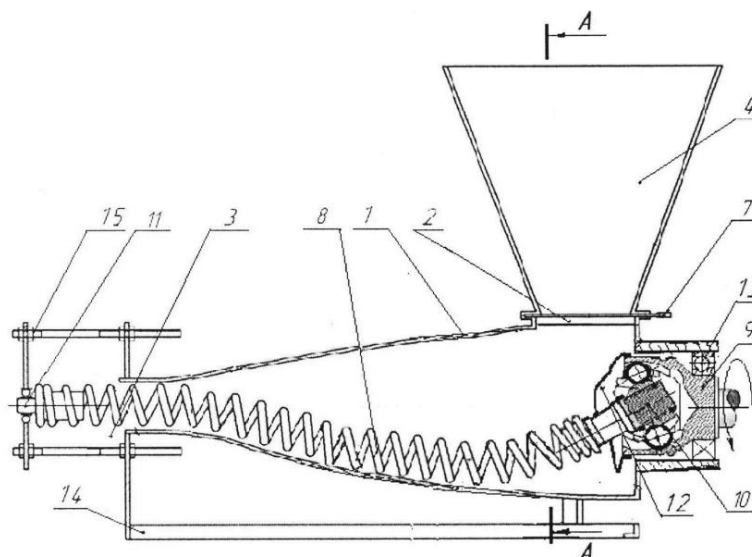
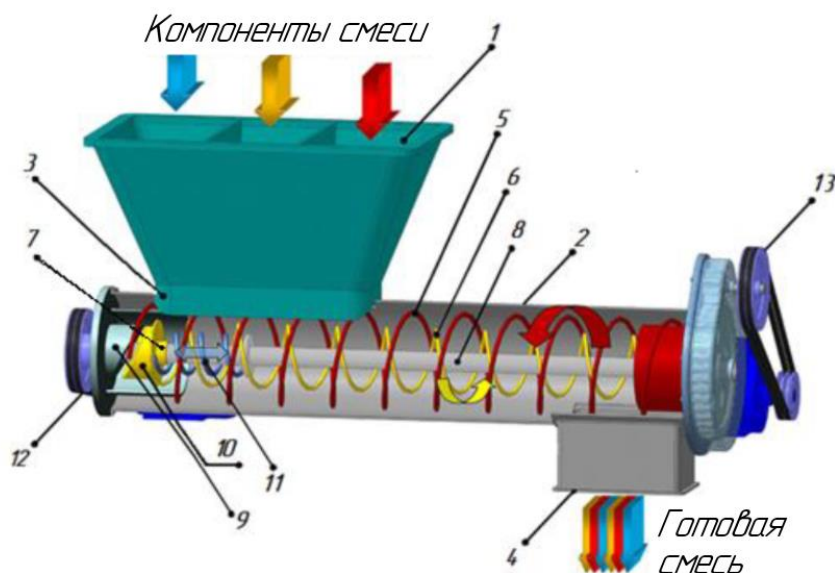


Рисунок 1.16 – Конструктивная схема смесителя кормов

Конструкция смесителя позволяет получать качественные смеси компонентов с различными физико-механическими свойствами, в частности, для смешивания побочных продуктов крахмального производства: кукурузной мезги с экстрактом, дробленного кукурузного зерна и жмыха. Смеситель обеспечивает однородность кормовой смеси в пределах 95 – 97 % [65, 66].

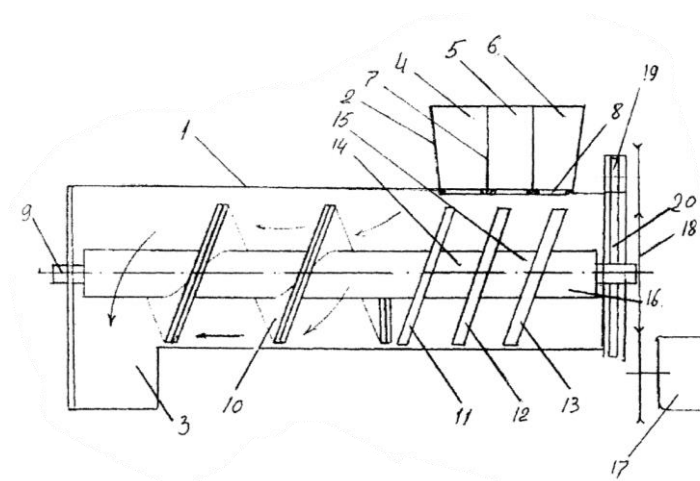
На рисунке 1.17 показана конструкция двуспирального смесителя кормов [67]. Устройство относится к смесителям непрерывного действия. Смеситель состоит из бункера 1, корпуса 2, загрузочного окна 3, выгрузного окна 4. Внутри бункера установлены перегородки для регулировки размеров секций, в зависимости от количества компонентов кормосмеси. Внутри цилиндрического корпуса смесителя размещены две винтовых спирали 5 и 6. Каждая спираль имеет собственный привод. Особенностью смесителя является одновременное вращательное и осевое возвратно-поступательное движение внутренней винтовой спирали [68]. Недостатком смесителя является сложность его конструкции, которая обусловлена наличием двух независимых приводов рабочих органов. А также невозможность получения качественных смесей при малой концентрации отдельных компонентов.



1 – бункер; 2 – корпус; 3 – окно загрузки, 4 – окно выгрузки;  
5, 6 – винтовые спирали; 7 – втулка шлицевая; 8 – вал; 9, 10 – кулачки полые;  
11 – пружина сжатия; 12, 13 – регулируемые приводы.

Рисунок 1.17 – Двуспиральный смеситель кормов

На рисунке 1.18 показана схема смесителя непрерывного действия с рабочим органом в виде комбинированного шнека [69].



1 – кожух; 2 – бункер; 3 – выгрузное окно; 4, 5, 6 – секции бункера;  
7 – перегородка; 8 – заслонки; 9 – вал; 10 – шнек; 11, 12, 13 – наклонные  
диски; 14, 15, 16 – распорные втулки; 17 – электродвигатель;  
18 – клиноременная передача; 19, 20 – шестерни.

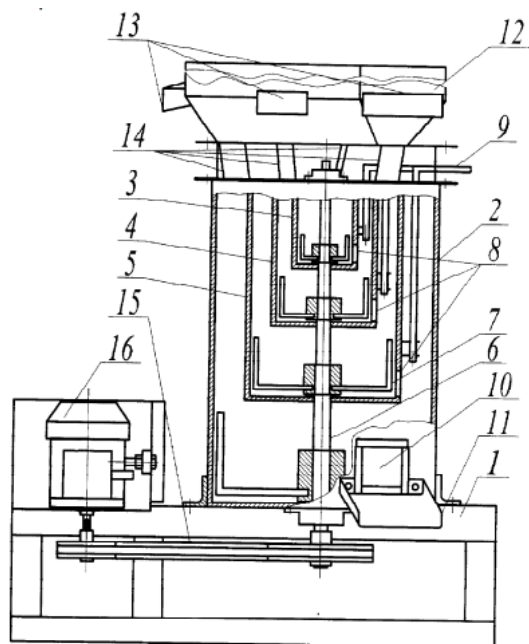
Рисунок 1.18 – Схема смесителя с комбинированным шнеком



В процессе смешивания компоненты попадают из секций бункера в кожух. Откуда под воздействием наклонных дисков и шнека, смешиваясь, перемещаются к выгрузному окну 3. Схожую конструкцию имеют смесители по патентам [70, 71, 72]. Общим недостатком этих смесителей является невозможность получения качественных смесей при малой доле отдельных компонентов.

На рисунке 1.19 показан смеситель, особенностью которого является приготовление конечной качественной смеси на основе предварительного смешивания компонентов, представленных в малых долях [73, 74]. Через центр корпуса смесителя и смесительных емкостей проходит вал с установленными на нем мешалками Г-образной формы. Корпус смесителя и смесительные емкости оснащены выгрузными окнами и заслонками. В верхней части смесителя находится бункер. Бункер разделен на четыре секции, размеры которых пропорциональны объему смесительных емкостей. Каждая из секций бункера соединена с соответствующей ей по объему смесительной емкостью посредством гибкого шланга.

При работе смесителя смесь условно считается двухкомпонентной, состоящей из компонента, имеющего наименьшую концентрацию, и наполнителя. При загрузке исходных компонентов смеси в бункер, в наименьшую секцию помещают компонент, имеющий меньшую концентрацию и часть наполнителя. Остальные секции также заполняют. В начале смешивания подают материал из меньшей секции бункера в емкость 3. После окончания смешивания в емкости 3 предварительную смесь выгружают в большую по объему емкость 4, туда же подают наполнитель из соответствующей секции бункера. После смешивания материал аналогично поступает в емкость 5 и корпус 2, где происходит конечное смешивание компонентов.



1 – рама; 2 – корпус; 3, 4, 5 – цилиндрические емкости; 6 – вал;  
7 – лопасти; 8 – заслонки; 9 – рукоятка; 10 – заслонка; 11 – лоток; 12 – бункер;  
13 – заслонки; 14 – шланги; 15 – ременная передача; 16 – электродвигатель.

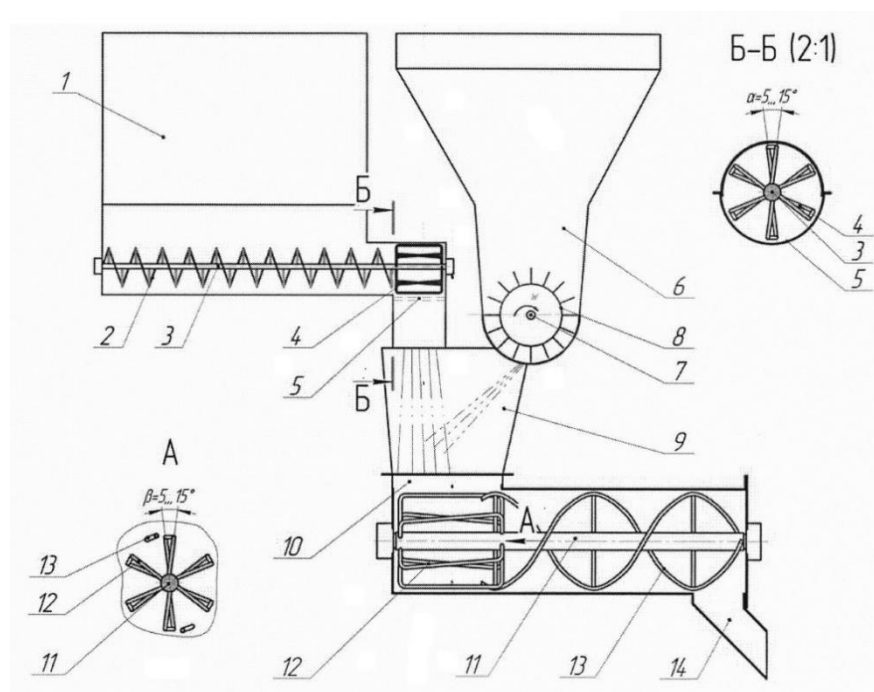
Рисунок 1.19 – Схема смесителя

Приготовление предварительной смеси позволяет снизить общую продолжительность смешивания в 2–3 раза. Конструкция смесителя обеспечивает однородность получаемой смеси 95% при доле ключевого компонента 1%. Это является отличным показателем и достигается за счет предварительного смешивания и формирования турбулентных потоков материала. Удельная энергоёмкость при этом составляет 14,3 кВт·ч/т [75]. Основным недостатком устройства является его сложность, а также высокая удельная энергоёмкость смешивания.

Также известно комбинированное устройство непрерывного действия для смешивания сухих кормов и добавок, содержащее камеру предварительного смешивания и камеру основного смешивания (рис. 1.20) [76].

Корм из бункера 1 посредством шнека и ворошителя подается в камеру предварительного смешивания. В это же время из бункера дозатора в камеру предварительного смешивания подаются добавки, поток которых

бомбардирует поток корма из бункера 1 тем самым происходит смешивание. Полученная таким образом предварительная смесь поступает в камеру основного смешивания где происходит формирование конечной смеси. Применение такого подхода и конструктивная его реализация позволяют получить смесь однородностью 90 % при доле ключевого компонента более 10% [75]. Получение же качественной смеси при меньшей доле ключевого компонента не представляется возможным, что составляет основной недостаток устройства, помимо сложности его конструкции.



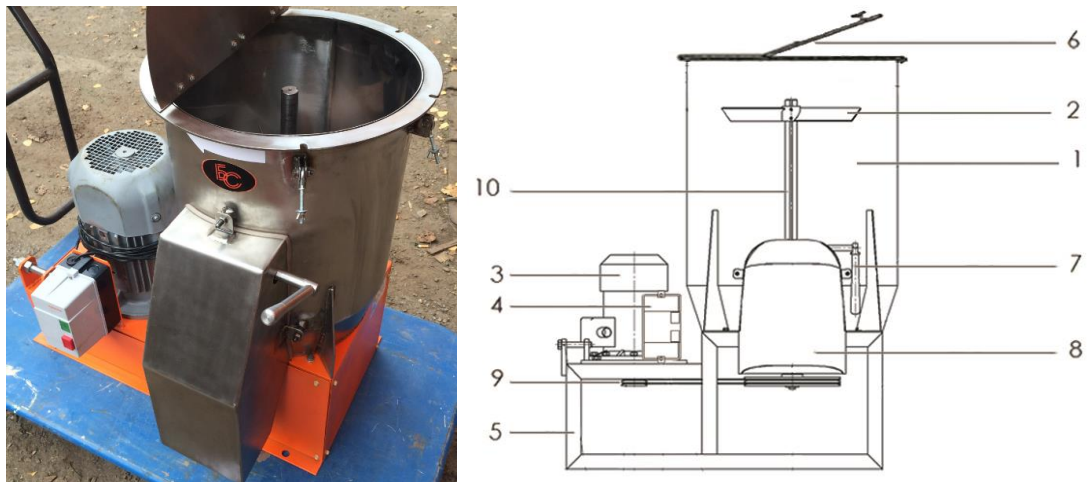
1 – бункер-питатель основного компонента; 2 – выгрузной спирально-винтовой шнек; 3 – вал; 4 – ворошитель; 5 – сетка; 6 – бункер-дозатор добавок; 7 – вал; 8 – лопастные барабаны; 9 – камера предварительного смешивания; 10 – камера основного смешивания; 11 – приводной вал; 12 – мешалка; 13 – спирально-винтовой конвейер; 14 – лоток выгрузки

Рисунок 1.20 – Комбинированное устройство непрерывного действия для смешивания сухих кормов и добавок

На рисунке 1.21 показан общий вид и схема центробежного лопастного смесителя ВЛС с вертикально установленным валом и радиальными лопастными мешалками компании Спектр [77].

Смеситель предназначен для сухих сыпучих материалов. На валу установлены две лопастные мешалки, одна из которых на дне смесителя, а вторая в верхней его части.

Схожее конструктивное исполнение имеет центробежный смеситель СЛ фирмы Агромаш-НН (рис. 1.22) [78]. В отличие от центробежного смесителя фирмы Спектр смеситель СЛ имеет комбинированный шнеколопастной рабочий орган. Лопастные мешалки размещены на валу на трех уровнях, а сами лопасти установлены под углом, обеспечивающим перемещение смеси вверх. При этом воздействие шнека создает обратный поток материала, что интенсифицирует процесс смешивания.



- 1 – бункер; 2 – лопастная мешалка; 3 – электродвигатель; 4 – пускатель;  
5 – опорная рама; 6 – крышка; 7 – рычаг заслонки; 8 – лоток выгрузки;  
9 – ременная передача; 10 – вал.

Рисунок 1.21 – Центробежный лопастной ВЛС фирмы Спектр

Привод смесителя СЛ осуществляется непосредственно червячным мотор-редуктором, что свидетельствует о сравнительно невысокой частоте

вращения мешалки. Однородность получаемых смесей в смесителях ВЛС и СЛ, по заявлению производителей, может достигать 95%.



Рисунок 1.22 – Смеситель СЛ фирмы Агротех-НН

Для смешивания сыпучих порошкообразных материалов также применяются гравитационные смесители типа «пьяная» бочка. На рисунке 1.23 показан общий вид гравитационного смесителя компании Вибротехник [79]. Цилиндрический бункер, образующий камеру смешивания, имеет полезный объем 33 л. Бункер устанавливается под углом во вращающейся рамке, при этом предусмотрена возможность регулировки угла установки в пределах  $15-60^\circ$  с шагом в  $15^\circ$ , а также вертикальное положение для загрузки и выгрузки смешиваемого материала.

Установка оснащена мотор-редуктором и панелью управления. Смешивание обеспечивается за счет вращения цилиндрического бункера, установленного под углом. Отсутствие мешалок внутри бункера и невысокая скорость его вращения позволяет избежать истирания и переизмельчения частиц смешиваемого материала во время смешивания. Конструкции таких смесителей позволяют получать смеси однородностью более 90%, при коэффициенте заполнения равном 0,5 [80]. Недостатки таких смесителей

обусловлены низкой производительностью и невозможностью получения качественных смесей при малых концентрациях отдельных компонентов.



Рисунок 1.23 – Общий вид гравитационного смесителя

Существующие смесители не вполне отвечают требованиям для использования их в технологических линиях кормоприготовления, ввиду необоснованности их параметров и режимов работы с учетом физико-механических свойств используемых сегодня кормовых добавок. Также к недостаткам существующих смесителей следует отнести невозможность получения качественных смесей с малой долей ключевого компонента при обеспечении низкой энергоемкости процесса смешивания.

## **1.4 Анализ методов оценки качества смешивания**

### **1.4.1 Методы отбора проб**

В ходе смешивания происходит перемещение частиц отдельных компонентов относительно друг друга с целью достижения такого состояния, при котором в каждом отдельном минимальном объеме анализируемой пробы, взятой из рассматриваемой смеси, концентрации отдельных компонентов соответствуют их долям при закладке в смеситель. В действительности идеального смешивания достичь не удастся, что обусловлено большим количеством факторов, влияющих на формирование качественной смеси. Эти

факторы обусловлены конструктивными параметрами смесителя, физико-механическими свойствами смешиваемых материалов и методами смешивания. При этом равномерность распределения компонентов в смеси рассматривается как случайная величина [81].

Для отбора проб смеси сыпучих материалов применяются метод квартования и метод точечного отбора проб.

Метод квартования чаще всего применяется при анализе работы смесителей периодического действия. Весь объем смеси или его часть высыпается на плоский поддон и распределяется на нем ровным слоем небольшой высоты. Затем всю площадь смеси делят на 20 – 40 равных квадратов, из которых отбирают пробы приблизительно равной массы [81, 82]. Недостатком метода является необходимость выгрузки смеси для последующего анализа. В результате выгрузки нарушается сформировавшаяся в процессе смешивания структура смеси, что не позволяет обнаружить возможные мертвые зоны в объеме смесителя.

Метод точечного отбора проб получил широкое распространение. Для отбора проб используют цилиндрический пробоотборник, состоящий из полого цилиндрического корпуса 1 с коническим наконечником, в котором выполнены окна 2 (рис. 1.24). В корпус 1 вставлена трубка 3, содержащая окна 4, каждое из которых сообщается с отдельной изолированной камерой для отбора проб. Рычаг 5 позволяет осуществлять перекрытие окон пробоотборника путем вращения трубки 3 в корпусе 1.

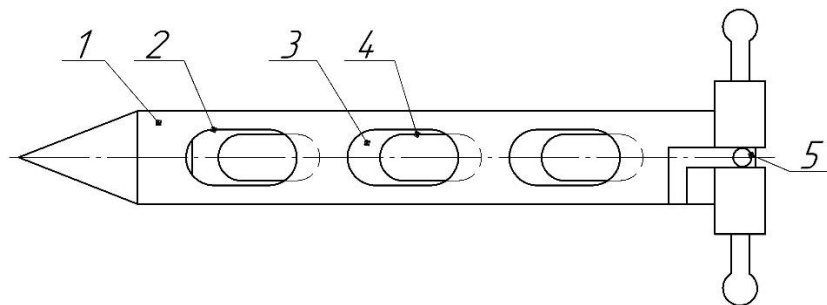


Рисунок 1.24 – Пробоотборник

При введении пробоотборника в смесь окна 4 перекрыты. После установки пробоотборника на необходимую глубину окна 4 открывают, совмещая их с окнами 2, с помощью рычага 5. Происходит заполнение смесью изолированных камер в трубке 3. После чего окна перекрываются и пробоотборник извлекают из смеси. В рамках этого метода пробы отбираются непосредственно из смесителя, что позволяет установить сформировавшееся в процессе смешивания взаимное расположение компонентов смеси и наличие мертвых зон.

#### **1.4.2 Методы оценки качества смешивания**

Оценка качества смешивания осуществляется путем анализа проб смеси и заключается в установлении равномерности распределения компонентов в результате их смешивания. При этом, как правило, достаточно установить распределение одного из компонентов, имеющего наименьшую долю в смеси, который называют ключевым. Ключевой компонент может быть выбран как из основного состава смеси, так и введен в нее специально, в зависимости от условий эксперимента.

Одним из наиболее распространенных методов оценки качества смешивания является метод весового анализа [83-87, 113, 141]. В рамках метода качество смешивания определяется путем разделения пробы смеси на основной и ключевой компоненты. Разделение проб смеси осуществляют вручную, на ситах или с помощью воздушных сепараторов. После разделения компоненты взвешивают и устанавливают их процентное соотношение в пробе. Широкое применение метода обусловлено его простотой и дешевизной реализации при достаточно высокой точности результатов.

Применяется метод анализа проб многокомпонентных смесей, основанный на эффекте фотолюминесценции. Пример применения метода приведен в исследованиях [96, 97]. В рамках метода компонент смеси принятый в качестве ключевого перед его загрузкой в смеситель покрывался фотолюминесцирующим раствором, способным излучать свет после



воздействия на него ультрафиолетового излучения. Доля ключевого компонента составляла 10%. После окончания процесса смешивания отбирались пробы смеси. Пробы помещались в герметичные камеры, где подвергались ультрафиолетовому излучению, что вызывало флуоресценцию ключевого компонента. После чего выполнялось фотографирование проб и последующая обработка фотографических изображений с помощью специализированного программного обеспечения. Исследования показали высокую эффективность метода для оценки содержания ключевого компонента в многокомпонентной гранулированной смеси.

Известен подход к оценке качества многокомпонентной смеси путем анализа фотоизображения основанный на методе кластеризации К-средних [98, 99]. Под кластеризацией понимается обнаружение на двухмерном изображении группировок данных. В рамках реализации метода изображение разбивается на  $K$  кластеров, количество которых принимается равным числу компонентов смеси. Анализ начинается с задания первоначальных случайных центров масс кластеров. После анализа кластеров относительно выбранных центров масс, положение центров корректируется и расчёт повторяется вновь. Расчет завершается, когда координаты вновь полученных центров равны предыдущим. В результате формируется сегментированное изображение, на основе которого вычисляется коэффициент однородности смешивания (рис. 1.25).

Точность метода кластеризации К-средних имеет высокую чувствительность к цифровому шуму изображений, что требует их предварительной обработки с применением фильтров.

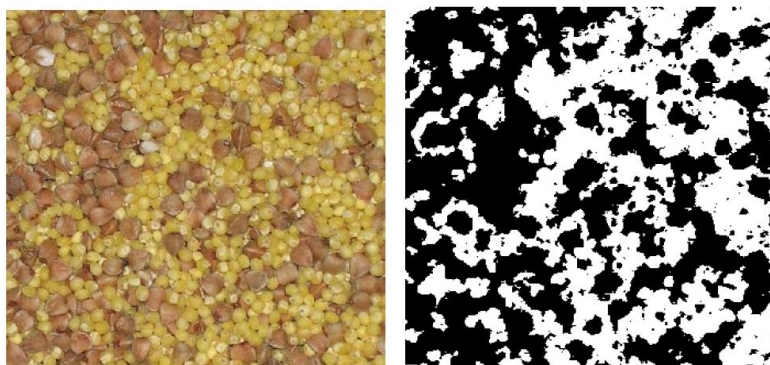


Рисунок 1.25 – Сегментированное изображение для оценки качества многокомпонентной смеси

Нашел распространение метод анализа проб, в основе которого лежит применение микротрейсеров [88, 93, 94]. Микротрейсеры представляют собой ферромагнитные частички железа или нержавеющей стали, покрытые слоем пищевого красителя, одинакового размера – 150 до 350 мкм и с гарантированным количеством частиц – от 50 000 до 1 000 000 частиц на грамм, в зависимости от марки микротрейсеров. Доля введения микротрейсеров составляет не более 50 г на тонну кормосмеси. Метод реализуется с помощью банки Мейсона или с помощью специализированного устройства. Такие устройства выполнены в виде цилиндрической емкости, у одного из оснований цилиндра установлен магнит, на который во время анализа закрепляется накладка из фильтровальной бумаги. Проба смеси помещается в емкость и интенсивно встряхивается, находящиеся в пробе микротрейсеры собираются на бумажной накладке с помощью магнита. Затем на фильтровальную бумагу наносится жидкость, в которой растворяются пищевые красители, образуя цветные пятна. После чего бумагу высушивают и подсчитывают пятна.

Использование микротрейсеров требует высокой точности дозирования и разделения, а также последующих расчетов, что обусловлено малыми размерами и весом микротрейсеров. В связи с чем метод анализа проб с применением микротрейсеров практически нереализуем без лаборатории, оборудованной надлежащим образом [95].

Для определения однородности смеси также применяют химические методы. Наиболее распространенным является метод титрования, который

основан на анализе избирательной реакции реагента, называемого титрантом, с ключевым компонентом смеси. В ходе реализации метода пробы, отобранные из смеси, растворяют в отдельных колбах. После чего раствор подвергают титрованию, путем постепенного добавления титранта до того момента пока соотношение количества ключевого компонента в растворе и добавленного титранта не приведет к видимым качественным изменениям – изменению цвета раствора или выпадению осадка. Содержание ключевого компонента в пробе рассчитывается исходя из объема затраченного титранта [81, 82].

Одним из методов аналитической химии, применяемым для оценки качества кормов, является метод атомно-абсорбционной спектроскопии [91]. Метод позволяет оценить качество кормосмеси с включенными в ее состав наночастицами металлов. Метод отличается высокой точностью, при этом доля ключевого компонента может составлять до 0,003 % [92].

Кондуктометрический метод анализа проб основан на определении величины электропроводности раствора в зависимости от концентрации в нем ключевого компонента. В качестве ключевого компонента может применяться поваренная соль [88]. Метод отличается высокой точностью и позволяет определить концентрацию хлорида натрия от 0,06 до 5,8% [89].

Разнообразие применяемых методов оценки качества смешивания обусловлено различными физико-химическими и физико-механическими свойствами компонентов смесей и необходимой точностью результатов. При выборе конкретного метода анализа проб также руководствуются стоимостью его реализации и доступностью необходимого оборудования.

### **1.5 Общие выводы, цель и задачи исследования**

Анализ рационов для крупного рогатого скота показал, что общая масса кормосмеси составляет 45 – 50 кг/гол. и состоит из 15 – 20 компонентов, при этом 5 – 7 компонентов, являющиеся БМВД, входят в смесь в расчете 10 – 300 г/гол., т.е. представлены в малых долях по отношению к общей массе смеси. При такой массовой доле становится практически невозможным

обеспечение высокого качества смешивания кормосмеси по существующим технологическим схемам кормоприготовления.

Существующие конструкции смесителей не вполне отвечают требованиям по достижению высокого качества смеси с малой долей ключевого компонента при низкой удельной энергоемкости смешивания для использования их в технологических линиях кормоприготовления, ввиду необоснованности их параметров и режимов работы с учетом физико-механических свойств используемых сегодня кормовых добавок.

При оценке качества смешивания наиболее рациональным является применение метода точечного отбора проб, который позволяет установить взаимное расположение компонентов смеси, сформировавшееся в процессе смешивания и наличие мертвых зон. Метод весового анализа проб является наиболее простым и доступным для оценки концентрации ключевого компонента в пробе, обеспечивая при этом высокую точность результатов.

На основе анализа научно-технической и патентной литературы обоснованы пути совершенствования технологий кормления КРС путем модернизации технологических схем приготовления кормосмесей и обоснования предпосылок к разработке смесителя для предварительного смешивания БМВД с учетом их физико-механических свойств. Обоснованы цель и задачи исследований.

Исходя из проведенного анализа определена цель работы – повышение эффективности приготовления смеси БМВД для КРС путем обоснования параметров и режимов работы смесителя.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи исследования:

- 1) провести анализ структуры рационов, технологических линий приготовления кормосмесей на фермах КРС по производству молока и технических средств для смешивания порошкообразных материалов;
- 2) определить физико-механические свойства БМВД и их смесей;

- 3) разработать теоретические зависимости энергетических и мощностных показателей процесса смешивания с учетом физико-механических свойств БМВД;
- 4) провести экспериментальные исследования смесителя в лабораторных условиях и определить влияние параметров и режимов его работы на качество смеси и энергоемкость процесса смешивания;
- 5) провести экспериментальные исследования смесителя в производственных условиях;
- 6) определить экономическую эффективность.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ

### 2.1 Предпосылки к разработке смесителя БМВД

БМВД представляют собой мелкодисперсные порошкообразные материалы со схожими физико-механическими свойствами [116, 121, 118]. Для их смешивания применяются центробежные смесители с вертикальным валом и лопастной радиальной мешалкой. В ряде исследований разработаны конструкции таких смесителей с помощью метода, основанного на равенстве моментов, создаваемых вращающимися лопастями мешалки и возникающих сопротивлений стенок корпуса аппарата [106, 107, 108]. Авторами выявлены экспериментальные зависимости влияния конструктивных параметров мешалки на неравномерность и энергоемкость процесса смешивания [104]. Показано влияние частоты вращения на однородность смеси [105]. Для обоснования конструктивных параметров смесителя авторы используют коэффициент длины лопастей:

$$K_L = \frac{L}{R_{em}} \quad (2.1)$$

где  $L$  – длина лопасти мешалки, мм;

$R_{em}$  – радиус емкости смесителя, мм.

Экспериментально установлено, что при частоте вращения лопастей до 1000 об/мин степень неоднородности не изменяется независимо от длины лопастей. При дальнейшем увеличении частоты вращения однородность повышается. При частоте вращения  $n = 1500$  об/мин и коэффициенте длины  $K_L = 0,89 - 1,0$  коэффициент неоднородности составляет 6,0% – 6,5%, а при  $K_L = 1,7$  – стремится к 2% [105].

Увеличение длины лопастей и частоты вращения мешалки способствует повышению однородности, но наблюдается рост температуры смеси и дополнительное измельчение частиц материала. Это негативно влияет на энергетическую эффективность смешивания, ведет к потере добавками ценных

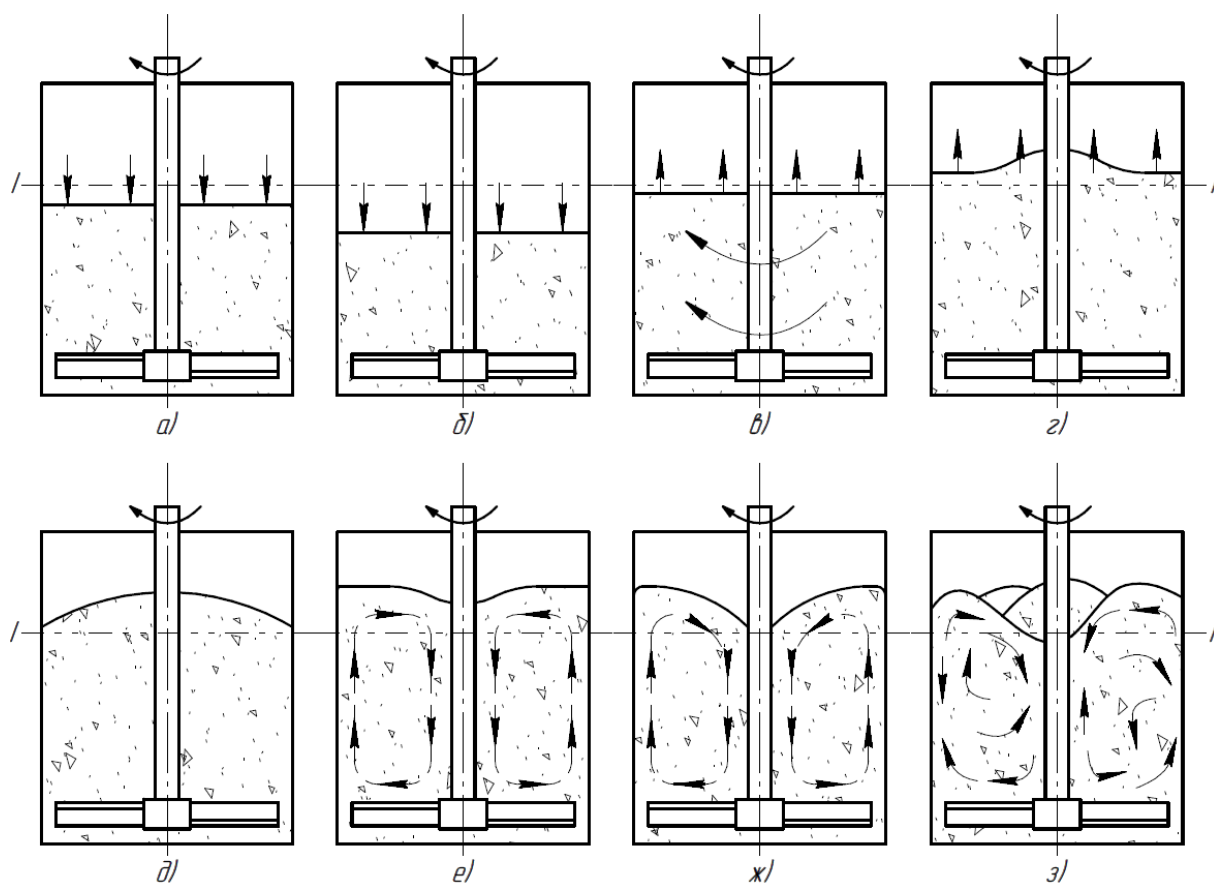
свойств в результате нагрева и пыления. Негативные факторы обусловлены тем, что изменение длины лопастей связано с увеличением их осевого участка, располагающегося вблизи стенок корпуса [105]. Это предположение также подтверждается аналогичным экспериментом, в ходе которого изменялось количество лопастей [108].

Для повышения эффективности и качества смешивания БМВД возможно применить подход, при котором достигается состояние псевдооживления сыпучего материала [81, 111, 112, 113, 114]. При смешивании в псевдооживленном слое равномерное распределение компонентов наступает в разы быстрее, чем при сдвиговом или конвективном смешивании. Вращение рабочих органов в таком слое создает интенсивную внутреннюю циркуляцию, уменьшает чувствительность к различию в физико-механических свойствах компонентов [115].

Псевдооживление материала быстро вращающейся лопастью мешалкой проходит в несколько этапов и связано с увеличением высоты слоя материала и уменьшением его плотности. Следствием этого является снижение энергозатрат на преодоление сопротивления материала [81, 110, 114].

На рисунке 2.1 показаны этапы смешивания для достижения псевдооживленного состояния сыпучего материала в зависимости от скорости вращения лопастью мешалки, установленной под углом  $45^\circ$  к днищу бункера. Первому этапу, при котором происходит уплотнение слоя материала, соответствует окружная скорость на краю лопасти  $u_o \leq 1$  м/с (рис. 2.1, а). Увеличение окружной скорости до  $u_o = 1 - 2$  м/с вызывает вибрацию частиц материала и уплотнение слоя продолжается (рис. 2.1, б). При достижении скорости  $u_o = 2 - 2,5$  м/с весь слой материала начинает медленно двигаться по окружности, что сопровождается незначительным снижением его плотности (рис. 2.1, в). При достижении окружной скорости  $u_o = 2,5 - 3,5$  м/с наблюдается вспучивание слоя сначала в области вала, а затем и во всем объеме, что также сопровождается снижением его плотности (рис. 2.1, г, д). При скорости  $u_o = 4 - 5$  м/с материал начинает циркулировать в объеме бункера. Нижние слои

материала поднимаются вдоль стенок бункера вверх и направляются в образовавшуюся в области вала воронку. При достижении скорости  $u_0 = 5 - 8$  м/с, циркуляция материала становится очень интенсивной (рис. 2.1, ж). Слой материала увеличивается на 10% – 15%, на его поверхности образуются крупные волны, материал переходит в псевдооживленное состояние (рис. 2.1, з).



I/- первоначальный уровень материала

Рисунок 2.1 – Этапы формирования состояния псевдооживления сыпучего материала в зависимости от скорости вращения лопастной мешалки

Существует ограничивающий параметр, характеризующий предельную высоту слоя материала над мешалкой  $H_b$ , как отношение высоты слоя над мешалкой к ширине лопасти. Для каждого материала, в зависимости от его физико-механических свойств, существует предельное значение этого параметра, выше которого псевдооживление не происходит:



$$H_b = \frac{H}{b} = 6 \dots 10 \quad (2.2)$$

где  $b$  – высота лопасти.

Меньшие значения параметра соответствуют легким и средним материалам, а большие – тяжелым и весьма тяжелым [81]. Насыпная плотность большинства кормовых добавок для КРС находится в пределах 500 – 800 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует легким и средним материалам [116, 82, 117]. При этом насыпная плотность смеси добавок в соответствии с действующими рационами составляет около 900 кг/м<sup>3</sup> [118].

Установлено, что чем меньше значение  $H_b$ , тем меньшие значения окружной скорости  $u_o$  необходимы для достижения псевдооживленного состояния [114, 119, 120].

Экспериментальные данные, полученные А.М. Ластовцевым и А.М. Хвальновым, показывают, что рост энергозатрат происходит на этапах уплотнения материала (рис. 2.1, а, б). Для расчета мощности, необходимой при движении лопастной радиальной мешалки при смешивании мелкодисперсных материалов, авторами предложена следующая формула [81]:

$$N_{уп} = c_1 \cdot \rho_n \cdot \omega^{1,2} \cdot L \cdot (b \cdot \sin\beta)^{0,32} \cdot H^{1,04} \cdot \tau_y \quad (2.3)$$

где  $c_1$  – коэффициент сопротивления в режиме уплотнения;

$\rho_n$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;

$b$  – ширина лопасти, м;

$L$  – длина лопасти, м;

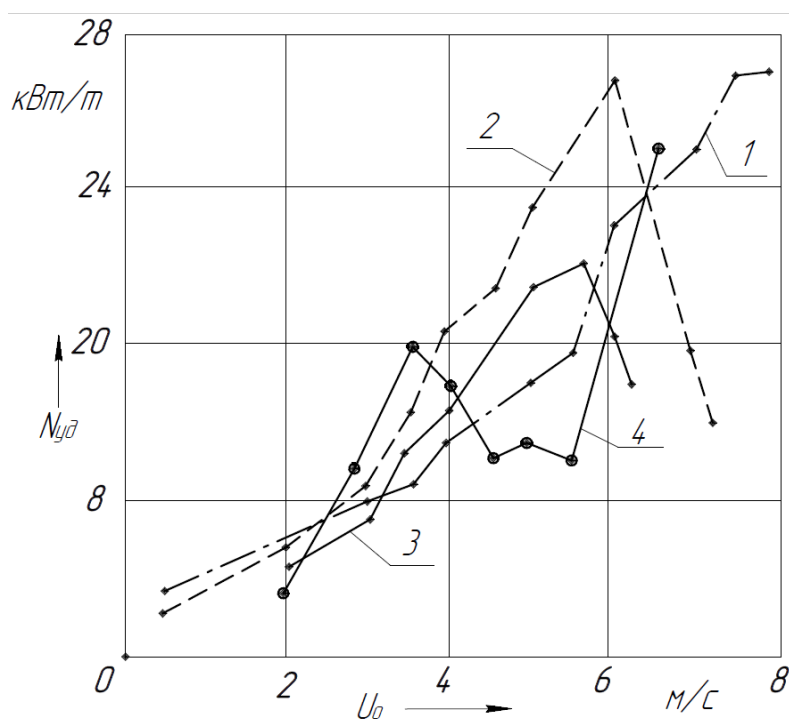
$\beta$  – угол атаки лопасти, град.;

$H$  – высота слоя материала над лопастью, м;

$\tau_y$  – коэффициент, учитывающий степень усадки материала.

Согласно этой зависимости, рост мощности наблюдается до определенного критического значения окружной скорости на краю лопасти  $u_{кр}$ . Критическое значение окружной скорости соответствует началу псевдооживления сыпучего материала.

Н.П. Поповым было установлено, что переход материала в псевдооживленное состояние сопровождается значительным уменьшением сопротивления движению лопасти и, как следствие, удельная мощность на валу мешалки заметно снижается. На рисунке 2.2 показаны экспериментальные зависимости удельной мощности смешивания от окружной скорости мешалки при различных значениях ширины лопасти [81]. Угол наклона лопастей составлял  $45^\circ$ .



- 1 –  $H/b = 9,6$ , при  $b = 20$  мм; 2 –  $H/b = 6,0$ , при  $b = 30$  мм;  
3 –  $H/b = 4,3$ , при  $b = 40$  мм; 4 –  $H/b = 3,2$ , при  $b = 50$  мм.

Рисунок 2.2 – Зависимость удельного расхода энергии от окружной скорости на краю лопасти при различных значениях ширины лопасти

На графике видно, что при достижении некоторого значения окружной скорости на краю лопасти, соответствующего  $u_{кр}$ , при различном отношении

высоты слоя над мешалкой к ширине лопасти, удельная энергоёмкость заметно снижается. Дальнейшее увеличение окружной скорости приводит к росту удельной энергоёмкости смешивания.

Анализируя и сопоставляя вышесказанное, можно предположить, что при обосновании конструктивных параметров смесителя [107, 108] и режимов работы в ходе экспериментальных исследований [104, 105, 109], авторами не достигнуты оптимальные значения  $u_o$  и  $H_b$ . Поэтому актуальность дальнейшего развития этих исследований не вызывает сомнений.

## 2.2 Определение параметров смесителя

В большинстве рассмотренных выше конструкций бункер выполнен в виде цилиндра с плоским дном. В процессе смешивания частицы материала в нижней части бункера перемещаются под воздействием лопастей мешалки к стенкам смесителя и соударяются с ними. При этом происходит потеря частицей сообщенной ей энергии и снижение скорости ее движения. Высвобождаемая энергия затрачивается не продуктивно: на сообщение частице остаточных деформаций и ее нагрев. Как следствие этого снижается скорость частиц. Это явление характеризуется коэффициентом восстановления (2.4), отношением модуля скорости частицы в конце удара к модулю скорости в начале [123, 127].

$$k = \frac{u_k}{u_n} \quad (2.4)$$

где  $u_k$  – скорость в конце удара, м/с;

$u_n$  – скорость в начале удара, м/с;

Скорость перемещения частиц в слое является одним из определяющих факторов псевдооживления. Для снижения энергоёмкости необходимо конструктивно обеспечить условия, при которых частицы материала соударяются со стенками бункера под некоторым углом.

В случае с цилиндрическим корпусом имеем условия прямого удара, при котором вектор скорости при ударе направлен по нормали к поверхности (рис. 2.3). Учитывая, что ударные силы очень велики и за мгновенное время удара изменяются от нуля до весьма большого значения и снова падают до нуля, то в теории удара за меру механического взаимодействия соударяющихся тел принимают не сами ударные силы, а их ударные импульсы  $\bar{S}$ , являющиеся величинами конечными. Действием неударных сил, например, силы тяжести пренебрегают.

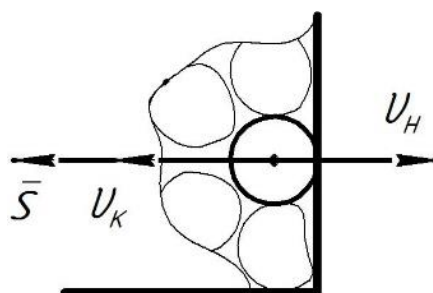


Рисунок 2.3 – Условия прямого удара

Вектор скорости частицы в конце соударения направлен по нормали к плоскости корпуса и противоположно направлению основного потока, создаваемого мешалкой, в результате чего возможно возникновение уплотнения смеси, истирание и нагрев частиц, что ведет к повышению энергоемкости. С этой точки зрения наиболее рациональным является обоснование угла расположения рабочих поверхностей бункера таким образом, чтобы материальный поток частиц воздействовал на них под некоторым углом. В этом случае имеем условия косоугольного удара (рис. 2.4), при котором вектор скорости направлен под углом к плоскости соударения.

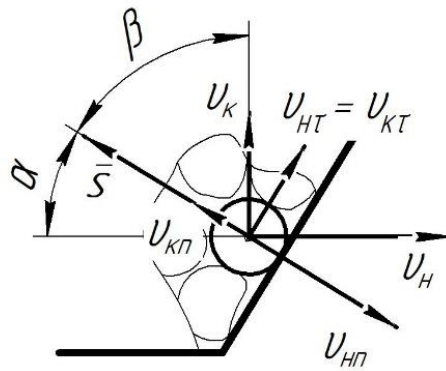


Рисунок 2.4 – Условия косоугольного удара

Пренебрегая влиянием трения, можно сказать, что касательная составляющая скорости частицы  $v_t$  при ударе не изменяется. При прочих равных условиях скорость в конце удара определяется только углом  $\alpha^\circ$  между вектором скорости и нормалью к плоскости.

На рисунке 2.5 представлена расчетная схема смесителя. Для формирования восходящего потока материала и снижения потерь скорости основание бункера смесителя выполнено в виде усеченного конуса. С целью исключения образования застойных зон угол у основания конуса принимается равным удвоенной величине угла естественного откоса смесей БМВД.

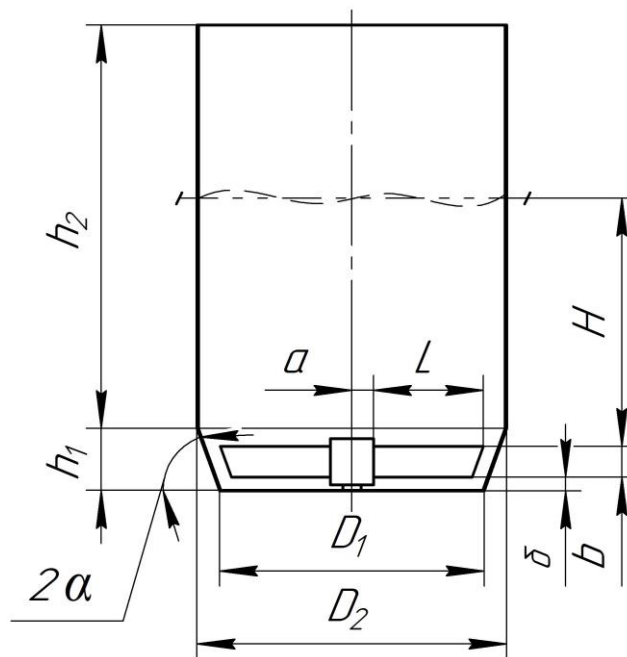
В зависимости от производственно-хозяйственных условий и физико-механических свойств кормовых добавок технологический объем смесителя БМВД можно определить по формуле:

$$V_3 = \frac{n_i \cdot m_{\text{гол}}}{\rho_n \cdot k_i}, \quad (2.5)$$

где  $n_i$  – размер технологической группы коров, гол.;

$m_{\text{гол}}$  – суточная масса добавок, кг/гол.;

$k_i$  – кратность кормления.



$h_1$  – высота конической части;  $h_2$  – высота цилиндрической части;  
 $H$  – высота слоя над мешалкой;  $a$  – расстояние от оси вращения до лопасти;  
 $L$  – длина лопасти;  $D_1$  – диаметр основания конической части бункера;  
 $D_2$  – диаметр цилиндрической части бункера;  $b$  – ширина лопасти.  $\alpha$  – угол  
 естественного откоса;  $\delta$  – зазор между корпусом и лопастью.

Рисунок 2.5 – Расчетная схема смесителя

С целью обоснования технологического объема смесителя, соответствующего реальным потребностям в зависимости от размера технологических групп и кратности кормления построено графическое решение уравнения (2.5) при значении насыпной плотности смеси БМВД  $910 \text{ кг/м}^3$  и суточной массе добавок  $1 \text{ кг/гол.}$ , в соответствии с действующими рационами [118] (рис. 2.6).

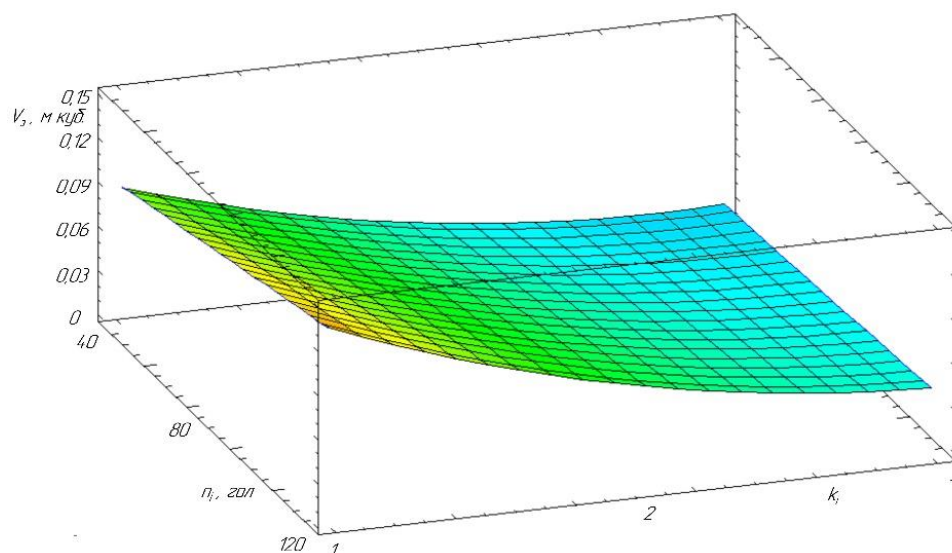


Рисунок 2.6 – Зависимость технологического объема смесителя от размера технологических групп и кратности кормления

Необходимый технологический объем смесителя БМВД в большей степени зависит от кратности кормления. Смеситель наибольшего объема – 0,13 м<sup>3</sup> необходим при размере технологических групп 120 голов и однократном кормлении. При этом для хозяйств с размерами технологических групп 40 голов и двукратным кормлением такой объем смесителя избыточен. Время смешивания в центробежных смесителях с псевдоожиженным слоем сравнительно невелико и составляет 40 – 240 с [81, 113]. Это позволяет приготавливать необходимую массу смеси за несколько циклов.

Для расчетов принимается необходимый технологический объем смесителя равный 0,044 м<sup>3</sup>, что соответствует размеру технологических групп – 80 голов и двукратному кормлению. Для определения конструктивного объема смесителя должно выполняться условие:

$$V_3 = V_k \cdot \varphi, \quad (2.6)$$

где  $\varphi$  – коэффициент заполнения;

$V_k$  – конструктивный объем.

Для центробежных цилиндрических смесителей коэффициент заполнения составляет  $\varphi = 0,5 - 0,7$  [75-103, 81, 120]. Для расчета принимаем коэффициент заполнения  $\varphi = 0,6$ .

Конструктивный объем бункера равен сумме объемов его цилиндрической и конической частей, для определения которых необходимо вычислить следующие параметры:  $D_1, D_2, h_1, h_2, b$  (рис. 2.5), при известных  $\delta, \varphi, \alpha, V_3, H_b$ . Сложившееся количество неизвестных и известных величин предполагает нахождение бесконечного множества решений. Ввиду этих условий выбираем базисные свободные неизвестные, которые конструктивно-технологически ограничены, например,  $D_2$  и  $h_1$ , путем выражения которых определим неизвестные, отвечающие требованиям производственно-хозяйственных условий.

На основе рисунка 2.5 определим зависимость:

$$b = h_1 - 2 \cdot \delta \quad (2.7)$$

На основе расчетной схемы (рис. 2.5) определим:

$$R_1 = R_2 - h_1 \cdot \operatorname{ctg} 2\alpha \quad (2.8)$$

Для определения  $h_2$  с учетом коэффициента заполнения необходимо учесть, что коэффициент заполнения определяется как отношение конструктивного объема к технологически необходимому объему смесителя:

$$\varphi = \frac{V_3}{V_k} \quad (2.9)$$

Исходя из условий расчета, свободный объем, не занимаемый смесью, определяется как:

$$V_B = V_k - V_3 = \pi \cdot R_2^2 \cdot (h_2 + \delta - H) \quad (2.10)$$



Преобразование выражения 2.10 и анализ расчетной схемы (рис. 2.5) позволяют определить свободный объем как:

$$V_B = V_K \cdot (1 - \varphi) \quad (2.11)$$

Приравняв и преобразовав выражения (2.10) и (2.11) получим:

$$\frac{\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_1 \cdot (R_1^2 + R_1 \cdot R_2 + R_2^2) + \pi \cdot R_2^2 \cdot h_2}{\pi \cdot R_2^2 \cdot (h_2 + \delta - H)} = \frac{1}{1 - \varphi} \quad (2.12)$$

Преобразовав выражение (2.12) получим:

$$\frac{1}{3} \cdot h_1 \cdot \left( \frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + h_2 = \frac{h_2 + \delta - H}{1 - \varphi} \quad (2.13)$$

Из равенства (2.13) выражаем  $h_2$ :

$$h_2 = \frac{1}{\varphi} \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot h_1 \cdot \left( \frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot (1 - \varphi) - \delta + H \right) \quad (2.14)$$

Таким образом, все интересующие величины выражены, но две из них ( $D_2$  и  $h_1$ ) могут быть произвольными, поэтому их необходимо связать с конструктивными или другими особенностями.

Рассмотрим частный случай, когда конструктивно-технологически задано ограничение в виде соотношения  $\frac{h_2}{D_2} = c$ , т.е.:

$$h_2 = D_2 \cdot c \quad (2.15)$$

где  $c$  – отношение высоты бункера к его диаметру,  $c = 1,5$ .

Диаметр цилиндрической части бункера  $D_2$  определим по формуле с учетом технологически необходимого объема смесителя, учитывающего физико-механические свойства БМВД и производственно-хозяйственные условия:

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_3}{\pi \cdot c \cdot \varphi}} \quad (2.16)$$

Расчетный диаметр цилиндрической части составляет 396 мм. Для дальнейших расчетов полученное значение округляется до ближайшего типоразмера – 400 мм, в соответствии с требованиями [140].

С точки зрения снижения энергоемкости величину зазоров между корпусом и лопастью необходимо принять из интервала  $\delta = 15 - 50$  мм [81]. Для дальнейших расчетов примем значение  $\delta = 30$  мм.

Для обоснования ширины лопасти рассмотрим предельные условия формирования псевдооживленного слоя частиц, при которых параметр высоты слоя принимает наибольшее значение из рекомендуемого интервала  $H_b = 10$  (2.2). Ширину лопасти определим в соответствии с рисунком 2.5 из выражения:

$$b = \frac{(D_2 \cdot c - (b + 2\delta)) \cdot \varphi}{H_b} \quad (2.17)$$

Расчетная ширина лопасти составляет 30 мм. С учетом принятой величины  $\delta$ , расстояние от оси вращения до края лопасти принимается равным 170 мм.

Путем преобразования формул 2.7 и 2.17 определим высоту конической части бункера:

$$h_1 = \frac{(D_2 \cdot c - (b + 2\delta)) \cdot \varphi}{H_b} + 2\delta \quad (2.18)$$

На основании расчётной схемы смесителя и принятых условий получены зависимости и определены конструктивные размеры и объем бункера, а также параметры лопасти смесителя, обеспечивающие формирование условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств БМВД и производственно-хозяйственных условий молочно-товарных ферм.

### 2.3 Определение энергетических и мощностных показателей процесса смешивания в псевдооживленном слое

Для определения зависимостей энергетических и мощностных показателей процесса смешивания рассмотрим изменение скорости частицы с помощью теоремы об изменении количества движения, которая в векторной форме имеет вид [124]:

$$\bar{S} = m \cdot \Delta \bar{v} \quad (2.19)$$

где  $m$  – масса материальной точки.

Для определения размеров частиц применяются различные методы дисперсионного анализа. Для материалов с размером частиц  $> 50$  мкм применяется метод ситового анализа с последующим построением интегральных и дифференциальных характеристик сыпучего материала, что позволяет определить средний диаметр частиц  $D_{cp}$  [125]. В дальнейшем будем рассматривать частицу как сферу, определяемую  $D_{cp}$ .

Принимая во внимание положения теории упаковки дискретных сред, запишем условия верхней границы коэффициента заполнения трехмерного пространства при гексагональной решетчатой упаковке [125, 126]:

$$k_3 = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \quad (2.20)$$

Такая укладка монодисперсных сферических частиц является наиболее плотной.

С учетом насыпной плотности массу отдельной частицы определим по формуле:

$$m_{\text{ч}} = V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{н}} \quad (2.21)$$

где  $V_{\text{ч}}$  – объем частицы;

$\rho_{\text{н}}$  – насыпная плотность.

Преобразовав выражение (2.20) и (2.21) получим:

$$m_{\text{ч}} = \frac{D_{\text{ср}}^3 \cdot \rho_{\text{н}} \cdot \sqrt{18}}{6} \quad (2.22)$$

Скорость перемещения частиц в слое является одним из определяющих факторов псевдооживления. Для определения степени изменения количества движения частиц в процессе смешивания необходимо определить начальную скорость частиц.

Окружная скорость на краю лопасти определяется как:

$$u_o = \frac{\pi \cdot (a + L_l) \cdot n}{30} \quad (2.23)$$

где  $L_l$  – длина лопасти, м;

$n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$a$  – расстояние от оси вращения до лопасти, м

При этом следует принять минимальную величину окружной скорости, соответствующую началу псевдооживления:

$$u_{min} \geq 8, \text{ м/с} \quad (2.24)$$

Для различных типов центробежных смесителей с псевдооживленным слоем рабочая скорость смешивания может в разы превышать начальную скорость псевдооживления. Так, например, оптимальная скорость вращения мешалки в циркуляционном лопастном смесителе типа СС НИИХИММАШа, по данным разработчика, составляет 18 м/с [81].

С учетом (2.15), (2.16) определим минимальную частоту вращения мешалки для условий начала псевдооживления:

$$n_{min} = \frac{30 \cdot u_{min}}{\pi \cdot L_{л}} \quad (2.25)$$

В работе [129] величина скорости движения частицы в радиальном направлении при схождении с поверхности лопасти определяется как:

$$v_{ч} = \frac{n \cdot (a + L_{л})}{2 \cdot f_0} \quad (2.26)$$

где  $f_0$  – коэффициент внешнего трения;

На скорость движения частиц по поверхности лопасти также влияет коэффициент внутреннего трения в результате взаимодействия верхнего слоя материала. Также следует учесть нормальное и тангенциальное сопротивление движению слоя сыпучего материала

Для уточнения кинематических и энергетических характеристик процесса смешивания сыпучего материала в режиме псевдооживления

предлагается ввести коэффициент структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы:

$$C_s = f(f_0; f; \varepsilon_i) \quad (2.27)$$

где  $f$  – коэффициент внутреннего трения;

$\varepsilon_i$  – порозность слоя многокомпонентной смеси.

Порозность слоя представляет собой отношение объема пор к объему смеси, то есть объема дисперсной среды к общему объему материала. Порозность характеризует степень уплотнения материала в процессе смешивания и степень межчастичного взаимодействия, что в конечном итоге предопределяет энергозатраты. В зависимости от плотности упаковки порозность слоя можно определить по формуле [114]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6 \cdot (1 - \cos\gamma) \cdot \sqrt{1 + 2\cos\gamma}} \quad (2.28)$$

где  $\gamma$  – угол между линиями, соединяющими центры сферических частиц.

Принимается, что угол между линиями, соединяющими центры сферических частиц изменяется от  $60^\circ$ , при гексагональной упаковке, до  $90^\circ$ , когда центры сфер расположены в вершинах куба.

Существующая формула применима лишь для систем, в которых дисперсная фаза представляет собой равные по размеру сферы. Истинная порозность может значительно отличаться, ввиду того, что в процессе уплотнения более мелкие частицы будут занимать пространство между крупными. Для определения порозности многокомпонентных смесей вводится коэффициент неоднородности гранулометрического состава [133, 134]:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.29)$$

где  $d_{10}$  и  $d_{60}$  – диаметры частиц, которых содержится в смеси менее 10% и 60%, соответственно.

С учетом коэффициента неоднородности гранулометрического состава порозность слоя многокомпонентной смеси примет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon}{C_u} \quad (2.30)$$

Коэффициент физико-механического сопротивления многокомпонентной дисперсной системы примет вид:

$$C_s = \frac{\varepsilon_i}{f_0 \cdot f} \quad (2.31)$$

В общем случае движение частицы материала в радиальном направлении происходит за счет центробежной силы инерции:

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (2.32)$$

где  $\omega$  – угловая скорость.

На рисунке 2.7 показана расчетная схема векторов сил и скоростей при воздействии мешалки на частицу смеси с указанием угла наклона лопасти.

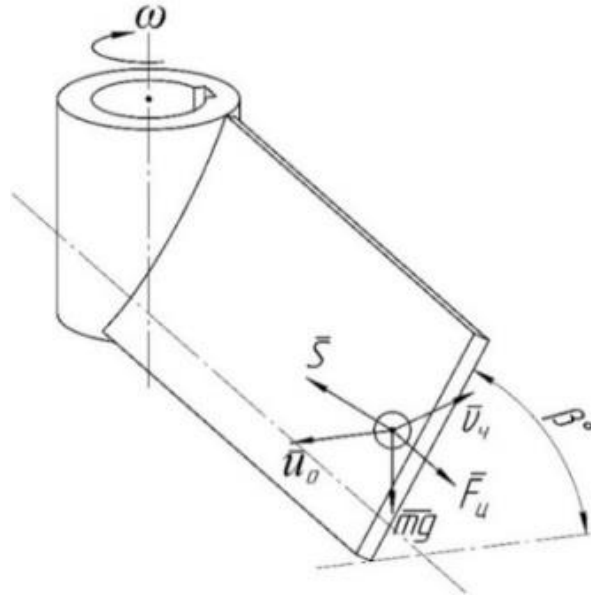


Рисунок 2.7 – Расчетная схема

Преобразовав выражения (2.23) и (2.31), принимая во внимание выражение (2.26) и (2.32) определим скорость схода частицы с лопасти с учетом коэффициента физико-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы и окружной скорости на краю лопасти:

$$v_{ч} = \frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_{л}) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \quad (2.33)$$

где  $\beta_L^\circ$  – угол наклона лопастей мешалки.

Полученное уравнение характеризует величину скорости перемещения частиц в толще псевдооживленного слоя под воздействием лопастной мешалки.

Таким образом, для перевода из состояния покоя в движение со скоростью  $v_{ч}$  частицы материала массой  $m_{ч}$  затрачивается энергия равная:

$$E_{ч} = \frac{D_{ср}^3 \cdot \rho_n \cdot k_3}{12 \cdot C_s} \cdot \left( \frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_{л}) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2, \quad (2.34)$$

Полученное уравнение характеризует затраты энергии на обеспечение движения частиц смеси для формирования условий псевдооживления с учетом



физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД.

Для определения потребной мощности для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом структурно-механических характеристик дисперсной многокомпонентной системы необходимо учесть массу слоя, перемещаемого мешалкой:

$$m_c = \rho_n \cdot V_c \quad (2.35)$$

где  $V_c$  – объем слоя, перемещаемого мешалкой.

Объем слоя можно найти из выражения:

$$V_c = S_c \cdot b \cdot \sin\beta_L \quad (2.36)$$

где  $\beta_L$  – угол наклона лопастей мешалки;

$S_c$  – площадь слоя.

Площадь слоя представляет собой кольцевую поверхность и определяется как:

$$S_c = \pi \cdot ((L_d + a)^2 - a^2) \quad (2.37)$$

Для определения величины сопротивления, обусловленного связностью дисперсной системы необходимо ввести характеристику предельного сопротивления сдвигу на границе слоя, перемещаемого мешалкой:

$$\tau_h = F_h \cdot f \quad (2.38)$$

где  $F_h$  – аутогезия частиц на границе слоя.

Аутогезия характеризует силы межчастичного взаимодействия и численно равна нормальному напряжению на верхней границе слоя перемещаемого мешалкой при свободной засыпке:

$$F_h = \frac{V_h \cdot \rho_n \cdot g}{S_c} \quad (2.39)$$

где  $V_h$  – объем слоя над мешалкой.

Объем слоя над мешалкой равен:

$$V_h = S_c \cdot H_h \quad (2.40)$$

где  $H_h$  – высота слоя материала над мешалкой

Таким образом, преобразовав уравнения (2.38), (2.39) и (2.40) определим предельную характеристику напряженности дисперсной системы на границе слоя, перемещаемого мешалкой:

$$P_\tau = H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \quad (2.41)$$

С учетом уравнений (2.35) и (2.40) получим выражение для определения энергии связности дисперсного слоя, перемещаемого мешалкой:

$$E_\tau = H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin\beta_L. \quad (2.42)$$

С учетом вышеизложенного, обобщенная формула для определения затрат энергии на обеспечение условий формирования псевдооживленного слоя с учетом структурно-механических характеристик дисперсной многокомпонентной системы примет вид:

$$E_c = \frac{\rho_n \cdot V_c \cdot \left( \frac{\pi \cdot n \cdot (L_n + a) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2}{2 \cdot C_s} + H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin \beta_L. \quad (2.43)$$

На основании уравнения (2.43) находим выражение, характеризующее величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД:

$$N_c = \left[ \frac{\rho_n \cdot V_c}{2 \cdot C_s} \cdot \left( \frac{\pi \cdot n \cdot (L_n + a) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2 + H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin \beta_L \right] \cdot \omega. \quad (2.44)$$

На основании проведенных теоретических исследований получены зависимости скоростных и энергетических характеристик движения частиц БМВД под воздействием лопастной мешалки в зависимости от структурно-механических характеристик смешиваемого материала и параметров смесителя. Полученные данные позволяют сделать вывод, что увеличение структурно-механического сопротивления дисперсной системы приводит к значительному росту необходимой мощности. В то время как повышение порозности слоя приводит к снижению энергозатрат в следствии уменьшения сопротивления движению лопасти. Установлено, что на скорость движения частиц в слое наибольшее влияние оказывает угол установки лопасти. Наибольшим значениям скорости движения частиц в слое соответствует наибольший угол установки лопасти. При этом увеличение угла установки лопасти приводит к значительному росту необходимой мощности смешивания.

С целью изучения влияния структурно-механического сопротивления слоя БМВД и угла наклона лопасти смесителя на мощность, необходимую для

формирования условий смешивания в псевдооживленном слое, выполнено графическое решение уравнения (2.44) при значении скорости на краю лопасти  $u_0 = 8$  м/с, соответствующем скорости начала псевдооживления (рис. 2.8).

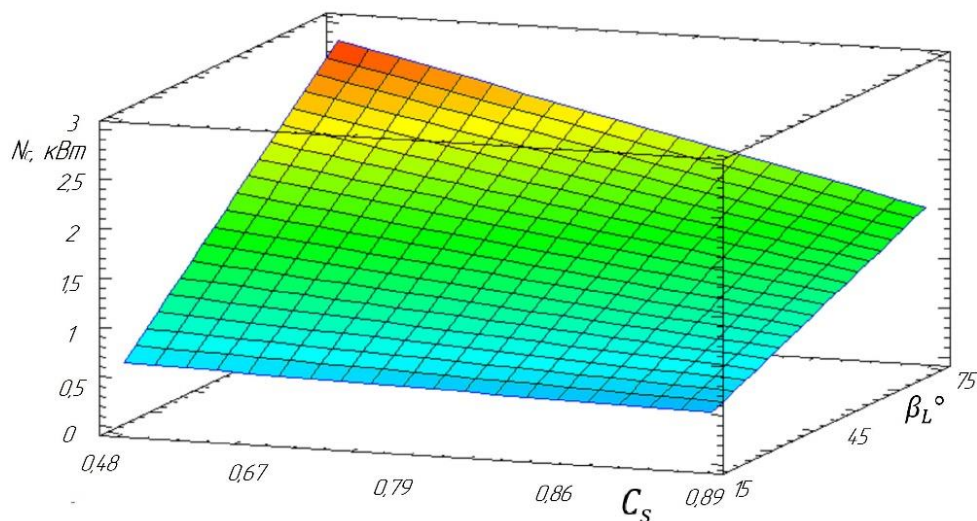


Рисунок 2.8 – Зависимость мощности от структурно-механического сопротивления слоя БМВД и угла наклона лопасти

Анализируя график на рисунке 2.8 можно сказать, что изменение структурно-механического сопротивления оказывает значительное влияние на мощность смешивания. Наибольшее влияние на мощность оказывает угол установки лопасти. При угле наклона лопасти  $30^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,89 значение мощности составляет 0,72 кВт. При угле наклона лопасти –  $60^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,48, значение мощности составляет 2,41 кВт. При значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,79 и угле наклона лопасти  $45^\circ$  значение мощности составляет уже 1,37 кВт. Возрастание необходимой мощности при снижении коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы связано с уплотнением слоя. При увеличении угла наклона лопасти от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  наблюдается возрастание необходимой мощности на 45% – 55%, в зависимости от коэффициента структурно-механического сопротивления, что связано с увеличением сил сопротивления материала.

## 2.4 Выводы по главе

1. Получены зависимости и определены конструктивные параметры смесителя, обеспечивающие формирование условий смешивания в псевдооживленном слое, с учетом физико-механических свойств БМВД и производственно-хозяйственных условий молочно-товарных ферм.

2. Получена зависимость (2.44), характеризующая величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД, которая показывает, что при угле наклона лопасти  $30^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,89 значение мощности составляет 0,72 кВт. При угле наклона лопасти –  $60^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,48, значение мощности составляет 2,41 кВт. При значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,79 и угле наклона лопасти  $45^\circ$  значение мощности составляет уже 1,37 кВт. Возрастание необходимой мощности при снижении коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы связано с уплотнением слоя. При увеличении угла наклона лопасти от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  наблюдается возрастание необходимой мощности на 45 % – 55 %, в зависимости от коэффициента структурно-механического сопротивления, что связано с увеличением сил сопротивления материала.

### 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Смешивание является сложным процессом, эффективность которого зависит от параметров и режимов работы смесителя и физико-механических свойств смешиваемого материала. Формирование качества смеси происходит в результате одновременного течения трех элементарных процессов: процесса конвективного смешивания, процесса диффузионного смешивания и сегрегации [81, 82, 87, 88].

На первоначальных этапах смешивания преобладает конвективное смешивание, скорость которого в большей степени зависит от конструктивных параметров смесителя и характера движения материала. Процесс происходит на уровне макрообъемов и практически не зависит от физико-механических свойств компонентов смеси. После того, как процесс перераспределения частиц будет происходить уже в микрообъемах смеси преобладающим становится процесс диффузионного смешивания, при котором частицы различных компонентов перераспределяются через вновь образуемые границы их раздела. В ходе дальнейшего смешивания все большее влияние на процесс смешивания оказывает сегрегация, характеризующаяся сосредоточением частиц отдельных компонентов под воздействием внешних сил. Наступает момент, когда процессы диффузионного смешивания и сегрегации уравниваются, после чего дальнейшее смешивание не приводит к улучшению качества смеси.

Влияние описанных элементарных процессов на качество смеси поясняется рисунком 3.1. Первый участок кривой соответствует конвективному смешиванию. Второй характеризует диффузионное смешивание. На третьем участке диффузионное смешивание и сегрегация уравниваются.

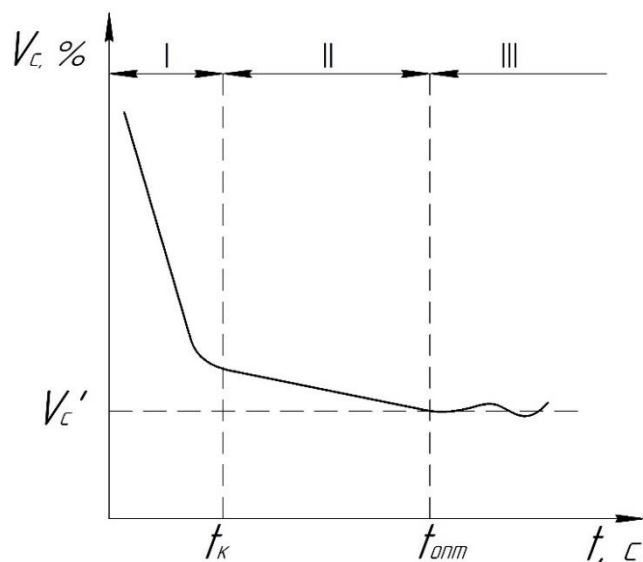


Рисунок 3.1 – Зависимость коэффициента неоднородности смеси от времени смешивания

Скорость диффузионного смешивания и сегрегации зависит от физико-механических свойств компонентов смеси и характера их движения. Такие свойства как, например, гранулометрический состав и насыпная плотность определяют сегрегацию компонентов смеси во время смешивания. Различие в гранулометрическом составе и насыпной плотности определяют процесс просыпания более мелких и тяжелых частиц между крупными и легкими в процессе смешивания, что ведет к разделению смеси на фракции [136, 137]. Гранулометрические характеристики определяют удельную площадь раздела фаз [117, 119]. Углы естественного откоса и обрушения характеризуют подвижность материала [138, 139]. Так для смесей сыпучих материалов, компоненты которых имеют одинаковые физико-механические свойства процесс диффузионного смешивания практически отсутствует [81, 82].

Для каждого смесителя существует оптимальное время смешивания –  $t_{opt}$ , по истечении которого достигается наилучшее качество смеси –  $V_c'$ , при наименьшей удельной энергоёмкости смешивания. Оптимальное время смешивания также зависит от физико-механических свойств смешиваемого материала. В связи с чем, задачами экспериментальных исследований

являются: определение физико-механических свойств, применяемых сегодня БМВД и определение рациональных параметров и режимов работы смесителя для их смешивания.

### 3.1 Методика определения физико-механических свойств БМВД и их смесей

В таблице 3.1 приведены исследуемые факторы в рамках программы исследований по определению физико-механических свойств белково-минерально-витаминных добавок. Выбор факторов, подлежащих исследованию, обусловлен их влиянием на эффективность процесса смешивания, параметры и режимы работы смесителя [82, 117, 119, 141].

Таблица 3.1 – Факторы, подлежащие исследованию

| Фактор                                 | Единица измерения | Условное обозначение |
|----------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Гранулометрический состав              | мм                | $D_{cp}$             |
| Насыпная плотность                     | кг/м <sup>3</sup> | $\rho_n$             |
| Влажность                              | %                 | $W_i$                |
| Угол естественного откоса              | град.             | $\alpha$             |
| Угол обрушения                         | град.             | $\alpha_o$           |
| Коэффициент внутреннего трения         | -                 | $f$                  |
| Коэффициент внешнего трения (по стали) | -                 | $f_o$                |

Исследование гранулометрического состава проводили методом ситового анализа. Суть метода заключается в разделении материала на фракции в зависимости от размера частиц [82]. Для отсева использовали набор сит по ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90) [149]. Номинальные размеры ячеек сит в мм: 2,0; 1,4; 1,0; 0,5; 0,316; 0,16; 0,05.

На основе полученных данных о размере частиц отдельных фракций определяли средневзвешенный размер частиц каждого материала по формуле:



$$D_{\text{ср}} = \frac{\sum d_{\text{ср}}^{\phi} x_i}{\sum x_i} \quad (3.1)$$

где  $x_i$  – массовая доля каждой фракции, г;

$d_{\text{ср}}^{\phi}$  – средний размер частиц для отдельных фракций, мм.

Суть методики определения насыпной плотности заключается во взвешивании емкости известного объема, наполненной исследуемым материалом путем свободной засыпки [82]. Насыпную плотность определяли по формуле:

$$\rho_{\text{н}} = \frac{G_1 - G_2}{V} \quad (3.2)$$

где  $G_1$  – средняя масса материала, кг;

$G_2$  – вес стакана без материала, кг;

$V$  – внутренний объем стакана, м<sup>3</sup>.

Влажность определяли с помощью анализатора влажности серии МХ-50 в соответствии с руководством по эксплуатации (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Анализатор влажности серии МХ-50

В данном анализаторе реализован принцип термогравиметрического анализа, при котором происходит высушивание образца с известной исходной

массой, взвешивание остатка и вычисление относительного изменения массы.

Массовую долю влаги вычисляют по формуле [82]:

$$W_i = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

где  $m_1$  – масса материала до высушивания, г;

$m_2$  – масса материала после высушивания, г.

Влажность смесей БМВД определяли расчетным методом на основе данных, полученных в работе [116], по формуле:

$$W_{см} = \frac{\sum(m_i \cdot W_i)}{m_{см}} \quad (3.4)$$

где  $m_i$  – масса компонента в рационе, кг;

$W_i$  – влажность компонента, %;

$m_{см}$  – масса смеси БМВД, кг;

Угол естественного откоса  $\alpha$  определяли в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 28254-2014 [150]. Сущность метода заключается в измерении угла между основанием и образующей конуса, сформировавшегося при свободной вертикальной засыпке материала.

После установления окончательного результата исследования угла естественного откоса вычисляли коэффициент внутреннего трения по формуле [82, 146]:

$$f = tg \alpha \quad (3.5)$$

Для определения угла обрушения  $\alpha_o$  использовали метод, сущность которого заключается в измерении угла между основанием и наклонной поверхностью, сформировавшейся при свободном перемещении массы материала, находящегося в объеме прибора, в результате извлечения ограничивающей материал заслонки [82, 146].

Для исследования коэффициента внешнего трения использовали метод, сущность которого заключается в определении угла внешнего трения  $\varphi_T$  при котором частицы сыпучего материала приходят в движение, начиная скользить. Угол  $\varphi_T$  связан с коэффициентом внешнего трения  $f_o$  зависимостью [82, 146]:

$$f_o = \operatorname{tg} \varphi_T \quad (3.6)$$

В ходе исследований определяли коэффициент внешнего трения по стали.

### **3.2 Методика определения рациональных параметров смесителя БМВД**

В рамках программы исследований параметров смесителя БМВД поставлены цель и задачи.

Цель исследований: определение рациональных параметров и режимов работы смесителя БМВД для получения качественных смесей.

Задачи исследований:

- определение рациональной окружной скорости на краю лопасти мешалки;
- определение рационального времени смешивания;
- определение рационального угла наклона лопасти.

#### **3.2.1 Обоснование факторов, подлежащих исследованию и уровней их варьирования**

Уровни варьирования окружной скорости на краю лопасти выбираются исходя из условий формирования псевдооживленного слоя. Из литературных источников и представленных в них результатов экспериментальных исследований известно, что материал переходит в псевдооживленное состояние при достижении значения окружной скорости на краю лопасти  $u_o \geq 8$  м/с [81]. В зависимости от значения окружной скорости частота вращения мешалки рассчитывается по формуле:

$$n_i = \frac{30 \cdot u_o}{\pi \cdot L_l} \quad (3.7)$$

За нижний уровень варьирования окружной скорости на краю лопасти принимается минимальная ее величина, соответствующая началу псевдооживления  $u_o = 8$  м/с, частота вращения мешалки при этом составит  $450 \text{ мин}^{-1}$ . За нулевой уровень принимается  $u_o = 9,5$  м/с ( $534 \text{ мин}^{-1}$ ), за верхний –  $u_o = 11$  м/с ( $618 \text{ мин}^{-1}$ ).

Для центробежных смесителей с быстровращающейся мешалкой, в зависимости от конструктивно-режимных параметров смесителя, физико-механических свойств смешиваемого материала и требуемого качества смесей, время смешивания может составлять  $240 - 960$  с [81, 105]. В смесителях с псевдооживленным слоем время достижения наилучшего качества смеси может находиться в пределах  $40 - 120$  с [81, 113, 114, 147]. Время смешивания сухих кормосмесей в барабанных смесителях составляет  $180 - 300$  с [135]. На основе проведенных поисковых экспериментальных исследований по определению интервала варьирования времени смешивания за нижний уровень варьирования времени смешивания принимается  $30$  с, за верхний уровень примем  $150$  с, за нулевой –  $90$  с.

Диапазон изменения угла наклона лопасти составляет от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Минимальный угол установки лопасти составляет  $0^\circ$  и соответствует горизонтальному положению лопасти. При максимальном угле наклона поверхность лопасти располагается вертикально. Теоретические исследования показали, что с увеличением угла наклона лопасти возрастает значение мощности, необходимой для смешивания (рис. 2.8). При этом малый угол установки лопасти ведет к расслоению смеси и снижению интенсификации смешивания. В ходе экспериментальных исследований смесителя с быстровращающейся многоуровневой мешалкой проведенных Бражник Ю.В. угол наклона лопасти изменяли в пределах от  $39^\circ$  до  $71^\circ$  [113, 147]. В ходе экспериментальных исследований по смешиванию в псевдооживленном слое выполненных Н.П. Поповым угол наклона лопасти составлял  $45^\circ$  [81].

На основе теоретических исследований и анализа имеющихся экспериментальных данных за нижний угол наклона лопасти принимается  $30^\circ$ , за нулевой уровень принимается  $45^\circ$ , а за верхний  $60^\circ$ .

Экспериментальные исследования реализованы с использованием трехуровневого плана Бокса-Бенкина [151]. Некомпозиционные планы второго порядка Бокса-Бенкина более экономичны по количеству опытов, чем соответствующие ортогональные и ротатабельные планы [152].

В таблице 3.2 указаны факторы, подлежащие исследованию, их кодированное обозначение и уровни варьирования.

Таблица 3.2 – Факторы, подлежащие исследованию и уровни их варьирования

| Факторы                                       | Кодированное обозначение | Уровни факторов |     |     | Интервал |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|-----|-----|----------|
|                                               |                          | -1              | 0   | +1  |          |
| Окружная скорость на краю лопасти $u_o$ , м/с | $X_1$                    | 8               | 9,5 | 11  | 1,5      |
| Время смешивания $t$ , с                      | $X_2$                    | 30              | 90  | 150 | 60       |
| Угол установки лопасти $\beta_L$ , град       | $X_3$                    | 30              | 45  | 60  | 15       |

Рандомизированная матрица планирования эксперимента представлена в таблице 3.3. При каждой комбинации факторов планируется трехкратная повторность опытов.

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Факторы и их взаимодействие |    |    |
|---------|-----------------------------|----|----|
|         | X1                          | X2 | X3 |
| 1       | +1                          | +1 | 0  |
| 2       | 0                           | +1 | -1 |
| 3       | +1                          | 0  | -1 |
| 4       | 0                           | +1 | +1 |
| 5       | +1                          | 0  | +1 |
| 6       | 0                           | 0  | 0  |
| 7       | 0                           | -1 | -1 |
| 8       | -1                          | 0  | -1 |
| 9       | +1                          | -1 | 0  |
| 10      | -1                          | 0  | +1 |
| 11      | 0                           | 0  | 0  |
| 12      | -1                          | -1 | 0  |
| 13      | -1                          | +1 | 0  |
| 14      | 0                           | -1 | +1 |
| 15      | 0                           | 0  | 0  |

Обработка результатов экспериментальных исследований производится известными методами математической статистики с определением средних значений, среднеквадратичного отклонения исследуемых величин за установленные временные периоды [156, 157, 158]. Обработка полученных данных проводилась с помощью программ Microsoft Excel и Statgraphics.

### **3.2.2 Методика отбора и определения эффективности смешивания**

При проведении экспериментальных исследований смесителя БМВД в качестве основного компонента применялась крупа манная, в качестве ключевого – просо, окрашенное с помощью пищевых красителей. Использование крупы манной в качестве модельного материала является наиболее рациональным ввиду соответствия ее физико-механических свойств свойствам БМВД, при обеспечении дешевизны реализации экспериментальных исследований [153].

Качество смешивания определяется методом весового анализа, сущность которого заключается в отборе проб смеси с последующим разделением их на составляющие компоненты и взвешивании. При этом смесь условно считают двухкомпонентной, состоящей из основного и ключевого компонентов.

При рассмотрении структуры смеси БМВД видно, что доля отдельных добавок может составлять около 1% – 2% [118]. Ввиду этого, доля ключевого компонента для всех экспериментов принимается равной 1%.

Зная долю ключевого компонента, необходимо определить минимальный вес пробы по формуле [81, 82]:

$$G_{min} = \frac{1,26 \cdot 10^4 \cdot D_{cp}^3 \cdot \rho_n}{c_o} \quad (3.8)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр зерен проса, мм [146];

$\rho_n$  – насыпная плотность смеси кормовых добавок, кг/м<sup>3</sup> [154];

$c_o$  – концентрация ключевого компонента, %.

В рамках методики определения качества смешивания применяли метод точечного отбора проб с помощью трубчатого пробоотборника (рис. 3.3) [81, 82]. Устройство пробоотборника позволяет установить распределение компонентов в смеси не нарушая сформировавшуюся структуру частиц в объеме смесителя для наиболее точной оценки влияния исследуемых параметров на качество смеси.



Рисунок 3.3 – Трубчатый пробоотборник

На рисунке 3.4 показана схема расположения точек отбора проб на виде сверху. Удаленность точек отбора проб относительно центра обусловлена различиями линейных скоростей частиц и возможностью формирования зон сегрегации у оси или стенок смесителя. В результате однократного точечного отбора формируются две пробы из нижнего и верхнего слоя смеси, чем обеспечивается представительность проб и исключается возможность наличия незамеченных зон сегрегации.

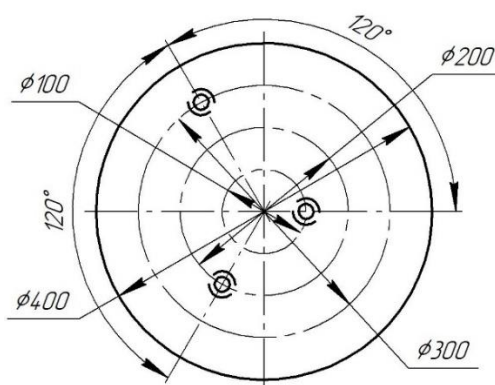


Рисунок 3.4 – Схема расположения точек отбора проб

Отобранные пробы помещались в отдельные герметичные емкости для дальнейшего их анализа. В ходе анализа материал каждой пробы взвешивается. Затем проба разделяется на основной и ключевой компоненты. Полученные доли взвешиваются с точностью до 0,1 г. Опыты проводятся в трехкратной повторности.

Для определения качества смешивания, оценки равномерности распределения ключевого компонента, рассчитывали коэффициент неоднородности смеси  $V_c$  [81, 75, 155]:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad (3.9)$$



где  $\bar{c}$  – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех  $n$  пробах смеси, %;

$c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -й пробе, %.

Коэффициент неоднородности удобно использовать ввиду того, что в ходе анализа проб нет необходимости устанавливать количество частиц, достаточно установить лишь весовую концентрацию ключевого компонента в пробе.

Для определения энергоёмкости применяется метод прямого измерения потребляемой электрической мощности в процессе смешивания. Измерение проводится с помощью электросчетчика Меркурий 230 ART – 03 PQRSIDN. Измерения проводятся в соответствии с планом эксперимента в трехкратной повторности.

Энергоёмкость смешивания определяли с учетом времени смешивания и массы загружаемого материала по формуле:

$$E_i = \frac{N_i \cdot t}{m_{см}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т} \quad (3.10)$$

где  $N_i$  – потребляемая мощность, среднеарифметическое значение трех повторностей, кВт;

$t$  – время смешивания, в соответствии с планом эксперимента, ч;

$m_{см}$  – масса смешиваемого материала, т.

В таблице 3.4 представлены выходные параметры и критерии их оптимизации.

Таблица 3.4 – Выходные параметры и критерии их оптимизации

| № п/п | Кодированное обозначение | Параметр                      | Критерий              |
|-------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1     | $Y_1$                    | Коэффициент неоднородности, % | $\leq 10$             |
| 2     | $Y_2$                    | Энергоёмкость, кВт·ч/т        | Минимум энергоёмкости |

### 3.2.3 Экспериментальная установка смесителя БМВД

Для проведения экспериментальных исследований по определению рациональных параметров и режимов смешивания БМВД была изготовлена экспериментальная установка смесителя (рис. 3.5). По принципу работы установка относится к смесителям периодического действия.



1 – бункер; 2 – лоток выгрузки; 3 – привод; 4 – рама; 5 – блок управления; 6 – панель управления.

Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка смесителя БМВД

Основные технические характеристики установки:

- Габаритные размеры – 820x450x1310 мм;
- Полезный объем смесительной камеры – 0,044 м<sup>3</sup>;
- Мощность привода – 5,5 кВт.
- Вес установки – 68 кг;

Установка работает следующим образом. Смешиваемый материал загружается в бункер 1 в произвольной последовательности. В блоке управления 5 с помощью панели управления 6 задается необходимая частота вращения привода 3 в соответствии с планом эксперимента. После чего осуществляется пуск привода, тем самым, начинается процесс смешивания.

Длительность смешивания задается в соответствии с планом эксперимента и контролируется с помощью секундомера СОСпр-26-2-00. После окончания процесса смешивания материал выгружается через лоток выгрузки 2.

### 3.3 Перечень используемых приборов и оборудования

Используемые в ходе исследований приборы и оборудование представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Перечень используемых приборов и оборудования

| № п/п | Наименование         | Марка                               | Диапазон измерения                                                        | Погрешность прибора                                      |
|-------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1     | Весы лабораторные    | ВСП-0,5/0,1-1                       | 1 – 500 гр                                                                | ±0,1 гр                                                  |
| 2     | Угломер              | Vogel                               | 0 – 360°                                                                  | 0,05°                                                    |
| 3     | Анализатор влажности | МХ-50                               | 0 – 100 %<br>0,1 - 51 гр                                                  | 0,1...4,995 гр – ± 0,1 %<br>5,000...51,000 гр – ± 0,02 % |
| 4     | Стакан               | ПК-100                              | 100±1 мл                                                                  | ±1 мл                                                    |
| 5     | Секундомер           | СОСпр-26-2-00                       |                                                                           | за 10 мин ≤0,1%                                          |
| 6     | Электросчетчик       | Меркурий 230<br>ART – 02<br>РОСРІLG |                                                                           | ≤1,5 %                                                   |
| 7     | Весы электронные     | SK-20K                              | 0,01 – 0 кг                                                               | ±2 гр.                                                   |
| 8     | Набор сит            | Вибротехник                         | Номинальные размеры ячеек сит в мм: 2,0; 1,4; 1,0; 0,5; 0,316; 0,16; 0,05 |                                                          |

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Результаты определения физико-механических свойств БМВД

В ходе определения физико-механических свойств БМВД был проведен анализ БМВД для КРС, используемых в рационах хозяйств Ленинградской области (Приложение Д). Определены свойства как отдельных добавок, так и свойства смесей БМВД. В таблице 4.1 приведены результаты определения гранулометрического состава. На рисунке 4.1 представлено распределение средневзвешенного размера частиц  $D_{cp}$ . Обозначение материалов на гистограммах приводится в соответствии с порядковыми номерами в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Гранулометрический состав

| №<br>п/п | Материал              | Размер ячейки w, мм |       |      |       |       |       |       |        | Суммарный<br>вес, г | $D_{cp}$ ,<br>мм |
|----------|-----------------------|---------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------|------------------|
|          |                       | 2,00                | 1,40  | 1,00 | 0,50  | 0,32  | 0,16  | 0,05  | Поддон |                     |                  |
| 1        | Фунгистат, г          | 0,00                | 0,40  | 0,77 | 52,27 | 22,50 | 15,90 | 8,27  | 0,53   | 100,63              | 0,54             |
| 2        | Полисахариды сухие, г | 0,93                | 4,57  | 7,03 | 25,20 | 19,20 | 31,03 | 11,93 | 0,17   | 100,07              | 0,53             |
| 3        | Премикс П-60, г       | 0,00                | 0,67  | 1,33 | 15,83 | 29,37 | 34,33 | 17,80 | 0,70   | 100,03              | 0,37             |
| 4        | Мел, г                | 0,00                | 2,33  | 9,07 | 48,30 | 15,63 | 19,87 | 4,77  | 0,20   | 100,17              | 0,63             |
| 5        | Элитокс, г            | 0,00                | 0,00  | 0,37 | 1,10  | 19,83 | 55,60 | 23,17 | 0,83   | 100,90              | 0,25             |
| 6        | Левисел, г            | 0,00                | 0,17  | 3,13 | 71,13 | 23,90 | 1,10  | 0,57  | 0,13   | 100,13              | 0,67             |
| 7        | Защищенный жир, г     | 0,00                | 0,33  | 8,63 | 86,93 | 3,93  | 0,07  | 0,00  | 0,00   | 99,90               | 0,78             |
| 8        | Соль, г               | 61,53               | 22,83 | 7,13 | 6,53  | 1,23  | 0,33  | 0,00  | 0,00   | 99,60               | 1,75             |
| 9        | Сода, г               | 0                   | 0,3   | 0,3  | 0,3   | 2,5   | 22,2  | 62,3  | 11,5   | 99,40               | 0,15             |

Суммарная масса фракций находилась в пределах 99 – 101 г, отклонение исходной массы пробы для всех определений составляло не более 1%. Большинство исследуемых кормовых добавок относятся к классу мелкозернистых материалов со средним размером частиц  $D_{cp} = 0,5 – 2$  мм [82, 117]. Наибольшим средневзвешенным размером обладает соль – 1,75 мм. Наименьшим размером частиц обладает Элитокс – 0,25 мм.

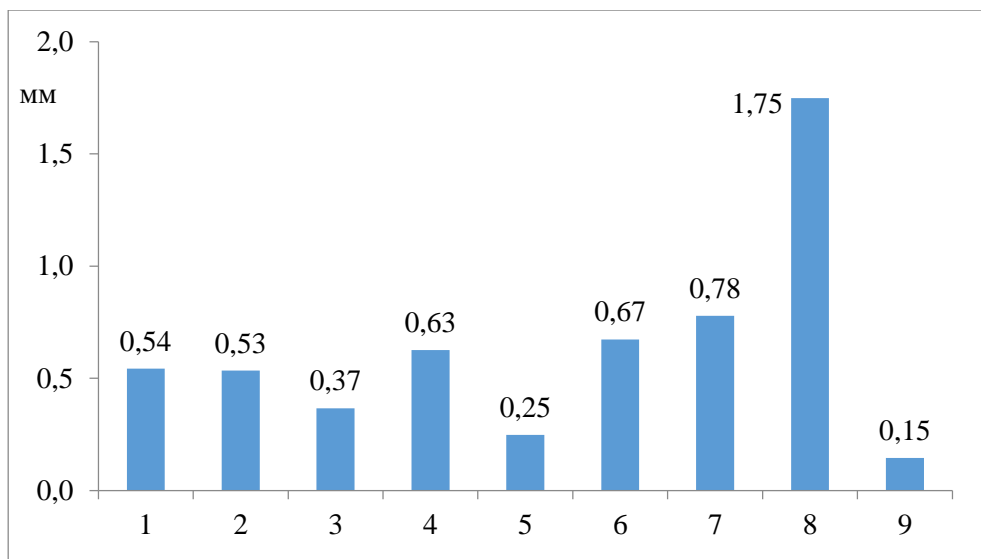


Рисунок 4.1 – Средневзвешенный размер частиц  $D_{cp}$

Результаты определения насыпной плотности представлены на рисунке 4.2. Результаты определения влажности представлены на рисунке 4.3. На рисунке 4.4 представлены результаты определения угла естественного откоса.

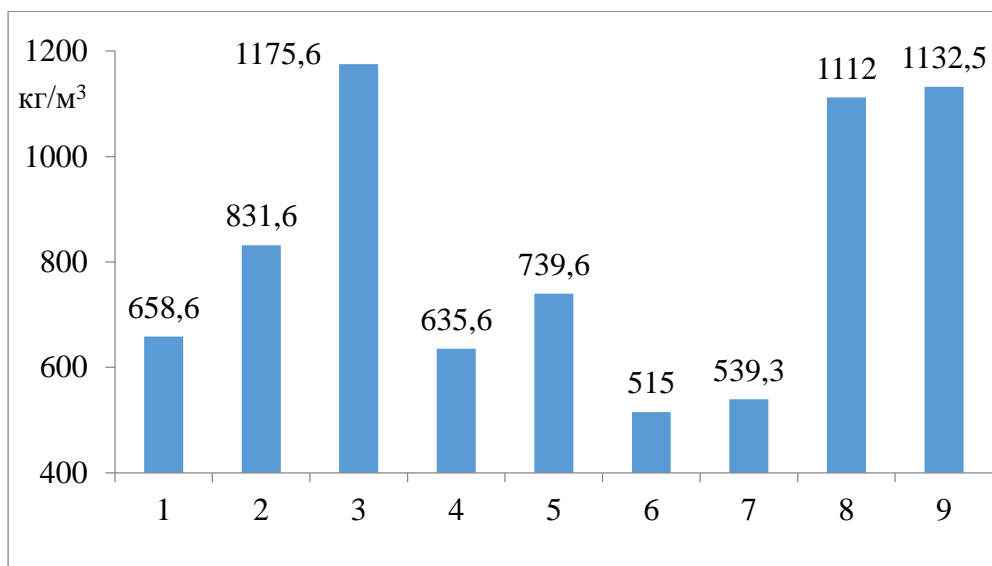


Рисунок 4.2 – Результаты определения насыпной плотности

Большинство исследуемых кормовых добавок по величине насыпной плотности относятся к средним (600 – 1100 кг/м<sup>3</sup>). К тяжелым (1100 – 2000 кг/м<sup>3</sup>) относятся Премикс П-60, соль и сода. К легким (до 600 кг/м<sup>3</sup>) относятся Левисел и защищенный жир.

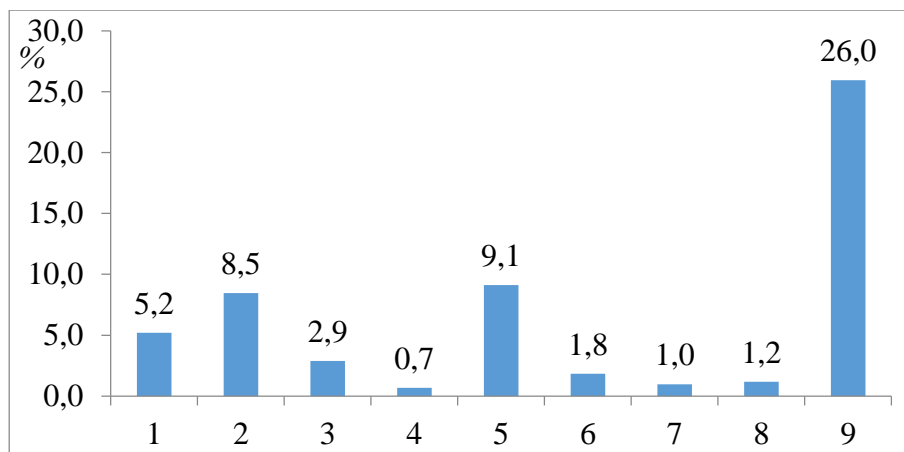


Рисунок 4.3 – Результаты определения влажности

Наибольшей влажностью обладает сода – 26,0%. Наименьшую влажность имеет мел – 0,7%. В целом, для большинства материалов, за исключением соды поле разброса значений влажности не выходит за пределы 10%.

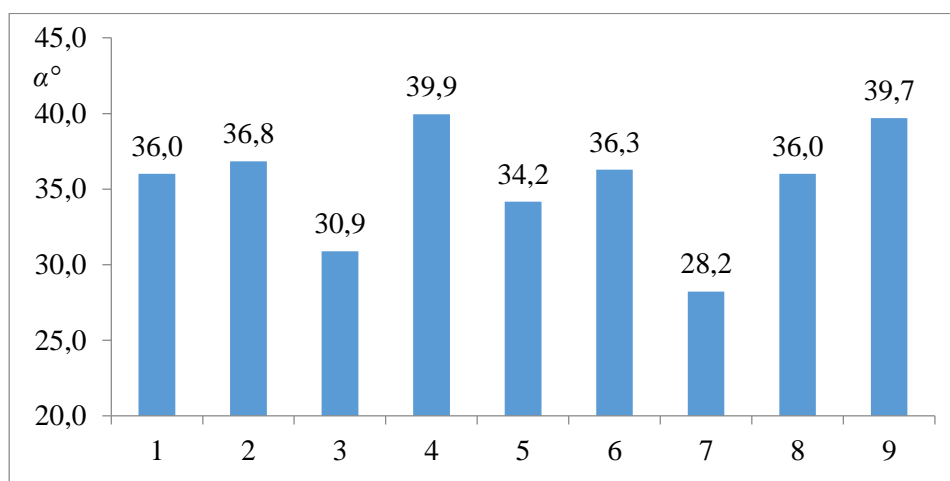


Рисунок 4.4 – Результаты определения угла естественного откоса

Наименьшим углом естественного откоса обладает защищенный жир – 28,2°. В целом, для большинства материалов этот показатель не превышает 40° и находится в пределах 30° – 40°. Наибольшим показателем угла естественного откоса обладает мел – 39,9°.

Результаты определения коэффициента внутреннего трения, угла обрушения и коэффициента внешнего трения (по стали) представлены на рисунках 4.5, 4.6 и 4.7, соответственно.

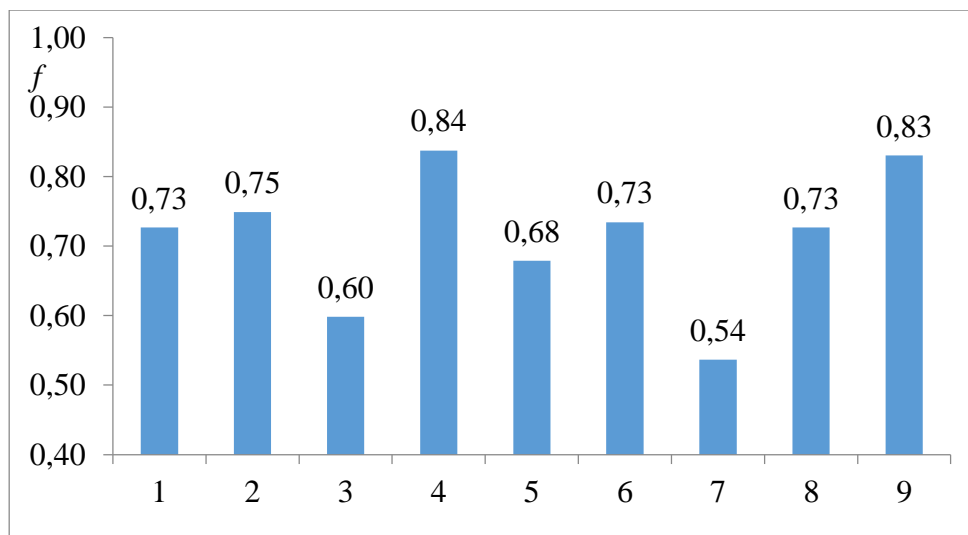


Рисунок 4.5 – Результаты определения коэффициента внутреннего трения

Наибольшим коэффициентом внутреннего трения обладает мел – 0,84, а наименьшим защищенный жир – 0,54.

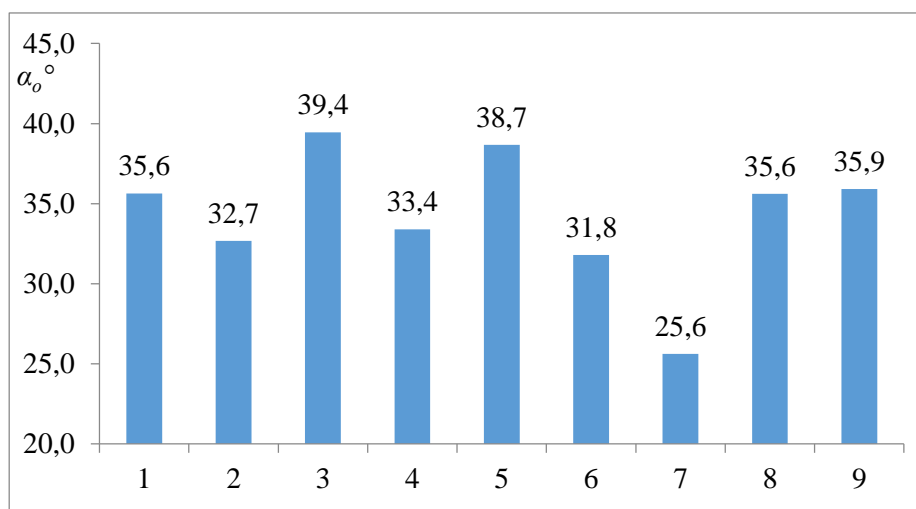


Рисунок 4.6 – Результаты определения угла обрушения

Наименьшим углом обрушения обладает защищенный жир – 25,6°. В целом, для большинства материалов угол обрушения не превышает 40°. Различия по этим показателям для основной части материала не превышают 15°. Наибольшим показателем угла обрушения обладает Премикс П-60 – 39,4.

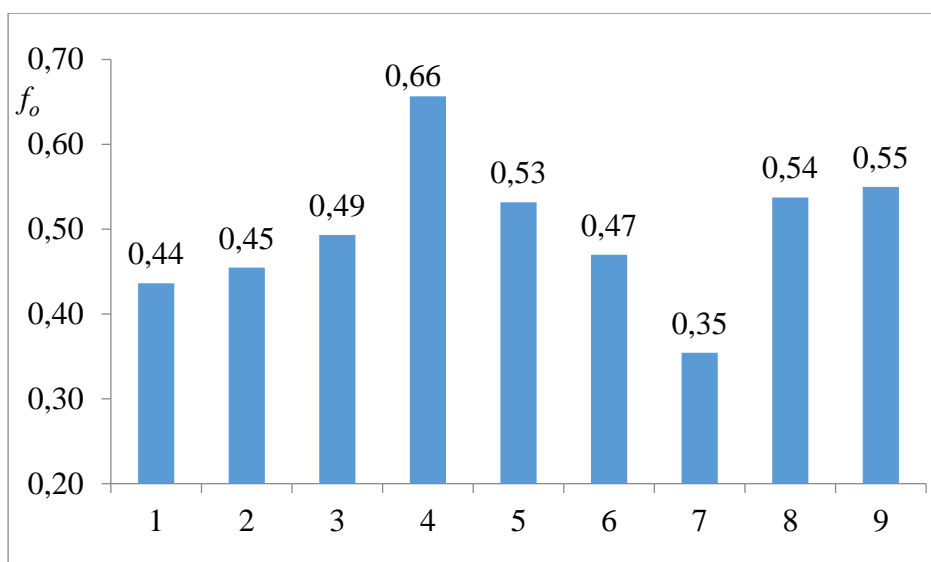


Рисунок 4.7 – Результаты определения коэффициента внешнего трения  
(по стали)

Коэффициент внешнего трения для всех БМВД находится в интервале 0,35 – 0,66, что позволяет рассмотреть возможное усреднение этого показателя в дальнейших расчетах.

В таблицах 4.2 и 4.3 представлены сводные данные результатов определения физико-механических свойств кормовых добавок.

Таблица 4.2 – Результаты определения физико-механических свойств БМВД

| № п/п | БМВД               | Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> | Влажность, % | Коэффициент внешнего трения |
|-------|--------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1     | Фунгистат          | 658,6                                 | 5,2          | 0,44                        |
| 2     | Полисахариды сухие | 831,6                                 | 8,5          | 0,45                        |
| 3     | Премикс П-60       | 1175,6                                | 2,9          | 0,49                        |
| 4     | Мел                | 635,6                                 | 0,7          | 0,66                        |
| 5     | Элитокс            | 739,6                                 | 9,1          | 0,53                        |
| 6     | Левисел            | 515,0                                 | 1,8          | 0,47                        |
| 7     | Защищенный жир     | 539,3                                 | 1,0          | 0,35                        |
| 8     | Соль               | 1112,0                                | 1,2          | 0,54                        |
| 9     | Сода               | 1132,5                                | 26,0         | 0,55                        |



Таблица 4.3 – Результаты определения физико-механических свойств БМВД

| № п/п | БМВД               | Угол естественного откоса, град. | Коэффициент внутреннего трения | Гранулометрический состав, мм | Угол обрушения, град. |
|-------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1     | Фунгистат          | 36,0                             | 0,73                           | 0,54                          | 35,6                  |
| 2     | Полисахариды сухие | 36,8                             | 0,75                           | 0,53                          | 32,7                  |
| 3     | Премикс П-60       | 30,9                             | 0,60                           | 0,37                          | 39,4                  |
| 4     | Мел                | 39,9                             | 0,84                           | 0,63                          | 33,4                  |
| 5     | Элитокс            | 34,2                             | 0,68                           | 0,25                          | 38,7                  |
| 6     | Левисел            | 36,3                             | 0,73                           | 0,67                          | 31,8                  |
| 7     | Защищенный жир     | 28,2                             | 0,54                           | 0,78                          | 25,6                  |
| 8     | Соль               | 36,0                             | 0,73                           | 1,75                          | 35,6                  |
| 9     | Сода               | 39,7                             | 0,83                           | 0,15                          | 35,9                  |

Полученные результаты позволяют классифицировать исследуемые кормовые добавки как порошкообразные и мелкозернистые материалы, а также установить различие их физико-механических свойств.

#### **4.2 Результаты определения физико-механических свойств смесей кормовых добавок для КРС**

Смеси кормовых добавок приготавливались в лабораторных условиях в соответствии с действующими рационами молочно-товарных ферм. В таблицах 4.4 и 4.5 представлены добавки, входящие в рационы различных технологических групп животных, и их доли относительно общей массы кормовой смеси, которая составляет 45 – 50 кг/гол.

Общий вид сформированных смесей представлен на рисунке 4.8. В таблице 4.6 представлен состав исследуемых смесей и доли входящих в них кормовых добавок.



а) вариант 1

б) вариант 2

Рисунок 4.8 – Смеси кормовых добавок по рационам молочно-товарных ферм

Таблица 4.4 – Кормовые добавки в рационе молочных коров (вариант 1)

| №<br>п/п | Наименование   | Доля в рационе, |         | В расчете на<br>80 гол., кг |
|----------|----------------|-----------------|---------|-----------------------------|
|          |                | %               | кг/гол. |                             |
| 1        | Мел            | 0,39            | 0,25    | 20                          |
| 2        | Элитокс        | 0,03            | 0,02    | 1,6                         |
| 3        | Левисел        | 0,02            | 0,01    | 0,8                         |
| 4        | Защищенный жир | 0,47            | 0,3     | 24                          |
| 5        | Сода           | 0,47            | 0,3     | 24                          |
| 6        | Соль           | 0,25            | 0,16    | 12,8                        |
|          | Итого          | 1,63            | 1,04    | 83,2                        |

Таблица 4.5 – Кормовые добавки в рационе молочных коров (вариант 2)

| №<br>п/п | Наименование       | Доля в рационе, |         | В расчете на<br>80 гол., кг |
|----------|--------------------|-----------------|---------|-----------------------------|
|          |                    | %               | кг/гол. |                             |
| 1        | Фунгистат          | 0,31            | 0,15    | 12                          |
| 2        | Полисахариды сухие | 0,62            | 0,3     | 24                          |
| 3        | Премикс П-60       | 0,52            | 0,25    | 20                          |
| 4        | Мел                | 0,33            | 0,16    | 12,8                        |
| 5        | Соль               | 0,21            | 0,1     | 8                           |
|          | Итого              | 1,99            | 0,96    | 76,8                        |

Таблица 4.6 – Состав исследуемых смесей кормовых добавок

| Смесь добавок (вариант 1) |                   |                      | Смесь добавок (вариант 2) |                    |                      |
|---------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| № п/п                     | Наименование БМВД | Доля в смеси БМВД, % | № п/п                     | Наименование БМВД  | Доля в смеси БМВД, % |
| 1                         | Мел               | 24,04                | 1                         | Фунгистат          | 15,63                |
| 2                         | Элитокс           | 1,92                 | 2                         | Полисахариды сухие | 31,25                |
| 3                         | Левисел           | 0,96                 |                           |                    |                      |
| 4                         | Защищенный жир    | 28,85                | 3                         | Премикс П-60       | 26,04                |
| 5                         | Сода              | 28,85                | 4                         | Мел                | 16,67                |
| 6                         | Соль              | 15,38                | 5                         | Соль               | 10,42                |
| 7                         | Итого             | 100,00               | 6                         | Итого              | 100,00               |

В таблице 4.7 представлены результаты определения физико-механических свойств смесей БМВД.

Таблица 4.7 – Свойства смесей БМВД

| Исследуемые факторы                             | Смесь добавок (вариант 1) | Смесь добавок (вариант 2) | Различие свойств, % |
|-------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| Гранулометрический состав $D_{cp}$ , мм         | 0,62                      | 0,59                      | 5,5                 |
| Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup> | 905,0                     | 911,3                     | 0,7                 |
| Влажность $W_{см}$ , %                          | 8,14                      | 4,44                      | 83,3                |
| Угол естественного откоса, $\alpha^\circ$       | 37,17                     | 34,83                     | 6,7                 |
| Угол обрушения, $\alpha_0^\circ$                | 25,6                      | 25,9                      | 1,2                 |
| Коэффициент внутреннего трения $f$              | 0,76                      | 0,70                      | 8,9                 |
| Коэффициент внешнего трения (по стали) $f_0$    | 0,50                      | 0,49                      | 1,3                 |

Смеси БМВД имеют схожий гранулометрический состав, средневзвешенный размер частиц составляет 0,62 мм и 0,59 мм. Насыпная плотность смесей составила 905 кг/м<sup>3</sup> и 911,3 кг/м<sup>3</sup>, влажность смесей – 8,14% и 4,44%, углы естественного откоса смесей равны 34,17° и 34,83°, углы обрушения – 25,6° и 25,9°, коэффициенты внутреннего трения смесей составили 0,76 и 0,7, коэффициенты внешнего трения (по стали) – 0,5 и 0,49.

По всем показателям физико-механических свойств, за исключением влажности, смеси БМВД, входящие в рационы коров хозяйств, различаются не более чем на 10%. По отдельным показателям, таким как насыпная плотность, угол обрушения и коэффициент внешнего трения, различия составляют менее 1,5 %. Исследования показали схожесть физико-механических свойств смесей БМВД, что позволяет усреднить показатели физико-механических свойств при обосновании параметров смесителя БМВД для крупного рогатого скота.

#### **4.3 Обоснование выбора модельного материала для экспериментальных исследований по смешиванию БМВД**

Точность результатов экспериментальных исследований по смешиванию возможно обеспечить путем максимального приближения условий эксперимента к производственным условиям. В связи с чем обоснование выбора модельного материала для проведения экспериментальных исследований по определению рациональных параметров и режимов работы смесителя БМВД является важной задачей. Главным критерием выбора модельного материала является соответствие его физико-механических свойств свойствам БМВД, а также минимизация стоимости реализации экспериментальных исследований.

Соответствие физико-механических свойств модельного материала свойствам рабочего материала является важнейшим условием дальнейшей работоспособности смесителя [82, 159]. Экспериментальные исследования по обоснованию рациональных параметров и режимов работы смесителя требуют

проведения большого количества опытов, что обосновывает актуальность дешевизны модельного материала.

В качестве модельного материала рассматриваются мел, соль, крупа манная (манка) и сода. Для сравнения показателей физико-механических свойств смесей кормовых добавок, применяемых в кормлении молочных коров, со свойствами модельных материалов рассматривали средние показатели свойств смесей БМВД, рассчитанные по данным таблицы 4.7. Средние значения свойств смесей кормовых добавок приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Средние показатели физико-механических свойств смесей кормовых добавок

| № п/п | Физико-механические свойства                   | Смесь БМВД |
|-------|------------------------------------------------|------------|
| 1     | Гранулометрический состав $D_{cp}$ , мм        | 0,60       |
| 2     | Насыпная плотность $\rho_n$ , т/м <sup>3</sup> | 0,91       |
| 3     | Влажность $W_{см}$ , %                         | 6,29       |
| 4     | Угол естественного откоса, $\alpha^\circ$      | 36,00      |
| 5     | Угол обрушения, $\alpha_0^\circ$               | 25,75      |
| 6     | Коэффициент внутреннего трения $f$             | 0,73       |
| 7     | Коэффициент внешнего трения (по стали) $f_0$   | 0,50       |

В таблице 4.9 приведены сводные данные о физико-механических свойствах рассматриваемых модельных материалов. Для определения физико-механических свойств модельных материалов применялись те же методики и оборудование что и для кормовых добавок.

В таблице 4.10 представлены данные о различии физико-механических свойств рассматриваемых модельных материалов со свойствами смеси БМВД. При сравнении рассчитан процент отклонения свойств материалов, при этом за 100% принимался численный показатель отдельных свойств смеси БМВД.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства модельных материалов

| № п/п | Исследуемые свойства                         | Манка | Мел   | Соль  | Сода  |
|-------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | Гранулометрический состав, мм                | 0,57  | 0,63  | 1,75  | 0,15  |
| 2     | Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>         | 0,72  | 0,636 | 1,112 | 1,132 |
| 3     | Влажность, %                                 | 11,68 | 0,70  | 1,20  | 26,00 |
| 4     | Угол естественного откоса, $\alpha^\circ$    | 35,20 | 39,90 | 36,00 | 39,70 |
| 5     | Угол обрушения $\alpha_0^\circ$              | 32,90 | 33,40 | 35,60 | 35,90 |
| 6     | Коэффициент внутреннего трения $f$           | 0,71  | 0,84  | 0,73  | 0,83  |
| 7     | Коэффициент внешнего трения (по стали) $f_0$ | 0,50  | 0,66  | 0,54  | 0,55  |

Таблица 4.10 – Различия физико-механических свойств

| Исследуемые свойства                         | Различие смеси БМВД и манки, % | Различие смеси БМВД и мела, % | Различие смеси БМВД и соли, % | Различие смеси БМВД и соды, % |
|----------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Гранулометрический состав, мм                | 6,6                            | 4,2                           | 189,4                         | 75,2                          |
| Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>         | 20,7                           | 30,0                          | 22,4                          | 24,6                          |
| Влажность, %                                 | 85,7                           | 88,9                          | 80,9                          | 313,4                         |
| Угол естественного откоса, $\alpha^\circ$    | 2,2                            | 10,8                          | 0,0                           | 10,3                          |
| Угол обрушения $\alpha_0^\circ$              | 27,8                           | 29,7                          | 38,3                          | 39,4                          |
| Коэффициент внутреннего трения $f$           | 2,3                            | 15,5                          | 0,0                           | 14,2                          |
| Коэффициент внешнего трения (по стали) $f_0$ | 0,0                            | 33,1                          | 8,9                           | 10,9                          |

На рисунке 4.9 показан средний процент отклонений, рассчитанный как среднеарифметическое значение отклонения по семи исследуемым физико-механическим свойствам.

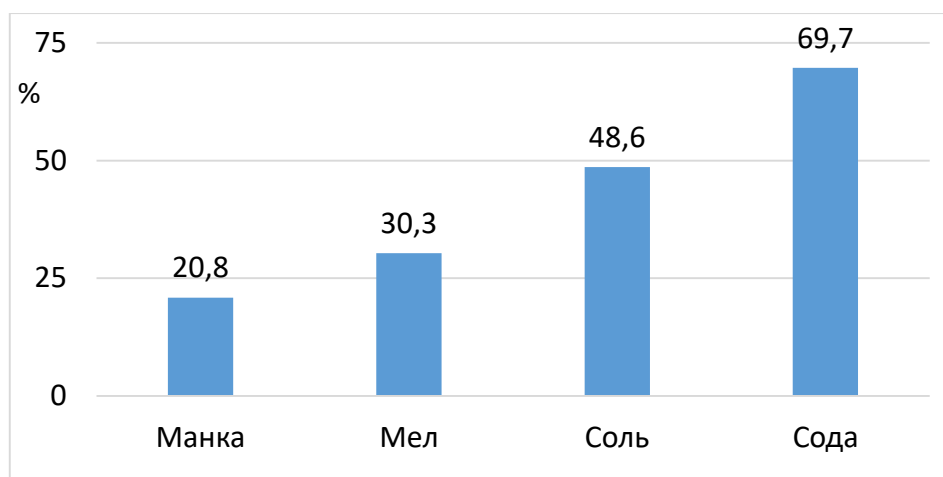


Рисунок 4.9 – Смеси кормовых добавок по рационам хозяйств

Анализируя график на рисунке 4.9 можно сказать, что наименьшим средним процентом отклонения обладает манка – 20,8%. Манка не имеет различий со свойствами смеси БМВД по коэффициенту внешнего трения, а по насыпной плотности и углу обрушения имеет минимальные различия. По гранулометрическому составу и углу естественного откоса манка также имеет незначительное отклонение от смеси БМВД – 6,6% и 2,2% соответственно.

Последовательное рассмотрение отклонений по отдельным свойствам показывает, что наименьшим отклонением по гранулометрическому составу обладает мел, различия составляют 4,2%. При этом мел значительно отличается по насыпной плотности и коэффициентам внутреннего и внешнего трения. Наименьшим отклонением по влажности обладает соль, также соль не имеет отличий по углу естественного откоса и коэффициенту внутреннего трения, при этом по гранулометрическому составу отличие составляет – 189,4%.

Гранулометрический состав и насыпная плотность сыпучего материала определяют возможность сегрегации компонентов смеси во время смешивания и реологические свойства материала, характеризующие подвижность, в связи с чем значительное различие по этим показателям может оказать влияние на воспроизводимость результатов лабораторных исследований в производственных условиях.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наиболее рациональным является использование крупы манной в качестве модельного материала для проведения экспериментальных исследований смесителя кормовых добавок. Это обусловлено наибольшим соответствием физико-механических свойств этого материала свойствам смесей БМВД, при обеспечении дешевизны реализации экспериментальных исследований.

#### **4.4 Результаты экспериментальных исследований по обоснованию интервала варьирования времени смешивания**

В ходе проведения экспериментальных исследований смесителя кормовых добавок в лабораторных условиях в качестве основного компонента применялась крупа манная в качестве ключевого – просо, окрашенное с помощью пищевых красителей. На рисунке 4.10 представлен общий вид смеси. Для всех опытов смесь имела общую массу 27,27 кг и состояла из 27 кг основного компонента и 0,27 кг ключевого компонента. При такой массе смешиваемого материала значение параметра высоты слоя находится пределах  $H_b = 6...10$  и соответствует имеющимся рекомендациям для обеспечения смешивания в условиях псевдоожижения.

Доля ключевого компонента составляла 1 % относительно массы основного компонента.



Рисунок 4.10 – Общий вид смеси



Для уточнения интервала варьирования времени смешивания провели ряд поисковых опытов. При этом изменяли угол установки лопасти от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  с интервалом  $15^\circ$  и время смешивания от 30 до 240 секунд с интервалом в 30 с, а окружная скорость на краю лопасти составляла 11 м/с для всех опытов. Для упрощения анализа проб поисковых опытов в результате однократного точечного отбора формировали и анализировали объединенную пробу из нижнего и верхнего слоя смеси.

После загрузки смесительной камеры включали привод смесителя, и тем самым начинался процесс смешивания. По истечении 30 с процесс смешивания приостанавливали, отбирали пробы и процесс смешивания возобновляли еще на 30 с.

В таблице 4.11 приведены численные значения коэффициента неоднородности смеси и энергоемкости процесса смешивания в зависимости от времени смешивания и угла установки лопасти

Таблица 4.11 – Коэффициент неоднородности смеси и энергоемкость процесса смешивания в зависимости от времени смешивания и угла установки лопасти

| № опыта | Время смешивания, с | Угол наклона лопасти $\beta_L = 30^\circ$ |                                  | Угол наклона лопасти $\beta_L = 45^\circ$ |                                  | Угол наклона лопасти $\beta_L = 60^\circ$ |                                  |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
|         |                     | $V_c, \%$                                 | $E_i, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$ | $V_c, \%$                                 | $E_i, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$ | $V_c, \%$                                 | $E_i, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$ |
| 1       | 30                  | 13,21                                     | 0,67                             | 12,12                                     | 0,84                             | 10,05                                     | 0,94                             |
| 2       | 60                  | 7,98                                      | 1,34                             | 12,84                                     | 1,68                             | 7,74                                      | 1,88                             |
| 3       | 90                  | 10,96                                     | 2,02                             | 5,16                                      | 2,52                             | 5,57                                      | 2,81                             |
| 4       | 120                 | 3,73                                      | 2,69                             | 2,69                                      | 3,36                             | 9,72                                      | 3,75                             |
| 5       | 150                 | 10,37                                     | 3,36                             | 14,11                                     | 4,19                             | 5,96                                      | 4,69                             |
| 6       | 180                 | 13,07                                     | 4,03                             | 8,08                                      | 5,03                             | 3,55                                      | 5,63                             |
| 7       | 210                 | 4,50                                      | 4,71                             | 8,05                                      | 5,87                             | 13,14                                     | 6,57                             |
| 8       | 240                 | 2,00                                      | 5,38                             | 13,18                                     | 6,71                             | 12,18                                     | 7,51                             |

Из данных таблицы 4.11 видно, что при углах установки лопасти  $30^\circ$  и  $60^\circ$  уже по истечении 60 с смешивания неоднородность смеси составляет менее 10 %, что отвечает зоотехническим требованиям. При этом удельная энергоёмкость смеси при наклоне лопасти –  $30^\circ$  меньше, чем при наклоне лопасти равном  $60^\circ$ .

Наилучшее качество смеси – 2,0% неоднородности достигается при длительности смешивания 240 с и наклоне лопасти  $30^\circ$ , при этом энергоёмкость смешивания составляет 5,38 кВт·ч/т. Близкое к наилучшему качество смеси – 2,69% неоднородности достигается при наклоне лопасти  $45^\circ$  и времени смешивания 120 с, при этом энергоёмкость смешивания сравнительно мала и составляет – 3,36 кВт·ч/т.

Достижение высокого качества смеси, соответствующего зоотехническим требованиям, при продолжительности смешивания не превышающей 120 с позволяет сделать вывод о необходимости установления интервалов варьирования времени смешивания кормовых добавок для КРС в центробежном смесителе с радиальной лопастью мешалкой, при планировании многофакторного эксперимента, в пределах 30 – 150 с, ввиду нецелесообразности смешивания дольше 150 с.

#### **4.5 Результаты экспериментальных исследований параметров и режимов работы смесителя БМВД**

Для определения рациональных конструктивно-технологических параметров и более полного изучения рабочего процесса проведены экспериментальные исследования с использованием методики планирования многофакторного эксперимента с использованием трёхуровневого плана Бокса-Бенкина по рандомизированной матрице планирования эксперимента, представленной в таблице 3.5, в трехкратной повторности.

Для всех опытов смесь имела общую массу 27,27 кг и состояла из 27 кг основного компонента 0,27 кг (1 %) ключевого компонента. Сначала в

смеситель загружался основной компонент после чего добавлялся ключевой компонент (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Загрузка компонентов смеси

После загрузки компонентов смеси начинали процесс смешивания. По окончании смешивания отбирали пробы. В результате однократного точечного отбора формировали две пробы из нижнего и верхнего слоя смеси. Отобранные пробы помещали в отдельные герметичные емкости для дальнейшего их анализа. В ходе анализа материал каждой пробы взвешивали. Затем пробу разделяли на основной и ключевой компоненты. Полученные доли взвешивали с точностью до 0,1 г.

В таблице 4.12 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости величины коэффициента неоднородности смеси ( $Y1$ ) и энергоемкости ( $Y2$ ) процесса смешивания от параметров и режимов работы смесителя БМВД.

Таблица 4.12 – Результаты экспериментальных исследований

| № опыта | Факторы и их взаимодействие |                |                | Y <sub>1</sub> | Y <sub>2</sub> |
|---------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         | X <sub>1</sub>              | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |                |                |
| 1       | +1                          | +1             | 0              | 8,04           | 4,13           |
| 2       | 0                           | +1             | -1             | 9,34           | 2,73           |
| 3       | +1                          | 0              | -1             | 11,19          | 1,94           |
| 4       | 0                           | +1             | +1             | 8,91           | 4,01           |
| 5       | +1                          | 0              | +1             | 9,62           | 2,82           |
| 6       | 0                           | 0              | 0              | 8,11           | 2,04           |
| 7       | 0                           | -1             | -1             | 23,27          | 0,54           |
| 8       | -1                          | 0              | -1             | 39,05          | 1,37           |
| 9       | +1                          | -1             | 0              | 11,22          | 0,83           |
| 10      | -1                          | 0              | +1             | 10,91          | 1,99           |
| 11      | 0                           | 0              | 0              | 6,58           | 2,04           |
| 12      | -1                          | -1             | 0              | 41,95          | 0,57           |
| 13      | -1                          | +1             | 0              | 27,80          | 2,83           |
| 14      | 0                           | -1             | +1             | 12,17          | 0,80           |
| 15      | 0                           | 0              | 0              | 6,95           | 2,05           |

В результате обработки экспериментальных данных таблицы 4.12 методами теории планирования экспериментов были получены регрессионные модели для описания зависимости величины коэффициента неоднородности смеси и энергоемкости процесса смешивания от параметров и режимов работы смесителя БМВД:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 7,72077 - 9,955 \cdot X_1 - 4,315 \cdot X_2 - 5,155 \cdot X_3 + 9,59115 \cdot X_1^2 + \\
 & 2,7425 \cdot X_1 \cdot X_2 + 6,6425 \cdot X_1 \cdot X_3 + 5,32115 \cdot X_2^2 + 2,6675 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & R^2 = 94,66
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & 3,04769 - 0,575 \cdot X_1 + 2,105 \cdot X_2 - 0,605 \cdot X_3 + 0,0615385 \cdot X_1^2 \\
 & - 0,3825 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,1025 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,4025 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,171538 \cdot X_3^2 \\
 & R^2 = 99,97
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

По уравнениям регрессии построены трехмерные поверхности отклика для определения влияния исследуемых факторов на неоднородность смеси (рис. 4.12) и энергоемкость (рис. 4.13) смешивания с указанием факторов в раскодированном виде:  $V_c = f(u_o; \beta_L)$ ;  $V_c = f(u_o; t)$ ;  $E_i = f(u_o; \beta_L)$ ;  $E_i = f(u_o; t)$ .

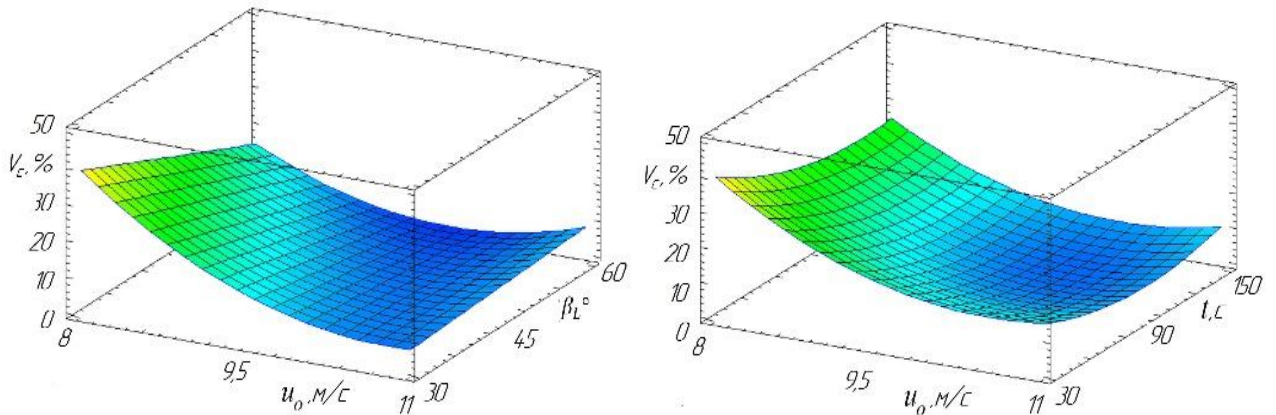


Рисунок 4.12 – Поверхности отклика влияния окружной скорости на краю лопасти  $u_o$  (м/с), угла наклона лопасти  $\beta_L$  (град.) и времени смешивания  $t$  (с) на коэффициент неоднородности смеси  $V_c$  (%)

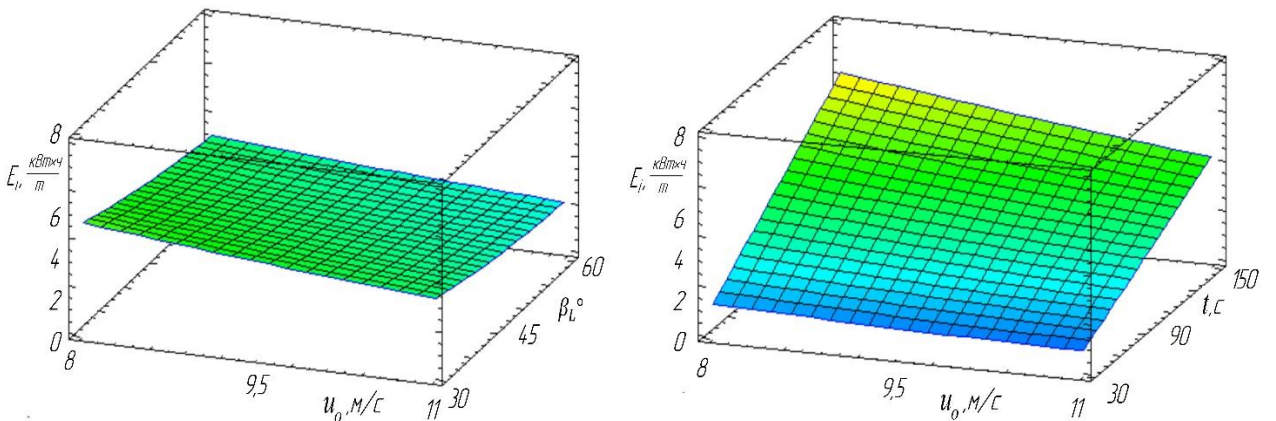


Рисунок 4.13 – Поверхности отклика влияния окружной скорости на краю лопасти  $u_o$  (м/с), угла наклона лопасти  $\beta_L$  (град.) и времени смешивания  $t$  (с) на энергоемкость процесса смешивания  $E_i$  (кВт·ч/т)

Анализ полученных данных показал, что наибольшее влияние на качество смеси оказывает окружная скорость на краю лопасти. При этом увеличение угла установки лопасти положительно влияет на качество смеси. Снижение коэффициента неоднородности смеси наблюдается лишь до определенного времени смешивания, дальнейшее смешивание не приводит к улучшению качества. Наилучшее качество смеси  $V_c = 6,58 \%$  достигается при окружной скорости  $u_o = 9,5$  м/с, времени смешивания  $t = 90$  с и угле наклона лопасти  $\beta_L = 45$  град (Приложение Е).

Энергоемкость смешивания в большей степени зависит от времени смешивания и угла установки лопасти. Наименьшее значение энергоемкости смешивания  $E_i = 0,54$  кВт·ч/т достигается при окружной скорости  $u_o = 9,5$  м/с, времени смешивания  $t = 30$  с и угле наклона лопасти  $\beta_L = 30$  град (Приложение Ж).

Исследования показали, что при увеличении окружной скорости на краю лопасти наблюдается снижение энергоемкости. Это обусловлено снижением структурно-механического сопротивления смешиваемого материала в следствии увеличения порозности слоя.

Для нахождения оптимальных параметров и режимов работы смесителя использовали нелинейное программирование. Решение задачи оптимизации, записывается в виде:

$$\begin{cases} V_c = f(X1; X2; X3) \leq 10\%; \\ E_i = f(X1; X2; X3) \rightarrow \min; \\ -1 \leq X1 \leq 1. \\ -1 \leq X2 \leq 1. \\ -1 \leq X3 \leq 1. \end{cases} \quad (4.3)$$

На основе анализа математических моделей (4.1, 4.2) была решена компромиссная задача по определению значения факторов для достижения коэффициента неоднородности смеси, советующего зоотехническим требованиям ( $V_c \leq 10\%$ ) и минимума энергоемкости смешивания. Процедура решения компромиссной задачи позволяет найти оптимальное значение

целевой формулы. Эта процедура работает с группой параметров, прямо или косвенно связанных с целевой формулой. Чтобы получить по целевой формуле заданный результат, процедура изменяет значения влияющих параметров. Чтобы сузить множество значений, используемых в модели, применяется ограничение на значения изменяемых и конечных параметров, прямо или косвенно связанных друг с другом, задаваемые при постановке задачи. Решение задачи оптимизации параметров и режимов работы смесителя выполнялось на ЭВМ с использованием статистической графической программы Statgraphics 19 (Приложение И). На рисунке 4.14 показаны контуры сечения поверхности отклика при решении компромиссной задачи.

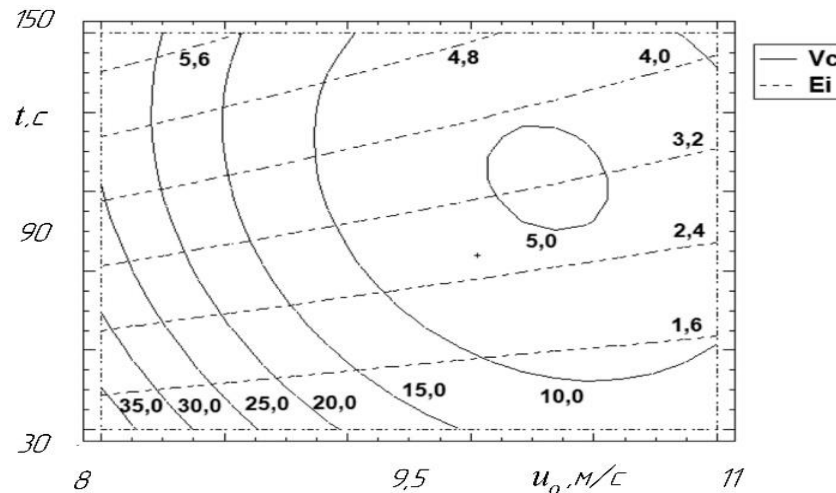


Рисунок 4.14 – Контурные сечения поверхности отклика при решении оптимизационной задачи

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что оптимальные параметры и режимы работы смесителя для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ( $V_c \leq 10\%$ ) и минимума энергоемкости смешивания составляют: окружная скорость на краю лопасти  $u_0 = 9,83$  м/с; время смешивания  $t = 88$  с; угол установки лопасти  $\beta_L = 60$  град., при этом коэффициент неоднородности смеси составил  $V_c = 2,51\%$ , а энергоемкость смешивания  $E_i = 2,31$  кВт·ч/т.

#### 4.6 Выводы по главе

Определены свойства БМВД и их смесей в соответствии с действующими рационами молочных коров. По всем показателям физико-механических свойств, за исключением влажности, смеси БМВД, входящие в рационы коров хозяйств, различаются не более чем на 10%. По отдельным показателям, таким как насыпная плотность, угол обрушения и коэффициент внешнего трения, различия составляют менее 2 %, что позволяет усреднить показатели физико-механических свойств при обосновании параметров смесителя БМВД для КРС. Полученные данные использованы при разработке теоретических предпосылок к обоснованию параметров и режимов работы смесителя БМВД, определении энергетических и мощностных показателей процесса смешивания.

Проведены экспериментальные исследования по определению влияния параметров и режимов работы смесителя на однородность смеси и удельную энергоёмкость смешивания. При этом доля ключевого компонента составляла 1 % (0,27 кг) относительно массы основного компонента (27,0 кг).

Получена математическая модель (4.1) влияния окружной скорости на краю лопасти  $u_o$  (м/с), угла наклона лопасти  $\beta_L$  (град.) и времени смешивания  $t$  (с) на коэффициент неоднородности смеси  $V_c$  (%).

Получена математическая модель (4.2) влияния окружной скорости на краю лопасти  $u_o$  (м/с), угла наклона лопасти  $\beta_L$  (град.) и времени смешивания  $t$  (с) на удельную энергоёмкость процесса смешивания  $E_i$  (кВт·ч/т).

Решена задача оптимизации параметров и режимы работы смесителя для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ( $V_c \leq 10\%$ ) и минимума энергоёмкости смешивания. Оптимальные параметры и режимы работы смесителя составили: окружная скорость на краю лопасти  $u_o = 9,83$  м/с; время смешивания  $t = 88$  с; угол установки лопасти  $\beta_L = 60$  град., при этом коэффициент неоднородности смеси составил  $V_c = 2,51$  %, а удельная энергоёмкость  $E_i = 2,31$  кВт·ч/т.



## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

### 5.1 Исследования смесителя в производственных условиях

Производственные исследования работы смесителя проводились на молочно-товарной ферме АО ПЗ «Петровский», п. Петровское Приозерского района Ленинградской области (рис. 5.1).

Исследования проводились для проверки достоверности теоретических положений и результатов лабораторных исследований по определению качества смешивания при смешивании кормовых добавок по действующим рационам в рамках существующей технологической схемы приготовления полнорационных кормовых смесей для молочных коров.



Рисунок 5.1 – Проведение исследований в производственных условиях

В ходе исследований готовились смеси БМВД в соответствии с действующими рационами и производственной необходимостью. Состав смесей приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Состав смесей

| № п/п | Компоненты смеси | Вес, кг |
|-------|------------------|---------|
| 1     | Левисел          | 6,62    |
| 2     | Элитокс          | 14,62   |
| 3     | Просо            | 0,212   |
|       | ИТОГО            | 21,45   |

Масса основного компонента для всех исследований составляла 21,24 кг и включала в себя 6,62 кг Левисела и 14,62 кг Элитокса. В качестве ключевого компонента применяли просо. Концентрация ключевого компонента для всех смесей составляла 1% от массы основы, или 0,212 кг. При заполнении смесителя значение параметра высоты слоя находилось в пределах  $H_b = 6 \dots 10$  и соответствовало рекомендациям для обеспечения смешивания в псевдооживленном слое.

Исследования проводились при расчетных параметрах и режимах работы, полученных в ходе решения компромиссной задачи для достижения коэффициента неоднородности смеси, советуемого зоотехническим требованиям ( $V_c \leq 10\%$ ) и минимума энергоемкости смешивания. Результаты определения качества смеси в ходе производственных исследований представлены на рисунке 5.2.

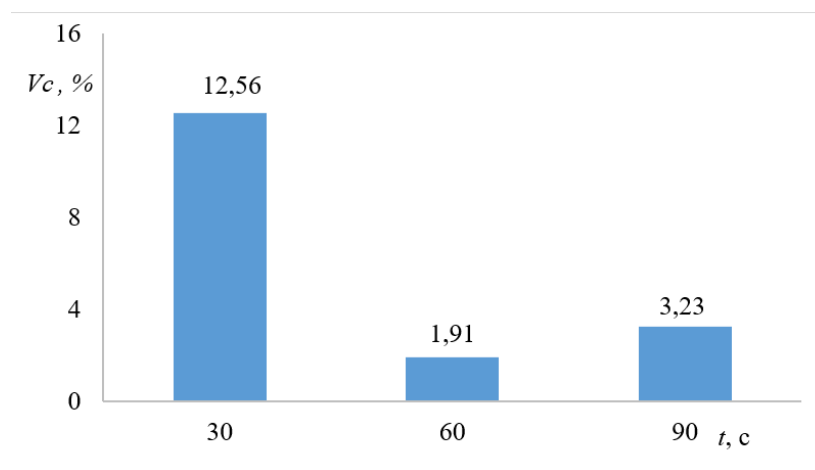


Рисунок 5.2 – Результаты производственных исследований

После загрузки всех компонентов включался привод смесителя, тем самым начинался процесс смешивания. По истечении 30 с процесс смешивания приостанавливали, отбирали пробы и процесс смешивания возобновляли еще на 30 с.

Наилучшее качество смеси было достигнуто по истечении 60 с работы. Коэффициент неоднородности смеси составил 1,91%, что соответствует зоотехническим требованиям и является отличным показателем. Энергоемкость смешивания при этом составила 1,03 кВт·ч/т. Дальнейшее смешивание не привело к улучшению качества, по истечении 90 с смешивания коэффициент неоднородности составил уже 3,23%. Полученные данные подтверждают результаты лабораторных исследований и свидетельствуют об эффективности работы разработанного смесителя в производственных условиях (Приложение К).

## **5.2 Оценка экономической эффективности**

Для оценки экономической эффективности разработанного смесителя проведено сравнение показателей предлагаемого смесителя с прототипом, в качестве которого был выбран смеситель лопастной СЛВ 5,5. Прототип имеет схожие технические характеристики и конструктивное исполнение [142]. Показатели экономической эффективности рассчитаны на основе стандартных и отраслевых методик [143, 144].

Заработная плата рассчитывалась исходя из средних показателей в сельскохозяйственной отрасли Ленинградской области. По данным службы государственной статистики на январь 2022 года средняя заработная плата на сельскохозяйственных предприятиях Ленинградской области составила 45049 рублей [145]. В таблице 5.2 приведены экономические показатели эффективности внедрения разработанного смесителя и результаты сравнительного анализа.

При сравнении прототипа – смесителя лопастного СЛВ 5,5, с разработанным смесителем исходили из существующих производственно-

хозяйственных условий АО ПЗ «Петровский». В хозяйстве содержится около 1200 голов дойного стада. Принята технология с двукратным кормлением, когда суточная норма кормов выдается за две раздачи – утром и вечером. Таким образом, к каждой раздаче необходимо подготовить смеси БМВД общей массой 534 кг в строгом соответствии с рационами отдельных технологических групп.

Таблица 5.2 – Экономические показатели эффективности внедрения

| № п/п | Показатели                                    | Смеситель лопастной СЛВ 5,5 | Предлагаемый |
|-------|-----------------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1     | Балансовая стоимость, руб.                    | 90000                       | 111700       |
| 2     | Масса машины, кг                              | 76                          | 68           |
| 3     | Снижение материалоемкости, %                  | -                           | 10,5         |
| 4     | Время смешивания за цикл, ч                   | 0,067                       | 0,017        |
| 5     | Однородность смеси, %                         | 95                          | 98           |
| 6     | Суточное время смешивания, ч                  | 2,0                         | 0,5          |
| 7     | Установленная мощность электродвигателей, кВт | 5,5                         | 5,5          |
| 8     | Энергозатраты в год, кВт*ч                    | 4015                        | 1004         |
| 9     | Оплата труда, руб.                            | 200015                      | 50004        |
| 10    | Амортизация, руб.                             | 18000                       | 22340        |
| 11    | Ремонт и техническое обслуживание, руб.       | 16200                       | 20106        |
| 12    | Годовые эксплуатационные затраты руб.         | 262601                      | 99546        |
| 13    | Снижение эксплуатационных затрат, %           | -                           | 62,1         |
| 14    | Приведенные затраты, руб.                     | 271601                      | 110716       |
| 15    | Снижение приведенных затрат, %                | -                           | 59,2         |
| 16    | Годовая экономия, руб.                        | -                           | 163055       |
| 17    | Срок окупаемости, год.                        | -                           | 0,7          |

Годовые эксплуатационные затраты составляют 99546 рублей, что на 61,2% меньше чем у СЛВ 5,5. Снижение эксплуатационных затрат главным образом достигается за счет уменьшения времени смешивания. При этом однородность получаемой смеси составляет 98%, что на 3% больше чем у

прототипа. Масса предлагаемого смесителя на 8 кг меньше прототипа, за счет чего достигается снижение материалоемкости более 10%

Приведенные и эксплуатационные затраты при использовании разработанного смесителя на 60% меньше в сравнении с СЛВ 5,5. Экономия денежных средств в годовом выражении при использовании предлагаемого смесителя составит 163055 рублей. Срок окупаемости смесителя составит не более 9 месяцев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Структура полнорационной кормосмеси для молочных коров состоит из 15 – 20 компонентов общей массой 45 – 50 кг/гол., в том числе 5 – 7 компонентов входят в смесь в виде белково-минерально-витаминных добавок, каждый из которых составляет от 10 г/гол. до 300 г/гол., т.е. 0,02 % – 0,6 % от общей массы смеси. При таких малых долях обеспечить равномерность распределения в смеси компонентов затруднительно, поэтому на основе анализа технологий приготовления кормосмесей предложена технологическая схема, предусматривающая выделение предварительного смешивания БМВД в отдельную операцию с дальнейшим внесением в основной процесс смешивания в виде отдельного компонента. При этом предварительная смесь БМВД будет иметь достаточно высокую степень однородности и массу более 1,5% от общей массы кормосмеси. Существующие конструкции смесителей не вполне отвечают требованиям по достижению высокого качества смеси с малой долей ключевого компонента при низкой удельной энергоемкости смешивания для использования их в технологических линиях кормоприготовления, ввиду необоснованности их параметров и режимов работы с учетом физико-механических свойств используемых сегодня кормовых добавок.

2. Определены физико-механические свойства БМВД и их смесей для КРС: гранулометрический состав, насыпная плотность, влажность, угол естественного откоса и коэффициент внутреннего трения, угол обрушения, коэффициент внешнего трения (по стали). По всем показателям физико-механических свойств, за исключением влажности, смеси БМВД различаются не более чем на 10%. По отдельным показателям, таким как насыпная плотность, угол обрушения и коэффициент внешнего трения, различия составляют менее 2 %. Схожесть физико-механических свойств смесей БМВД позволяет усреднить их при обосновании параметров и режимов работы смесителя БМВД.

3. Получена зависимость (2.44), характеризующая величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД, которая показывает, что при угле наклона лопасти  $30^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,89 значение мощности составляет 0,72 кВт. При угле наклона лопасти –  $60^\circ$  и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,48, значение мощности составляет 2,41 кВт. При значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,79 и угле наклона лопасти  $45^\circ$  значение мощности составляет уже 1,37 кВт. Возрастание необходимой мощности при снижении коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы связано с уплотнением слоя. При увеличении угла наклона лопасти от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  наблюдается возрастание необходимой мощности на 45 % – 55 %, в зависимости от коэффициента структурно-механического сопротивления, что связано с увеличением сил сопротивления материала.

4. На основании экспериментальных исследований получены уравнения регрессии для определения влияния исследуемых факторов на коэффициент неоднородности смеси (4.1) и удельную энергоемкость смешивания (4.2). Решение оптимизационной задачи для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ( $V_c \leq 10\%$ ) и минимума энергоемкости смешивания позволило определить оптимальные параметры и режимы работы смесителя, которые составили: окружная скорость на краю лопасти  $u_o = 9,83$  м/с; время смешивания  $t = 88$  с; угол установки лопасти  $\beta_L = 60$  град., при этом коэффициент неоднородности смеси  $V_c = 2,51$  %, а удельная энергоемкость  $E_i = 2,31$  кВт·ч/т.

5. Проведены исследования в производственных условиях. На основании экспериментальных данных можно заключить, что разработанный смеситель обеспечивает качество смешивания от 94 до 98%, что удовлетворяет зоотехническим требованиям.

6. Рассчитаны показатели экономической эффективности предлагаемого смесителя в сравнении со смесителем лопастным СЛВ 5,5. Годовые эксплуатационные затраты составили 99546 рублей, что на 61,2 % меньше чем у СЛВ 5,5. Снижение эксплуатационных затрат главным образом достигается за счет уменьшения времени смешивания. При этом однородность получаемой смеси составила 98%, что на 3% больше чем у прототипа. Экономия денежных средств в годовом выражении при использовании предлагаемого смесителя составила 163055 рублей. Срок окупаемости смесителя составил 9 месяцев.



**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Официальный сайт министерства сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/3e5/3e5941f295a77fdcfed2014f82ecf37f.pdf> (Дата обращения: 01.08.2022).
2. Приказ Минздрава России от 19.08.2016 N 614 (ред. от 25.10.2019) «Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_ë204200/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_ë204200/) (Дата обращения 06.07.2022).
3. Потребление основных продуктов питания (в расчете на душу населения): Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/indicator/31346> (Дата обращения 25.07.2022).
4. Развитие молочной индустрия России в 2021 году два года в условиях пандемии: Национальный союз производителей молока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://souzmoloko.ru/materiali/razvitiemolochnoy-industrii.pdf> (Дата обращения 19.07.2022).
5. Средние цены производителей сельскохозяйственной продукции по Российской Федерации в 2010-2021 гг.: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/price> (Дата обращения 25.07.2022).
6. Морозов Н.М. и др. Создание прочной кормовой базы и технических средств нового поколения – залог успешного развития животноводства. Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 4(24). С. 4-9.
7. Волгин В.И. Полноценное кормление молочного скота - основа реализации генетического потенциала продуктивности.

- Монография/В.И. Волгин, Л.В. Романенко, П.Н. Прохоренко, З.Л. Федорова, Е.А. Корочкина. – М.: РАН, 2018. -260 с.
8. Морозов Н.М. Организационно-экономические и технологические основы М 80 механизации и автоматизации животноводства: науч. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. - 284 с.
  9. Тузов И.Н., Григорьева М.Г. Современные проблемы в скотоводстве. Краснодар: КубГАУ. 2016. 117 с.
  10. Прогнозно-аналитическое сопровождение инновационного развитие в сфере сельского хозяйства: сб. / Под. общ. ред. В.Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 504 с.
  11. Ведищев, С.М. Анализ малогабаритных комбикормовых агрегатов / С.М. Ведищев, А.А. Кажияхметова, Н.В. Хольшев // Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья [Электронный ресурс]: материалы I Всерос. конф. с междунар. участием / Под общ. ред. Ю.В. Родионова; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – С. 135-151.
  12. Махатов Б.М., Абдурасулова А.Е. Влияние кормовых добавок нового поколения на молочную продуктивность коров. Молодой ученый. 2019. № 21 (259). С. 153-160.
  13. Юдин В.А. Использование минерально–витаминного премикса на основе бентонита при раздое коров. Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2013. № 4. С. 26–37.
  14. Humer E, Petri R M, Aschenbach J R, Bradford B J, Penner G B, Tafaj M, Südekum K H, and Zebeli Q 2018 Invited review: Practical feeding management recommendations to mitigate the risk of subacute ruminal acidosis in dairy cattle. Journal of Dairy Science, 101 872888
  15. Westphalen M F, Carvalho Pedro H V, Joonpyo Oh, Hristov A N, Staniar W B and Felix T L 2021 Effects of feeding rumen-protected Capsicum oleoresin on

- growth performance, health status, and total tract digestibility of growing beef cattle. *Animal Feed Science and Technology* 271 114778
16. Stefańska B, Sroka J, Katzer F, Goliński P and Nowak W 2020 The effect of probiotics, phytobiotics and their combination as feed additives in the diet of dairy calves on performance, rumen fermentation and blood metabolites during the preweaning period. *Animal Feed Science and Technology* 114738
17. Yang W Z, Beauchemin K A and Rode L M 1999 Effects of an Enzyme Feed Additive on Extent of Digestion and Milk Production of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 82 391403
18. Авакимянц Е.В., Гордеев В.В. Анализ технологических линий приготовления кормосмесей и возможность их совершенствования // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2020. № 2(103). С. 98-108. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-1024
19. Erickson P.S., Kalscheur K.F. Nutrition and feeding of dairy cattle. // *Animal Agriculture*. 2020. P. 157-180. DOI: 10.1016/B978-0-12-817052-6.00009-4
20. Карелина О.А., Уливанова Г.В., Федосова О.А., Кулаков В.В. Анализ годовой динамики полноценности минерального состава рационов дойных коров на крупном животноводческом комплексе. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2022. № 3 (70). С. 104-108.
21. Elcoso G., Zweifel B., Bach A. Effects of a blend of essential oils on milk yield and feed efficiency of lactating dairy cows // *Applied Animal Science*, 2019. Vol. 35, P. 304-311
22. Zimbelman R.B., Collier R.J., Bilby T.R. Effects of utilizing rumen protected niacin on core body temperature as well as milk production and composition in lactating dairy cows during heat stress // *Animal Feed Science and Technology*, 2013. Vol. 180. P.26-33

23. Roque B.M., Salwen J.K., Kinley R., Kebreab E. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows diet reduces enteric methane emission by over 50 percent // *Journal of Cleaner Production*, 2019. Vol. 234, P. 132-138.
24. Фомичев Ю.П., Ермаков И.Ю. Применение в рационах молочных коров мицеллата-Са в сочетании с энергокормом и их влияние на молочную продуктивность, антиоксидантный и гормональный статус организма // *Техника и технологии в животноводстве*. 2020. №4(40). С. 81-87.
25. Rehman, A., Arif, M., Saeed, M., Manan, A., Al-Sagheer, A., Abd El-Hack, M. E., . . . Alowaimer, A. N. (2020). Nutrient digestibility, nitrogen excretion, and milk production of mid-lactation jersey × friesian cows fed diets containing different proportions of rumen-undegradable protein. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 92, 1-13. doi:10.1590/0001-3765202020180787
26. Micek, P., Kowalski, Z. M., Sady, M., Oprzañdek, J., Domagała, J., & Wanat, P. (2019). An energy-protein feed additive containing different sources of fat improves feed intake and milk performance of dairy cows in mid-lactation. *Journal of Dairy Research*, 86(1), 55-62. doi:10.1017/S0022029919000062
27. Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Gersz, A., Korczyński, M. (2021). Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*, 291 doi:10.1016/j.jenvman.2021.112693doi:10.1016/j.powtec.2021.05.027.
28. Al-Azzawi, M., Bowtell, L., Hancock, K., & Preston, S. (2021). Addition of activated carbon into a cattle diet to mitigate GHG emissions and improve production. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15) doi:10.3390/su13158254
29. Мороз М.Т. Кормление крупного рогатого скота / М.Т. Мороз // АМА НЗ РФ. СПб, 2010. - 248 с.
30. Казаровец, Н. В. Племенная работа, кормление и содержание высокопродуктивных молочных коров / Н.В. Казаровец, Н.С. Яковчик, П.П. Ракецкий; под общ. ред. П.П. Ракецкого. – Минск : БГАТУ, 2016. – 564 с.

31. Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах / Р.В. Некрасов, А.В. Головин, Е.А. Махаев [и др.]; ФНЦ – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста; Под ред. Р.В. Некрасова, А.В. Головина, Е.А. Махаева. – Москва: Российская академия наук, 2018. – 290 с. – ISBN 978-5-906906-77-9
32. Александрова Л.А. Проблемы производственного импортозамещения в АПК России / Л.А. Александрова // Аграрная наука и образование: проблемы и перспективы: Сборник статей национальной научно-практической конференции, Саратов, 20–21 марта 2021 года / Под редакцией Е.Б. Дудниковой. – Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2021. – С. 6-15.
33. Kuhn North America [Электронный ресурс] URL: <https://www.kuhn-usa.com> (Дата обращения 8.10.2019).
34. Valmetal [Электронный ресурс] URL: <https://valmetal.com> (Дата обращения 8.10.2019).
35. Belair [Электронный ресурс] URL: <https://www.belair-sarl.com> (Дата обращения 8.10.2019).
36. Jaylor [Электронный ресурс] URL: <http://www.jaylor.com> (Дата обращения 7.10.2019).
37. Trioliet [Электронный ресурс] URL: <https://www.trioliet.com> (Дата обращения 8.10.2019).
38. DeLaval VM [Электронный ресурс] URL: <https://www.delaval.com> (Дата обращения 8.10.2019).
39. EuroMilk [Электронный ресурс] URL: <http://www.euromilk.pl> (Дата обращения 8.10.2019).
40. АО «Слободской машиностроительный завод» [Электронный ресурс] URL: <http://www.smsz.ru> (Дата обращения 8.10.2019).
41. RMH Lachish Industries [Электронный ресурс] URL: <http://www.rmhmixer.com> (Дата обращения 8.10.2019).

42. Pellon [Электронный ресурс] URL: <https://www.pellon.fi> (Дата обращения 8.10.2019).
43. Сергеев А. Г. Результаты исследований качественных и количественных характеристик гранулированного комбикорма / А. Г. Сергеев, В. Н. Нечаев, А. Е. Шамин // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 1. – С. 13-21. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-70-1-13-21
44. Сергеев А. Г. Оценка рабочего процесса комбикормового оборудования ООО "Доза-Агро" по показателям качества кормов / А. Г. Сергеев, С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев, А. Е. Шамин // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2020. – № 2. – С. 54-64. – DOI 10.33920/sel-05-2002-06
45. Сергеев А. Г. Оценка характеристик системы дозирования компонентов комбикорма в условиях хозяйства / А. Г. Сергеев, С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 8. – С. 93-99. – DOI 10.28983/asj.y2020i8pp93-99
46. Коновалов В. В. Обоснование угла установки емкости и длительности перемешивания сухих смесей барабанным смесителем / В. В. Коновалов, Н. В. Дмитриев, С. А. Кшникаткин, А. В. Чупшев // Нива Поволжья. – 2013 – №1 (26). – С. 46-50.
47. Патент № 2488434 РФ. Смеситель. / П. А. Савиных, Н. В. Турубанов, В. Романюк, А. С. Киселев, Н. А. Чернятьев. Опубл. 27.07.2013.
48. Определение оптимальных параметров горизонтального смесителя с ленточным шнеком / П. А. Савиных, Н. В. Турубанов, А. Ю. Исупов, Д. А. Зырянов // Техника и технологии в животноводстве. – 2021. – № 3(43). – С. 66-70.
49. Техничко-экономическая и энергетическая оценка горизонтального ленточного смесителя сыпучих кормов / П. А. Савиных, Н. В. Турубанов, Н. А. Чернятьев [и др.] // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 1(16). – С. 99-107.

50. Ведищев, С.М. Смеситель сухих рассыпных кормосмесей / С.М. Ведищев, А.В. Прохоров, Н.В. Хольшев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 4(42). – С. 326-328.
51. Хольшев Н.В. Разработка технологического процесса и устройства для смешивания сухих рассыпных кормосмесей / Н.В. Хольшев, С.М. Ведищев, Н.О. Миллюков, М.А. Гарина, В.В. Сорокин // Вестник ВНИИМЖ. - 2015. - № 4 (20). - 235 с.
52. Хольшев Н.В. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных кормосмесей шнеколопастным смесителем: дис. ... канд. техн. наук; 05.20.01/Хольшев Николааий Васильевич. - Тамбов, 2015. - 209 с.
53. Патент № 2454273 РФ. Комбикормовый агрегат / Счастлилова Н.В., Полункин А.А., Ульянов В.М., Утолин В.В., Коньков М.А. Опубл. 27.06.2012
54. Утолин, В.В. Повышение эффективности приготовления кукурузных кормов / В.В. Утолин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 150-158. – DOI 10.36508/RSATU.2022.48.55.017.
55. Утолин, В.В. Оптимизация параметров смесителя для приготовления кормов из побочных продуктов крахмалопаточного производства / В.В. Утолин, В.А. Хрипин, Н.Е. Лузгин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2017. – № 3(35). – С. 114-118.
56. Петренко С.С. Определение конструктивных параметров шнекового смесителя сыпучих материалов / С.С. Петренко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1(24). – С. 56.
57. Патент РФ на полезную модель № 119641 Шнековый смеситель сыпучих материалов/К.А. Адигамов, С.С. Петренко, Г.В. Черненко, С.Н. Байбара Заявка № 2012118797/11 Заявл. 04.05.2012; Опубл. 27.08.2012 бюл. №24.

58. Патент № 2463101 РФ. Смеситель сыпучих материалов периодического действия / Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Ведищев С.М., Тишанинов К.Н., Амелянц А.Г. Оpubл. 10.10.2012.
59. Патент №156670 РФ. Шнековый смеситель сыпучих материалов / Адигамов К.А., Черкасов Р.И., Байбара С.Н. Оpubл. 11.2015.
60. Турубанов, Н.В. Исследование процесса смешивания в вертикальном смесителе / Н.В. Турубанов, О.Ю. Медведев, А.Ю. Исупов // *Advanced Science*. – 2017. – № 3(7). – С. 351-359.
61. Патент № 166266 РФ. Смеситель-обоганитель концентрированных кормов / Каширин Д.Е., Полякова А.А. Оpubл. 20.11.2016.
62. Полякова, А.А. Обоснование параметров смесителя концентрированных кормов: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.20.01 / Полякова Анастасия Анатольевна; Рязан. гос. агро-ий ун-т. - Рязань, 2018. - 200 с.
63. Патент № 2743257 РФ. Смеситель кормов / Ульянов В.М., Утолин В.В., Липин В.Д., Паршина М.В., Батирова В.А., Паршина Л.А. Оpubл. 16.02.2021
64. Утолин В.В. Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров спирального смесителя / Утолин В.В., Гришков Е.Е., Лавров А.М. // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. – 2015. – № 1(25). – С. 70-76.
65. Ульянов В.М. Исследование спирального смесителя кормов / В.М. Ульянов, В.В. Утолин, М.В. Паршина [и др.] // *Вестник аграрной науки Дона*. – 2019. – № 4(48). – С. 26-35.
66. Ульянов В.М. Малогабаритный агрегат для приготовления концентрированных кормов / В. М. Ульянов, В. В. Утолин, М. В. Паршина [и др.] // *Уголовно-исполнительная система на современном этапе и перспективы ее развития: сборник тезисов выступлений и докладов участников Международной научно-практической конференции, Рязань,*



- 18–19 ноября 2020 года. Том 6. – Рязань: Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний, 2020. – С. 63-67.
67. Патент № 2687202 РФ. Смеситель кормов / Ульянов В.М., Утолин В.В., Липин В.Д., Паршина М.В., Паршина В.А. Оpubл. 07.05.2019.
68. Ульянов В.М. Производительность двухспирального смесителя концентрированных кормов / Ульянов В.М., Паршина М.В., Батирова В.А. // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 3 (55). С. 46-55.
69. Патент № 2729156 РФ. Смеситель кормов / В. М. Ульянов, И. Б. Тришкин, В. Д. Липин [и др.] / опубл. 04.08.2020.
70. Патент № 2752931 РФ. Смеситель кормов / В. Д. Липин, И. Б. Тришкин Т. В. Подлеснова [и др.] / опубл. 11.08.2021.
71. Патент на полезную модель № 199655 РФ. Смеситель кормов / В.Д. Липин, М.В. Паршина, В.А. Батирова, Л.А. Паршина / опубл. 11.09.2020.
72. Патент на полезную модель № 202399 РФ. Смеситель кормов / В.Д. Липин, Т.В. Подлеснова, М.В. Паршина, В.А. Батирова / опубл. 16.02.2021.
73. Патент № 2332253 РФ. Смеситель микродобавок / Чупшев А.В., Коновалов В. В., Гусев С.В., Терюшков В.П. Оpubл. 08.2008.
74. Патент № 165692 РФ. Смеситель микродобавок / Фомина М.В., Терюшков В.П., Коновалов В.В., Чупшев А.В., Оpubл. 10.2016.
75. Чупшев А.В. Повышение качества смешивания сухих микродобавок с обоснованием конструктивных и технологических параметров смесителя: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чупшев Алексей Владимирович. – Пенза, 2009. – 18 с.
76. Патент № 2616641 РФ. Устройство для смешивания сухих кормов и сухих добавок / Коновалов В.В., Терюшков В.П., Коновалов В.В., Чупшев А.В., Оpubл. 18.04.2017.

- 77.ПК Бизнес Спектр [Электронный ресурс] URL: <https://b-spektr.ru> (Дата обращения 20.12.2022)
- 78.Агромаш-НН [Электронный ресурс] URL: <http://agronnov.ru> (Дата обращения 02.12.2022)
- 79.Вибротехник [Электронный ресурс] URL: <http://vt-spb.ru> (Дата обращения 16.12.2022)
- 80.Щеколдина Т.В. Технология смешивания композиций безглютеновых мучных смесей на основе квиноа / Т. В. Щеколдина // Ползуновский вестник. – 2019. – № 3. – С. 19-24. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.004.
- 81.Макаров, Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю.И. Макаров – М.: Машиностроение, 1973. – с. 216.
- 82.Шубин И.Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: Учебное пособие/Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 76 с.
- 83.Оболенский Н.В. Разработка смесителя-ферментатора для получения корма с высоким содержанием белка в фермерских хозяйствах / Н.В. Оболенский, С.Ю. Булатов, А.И. Свистунов // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 2(57). – С. 62-75.
- 84.Фомина М.В. Влияние длительности смешивания и доли меньшего компонента на показатели работы мешалки лопастного смесителя с дополнительными лопатками / М.В. Фомина, В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 40-45. – DOI 10.12737/17452
- 85.Ведищев, С.М. Исследование влияния конструктивно- режимных параметров шнеколопастного смесителя на его качественные показатели / С.М. Ведищев, Н.В. Хольшев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 3(34). – С. 32-34.

86. Оценка равномерности распределения премиксов в полнорационных кормах при их подготовке в смесителях / С.Ю. Булатов, Е.В. Воронов, А.Е. Шамин, А.Г. Сергеев // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 3(27). – С. 4-12.
87. Кажияхметова А.А. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных комбикормов шнековым смесителем с активным каналом обратного хода: дис. ... канд. техн. наук; 05.20.01/Кажияхметова Айнур Ароновна. - Тамбов, 2020. - 199 с.
88. Брагинец, С.В. Совершенствование технологий и технических средств внутрихозяйственного производства полнорационных комбикормов: специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / С.В. Брагинец. – Ростов-на-Дону, 2022. – 382 с.
89. ГОСТ 13496.1-98 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания натрия и хлорида натрия [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024317>
90. Ферромагнитные микротрейсеры как индикаторы качества однородности комбикормов для живодноводства и птицеводства / Н.Н. Барашков, П.В. Писаренко, В.Ю. Крикунова [и др.] // Зерновые продукты и комбикорма. – 2016. – Т. 3. – № 63. – С. 34-40.
91. ГОСТ 32343-2013 КОРМА, КОМБИКОРМА. Определение содержания кальция, меди, железа, магния, марганца, калия, натрия и цинка методом атомно-абсорбционной спектроскопии [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110077>
92. Белов, А.Г. Производство кормов с использованием наночастиц и заменителей зерна / А.Г. Белов, С.В. Антимонов, С.П. Василевская // Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Оренбург, 21 июня 2022 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 134-136.

93. Жданова, Н.В. Применение ферромагнитных микротрейсеров как индикаторов определения качества однородности лечебных кормов, комбикормов и премиксов / Н.В. Жданова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 2(30). – С. 123-127.
94. Сыроватка, В.И. Физические основы производства гомогенных смесей лечебных, витаминных и минеральных премиксов / В.И. Сыроватка, Н.В. Жданова, А.Д. Обухов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 4(36). – С. 12-19
95. Assessment of reliability of mixing process in diverse mixers / P. Krzaczek, P. Sobczak, K. Zawisłak [et al.] // Tehnicki Vjesnik. – 2020. – Vol. 27. – No 4. – P. 1181-1185.
96. The use of UV-induced fluorescence for the assessment of homogeneity of granular mixtures / D. B. Matuszek // Open Chemistry – 2019. – Vol. 17. – No 1 P. 485-491.
97. Ultraviolet Fluorescence in the Assessment of Quality in the Mixing of Granular Material / D.B. Matuszek // Sustainability – 2020. – 12(4):1546.
98. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В.В. Воронин, К.А. Адигамов, С.С. Петренко, Р.А. Сизякин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4-2(23). – С. 36
99. Оценка качества смешивания сыпучих материалов с различным размером фракций / Р.И. Черкасов, К.А. Адигамов, В.В. Воронин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 169
100. Коновалов В.В. Снижение энергозатрат на смешивание концентрированных кормов разработкой и применением смесительного агрегата с комбинированными рабочими органами: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.20.01 / Коновалов Виктор Владимирович. – Пенза, 2018. – 167 с.

101. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов / И.Я. Федоренко. – М.: Форум, 2007. – 176 с.
102. Хлыстунов В.Ф. Влияние конструктивных и кинематических параметров на энергоёмкость процесса в наклонном шнековом смесителе / В.Ф. Хлыстунов [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 408-413.
103. Гарабажиу А.А. Разработка новой энергосберегающей конструкции роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов / Гарабажиу А.А. // Вестник Полоцкого гос. ун-та. серия В – 2010. С. 60-71.
104. Чупшев А.В. Влияние диаметра и количества лопастей мешалки смесителя на неравномерность и энергоёмкость процесса/А.В. Чупшев, В.В. Коновалов, В.П. Терюшков//Вестник ФГО ВПО МГАУ 2008. №2. С. 132-133.
105. Чупшев, А.В. Экспериментальные исследования смесителя кормов/А.В. Чупшев, В.В. Коновалов, С.В. Гусев//Нива Поволжья. 2008. №2(7). С. 69-75.
106. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета; Введ. с 01.01.1986. Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. 257 с.
107. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей / В.В. Коновалов, А.В. Чупшев, В.П. Терюшков, Г.В. Шабурова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 1(17). С. 135.
108. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей / А.В. Чупшев, В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, Г.В. Шабурова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 3(89). – С. 88-91.
109. Обоснование оптимальных конструктивно-режимных параметров смесителя непрерывного действия / В.В. Коновалов, А.С. Калиганов,

- В.П. Терюшков, А.В. Чупшев//Нива Поволжья. – 2011. – № 3(20). – С. 63-67.
110. Макаров, Ю.И. Отечественное и зарубежное оборудование для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров, Б.М. Ломакин, В.В. Харакоз – М., 1963. – 86 с.
111. Горшков П.С. Роторный спирально – лопастной смеситель периодического действия: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / П.С. Горшков – Белгород, 2013. – 169 с.
112. Богданов В.С. Анализ смесительного оборудования для сухих строительных смесей / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, Ю.В. Бражник, П.С. Горшков // Межвузовский сборник статей: «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов». Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Вып. XI. – С.70-73.
113. Бражник, Ю.В. Лопастной смеситель для сухих строительных смесей с высокоскоростным режимом работы / Ю.В. Бражник, Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – 131 с.
114. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк; пер. с польск. под ред. Щупляка И.А. – М.: «Химия», 1975. – 384 с.
115. Черняев, Н.П. Производство комбикормов. Н.П. Черняев - М.: Агропромиздат, 1989. 224 с.
116. Avakimyants E.V. Gordeev. V.V. Study of physical and mechanical properties of feed additives for cattle / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – P. 032085.
117. Гельфман М.И. Коллоидная химия / Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. – СПб.: Лань, 2010. - 336 с.
118. Avakimyants, E.V. Physical and mechanical properties of mixtures of feed additives for cattle / E.V. Avakimyants, V.V. Gordeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 20–24 октября 2021

- года. – Virtual, Online, 2022. – P. 012082. – DOI 10.1088/1755-1315/979/1/012082
119. Першин В.Ф. Конструирование смесителей сыпучих материалов, обеспечивающих стабильный уровень качества смеси / В.Ф. Першин, М.М. Свиридов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999. – №8. – С.13-15.
120. Демин, О.В. Анализ работы различных видов смесителей сыпучих материалов периодического действия / О.В. Демин // Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 8. – С. 109–114.
121. Авакимянц Е.В., Гордеев В.В. Физико-механические свойства кормовых добавок для КРС / АгроЭкоИнженерия. 2020. № 1. С. 100-108.
122. Теоретическое исследование влияния параметров смешивания на время смешивания и качество смеси разнородных дисперсных материалов / В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, И.А. Балагуров [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 5. – С. 56-61.
123. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.
124. Лейбович, М.В. Теория удара в задачах и примерах: учеб. пособие / М.В. Лейбович; [науч. ред. Е.Л. Маркова]. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. - 236 с.
125. Белов, В.В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие / В.В. Белов, И.В. Образцов, В.К. Иванов, Е.Н. Коноплев. Тверь: ТвГТУ, 2015. 102 с.
126. Яськов Г.Н. Упаковка большого числа конгруэнтных шаров в цилиндре // Докл. НАН Украины. – 2009. – №12. – С. 45–48.
127. Григорьев А.Ю., Григорьев К.А., Малявко Д.П. Соударение тел: Учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 43 с.

128. ГОСТ 9931-85 Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры
129. Горшков П.С. Роторный спирально – лопастной смеситель периодического действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / П.С. Горшков – Белгород, 2013. – 169 с.
130. Койнова А.Н. Накормим всех вовремя: как не ошибиться при выборе смесителя-кормораздатчика // Эффективное животноводство 2019. № 6 (154). С. 11-14.
131. Семенихин А.М. Обоснование методики выбора измельчителей-смесителей-раздатчиков / Семенихин А.М., Шварц С.А., Дзряян В.С. // Вестник аграрной науки Дона. 2017. 1 (37). С. 68-75.
132. Гордеев В.В. Анализ планировочных решений коровников для нового строительства / В.В. Гордеев, В.Е. Хазанов, А.В. Яковлева // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2015. – № 87. – С. 186-195.
133. Геотехнические свойства гранулометрического состава грунтов: учебно-методическое пособие / П.А. Фонарёв [и др.]; под ред. П.А. Фонарёва. – М.: МАДИ, 2017. – 56 с.
134. Определение физических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород / Т.Г. Бжицких, С.Ф. Санду, Н.Э. Пулькина – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008 – 90 с.
135. Обоснование угла установки емкости и длительности перемешивания сухих смесей барабанным смесителем/В.В. Коновалов, Н.В. Димитриев, С.А. Кшникаткин, А.В. Чупшев//Нива Поволжья – 2013. – № 1. – С. 46-50.
136. Yan, Z., Wilkinson, S. K., Stitt, E. H., & Marigo, M. (2016). Investigating mixing and segregation using discrete element modelling (DEM) in the freeman FT4 rheometer. *International Journal of Pharmaceutics*, 513 (1-2), 38-48. doi:10.1016/j.ijpharm.2016.08.065`



137. Tanabe S, Gopireddy S R, Minami H, Ando S, Urbanetz N A and Scherließ R (2019) Influence of particle size and blender size on blending performance of bi-component granular mixing: A DEM and experimental study. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 134 205218
138. Perez, S., Aharonov, E., & Toussaint, R. (2016). Unsteady granular flows down an inclined plane. *Physical Review E*, 93(4) doi:10.1103/PhysRevE.93.042902
139. Sulpizio, R., Castioni, D., Rodriguez-Sedano, L.A., Sarocchi, D. & Lucchi, F. (2016). The influence of slope-angle ratio on the dynamics of granular flows: Insights from laboratory experiments. *Bulletin of Volcanology*, 78(11) doi:10.1007/s00445-016-1069-5
140. ГОСТ 9931-79 Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры.
141. Коновалов В.В. Расчет оборудования и технологических линий приготовления кормов (примеры расчетов на ЭВМ).: учебное пособие – Пенза: РИО ПГСХА, 2002. - 206 с.
142. Аграрные Технологии и Машины [Электронный ресурс] URL: [https://agrotm.su/market/smesiteli\\_lopastnye\\_vertikal\\_nye/smesitel\\_dlya\\_pre\\_miksov\\_i\\_bmvd\\_slv-5\\_5/](https://agrotm.su/market/smesiteli_lopastnye_vertikal_nye/smesitel_dlya_pre_miksov_i_bmvd_slv-5_5/) (дата обращения 13.06.2022)
143. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А.В. Шпилько, В.И. Драгайцев, Н.М. Морозов [и др.]. – Москва: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2001. – 346 с.
144. ГОСТ 34393-2018 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161745>
145. Социально-экономическое положение Ленинградской области в январе–феврале 2022 года URL: [https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/D0222\\_01.pdf](https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/D0222_01.pdf)
146. Нис Я.З. Физико-механические свойства сырья и готовых продуктов: Лабораторный практикум: учебно-методическое пособие / Южно-

- Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. - 60 с.
147. Бражник Ю.В. Совершенствование конструкции и процесса смешивания в лопастном смесителе с высокоскоростным режимом работы: Диссертация канд. техн. наук. -Белгород, 2017. -153 с.
148. Бойцов Ю.А. Исследование внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов: Метод. указания к лабораторной работе для студентов спец. 170600. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 10 с.
149. ГОСТ Р 51568-99 Сита лабораторные из металлической проволочной сетки.
150. ГОСТ 28254-2014 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения объемной массы и угла естественного откоса.
151. Vox G.E. P. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables / G.E. P Vox., D.W Behnken. – Technometrics, 1960. – С. 455 - 475.
152. Мельников С.В. Планирование экспериментов в исследованиях сельскохозяйственных процессов / Мельников С.В., Алёшин В.Р., Роцин П.М. – Л.: Колос. Ленинградское отделение, 1980. 168 с
153. Авакимянц, Е. В. Обоснование выбора модельного материала для экспериментальных исследований по смешиванию БМВД / Е.В. Авакимянц, В. В. Гордеев // Техника и технологии в животноводстве. – 2022. – № 3(47). – С. 59-62. – DOI 10.51794/27132064-2022-3-59
154. Авакимянц Е.В. Определение технологического объема смесителя белково-минерально-витаминных добавок / Е.В. Авакимянц // Техника и технологии в животноводстве. – 2021. – № 3(43). – С. 62-65. – DOI 10.51794/27132064-2021-3-62.
155. Борщев В.Я. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 208 с.

156. Коновалов В.В. Практикум по обработке результатов научных исследований с помощью ПЭВМ: Учебное пособие. – Пенза: ПГСХА, 2003. – 176 с.
157. Валге А.М. Обработка данных в EXCEL на примерах (Методическое пособие). – СПб.: ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2010. – 104 с.
158. Валге А.М. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на Statgraphics и Excel / А.М. Валге, Н.И. Джабборов, В.А. Эвиев; Ин-т агроинженерных и экологических проблем с.-х. пр-ва, Калмыцкий гос. ун-т. – Санкт-Петербург: 2015. – 137 с.
159. Сторожук, Т.А. Оптимизация процесса смешивания кормов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2019. – № 148. – С. 31-39. – DOI 10.21515/1990-4665-148-003

ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Сертификаты участника конференций



Федеральный  
научный  
агроинженерный  
центр ВИМ

Federal  
scientific  
agroengineering  
center VIM



Институт  
механизации  
животноводства —  
филиал  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Institute  
of livestock  
mechanization —  
the filial of VIM

# Сертификат

выдан

**Авакимянцу  
Евгению Вячеславовичу**

и подтверждает участие  
в XXIII Международной  
научно-практической конференции  
(online-формат)

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНИКА  
И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЖИВОТНОВОДСТВЕ**

Директор ИМЖ,  
академик РАН



Ю. А. Иванов

Москва, 20–21 октября 2020 г.



*Российская Академия Наук*







## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Свидетельство к золотой медали 30-ой Международной агропромышленной выставки «Агрорусь-2021»





## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Диплом правительства Санкт-Петербурга ПСП №21201  
победителя конкурса грантов для студентов, аспирантов вузов  
и академических институтов, расположенных на территории  
Санкт-Петербурга





ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Диплом победителя программы УМНИК



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Результаты определения физико-механических свойств БМВД.

Таблица Д.1 – Результаты определения насыпной плотности БМВД

| № п/п | Материал           | Масса пустого стакана, кг | № опыта | Масса стакана с материалом, кг | Объем стакана, м <sup>3</sup> | Средняя масса материала, кг | Насыпная плотность кг/м <sup>3</sup> |
|-------|--------------------|---------------------------|---------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1     | Фунгистат          | 0,127                     | 1       | 0,1924                         | 0,0001                        | 0,0659                      | 658,67                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,1929                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,1933                         |                               |                             |                                      |
| 2     | Полисахариды сухие | 0,127                     | 1       | 0,2095                         | 0,0001                        | 0,0832                      | 831,67                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,2104                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,2106                         |                               |                             |                                      |
| 3     | Премикс П-60       | 0,127                     | 1       | 0,2453                         | 0,0001                        | 0,1176                      | 1175,67                              |
|       |                    |                           | 2       | 0,244                          |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,2444                         |                               |                             |                                      |
| 4     | Мел                | 0,127                     | 1       | 0,1898                         | 0,0001                        | 0,0636                      | 635,67                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,1905                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,1914                         |                               |                             |                                      |
| 5     | Элитокс            | 0,127                     | 1       | 0,2012                         | 0,0001                        | 0,0740                      | 739,67                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,2014                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,2003                         |                               |                             |                                      |
| 6     | Левисел            | 0,127                     | 1       | 0,1788                         | 0,0001                        | 0,0515                      | 515,00                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,1788                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,1779                         |                               |                             |                                      |
| 7     | Защищенный жир     | 0,127                     | 1       | 0,1812                         | 0,0001                        | 0,0539                      | 539,33                               |
|       |                    |                           | 2       | 0,1811                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,1805                         |                               |                             |                                      |
| 8     | Соль               | 0,127                     | 1       | 0,2375                         | 0,0001                        | 0,1112                      | 1112,00                              |
|       |                    |                           | 2       | 0,2386                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,2385                         |                               |                             |                                      |
| 9     | Сода               | 0,127                     | 1       | 0,2394                         | 0,0001                        | 0,1133                      | 1132,50                              |
|       |                    |                           | 2       | 0,2411                         |                               |                             |                                      |
|       |                    |                           | 3       | 0,215,6                        |                               |                             |                                      |

Таблица Д.2 – Результаты определения влажности БМВД

| № п/п | Материал           | № опыта | m <sub>1</sub> , г | m <sub>2</sub> , г | W, %  | W <sub>ср</sub> , % |
|-------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|-------|---------------------|
| 1     | Фунгистат          | 1       | 1,008              | 0,96               | 5,53  | 5,19                |
|       |                    | 2       | 1                  | 0,953              | 4,85  |                     |
| 2     | Полисахариды сухие | 1       | 1,056              | 0,969              | 8,29  | 8,46                |
|       |                    | 2       | 1,072              | 0,98               | 8,62  |                     |
| 3     | Премикс П-60       | 1       | 0,964              | 0,937              | 2,83  | 2,89                |
|       |                    | 2       | 1,012              | 0,983              | 2,95  |                     |
| 4     | Мел                | 1       | 1,048              | 1,042              | 0,66  | 0,68                |
|       |                    | 2       | 1,002              | 0,996              | 0,69  |                     |
| 5     | Элитокс            | 1       | 1,03               | 0,939              | 9,01  | 9,12                |
|       |                    | 2       | 1,075              | 0,976              | 9,22  |                     |
| 6     | Левисел            | 1       | 1,058              | 1,036              | 2,06  | 1,84                |
|       |                    | 2       | 1,011              | 0,995              | 1,61  |                     |
| 7     | Защищенный жир     | 1       | 1,022              | 1,012              | 1,05  | 0,96                |
|       |                    | 2       | 1,084              | 1,076              | 0,87  |                     |
| 8     | Соль               | 1       | 1,108              | 1,096              | 1,03  | 1,18                |
|       |                    | 2       | 1,135              | 1,121              | 1,33  |                     |
| 9     | Сода               | 1       | 1,088              | 0,803              | 26,86 | 25,96               |
|       |                    | 2       | 1,186              | 0,89               | 25,05 |                     |

Таблица Д.3 – Результаты определения угла естественного откоса  $\alpha$  и коэффициента внутреннего трения  $f$  БМВД

| № п/п | Материал           | № опыта | Значение $\alpha$ , град. | Среднее значение $\alpha$ , град. | Коэф внутреннего трения $f$ |
|-------|--------------------|---------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1     | Фунгистат          | 1       | 37,34                     | 36                                | 0,73                        |
|       |                    | 2       | 35,34                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 35,34                     |                                   |                             |
| 2     | Полисахариды сухие | 1       | 36,67                     | 36,8                              | 0,75                        |
|       |                    | 2       | 37,83                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 36                        |                                   |                             |
| 3     | Премикс П-60       | 1       | 30                        | 30,9                              | 0,6                         |
|       |                    | 2       | 32,83                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 29,83                     |                                   |                             |
| 4     | Мел                | 1       | 38,5                      | 39,9                              | 0,84                        |
|       |                    | 2       | 42,34                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 39                        |                                   |                             |
| 5     | Элитокс            | 1       | 36                        | 34,2                              | 0,68                        |
|       |                    | 2       | 32,17                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 34,34                     |                                   |                             |
| 6     | Левисел            | 1       | 34,5                      | 36,3                              | 0,73                        |
|       |                    | 2       | 37,67                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 36,67                     |                                   |                             |
| 7     | Защищенный жир     | 1       | 26,67                     | 28,2                              | 0,54                        |
|       |                    | 2       | 29                        |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 29                        |                                   |                             |
| 8     | Соль               | 1       | 35,17                     | 36                                | 0,73                        |
|       |                    | 2       | 36,67                     |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 36,17                     |                                   |                             |
| 9     | Сода               | 1       | 40,2                      | 39,7                              | 0,83                        |
|       |                    | 2       | 40                        |                                   |                             |
|       |                    | 3       | 38,9                      |                                   |                             |

Таблица Д.4 – Результаты определения угла обрушения БМВД

| № п/п | Материал           | № опыта | Значение,<br>$\alpha_o$ , град | Среднее значение<br>$\alpha_o$ , град |
|-------|--------------------|---------|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1     | Фунгистат          | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 2     | Полисахариды сухие | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 3     | Премикс П-60       | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 4     | Мел                | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 5     | Элитокс            | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 6     | Левисел            | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 7     | Защищенный жир     | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 8     | Соль               | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |
| 9     | Сода               | 1       | 90                             | 90,0                                  |
|       |                    | 2       | 90                             |                                       |
|       |                    | 3       | 90                             |                                       |

Таблица Д.5 – Результаты определения коэффициент внешнего трения БМВД  
(по стали)

| № п/п | Материал           | № опыта | Значение, $\varphi_T$ , град | Среднее значение $\varphi_T$ , град | Коэффициент внешнего трения $f_0$ |
|-------|--------------------|---------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1     | Фунгистат          | 1       | 22,67                        | 23,56                               | 0,44                              |
|       |                    | 2       | 23,34                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 24,67                        |                                     |                                   |
| 2     | Полисахариды сухие | 1       | 25,17                        | 24,45                               | 0,45                              |
|       |                    | 2       | 24,34                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 23,83                        |                                     |                                   |
| 3     | Премикс П-60       | 1       | 27,25                        | 26,25                               | 0,49                              |
|       |                    | 2       | 24,67                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 26,83                        |                                     |                                   |
| 4     | Мел                | 1       | 33,5                         | 33,28                               | 0,66                              |
|       |                    | 2       | 33                           |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 33,34                        |                                     |                                   |
| 5     | Элитокс            | 1       | 28,34                        | 28,00                               | 0,53                              |
|       |                    | 2       | 27,67                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 28                           |                                     |                                   |
| 6     | Левисел            | 1       | 25                           | 25,17                               | 0,47                              |
|       |                    | 2       | 25,17                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 25,34                        |                                     |                                   |
| 7     | Защищенный жир     | 1       | 19,17                        | 19,50                               | 0,35                              |
|       |                    | 2       | 16,33                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 23                           |                                     |                                   |
| 8     | Соль               | 1       | 29,34                        | 28,25                               | 0,54                              |
|       |                    | 2       | 24,75                        |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 30,67                        |                                     |                                   |
| 9     | Сода               | 1       | 29,9                         | 28,80                               | 0,55                              |
|       |                    | 2       | 28,5                         |                                     |                                   |
|       |                    | 3       | 28                           |                                     |                                   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Зависимость коэффициента неоднородности смеси от исследуемых факторов

| Source        | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| A:Uo          | 792,816        | 1  | 792,816     | 46,62   | 0,0005  |
| B:Tc          | 148,954        | 1  | 148,954     | 8,76    | 0,0253  |
| C:BL          | 212,592        | 1  | 212,592     | 12,50   | 0,0123  |
| AA            | 341,678        | 1  | 341,678     | 20,09   | 0,0042  |
| AB            | 30,0852        | 1  | 30,0852     | 1,77    | 0,2318  |
| AC            | 176,491        | 1  | 176,491     | 10,38   | 0,0181  |
| BB            | 105,169        | 1  | 105,169     | 6,18    | 0,0474  |
| BC            | 28,4622        | 1  | 28,4622     | 1,67    | 0,2433  |
| Total error   | 102,026        | 6  | 17,0043     |         |         |
| Total (corr.) | 1913,35        | 14 |             |         |         |

R-squared = 94,6677 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 87,5579 percent

PRESS = 1059,49

R-squared (predicted) = 44,6264 percent

Standard Error of Est. = 4,12363

Mean absolute error = 2,18205

Durbin-Watson statistic = 1,1718 (P=0,0585)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,365132

#### The StatAdvisor

The ANOVA table partitions the variability in Vc into separate pieces for each of the effects. It then tests the statistical significance of each effect by comparing the mean square against an estimate of the experimental error. In this case, 6 effects have P-values less than 0,05, indicating that they are significantly different from zero at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 94,6677% of the variability in Vc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 87,5579%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 4,12363. The mean absolute error (MAE) of 2,18205 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 5,0%, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 5,0% significance level.

#### The StatAdvisor

This pane displays the regression equation which has been fitted to the data. The equation of the fitted model is

$$Vc = 7,72077 - 9,955*Uo - 4,315*Tc - 5,155*BL + 9,59115*Uo^2 + 2,7425*Uo*Tc + 6,6425*Uo*BL + 5,32115*Tc^2 + 2,6675*Tc*BL$$

where the values of the variables are specified in their original units. To have STATGRAPHICS evaluate this function, select Predictions from the list of Tabular Options. To plot the function, select Response Plots from the list of Graphical Options.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Зависимость энергоемкости смешивания от исследуемых факторов

| Source        | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio  | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|----------|---------|
| A:Uo          | 2,645          | 1  | 2,645       | 1619,07  | 0,0000  |
| B:Tc          | 35,4482        | 1  | 35,4482     | 21698,72 | 0,0000  |
| C:BL          | 2,9282         | 1  | 2,9282      | 1792,42  | 0,0000  |
| AA            | 0,0140659      | 1  | 0,0140659   | 8,61     | 0,0261  |
| AB            | 0,585225       | 1  | 0,585225    | 358,23   | 0,0000  |
| AC            | 0,042025       | 1  | 0,042025    | 25,72    | 0,0023  |
| BC            | 0,648025       | 1  | 0,648025    | 396,67   | 0,0000  |
| CC            | 0,109295       | 1  | 0,109295    | 66,90    | 0,0002  |
| Total error   | 0,00980192     | 6  | 0,00163365  |          |         |
| Total (corr.) | 42,4248        | 14 |             |          |         |

R-squared = 99,9769 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9461 percent

PRESS = 0,100798

R-squared (predicted) = 99,7624 percent

Standard Error of Est. = 0,0404185

Mean absolute error = 0,021359

Durbin-Watson statistic = 1,75185 (P=0,3755)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,0124093

#### The StatAdvisor

The ANOVA table partitions the variability in  $E_i$  into separate pieces for each of the effects. It then tests the statistical significance of each effect by comparing the mean square against an estimate of the experimental error. In this case, 8 effects have P-values less than 0,05, indicating that they are significantly different from zero at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,9769% of the variability in  $E_i$ . The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,9461%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0404185. The mean absolute error (MAE) of 0,021359 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 5,0%, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 5,0% significance level.

#### The StatAdvisor

This pane displays the regression equation which has been fitted to the data. The equation of the fitted model is

$$E_i = 3,04769 - 0,575 \cdot U_o + 2,105 \cdot T_c - 0,605 \cdot B_L + 0,0615385 \cdot U_o^2 - 0,3825 \cdot U_o \cdot T_c + 0,1025 \cdot U_o \cdot B_L - 0,4025 \cdot T_c \cdot B_L + 0,171538 \cdot B_L^2$$

where the values of the variables are specified in their original units. To have STATGRAPHICS evaluate this function, select Predictions from the list of Tabular Options. To plot the function, select Response Plots from the list of Graphical Options.



## ПРИЛОЖЕНИЕ И

### Решение задачи оптимизации параметров и режимов работы смесителя БМВД

Step 1: Define the response variables to be measured

| Name | Units | Analyze | Goal       | Target | Impact | Sensitivity | Low | High |
|------|-------|---------|------------|--------|--------|-------------|-----|------|
| Vc   |       | Mean    | Hit target | 0,5    | 3,0    | Medium      | 0,0 | 10,0 |
| Ei   |       | Mean    | Minimize   |        | 3,0    | Medium      |     |      |

Step 2: Define the experimental factors to be varied

| Name | Units | Type       | Role         | Low  | High | Levels |
|------|-------|------------|--------------|------|------|--------|
| A:Uo |       | Continuous | Controllable | -1,0 | 1,0  |        |
| B:Tc |       | Continuous | Controllable | -1,0 | 1,0  |        |
| C:BL |       | Continuous | Controllable | -1,0 | 1,0  |        |

Step 3: Select the experimental design

| Type of Factors | Design Type        | Centerpoints Per Block | Centerpoint Placement | Design is Randomized | Number of Replicates |
|-----------------|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Process         | Box-Behnken design | 3                      | Random                | Yes                  | 0                    |

| Type of Factors | Total Runs | Total Blocks | Error D.F. |
|-----------------|------------|--------------|------------|
| Process         | 15         | 1            | 5          |

Number of samples per run: 1

Step 4: Specify the initial model to be fit to the experimental results

| Factors | Model     | Coefficients | Excluded effects |
|---------|-----------|--------------|------------------|
| Process | quadratic | 10           |                  |

Step 5: Select an optimal subset of the runs (optional)

15 runs selected

Step 6: Select tables and graphs to evaluate the selected runs

To display design diagnostics, use the checkbox on the Analysis Options dialog box.

Step 8: Analyze the experimental results

| Model          | Vc      | Ei        |
|----------------|---------|-----------|
| Transformation | none    | none      |
| Model d.f.     | 8       | 8         |
| P-value        | 0,0027  | 0,0000    |
| Error d.f.     | 6       | 6         |
| Std. error     | 4,12363 | 0,0404185 |
| R-squared      | 94,67   | 99,98     |
| Adj. R-squared | 87,56   | 99,95     |

Step 9: Optimize the responses

Response Values at Optimum

| Response | Optimized | Prediction | Lower 95,0% Limit | Upper 95,0% Limit | Desirability |
|----------|-----------|------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Vc       | yes       | 2,51264    | -3,54982          | 8,5751            | 0,788143     |
| Ei       | yes       | 2,31251    | 2,25578           | 2,36924           | 0,774032     |

Optimized desirability = 0,781056

Factor Settings at Optimum

| Factor | Setting   |
|--------|-----------|
| Uo     | 0,220585  |
| Tc     | -0,123903 |
| BL     | 0,999998  |

**The StatAdvisor**

You have specified 2 response variables and 3 experimental factors. The selected design has 15 runs, with 1 sample to be taken during each run. The default model is quadratic with 10 coefficients.

Statistical models have been fit to the response variables. Models with P-values below 0,05, of which there are 2, indicate that the model as fit is statistically significant at the 5,0% significance level. Also of interest is the R-squared statistic, which shows the percentage of variation in the response that has been explained by the fitted model. Your R-squared values range from 94,67% to 99,98%.

The optimal setting of the experimental factors have been determined and are displayed in the summary. At these settings, the response variables generate a desirability index of 78,11%.

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ



**Акционерное общество Племенной завод «Петровский»  
(АО ПЗ «Петровский»)**

ИНН/КПП 4712000216/471201001 ОГРН 1024701645913

Адрес юридический и почтовый:

188732 Ленинградская область Приозерский р-н п. Петровское, ул. Шоссейная, д.22

Тел: (81379) 66-136, 66-145, 66-252(факс), E-mail: [pz\\_petrovsky@mail.ru](mailto:pz_petrovsky@mail.ru)

р/с 4070281026000000109 в ПРИОЗЕРСКИЙ ФИЛИАЛ ПАО «БАНК «САНКТ-

ПЕТЕРБУРГ» к/с 30101810945374030817 в Северо-Западном ГУ Банка России

БИК 044030817

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских  
и технологических работ

08 июня 2022 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель АО ПЗ «Петровский» в лице директора Иванова С.И. и представители ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в лице руководителя научно-исследовательской работы Гордеева В.В. и аспиранта Авакимянца Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Авакимянца Е.В., выполненной в отделе агроэкологии в животноводстве ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ внедрены в 2022 г. в АО ПЗ «Петровский» путем проведения испытаний в производственных условиях и использования в производственном процессе разработанного и изготовленного смесителя для приготовления смеси белково-минерально-витаминных добавок.

Смеси белково-минерально-витаминных добавок приготавливались в соответствии с действующими рационами и производственной необходимостью хозяйства. Концентрация ключевого компонента для всех смесей составляла 1% от массы основного компонента. Качество приготавливаемой смеси соответствует зоотехническим требованиям – однородность смеси составила 98%, время смешивания – 60 с, удельная энергоёмкость – 1,03 кВт·ч/т.

Замечания и предложения:

- необходимо обеспечить герметичность бункера смесителя в местах соединений с целью минимизации пыления материала при смешивании

Директор АО ПЗ «Петровский»



С.И. Иванов

Руководитель научно-исследовательской работы,

канд. техн. наук, вед. науч. сотр.

ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

В.В. Гордеев

Разработчик, аспирант, младший научный сотрудник

ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Е.В. Авакимянец



## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

## Патент на изобретение № 2743924 «Смеситель»

авторы: Авакимянц Евгений Вячеславович, Гордеев Владислав Владимирович

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2743924****Смеситель**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)*

Авторы: *Авакимянц Евгений Вячеславович (RU), Гордеев Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № 2020127498

Приоритет изобретения **18 августа 2020 г.**Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **01 марта 2021 г.**Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **18 августа 2040 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильев





## ПРИЛОЖЕНИЕ М

## Патент на изобретение № 2780319 «Смеситель»

авторы: Авакимянц Евгений Вячеславович, Гордеев Владислав Владимирович

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2780319

Смеситель

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)*

Авторы: *Авакимянц Евгений Вячеславович (RU), Гордеев Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № 2022102749

Приоритет изобретения 04 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 04 февраля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

