

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Великолукская государственная сельскохозяйственная академия»

*На правах рукописи*

Савельева Людмила Николаевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
СМЕШИВАНИЯ САПРОПЕЛЕ-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С  
ОБОСНОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского  
хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Морозов В.В.

Великие Луки – 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	05
<b>1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	<b>11</b>
1.1. Сапропель - природный ресурс органического сырья для производства удобрений	11
1.2. Анализ существующих технологий производства и использования сапропелевых удобрений и конструктивно-технологических схем смесительных устройств	18
1.3. Пути совершенствования технологического процесса производства сапропеле-минеральных удобрений и задачи исследования	33
1.4. Цель и задачи исследований	41
<b>2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ</b>	<b>42</b>
2.1. Теоретическое обоснование технологического процесса смешивания сапропеле-минеральной смеси	42
2.2. Теоретическое обоснование основных параметров барабанного смесителя с лопастями на внутренней стенке	45
2.3. Производительность смесителя с лопастью, расположенной на внутренней стенке барабана под углом по отношению к радиальному направлению	54
2.4. Определение конструктивных параметров барабанного смесителя	63
2.5. Основные положения и теоретический расчет затрат энергии на смешивание	66
<b>3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ САПРОПЕЛЕ-МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ</b>	<b>72</b>

3.1. Программа экспериментальных исследований процесса смешивания сапропеле-минеральной смеси	72
3.2. Устройство и рабочий процесс экспериментальной установки и методика исследований процесса смешивания в барабанном смесителе	74
3.3. Измерительные приборы, оборудование и методика исследования влияния сапропеле-минеральной смеси на рост и развитие сельскохозяйственных культур и агрохимические показатели почвы	78
<b>4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САПРОПЕЛЕ-МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ И ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В БАРАБАННО-ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ</b>	<b>84</b>
4.1. Определение показателей физико-механических свойств сапропеле-минеральной смеси	84
4.2. Математическое моделирование влияния конструктивных и технологических параметров смесителя на качество сапропеле-минеральных удобрений, производительность и энергозатраты процесса смешивания	85
4.3. Исследование влияния сапропеле минеральных удобрений на рост и развитие сельскохозяйственных культур и на агрохимические показатели почвы	94
4.4. Технологическая линия для поточного производства сапропеле-минеральных удобрений	98
<b>5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПРОПЕЛЕ-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ</b>	<b>101</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>105</b>
<b>РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ</b>	<b>107</b>
<b>Принятые обозначения</b>	<b>108</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>111</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	<b>129</b>

Приложение А. Справка об использовании результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе	130
Приложение Б. Матрица, названия, кодированные обозначения факторов, значения критерия оптимизации для многофакторного регрессионного анализа при реализации плана эксперимента Бокса (В4) второго порядка для четырех факторов	131
Приложение В – Результаты многофакторного регрессионного анализа	136
Приложение Г – Значение однородности смеси предварительных двухфакторных экспериментов для определения уровней варьирования входных параметров многофакторного регрессионного анализа	146
Приложение Д. Акт внедрения опытного образца и результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в высших учебных заведениях в ИП «Крестьянско-фермерском хозяйстве Михайлов М.В.» Великолукского района Псковской области	148
Приложение Е. Заявка на полезную модель	150

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Для удовлетворения потребностей человечества в высококачественной продукции с сохранением природных комплексов агропромышленный комплекс сегодня требует комплексных, экологически оправданных методов хозяйствования для сохранения и использования почвы, водных ресурсов, атмосферы.

Максимально возможные урожаи сельскохозяйственных культур можно получить только при совместном применении органических и минеральных удобрений. При этом минеральные удобрения в основном способствуют повышению урожайности. Органические удобрения, помимо повышения урожайности, улучшают структуру и плодородие почв, способствуя увеличению содержания гумуса, что непременно сказывается на качестве продукции.

Ценным продуктом озер Северо-Западного региона, является озерный сапропель, который может широко использоваться в сельском хозяйстве. В сапропеле, совместно с высоким содержанием органических веществ в повышенном количестве имеются все важнейшие макро- и микроэлементы, витамины, гормоны, антибиотики, пигменты, каротин, протеин и другие биологически важные вещества. В Псковской области самыми крупными залежами сапропеля обладают озера: Дубец в Бежаницком районе, Дулово в Локнянском районе, Усвоя в Невельском районе, Велье в Пушкиногорском районе и Усвятское в Усвятском районе.

Разведанные запасы сапропеля (кат.А) при общей ежегодной добыче 465 тыс. тонн (60% влажности), по данным Л.М. Хобиной и Е.И. Скобеевой (1999 г.), дают возможность разрабатывать на протяжении 50 лет одновременно 37 месторождений.

Сапропели являются ценным комплексным удобрением, так как содержат все необходимые для питания растений вещества. Как органоминеральное удобрение, сапропель равноценен навозу, большой недостаток которого испытывают почвы Псковской области. Сапропель улучшает

структуру почвы, благодаря повышенному содержанию кальция способствует раскислению почв.

Лишь на 15% компенсируется вынос растениями элементов питания из почвы с урожаем за счет внесения минеральных удобрений и пожнивными остатками.

В работах Морозова В.В. и Павлова А.Н. рассмотрены технологии послойной разработки сапропеля на удобрения с помощью шнекового нагнетателя сапропеля естественной влажности. Перспективность использования сапропелей показали исследования ученых Вирясова Г.П., Тишковича А.В., Лопотко М.З., Лиштвана И.И. Они обладают высокой подвижностью гуминового комплекса, прекрасной связующей способностью для производства сапропеле-минеральных удобрений и лучшим, чем у торфа, соотношением между углеродом и азотом органических соединений.

Применение смешанных удобрений в виде сапропеле-минеральной смеси, повышает плодородие почв и грунтов за счет обогащения их гумусовыми соединениями, азотом, фосфором, кальцием и микроэлементами [52]. При внесении сапропеле минеральной смеси активизируется агрономически полезная микрофлора, повышается подвижность питательных веществ.

В технологии приготовления сапропеле-минеральных удобрений процесс смешивания занимает особое место, так как он самый трудоемкий и определяет производительность технологии в целом, а также напрямую влияет на качество приготавливаемой смеси. К смесительным устройствам предъявляют два основных требования. Первое, обеспечить в готовой смеси необходимое соотношение компонентов (по массе или объему) с отклонениями, не превышающими установленных допусков. Второе, частицы смешиваемых компонентов перераспределить так, чтобы показатель неравномерности их распределения был в пределах технологических требований.

Процесс смешивания компонентов является объектом исследования в технологической линии производства сапропеле-минеральных удобрений.

Научная новизна состоит в разработке математических и физических моделей, которые описывают процесс смешивания исходных компонентов в исследуемом устройстве; определении значений основных параметров влияющих на качественные и количественные показатели процесса смешивания; получении уравнений регрессии, описывающих зависимость между основными факторами процесса смешивания исходных компонентов; в разработке смесителя сапропеле-минеральной смеси в технологической линии производства сапропеле-минеральных удобрений.

Положительными результатами лабораторных и производственных исследований подтверждена достоверность основных положений.

Разработан смеситель сапропеле-минеральных удобрений для технологической линии производства и система управления основными параметрами процесса смешивания.

**Цель исследований.** Совершенствование технологического процесса смешивания сапропеле-минеральных удобрений путём обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя.

**Задачи исследований:**

1. Изучить технологии производства и использования сапропелевых удобрений и выявить рациональные пути совершенствования технологического процесса смешивания.

2. Получить аналитические зависимости для определения конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя непрерывного действия.

3. Получить математические модели процесса смешивания сапропеле-минеральных компонентов в барабанном смесителе.

4. Обосновать рациональные параметры и режимы работы барабанного смесителя для получения однородности смеси.

5. Провести экспериментальные испытания и дать технико-экономическую оценку полученных результатов.

**Объект исследования.** Технологический процесс смешивания сапропеля с минеральными удобрениями.

**Предмет исследования.** Закономерности взаимодействия рабочих органов смесителя с сапропеле-минеральной смесью.

**Научную новизну** работы составляют:

1. Конструктивно-технологическая схема устройства рабочего органа барабанного смесителя с установкой лопастей с различными конструктивными параметрами внутри барабана;

2. Математические модели процесса смешивания сапропеля с минеральными удобрениями в барабанном смесителе;

3. Закономерности, позволяющие обосновать конструктивные и технологические параметры барабанного смесителя.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Результаты теоретических исследований являются базой для совершенствования технологического процесса смешивания сапропеля с минеральными удобрениями, обоснование конструктивных и технологических параметров рабочего органа барабанного смесителя. Полученные результаты исследований и разработок рационализируются для широкого использования на сельскохозяйственных предприятиях, для дальнейшего совершенствования машин данного типа и для применения их в учебном процессе при подготовке специалистов сельскохозяйственного профиля.

#### **На защиту выносятся:**

- Конструктивно-технологическая схема барабанного смесителя с рабочим органом барабанно-лопастного типа.
- Аналитические зависимости для определения конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя непрерывного действия.
- Математические модели процесса смешения сапропеля и минеральных удобрений.
- Рациональные конструктивные и технологические параметры и режимы работы барабанного смесителя.



- Результаты испытаний барабанного смесителя и его технико-экономическая оценка

### **Публикации.**

Основные материалы диссертационных исследований опубликованы в 8 печатных работах, общим объемом 3,56 п.л., в т.ч. 2 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК и 1 работа в журнале IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), который индексируется в SCOPUS и подается для индексации в Web of Science (CPCI). Лично автору принадлежит 2,2 п.л.

### **Апробация работы.**

- На Международной научно-практической конференции «Наука об актуальных проблемах и перспективах инновационного развития регионального АПК», в Великолукской ГСХА, 14-15 апреля 2016 г.
- На Международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного развития АПК», в Великолукской ГСХА, 13-14 апреля 2017 г.
- На Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития агропромышленного производства», в Великолукской ГСХА, 19-20 апреля 2018 г.
- На международной научно-практической конференции «Традиции и инновации в развитии АПК» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА, 17-18 апреля 2019 г.
- На международной научно-практической конференции «Научное обеспечение инновационного развития АПК» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА, 18 мая 2020 г. На региональной научно-практической конференции «Достижения науки в области АПК» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА, 09 октября 2020 г.
- На Международной научно-практической конференции «Современные тенденции машиностроения и техносферной безопасности» «Modern trends in mechanical engineering and technosphere safety» (Конференция «СТМТБ 2020» / «MTMETS 2020»), посвященной 90-летию ДГТУ (РИСХМ), 20 октября 2020 г.

- На Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики» ФГБОУ ВО СПбГАУ, 26-28 мая 2021 г. Санкт-Петербург.

#### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка принятых сокращений, четырех приложений. Основная часть изложена на 150 листах формата А4 машинописного текста, содержит 38 рисунков, 17 таблиц. Список литературы представлен 130 источниками.

## **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Сапропель - природный ресурс органического сырья для производства удобрений**

Сапропель это - илистые донные отложения пресных водоемов, содержащие большое количество органических веществ, углеводов, битумов и других сапропелитов в коллоидном состоянии. Это продукт физико-механической и химико-биологической переработки остатков, населяющих озеро растительных и животных организмов, а также неорганических компонентов биогенного происхождения и минеральных примесей. Сапропель формируется годами, нижние слои залежи уплотнены и имеют низкую влажность, а верхние неоформленные имеют повышенную влажность и называются пелогеном. В этом слое под действием пресноводных микроорганизмов из остатков растительного и животного мира озер идет процесс формирования сапропеля [2, 4, 6, 9].

Высота сапропелевой залежи зависит от вида озера, как правило, в глухих озерах залежь располагается равномерно по акватории и имеет более мощный слой, а в проточных менее равномерно в результате действия течения [10].

Озера по своему формированию бывают различного типа проточные, в которые втекает и вытекает река, приточные, в которые втекает река и глухие, нет связи с речной артерией. В зависимости от водообмена в озере начинают проявляться признаки увеличения развития и роста растительности и формирование донных отложений. В глухих озерах при развитии эвтрофии донные отложения за год могут формироваться в пределах от 1 до 5 мм.

В проточных озерах формирование донных отложений значительно ниже, но увеличивается степень минерализации органического вещества, в следствии чего формируются отложения повышенной зольности. В этих озерах, поверженных эвтрофии, происходит интенсивное накопление донных отложений и может достигать 4-7 мм в год, в следствии чего происходит зарастание озера (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – «Бельковское» озеро Великолукского района Псковской области

Озера можно рассматривать как живой организм, в котором в зависимости от глубины, погодных условий и времени года развивается и угасает растительный и животный мир, поэтому отложения по формированию слоя органического и минерального состава могут различаться.

Внешне сапрпель имеет вид желеобразной массы с консистенцией, близкой к сметанообразной, с постепенным уплотнением при увеличении глубины отложений. На консистенцию и цвет сапрпеля оказывают значительное влияние минеральные примеси, присутствующие нередко в значительном количестве и придающие ему характер глинистых, песчаных, известковых и других образований. Окраска сапрпелей очень разнообразная: коричневая, темно-оливковая, темно-серая, почти черная, серо-желтая, зеленоватая, голубоватая, розовая и красноватая. Цвет имеет большое значение при оценке сапрпеля, так как указывает на наличие органических и неорганических веществ (зеленоватый - хлорофилла, розовый - каротина, голубоватый - вивианита, черный, быстро темнеющий на воздухе - восстановленного железа, сероватый - примеси извести) [14, 15, 16, 24].

Разнообразие растительного и животного мира озер, богатое

минеральное питание определяют состав и свойства сапропелей, которые, в соответствии с действующей классификацией, подразделяются на три типа, шесть классов и девятнадцать видов (табл. 1.1) [25].

Таблица 1. 1 - Классификация сапропелевых отложений

Тип	Класс	Вид
Биогенный	Органический	Протококковый Цианофициный Смешано-водорослевый Торфянистый Зоогеново-водорослевый
	Кремнистый	Диатомовый
Кластогенный	Органо-силикатный	Органо-песчанистый Диатомово-песчанистый Органо-глинистый Диатомово-глинистый
	Силикатный	Песчанистый Глинистый
Смешанный	Карбонатный	Органо-известковый Глинисто-известковый Известковый
	Железистый	Органо-железистый Известково-железистый Лимонитовый Сульфидный

Твердая фаза сапропелей является гетерополидисперсной и состоит из продуктов распада сапропелеобразователей, органической части и минеральной, входящей в состав органической и существующей отдельно в виде взвесей и растворов солей. Компактность агрегатов зависит от природы сапропелей, содержания органической и минеральной составляющих, степени насыщенности сапропелей катионами [29].

Органическое вещество сапропелей представляет совокупность растительных и животных остатков и продуктов их распада. Исследования озерных сапропелей показывают, что в их составе в большей степени преобладают остатки растительного мира и они влияют на формирование донных отложений, [44] продуцирующих торфянистые сапропели, а также в мезотрофных замкнутых озерах со слабоминерализованной водной массой [33].

В состав органического вещества также входят продукты распада животного мира, которые зависят от процессов фотосинтеза, а также от качества и количества поступаемого обломочного материала. Общее содержание органического вещества может изменяться от 15 до 94 % массы сухого вещества [44]. В органических сапропелях содержание ОВ находится в пределах от 70 до 94 %, в кремнистых и карбонатных - от 15 до 60 %, в смешанных - от 45 до 58%.

Групповой состав ОВ сапропелей характеризуется различными количествами битумов, легко- и трудногидролизуемых соединений, а также негидролизуемого остатка (лигнина). Содержание каждого из перечисленных компонентов зависит от условий образования и изменяется в следующих пределах: гуминовые кислоты 11,3...43,4 %; фульвокислоты 2,1...23,5 %; негидролизуемый остаток 5,1...22,6 %; геммицеллюлоза 9,8...52,5 %; целлюлоза 0,4...6 %; водорастворимые вещества 2,4...13,5 %; битумы А 3,4...10,9 %; битумы С 2,1...6,6 %. Битумы сапропеля богаты воском и отличаются от битумов торфа более низким числом омыления и кислотности. В битумах сапропелей больше алифатических соединений, чем ароматических. Они имеют светлую окраску (битумы торфа - темную). По основным технологическим показателям они соответствуют требованиям, предъявленным к торфяным битумам (ТУ 6-01-973-75) [60, 61].

Гуминовые соединения сапропелей отличаются разнообразием и в зависимости от условий их образования составляют 6,7...71,2 % от ОВ [63, 67]. При образовании белковых соединений, содержащихся в сапропелеобразователях, до 30 % азота прочно закрепляется в молекулах ГК и не отщепляется даже под действием 20 %-ой соляной кислоты. ГК сапропелей также образуют органоминеральные соединения [94, 95, 96].

Агрохимические свойства сапропеля зависят от зольности, содержание которой для разных классов сапропелей находится в следующих пределах: в органических от 6 до 30 % на сухое вещество; в кремнистых, карбонатных и силикатных - от 30 до 85 % [51, 71, 72]. Минеральная составляющая сапропелей представлена двуокисью кремния, окислами металлов переменной валентности,

карбонатами кальция и магния, силикатными и алюмосиликатными породами. На накопление химических соединений и тяжелых металлов в донных отложениях влияет расположение озер в рельефе местности и поступление в них с дождевыми и вешними водами путем смыва с водосборных площадей различных элементов [78, 81].

В сапропелевых отложениях обнаружены многие микроэлементы, среди которых можно выделить титан, хром, марганец, никель, ванадий, медь, бор, цирконий и молибден. Кроме этого, сапропели также содержат биологически активные вещества - витамины, стимуляторы роста, антибиотики, гормоны [99].

Высокая водоудерживающая и низкая фильтрационная способности сапропеля способствуют улучшению водно-физических свойств легких почв. Обладая клеящей способностью, сапропель при взаимодействии с почвой улучшает ее структуру, придает ей комковатость, рыхлость, увеличивается воздухопроницаемость [117].

Наиболее изучены и перспективны для использования в сельском хозяйстве сапропелевые отложения озер центральных и северо-западных областей Нечерноземной зоны России [29], (рис.1.2), многие из которых в настоящее время зарастают.



Рисунок 1.2 – Озеро «Аничково» Псковской области

Сведения о запасах сапропеля в озерах представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Запасы сапропелей центральных и северо-западных областей РФ [29].

Область	Прогнозируемые запасы		Разведанные запасы	
	Количество месторождений	Запас, млн. м <sup>3</sup>	Количество месторождений	Запас, млн. м <sup>3</sup>
Владимирская	105	70	58	39
Ивановская	60	114	12	40
Ленинградская	1360	1600	75	164
Московская	158	200	82	129
Новгородская	859	800	54	188
Псковская	953	1700	81	269
Рязанская	95	150	52	81
Смоленская	100	200	15	10

В результате сложных физических, химических и биологических процессов сапропель оказывается обогащенным, помимо собственно органического вещества, кальцием, фосфором, железом, микроэлементами, физиологически активными веществами и имеет важное сырьевое значение для производства различных видов удобрений. По своим агрохимическим и физическим свойствам сапропели представляют большой интерес для использования в сельскохозяйственном производстве с целью повышения урожайности и плодородия почвы [122].

Особенности химического состава и свойств сапропелей позволяют использовать их в качестве сырья для получения различных видов удобрений: органических, органоминеральных, известковых компостов с навозом [132].

В последнее время ряд научных учреждений ведут поиски путей наиболее рационального использования сапропеля в качестве удобрения, так как сапропель является хорошим адсорбентом аммиачных форм азота, проводят его аммонизацию, которая резко повышает удобрительные свойства.

Установлено, что использование сапропеля в качестве удобрения оказывает положительное влияние на рост и развитие различных сельскохозяйственных культур, увеличивает содержание крахмала в картофеле,



сахара в свекле, кроме того, он оказывает существенное влияние на повышение урожайности зерновых культур и овощей [137].

По агрохимическим и физическим свойствам сапропелевые удобрения оказывают положительное влияние на содержание гумуса и почвенное плодородие.

Для создания хорошего пахотного слоя с улучшением химического состава и агрегатного состояния почвы целесообразно использовать агромелиоративную обработку с использованием сапропеля. Применение такой технологии позволяет повысить влагонасыщение почвы, скважность и увеличить объемный вес [141].

Многочисленные исследования использования сапропеля при возделывании сельскохозяйственных культур показали, что сапропель является не только средством непосредственного обеспечения культурных растений питательными веществами, но и весьма важным фактором коренного улучшения агрохимических и физических свойств почвы [142].

Установлено, что проведенных исследований по использованию сапропеля в качестве удобрений и влияния их на плодородие почвы, урожайность сельскохозяйственных культур недостаточно, они не отражают в полной мере трансформирование сапропеля различными минеральными и органическими добавками и носят отрывочный характер.

Исследованиями установлено, что одним из важных показателей сапропеля и его агрономической ценности является наличие в нем азота, но он представлен в труднодоступных для растений соединениях, что приводит к внесению больших доз сапропеля. Поэтому для более эффективного использования сапропеля и трансформации азота в доступную форму, а также обогащения фосфором, калием и другими питательными элементами необходимыми для растений, целесообразно сапропель трансформировать органическими и минеральными удобрениями [144, 145].

В связи с этим, рассмотрение вопросов, связанных с использованием сапропеля на удобрения, является целесообразным и актуальным, и с целью

проведения дальнейших исследований следует изучить существующие в настоящее время технологии производства и использования сапропелевых удобрений.

## **1.2. Анализ существующих технологий производства и использования сапропелевых удобрений и конструктивно-технологических схем смесительных устройств**

Использование сапропелей в сельском хозяйстве известно с древних времен. Уже в XVIII веке озерный ил использовался в сельском хозяйстве, а с 30-х годов XX века сапропель получил более широкое применение при возделывании овощных и зерновых культур [3].

А с 1962 года использование сапропеля в сельском хозяйстве в качестве удобрений приобрело научно-обоснованный характер.

Идея использования специализированных плавучих земснарядов с гидромеханизированной выемкой залежи и гидротранспортом легла в основу организации технологии.

В то же время были внедрены следующие методы [8]:

- \* добыча сапропеля с помощью земснарядов и грейферных экскаваторов с транспортировкой в отстойники;

- \* намыв сапропеля на поля и пойменные луга;

- \* кольматация болотистых прибрежных пойменных болот.

Разработка месторождения и гидротранспорт пульпы осуществлялись земснарядами (MZ-3A, MZ-8, ZRS-G, 35A, 80-30, VP34-2, ERS-1, 150-45, 200-50, 300-40, 500-60) производительностью от 25 до 500 м<sup>3</sup> /ч с различными устройствами для сбора грунта. (Рис. 1.3) [11]



Рисунок 1.3 – Добыча сапропеля земснарядом

Из опыта использования сапропеля на удобрение установлено, что для подачи сапропеля естественной влажности на расстояние до 1 километра целесообразно использовать гидравлический транспорт. (рис. 1.4)



Рисунок 1. 4 – Подача пульпы в отстойники

По такой технологии удобрения производят в течение двух лет. В начале сапрпель с помощью земснаряда добывают из озера и подают в отстойник для обезвоживания. Затем после промораживания в зимний период и достижения необходимой влажности проводят технологический процесс сельскохозяйственными машинами для производства удобрений [12].

Для получения измельченного удобрения влажностью 60% сапрпель фрезеруют фрезой для подготовки торфа на глубину 18-24 мм, перемешивают и складывают в бурты.

Сапропелевые удобрения, приготовленные в отстойниках, характеризуются хорошими физико-механическими свойствами, но с низкими агрохимическими показателями, незасоренностью семенами сорных растений. Недостатами этой технологии являются высокие трудозатраты и зависимость от погодных условий [17].

При прямом намыве сапропеля на поля пульпой влажностью 90-95% со стоком осветлённой воды по рельефу в озеро необходимо искусственно создавать условия для осаждения сапропеля на полях [21].

Намывать сапропель на поля можно в течение всего сезона работы землеснаряда. Однако, чтобы не изымать земли из хозяйственного оборота, намыв лучше проводить после уборки урожая сельскохозяйственных культур с этих участков. При намыве одного участка на другом происходит обезвоживание сапропеля.

При намыве сапропеля непосредственно на поля значительно сокращается цикл внесения его в почву, исключается необходимость его промораживания и переработки на удобрения. При этом стоимость работ в 1,8-2,1 раза меньше, чем производство удобрений в отстойниках.

Намыв сапропеля непосредственно из озера на поля улучшает физико-механический состав непродуктивных почв. Однако этот способ при сложном рельефе местности затрудняет создание условий для осаждения сапропеля на полях.

К недостаткам намыва сапропеля на поле также необходимо отнести и то, что из-за продолжительного затопления почвы (до 4-6 мес.) структура нарушена, водно-физические свойства, биологическое состояние почв ухудшаются, почва плохо обрабатывается. Во время сушки сапропеля на поверхности образуется корочка, которая препятствует испарению влаги. Чтобы разрушить корку, необходимо провести поверхностное щелевание по типу формирования гидроторфа [31].

При добыче сапропеля с глубины до 5 м как правило применяют экскаваторы или грейферные краны, которые установлены на понтоне.

При экскавации сапропеля из залежи его с помощью ковша подают в плавучую баржу и транспортируют для разгрузки к берегу (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Экскаваторный способ добычи сапропеля.

Баржа также разгружается экскаватором в транспортные средства и сапрпель доставляется на площадку для процесса обезвоживания и производства удобрений [34].

Сапрпель в естественном состоянии является органо-минеральным сырьем для производства удобрений. И для того, чтобы из него получить полноценное удобрение необходимо его трансформировать органическими и минеральными добавками.

Из-за более медленного разложения сапрпелей в почве, чем навоза, агрохимическая эффективность последнего оценивается в течение 3-5 лет. Благодаря наличию углеводов и легкоусвояемых соединений сапрпель превосходит торф по микробиологическим показателям.

Влияние сапрпеля на рост и развитие сельскохозяйственных растений значительно зависит от нормы внесения. И если вносить при норме 40-80 т / га его воздействие наблюдается на протяжении 2-3 лет [52].

Однако опыт использования сапрпеля показывает, что даже незначительные нормы внесения в чистом виде оказывают удовлетворительное влияние на урожайность, снижение кислотности и увеличение водонасыщения почвы.

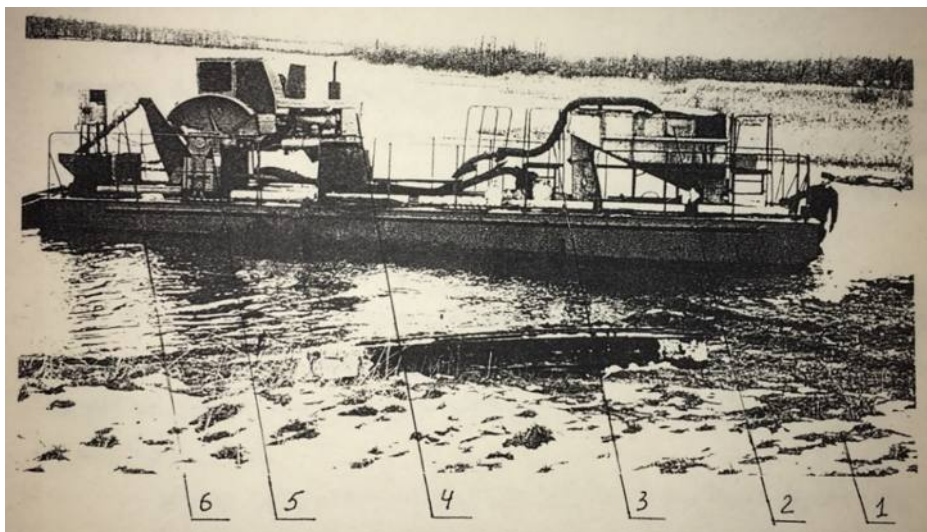
Сапропель нужно рассматривать как сырье для производства удобрений, с улучшением микробиологических и агрохимических свойств и для этого его необходимо трансформировать органическими добавками с большим содержанием микроорганизмов.

При данной технологии работы проводятся комплексом машин, имеющихся в хозяйстве и обеспечивающих приготовление удобрений на площадке. (таблица 1.3) [45]

Таблица 1.3 - Технологический комплекс машин

Пункт приготовления удобрений, тыс.т	Подача компонентов		Приготовление удобрений
	Сапропеля	Жидкого навоза	
Площадка 18018	Установка УРС Напорно-гидравлическая система 40М Трактор Т-150К Прицеп ПТС -10	Трактор Т-150К  Машина МЖТ-10	Трактор ДТ-75 Культиватор чизельный К4-5, 1 Болотная фреза ФБН-1,5 Тяжелая прицепная борона БДТ-3

В ходе технологического процесса сапропель из месторождения перемещается скреперующе-заборным устройством в шнековый насос, который подает его в бункер-накопитель. (рис. 1.6)



1 – пантон, 2 – бункер, 3 – трубопровод, 4 – трактор для привода, 5 – приводная станция, 6 – гидроцилиндр подъема стрелы.

Рисунок 1.6 – Установка для разработки сапропеля



После заполнения бункера установку подтягивают к берегу и сапропель перекачивают в прицеп МЖТ-10 для смешивания с жидким навозом в соотношении 10:1. Трактор Т-150К транспортирует массу на участок подготовки удобрений, где она разливается слоем 0,30-0,35 м. По мере высыхания, для улучшения проникновения влаги в почву и образования трещин для испарения, массу рыхлят долотным культиватором. Во время дальнейшей сушки, с целью устранения корочки, образования комков и улучшения качества удобрения, массу разрыхляют тяжелой прицепной бороной БДТ-3, перемешивают и измельчают болотной фрезой ФБН-1,5.

По завершении технологического процесса подготовки удобрений погрузчик ПНД-250А, перемещаясь по участку, дополнительно измельчает массу заборным рабочим органом и загружает в прицеп ПРТ-10 для внесения органических удобрений, который трактор Т-150К транспортирует на поля.

Данная технология позволяет производить удобрения высокого качества, но зависит от погодных условий и времени формирования качественного удобрения.

В работе Павлова А.Н. рассмотрена технология трансформирования сапропеля естественной влажности навозом для внутрпочвенного внесения с использованием шнекового насоса.

При производстве удобрения сапропель из залежи шнековым насосом подают в бункер установки для добычи сапропеля, затем установку перемещают к берегу для разгрузки, дальнейшей транспортировки и переработки сапропеля.

Одновременно с процессом добычи, из навозохранилища, с помощью насосного устройства загружали жидкий навоз в разбрасыватель МЖТ – 10, который трактором Т – 150К перевозили на площадку приготовления удобрений, для смешивания с сапропелем естественной влажности, в соотношении 5:1 в транспортном средстве РЖТ – 8, оборудованным шнековым нагнетателем и в течении 10 – 15 минут перемешивают.

По завершению технологического процесса трансформирования сапропеля с помощью конического шнекового нагнетателя, установленного на агрегате РЖТ – 8, приготовленное удобрение вносили в пахотной слой.

Внутрипочвенное внесение удобрения уменьшает потерю питательных веществ, вносимых в почву, и улучшает экологическое состояние среды.

Внедрение новых прогрессивных технологий в сельскохозяйственное производство направлено на увеличение использования минеральных удобрений, но порой это приводит к загрязнению окружающей среды. Что бы уменьшить это влияние желательно использовать сорбционные свойства сапропеля, вносить больше органических удобрений. Что приведет к обогащению почвы питательными веществами на более длительный период и улучшению окружающей среды [51, 52].

Использование сапропелей и минеральных удобрений может быть повышено в результате производства из них гранулированных удобрений. Учитывая хорошие связующие свойства и способность образовывать прочные гранулы, которые в дальнейшем медленно размягчаются в почве, от влаги и микроорганизмов, органические сапропели используются для получения гранулированных органоминеральных удобрений с добавками NPK и микроэлементов [52,56].

В настоящее время многие ученые занимаются созданием медленнодействующих удобрений, повышающих эффективность использования питательных веществ в нашей стране и за рубежом. Поэтому большой практический интерес представляют собой технологии улучшения качества удобрений, которые упрощают технологический процесс их производства и не требуют применения реагентов и кондиционирующих добавок [57].

Поэтому для повышения эффективности применения минеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур целесообразно смешивать их с сапропелем с целью использования сорбирующих его свойств.



В зависимости от физико-механических и гранулометрических свойств смешиваемых материалов применяются разнообразные технологии смешивания. Так как в литературе нет конкретных данных о машинах для приготовления удобрений на основе сапропеля, мы рассмотрели конструкции смесителей, которые применяются в различных отраслях народного хозяйства [52] (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Классификация смесителей

Признаки	Вид смесителя
по способу установки	передвижные стационарные
по характеру протекающего в них процесса смешивания	периодического действия непрерывного действия
по скорости вращения перемешивающего органа	тихоходные скоростные
по механизму процесса смещения	конвективного смешения диффузионного смешения конвективно-диффузионного смешения
по способу воздействия на смесь	гравитационные центробежные продуваемые
по виду потока частиц	циркуляционные с хаотическим перемещением частиц
по конструктивному признаку	с вращающимся корпусом со стационарным корпусом и вращающимся перемешивающим органом с вертикальным валом с горизонтальным валом червячные лопастные и т. д.
по способу разгрузки	с ручной разгрузкой с механизированной разгрузкой
по способу управления	с ручным управлением с автоматическим управлением

Установлено, что наиболее рациональными являются смесители постоянного действия, в которых подача компонентов для смешивания и выход готовой продукции происходит постоянно [52, 69]. Такие конструкции, как правило, компактнее и производительнее других, поскольку операции загрузки, смешивания и выгрузки здесь совмещены. Отличительной особенностью

смесителя непрерывного действия является отсутствие циркулирования материала через одни и те же зоны перемешивания. Непрерывная сменяемость зон создает условия для поточного перемешивания материала от места загрузки к месту выгрузки и позволяет осуществить загрузку компонентов одновременно на разных участках.

Непрерывнодействующие смесители можно классифицировать по конструктивному признаку и по способу воздействия на смесь (табл. 1.5)

Таблица 1.5 – Классификация непрерывнодействующих смесителей сыпучих материалов

по конструктивному признаку:	по способу воздействия на смесь:
— горизонтальные;	— гравитационные;
— вертикальные;	— центробежные прямоочные;
— с вращающимся валом;	— барабанные;
— вращающимся корпусом;	— вибрационные;
— односекционные;	— червячно-лопастные;
— многосекционные;	— лопастные центробежного действия.

Смесительный эффект центробежных аппаратов достигается за счет сдвиговых разрывных и ударных напряжений, возникающих в слое сыпучего материала при его воздействии со скоростным перемешивающим устройством и внутренними стенками [70]. Процесс образования смеси происходит при распылении смешиваемых материалов одним или несколькими роторами в пространстве и затем на боковую поверхность аппарата. Большое влияние на процесс смешивания в данных смесителях оказывают центробежные силы, которые могут как увеличивать смесительный эффект, так и приводить к сегрегации смеси.

Принципиальная схема смесителя а.с. № 1278239 показана на рисунке. 1.7.

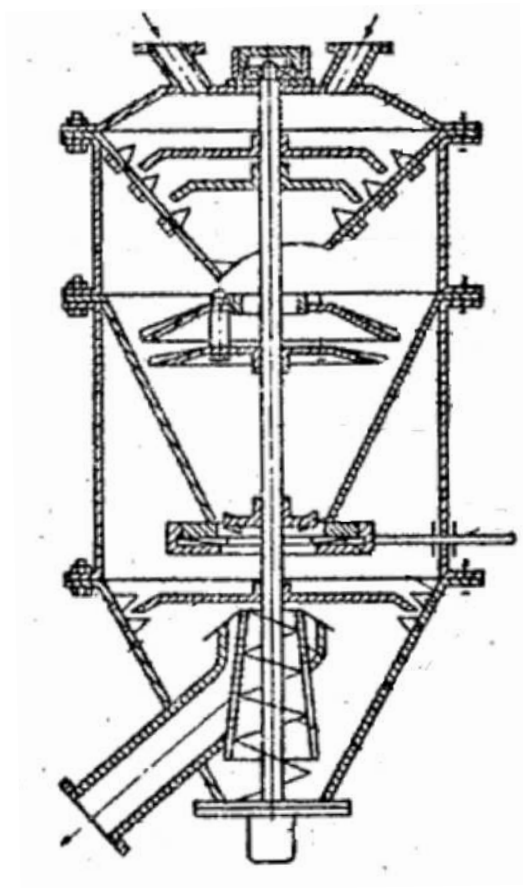
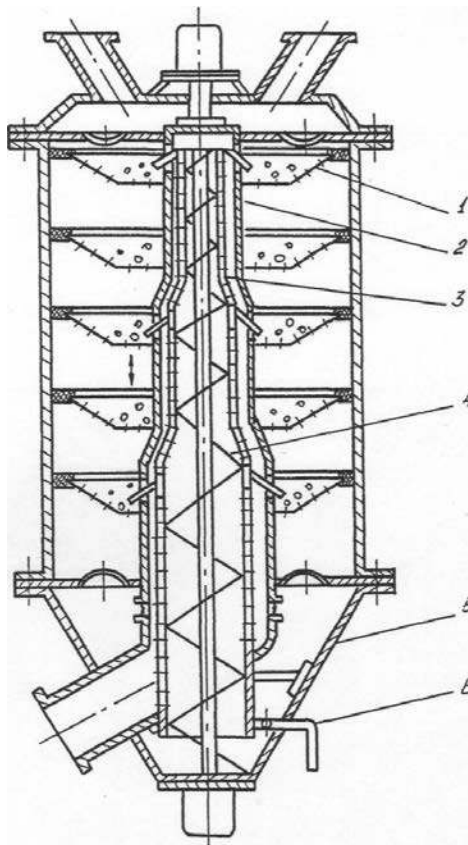


Рисунок 1.7 – Центробежный смеситель

В данной конструкции, за счет регулируемой накопительной способности, хорошо сглаживаются флуктуации входных потоков [89]. Но конструкция этого смесителя не подходит под физико-механические свойства сапропеле-минеральной смеси, так как он предназначен только для очень сухих сыпучих материалов влажностью не более 10%.

По способу воздействия на смесь вибрационные смесители можно разделить на две группы: принудительные и гравитационные.

Для повышения эффективности процесса смешивания в технологическом процессе используют рециркуляцию многократного возврата потока смешиваемых компонентов в камеру смешивания и такой принцип работы заложен в конструкцию вибрационного смесителя с направленной рециркуляцией, защищенный а.с. № 1115790 [88]. Его принципиальная схема показана на рисунке 1.8.



1 – вибрирующие тарелки, 2 – внутренний конус, 3 – перфорированный цилиндр, 4 – шнек, 5 – коническое днище, 6 – перфорированная труба.

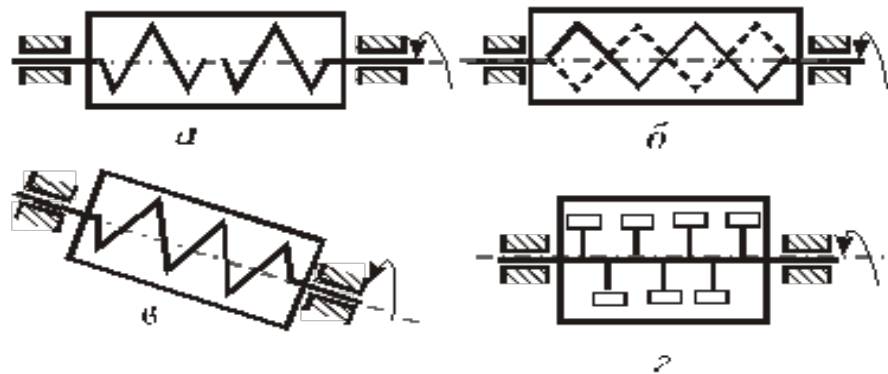
Рисунок 1.8 – Вибрационный смеситель с направленной рециркуляцией.

При технологическом процессе компоненты смеси поступают на вибрирующие тарелки 1, которые за счет вибрации перемещают смесь в коническое днище 5. Потом при помощи шнека и турбулентности смесь перемещается вверх, и через перфорацию попадает в выгрузную горловину. Часть образовавшихся агломератов из частиц, не прошедших через перфорацию, выгружается через выпускные окна для рециркуляции во внутреннюю часть смесителя.

Следует отметить, что, несмотря на привлекательность идей, заложенных в данной конструкции, она сложна в изготовлении. Данная конструкция смесителей имеет громоздкие габариты, неоправданно большие энергозатраты, обеспечивает низкую однородность смеси и не подходит по физико-механическим свойствам сапропеле-минеральной смеси.

Существуют смесители со шнековыми, ленточными и лопаточными

рабочими органами, в которых смешивание частиц происходит при помощи этих перемешивающих устройств в различных направлениях (рис. 1.9). [90]



а – с двумя смешивающими рабочими органами; б – с рабочими органами червячного или шнекового вида; в – с установкой под углом рабочего органа; г – с рабочими органами лопастного вида

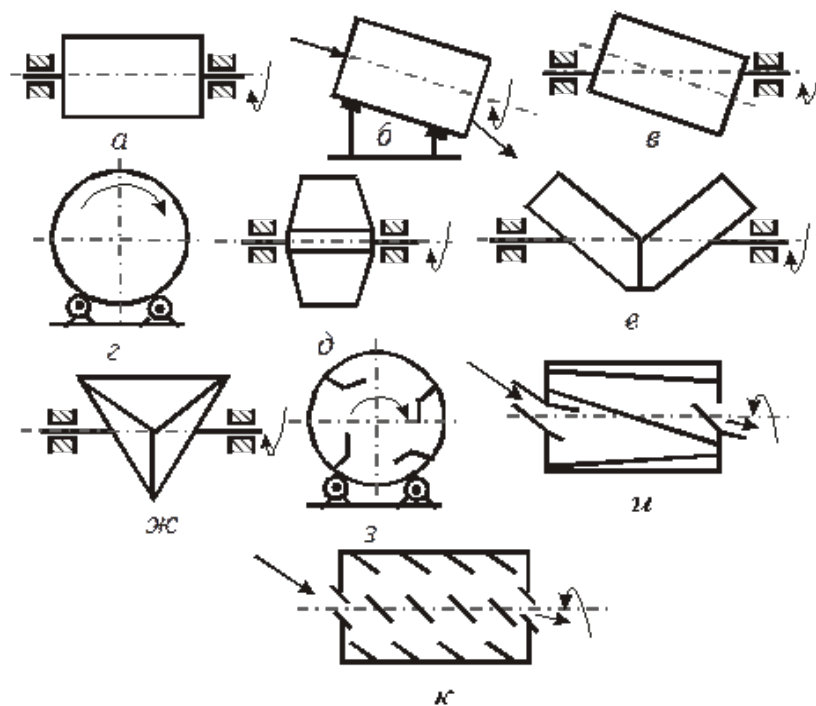
Рисунок 1.9 – Классификация смесителей с внутренними рабочими органами барабанного типа

В смесителях поточного и циклического действия с внутренними рабочими органами шнекового типа перемешивание частиц происходит в следствии разнонаправленного движения компонентов смеси [74].

Есть смесители ленточного типа, в которых смешивание происходит при помощи ленточных спиралей, перемешивающих вдоль вала. Однако, эти смесители предназначены для смешивания компонентов повышенной влажности [75].

Типичными представителями гравитационных смесителей непрерывного действия являются барабанные смесители. В этих агрегатах, за счет вращения корпуса (барабана), образуется так называемый «динамический откос», по которому смешиваемые материалы, будучи поднятыми на определенную высоту скользят слоями и пересыпаются, чем достигается их смешивание. Качество смеси в аппаратах барабанного типа зависит от величины продольного перемешивания и сглаживания флуктуаций входных потоков [76]. С целью интенсификации процесса смешивания и повышения качества смеси смесители оснащаются внутренними устройствами различного вида.

Барабанные смесители применяются для смешивания сухих и увлажненных смесей (рис.1.10).



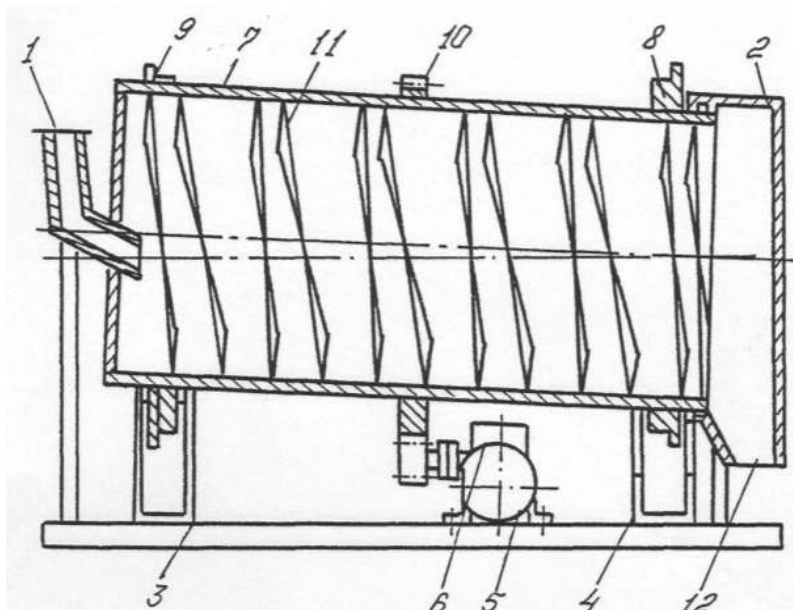
а – с горизонтальной осью вращения; б – наклонного типа; в – с переменной осью вращения; г – с приводом от роликов; д – биконусный; е – V-образного типа; ж – тетраэдрического типа; з – с внутренними лопастями; и – с внутренними ребрами; к – с наклонными лопастями

Рисунок 1.10 – Смесители барабанного типа

Частота вращения рабочего органа барабанного смесителя существенно влияет на однородность смеси. Установлено, что превышение частоты вращения барабана выше оптимального значения центробежные силы отрицательно влияют на хаотическое движение компонентов смеси и нарушают технологический процесс. Также на качество смешивания влияет величина загрузки барабана, она не должна отрицательно влиять на траекторию движения смешиваемых частиц. Если частота вращения будет выше оптимального значения, то частицы не будут перемешиваться, а «прилипнут» к стенкам барабана за счет действия центробежных сил. Чтобы избавиться от этого эффекта внутри барабана устанавливают лопасти или изменяют тип барабана, что помогает добиться трехмерного перемещения частиц смеси.

Барабанный смеситель непрерывного действия, разработанный в

Ярославском политехническом институте представлен на рисунке 1.11 [52].



1 – загрузочная горловина, 2 – разгрузочная воронка, 3, 4 – станина, 5 – электрический двигатель, 6 – редуктор привода, 7 – остов барабана, 8, 9 – опорные катки, 10 – зубчатый венец, 11 – спиральные направляющие, 12 – нижний патрубок.

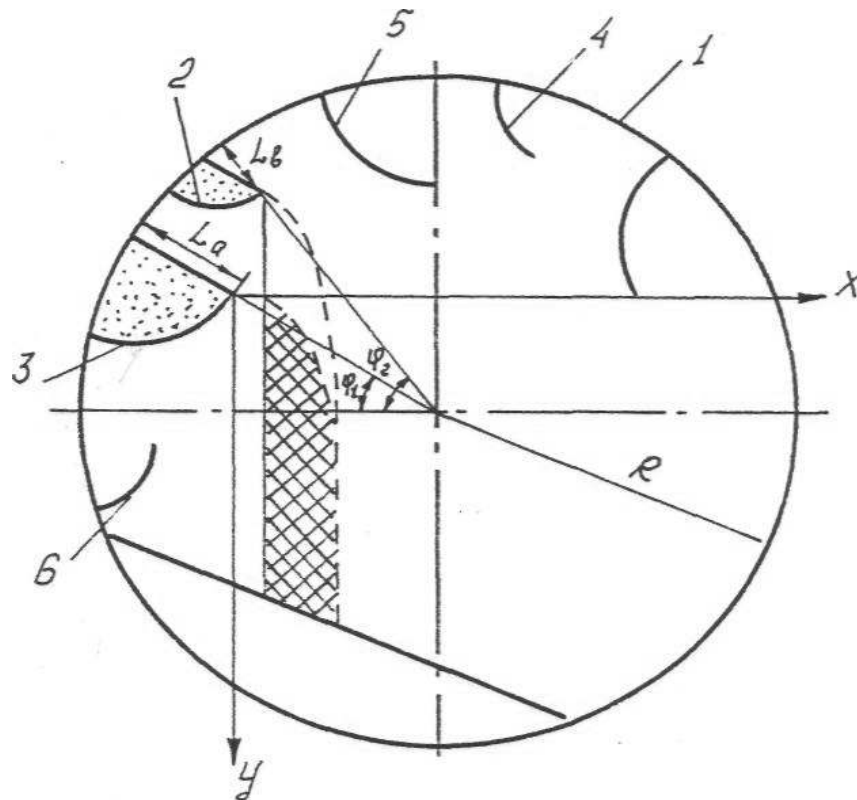
Рисунок 1.11 – Барабанный смеситель

При смешивании в барабанном смесителе компоненты смеси от дозаторов поступают в загрузочную горловину смесителя. Барабан, установленный под углом к горизонту, вращаясь от электрического двигателя с помощью спиральных направляющих перемешивает компоненты и перемещает к разгрузочной воронке. Качество получаемой смеси можно регулировать шагом спиральных направляющих путем изменения толщины слоя материала [77].

Но этот смеситель не подходит для сапропеле-минеральной смеси по физико-механическим свойствам, так как возможно залипание спиральных направляющих.

В Тамбовском институте химического машиностроения (патент SU 1162471 А) разработан смеситель непрерывного действия представленный на рисунке 1.12. Смеситель непрерывного действия состоит из цилиндрического

оства, внутри которого расположены сферические лопатки различной ширины.



1 – оств, 2, 3, 4, 5, 6 – лопатки.

Рисунок 1.12 – Смеситель непрерывного действия

При рабочем процессе вращающийся барабан с помощью лопаток перемещает компоненты смеси до угла падения массы с лопатки. При дальнейшем вращении материал сыпается с лопатки и в свободном падении движется по различным траекториям, которые зависят от момента отрыва, ширины лопаток и физико-механических свойств компонентов. Так как лопатки имеют различную ширину траектории падающих частиц также будут разными, что обеспечивает пересечение вееров материала, падающего с лопастей, то есть дополнительно формируются зоны активного перемешивания (зоны активного перемешивания заштрихованы) [78].

Этот смеситель наиболее подходит по конструкции, но желательно лопатки сделать прямыми, чтобы не было возможности залипания сапропеле-минеральной смеси в области стыка лопаток и стенок барабана для получения более качественной смеси сапропеля с минеральными удобрениями.



Проанализировав преимущества и недостатки всех смесителей непрерывного действия, отметим, что каждый из этих обладает как достоинствами, так и недостатками [54].

Барабанные смесители, в отличие от остальных смесителей, обладают всеми достоинствами смесителей второй группы, а также простой конструкцией, надежностью в эксплуатации, меньшими материалоемкостью и энергозатратами.

Поэтому, в качестве объекта исследования нами был выбран барабанно-лопастной смеситель, обладающий способностью сглаживать флуктуации мгновенных расходов входных потоков за счет направленной организации движения их внутри аппарата. Он подходит под физико-механические свойства сапропеле-минеральной смеси, простой в обслуживании, по сравнению с другими смесителями [103, 104].

### **1.3 Пути совершенствования технологического процесса производства сапропеле-минеральных удобрений и задачи исследования**

Смешивание-это процесс механического перемещения компонентов смеси, в результате которого из заданного количества компонентов получается однородная физическая смесь. Практическая цель смешивания-увеличить использование вносимых в почву питательных веществ, т. е. удобрений [18].

Эффективность технологического процесса смешивания и качество приготовленной смеси зависят от агрегатного состояния перемешиваемых компонентов и конструктивно-технологических параметров смесителя [20, 42].

Также установлено, что эффективность смешивания зависит и от однородности компонентов смеси.

Многие исследователи указывают на существование двух видов смешивания: конвективного и диффузионного [23]. К первому виду относят обычно смешивание за счет усилий сдвига. Хотя в процессе участвуют все виды смешивания, но доминирующая роль зависит от конструкции смесительного аппарата. В смесителях с вращающимся корпусом, а также в некоторых типах

тихоходных смесителей, например, горизонтальных ленточных со стационарным корпусом, преобладает диффузионное смешивание и, наоборот, в стационарных смесителях с явно выраженной циркуляцией материала – конвективное [32].

Вид смешивания определяет скорость процесса и время его завершения. Смесители, в которых преобладает конвективное смешивание, характеризуются менее продолжительным периодом смешивания, необходимым для достижения предельной однородности смеси.

Поточные смесители по технологическому процессу смешивания делятся на: 1) в которых технологический процесс происходит вдоль оси без какого-либо продольного перемешивания частиц. Эти смесители практически безынерционны и требуют точное в дозирование смешиваемых компонентов. Их конструкция должна обеспечивать беспрепятственное перемещение материала и хорошее поперечное смешивание компонентов смеси. Несмотря на конструктивную простоту при незначительных габаритных размерах смесителей первой группы, стоимость таких смесительных установок, в состав которых они входят, слишком высока, а также качество смеси, получаемой этими смесителями, низкое; 2) в которых исходный материал приобретает хаотичное движение внутри смесителя; 3) в которых материал перемещается вдоль оси при наличии некоторого продольного перемешивания частиц. Однако, в отличие от смесителей первой группы, в них присутствует некоторое постепенное продольное перемещение частиц относительно друг друга. В следствии наличия продольного перемешивания частиц смесители второй группы обладают инерционностью входных потоков. Наиболее характерными смесителями этой группы являются барабанные смесители непрерывного действия [30].

Технологический процесс в барабанных смесителях непрерывного действия принципиально отличается от других смесителей. Во-первых, в отличие от установок периодического действия при разовой загрузке исходных компонентов, в этих смесителях процессы загрузки всех компонентов,

смешивания и выгрузки происходят непрерывно в потоке, и необходимая однородность смеси достигается без повторного прохождения компонентов через рабочую полость смесителя [82]. Еще одной отличительной особенностью барабанных смесителей является хаотичное перемещение компонентов внутри смесителя [51,85].

Движение компонентов смеси в барабанном смесителе регулируется силами трения и центробежными силами. Под действием этих сил возникают два основных потока: перемещение и перемешивание компонентов в плоскости вращения и вдоль оси барабана [140].

Анализ процесса смешивания в барабанном смесителе показывает, что характер движения частиц смеси внутри камеры смешения аналогичен режимам движения материала в шаровых мельницах, в смесителях барабанного типа, используемых в химической промышленности, вращающихся печах, а также во вращающихся цилиндрах и триерах [79, 146].

Принцип работы барабанного смесителя основан на том, что компоненты смеси, непрерывно подаваемые загрузочным конвейером в смесительную камеру, под действием сил трения и центробежных сил поднимаются по круговой траектории на определенную высоту, а затем, отрываясь от стенки барабана, устремляются вниз, перераспределяясь и смешиваясь в свободном падении, из-за разницы физико-механических свойств компонентов и разной длины траектории отдельных слоев потока смеси [79, 93].

Смешивание сапропеля с минеральными удобрениями в барабанном смесителе непрерывного действия является сложным, недостаточно изученным физико-технологическим процессом. Скорость и качество смешивания в смесительных установках барабанного типа зависят от физико-механических свойств смешиваемых компонентов, конструктивных и технологических параметров смесительного устройства [79, 133, 134].

Следует отметить, что процесс смешивания всегда сопровождается процессом частичного расслоения полученной смеси – сегрегацией [121]. Поэтому практически невозможно получить сапропеле-минеральную смесь, в

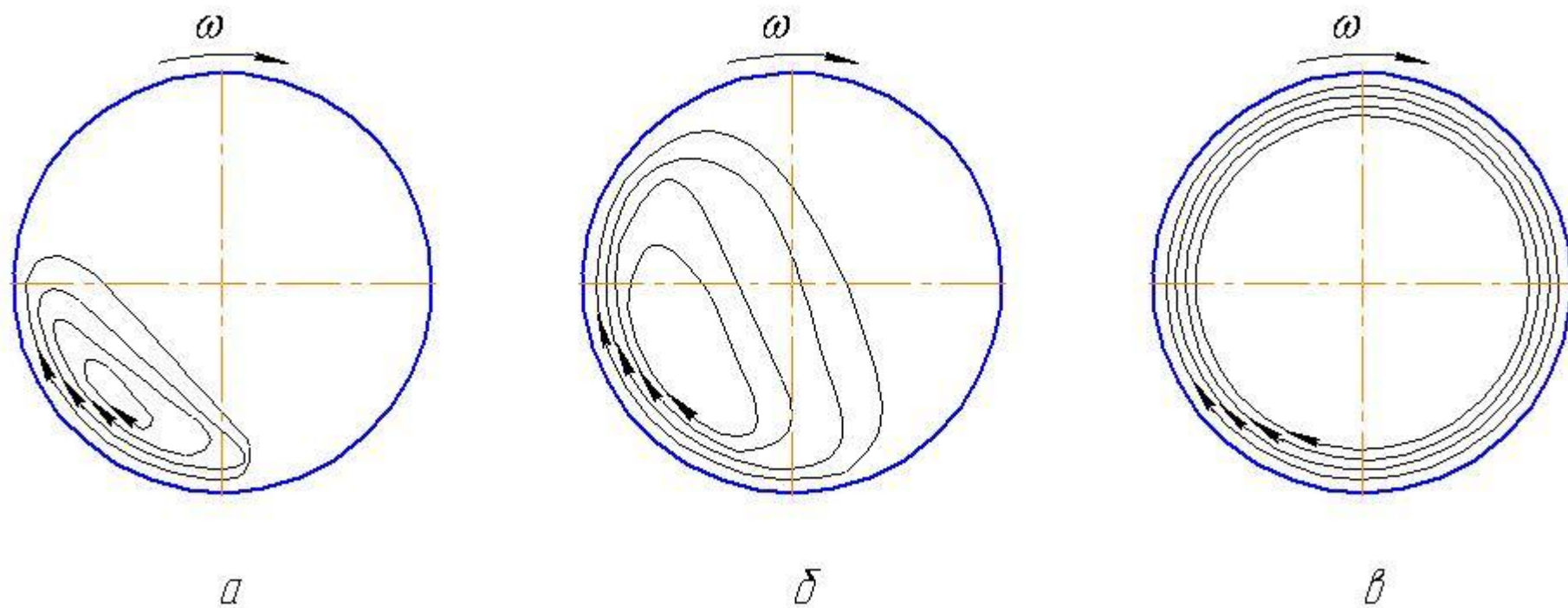
которой расположение частиц компонентов было бы полностью упорядоченным. Фактически получается статически произвольная смесь, которая отличается от идеальной [79].

При относительно низкой скорости вращения барабана  $n < 0,6 n_{кр}$  ( $n_{кр}$  - критическая скорость вращения) компоненты смеси перемещаются в направлении вращения на определенный угол (рис. 1. 13 а) и при той же скорости вращения барабана под действием силы тяжести скатываются параллельными слоями по наклонной поверхности, где снова попадают в поднимающийся слой [50].

При увеличении скорости вращения барабана  $n = 0,6 n_{кр}$  возникает "катарактный" режим перемещения материала. В этом случае угол поворота груза увеличивается, и частицы потока поднимаются все выше и выше, а затем в определенной точке, называемой точкой разделения, они покидают круговые траектории и падают вниз по траектории, близкой к параболической (рис. 1.13 б) [61].

При дальнейшем увеличении частоты вращения смесительной камеры  $n > n_{кр}$  смесь под действием центробежных сил прижимается к внутренней поверхности (рис. 1.13в) и начинает вращаться вместе с барабаном.

Анализ характера движения материала в барабанном смесителе показывает, что наиболее эффективным, с точки зрения смешения компонентов, является «катарактный» режим работы, при котором частицы смеси движутся вначале по круговым траекториям, а затем переходят на параболические, перераспределяясь при этом в потоке и интенсивно смешиваясь друг с другом [63, 79].



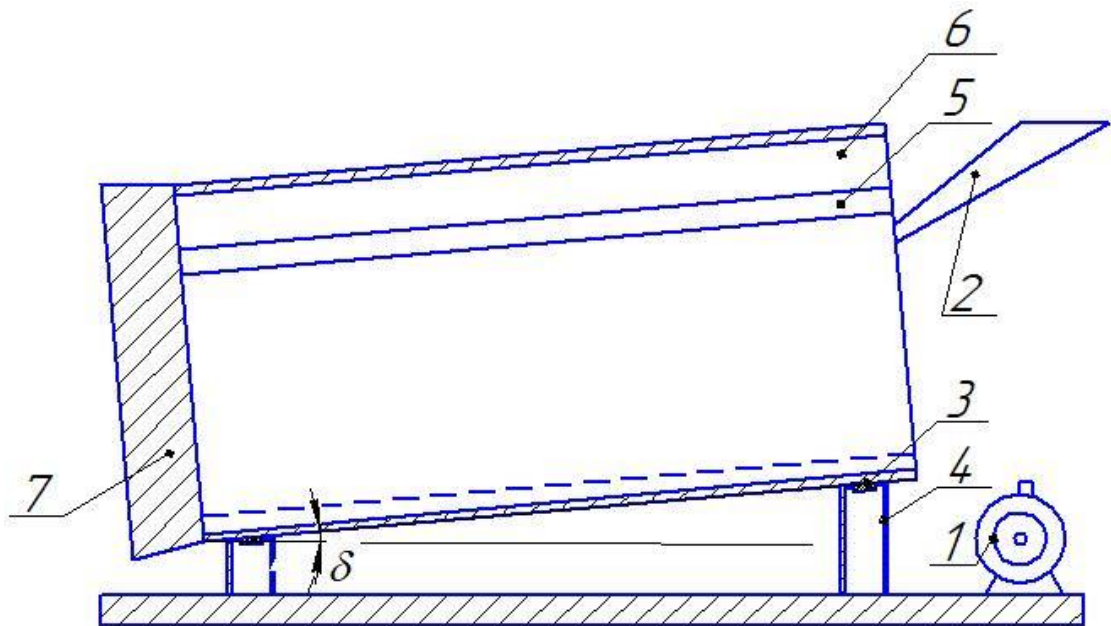
а) –  $n < 0,6 n_{кр}$

б) –  $n \geq 0,6 n_{кр}$

в) –  $n > n_{кр}$

Рисунок 1.13 – Движение сафопеле-минеральной смеси в барабанном смесителе

Учитывая специфические свойства сапропеля и минеральных удобрений целесообразно для увеличения производительности процесса смешивания и предотвращения образования комков получаемой смеси устанавливать на внутренней поверхности барабана лопасти, позволяющие послойно разрушать общий поток сапропеле-минеральной смеси и способствующий более эффективному протеканию процесса смешивания (рис. 1.14) [51,67].



1 – электродвигатель, 2 – загрузочное устройство, 3 – опорные ролики, 4 – установочная рама, 5 – лопасти, 6 – барабан, 7 – выгрузное устройство.

Рисунок 1.14 – Барабанно-лопастной смеситель

Однако наличие лопастей внутри барабана оказывает существенное влияние на характер движения смешиваемых частиц внутри смешивающей камеры и распределение сил, действующих на частицы материала во вращающемся барабане [51,74]. В этом случае имеющиеся в литературе для гладкостенных барабанов аналитические зависимости по определению некоторых параметров барабана и режимов его работы оказываются неприемлимыми [79]. Поэтому возникает необходимость теоретического обоснования основных конструктивно-технологических параметров подобного барабанного смесителя, его производительности и энергоемкости процесса смешивания.

Задача выбора оптимальной конструкции смесителя достаточно сложна её выполнение возможно на основе научного анализа взаимодействия сапропеля с элементами рабочих органов смесителя.

Научно обоснованный подход к решению данной проблемы позволит обосновать конструкцию рабочих органов смесителя и технологический процесс смешивания сапропеля с минеральными удобрениями. С этой целью необходимо сконструировать рабочий орган для подобранного смесителя, обосновать его конструктивные размеры и технологические параметры при которых, на выходе получится смесь сапропеля с минеральными удобрениями с достаточной степенью качества.

Для комплексного решения данной проблемы нами разработана методологическая схема исследования, обеспечивающая достижение поставленной цели: совершенствование технологического процесса производства сапропеле-минеральных удобрений путем обоснования конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Методологическая схема исследования



#### **1.4 Цель и задачи исследований**

Целью дальнейших исследований является – совершенствование технологического процесса смешивания сапропеле-минеральных удобрений с обоснованием конструктивных и технологических параметров смесителя.

Методологическая схема (рис.1.15) включает в себя необходимые и достаточные условия, анализ которых позволяет сформулировать основные задачи исследований:

6. Изучить технологии производства и использования сапропелевых удобрений и выявить рациональные пути совершенствования технологического процесса смешивания.

7. Получить аналитические зависимости для определения конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя непрерывного действия.

8. Получить математические модели процесса смешивания сапропеле-минеральных компонентов в барабанном смесителе.

9. Обосновать рациональные параметры и режимы работы барабанного смесителя для получения однородности смеси.

10. Провести экспериментальные испытания и дать технико-экономическую оценку полученных результатов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

### 2.1 Теоретическое обоснование технологического процесса смешивания сапропеле-минеральной смеси.

Смешивание является одной из наиболее значимых и энергоёмких операций в технологии производства сапропеле-минеральных удобрений. Поэтому, с учётом проведения дальнейших исследований данного процесса рассмотрим более подробно технологический процесс смешивания в барабанном смесителе [28].

Прежде чем приступить к выводу основных зависимостей, рассмотрим траекторию отдельной частицы и систему действующих на нее сил в гладкостенном барабане (рис. 2.2) [35, 36, 38].

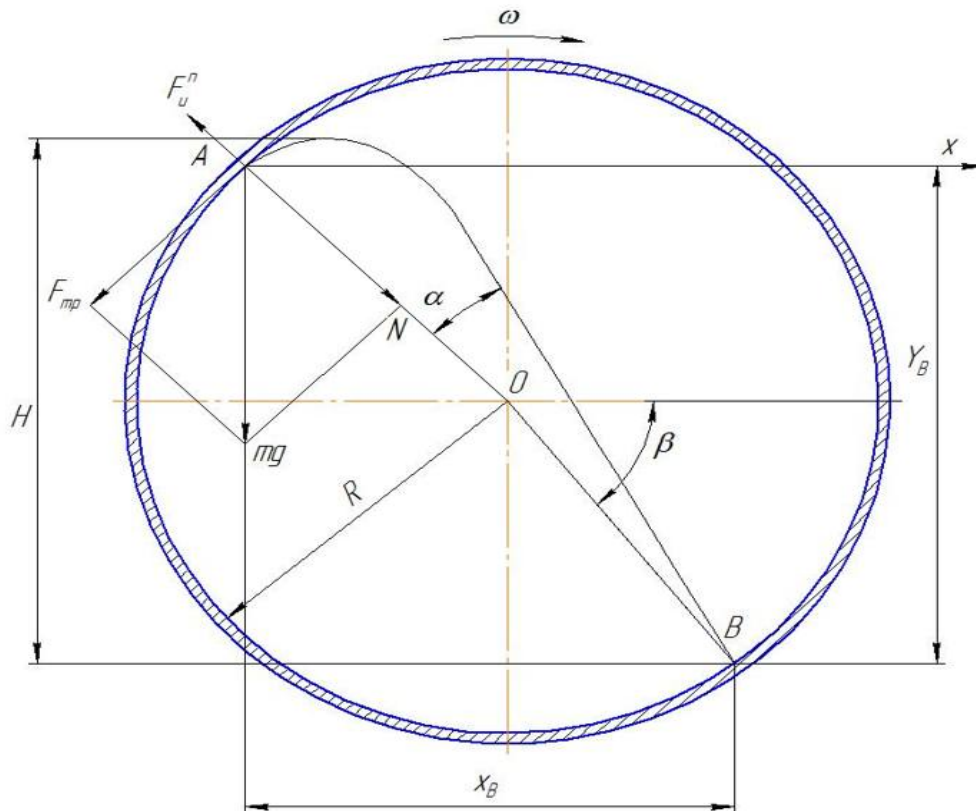


Рисунок 2.2 - Траектория отдельной частицы и система действующих на нее сил в гладкостенном барабане.

Как видно из рисунка 2.2 на частицу смеси действуют силы [55]:

Сила тяжести частицы –  $mg$

Центробежная сила инерции –  $F_u^n$ .

Из анализа действующих на частицу сил можно записать условие отрыва частицы [57]:

$$mg \cdot \cos \alpha \geq m \cdot \omega^2 \cdot R, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  - угол отрыва частиц, град;

$\omega$  - угловая скорость вращения барабана,  $c^{-1}$ ;

$R$  – радиус барабана, м.

Если принять  $\omega = \pi n / 30$ ,  $g = 10$  м/с, тогда

$$\begin{aligned} mg \cdot \cos \alpha &\geq m \cdot R \frac{\pi^2 \cdot n^2}{30^2} \\ 10 \cdot \cos \alpha &\geq R \frac{\pi^2 \cdot n^2}{30^2} \\ n &\leq \sqrt{\frac{10 \cdot 30^2 \cos \alpha}{\pi^2 \cdot R}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Таким образом, наивыгоднейшая частота вращения барабана равна [62]:

$$n = \frac{30}{\sqrt{R}} \cdot \sqrt{\cos \alpha}, \text{ мин}^{-1}. \quad (2.3)$$

В случае, когда  $\alpha = 0$ , критическая частота вращения барабана определяется по формуле [64, 65]:

$$n_{кр} = \frac{30}{\sqrt{R}}, \text{ мин}^{-1}. \quad (2.4)$$

Если принять точку  $A$  за начало координат, то высота падения частицы от точки  $A$  до точки  $B$  равна

$$y_B = -4 R \sin^2 \alpha \cos \alpha. \quad (2.5)$$

Длина траектории частицы внутри смешивающей камеры будет наибольшей в том случае, когда будет иметь максимальное значение высота  $H$  или ордината точки  $B - y_B$  [100, 101]. Приравняв первую производную уравнения (2.6) нулю, можно найти этот максимум, а из полученного выражения определить конкретное значение наивыгоднейшего угла отрыва [110, 111].

$$\dot{y}_B = V_B = -4R(\sin^2 \alpha' \cos \alpha + \cos \alpha' \sin^2 \alpha), \quad (2.6)$$

Тогда, взяв производную и приравняв ее нулю, а также сделав преобразования получим [107]:

$$V_B = -4R \sin \alpha (2 - \operatorname{tg}^2 \alpha) = 0, \quad (2.7)$$

$$2 - \operatorname{tg}^2 \alpha = 0, \text{ следовательно, } \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2}, \text{ тогда } \alpha = 54^\circ 44'. \quad (2.8)$$

Взаимосвязь угла отрыва  $\alpha$  и угла падения  $\beta$  выражается следующим соотношением [113]:

$$\beta = 3\alpha - 90. \quad (2.9)$$

Следует отметить, что при движении внутри барабана потока материала определенной толщины наилучшим углом отрыва для каждого слоя, движущегося по круговой траектории с различным радиусом, будет угол равный  $54^\circ 44'$ , независимо от расстояния рассматриваемого слоя потока до оси барабана [123, 124, 129].

## **2.2 Теоретическое обоснование основных параметров барабанного смесителя с лопастями на внутренней стенке.**

Основными конструктивными и технологическими параметрами барабанного смесителя непрерывного действия с лопастями на внутренней стенке барабана являются габаритные размеры барабана, его частота вращения, коэффициент заполнения цилиндра смесителя сапропеле-минеральной смесью, производительность в зависимости от угла установки лопасти вдоль оси барабана и потребляемая мощность [1].

Для определения основных параметров смесителя с лопастями на внутренней стенке барабана [51] рассмотрим схему действия сил на частицу, находящуюся на лопасти (рис. 2.3). При этом примем в виде допущения, что поток внутри смешивающей камеры однороден по составу и подача его в барабанный смеситель при установившемся режиме работы равномерна.

Анализ распределения сил, действующих на частицу смеси, находящуюся на лопасти барабанного смесителя, показывает, что перемещение частицы будет происходить в направлении действия силы тяжести, то есть от периферии к центру вращения. То есть движение частиц смеси будет направлено внутрь смешивающей камеры [22].

Для обоснования оптимальной частоты вращения барабана рассмотрим систему сил, действующих на частицу смеси в точке отрыва ее от стенки барабана [79].

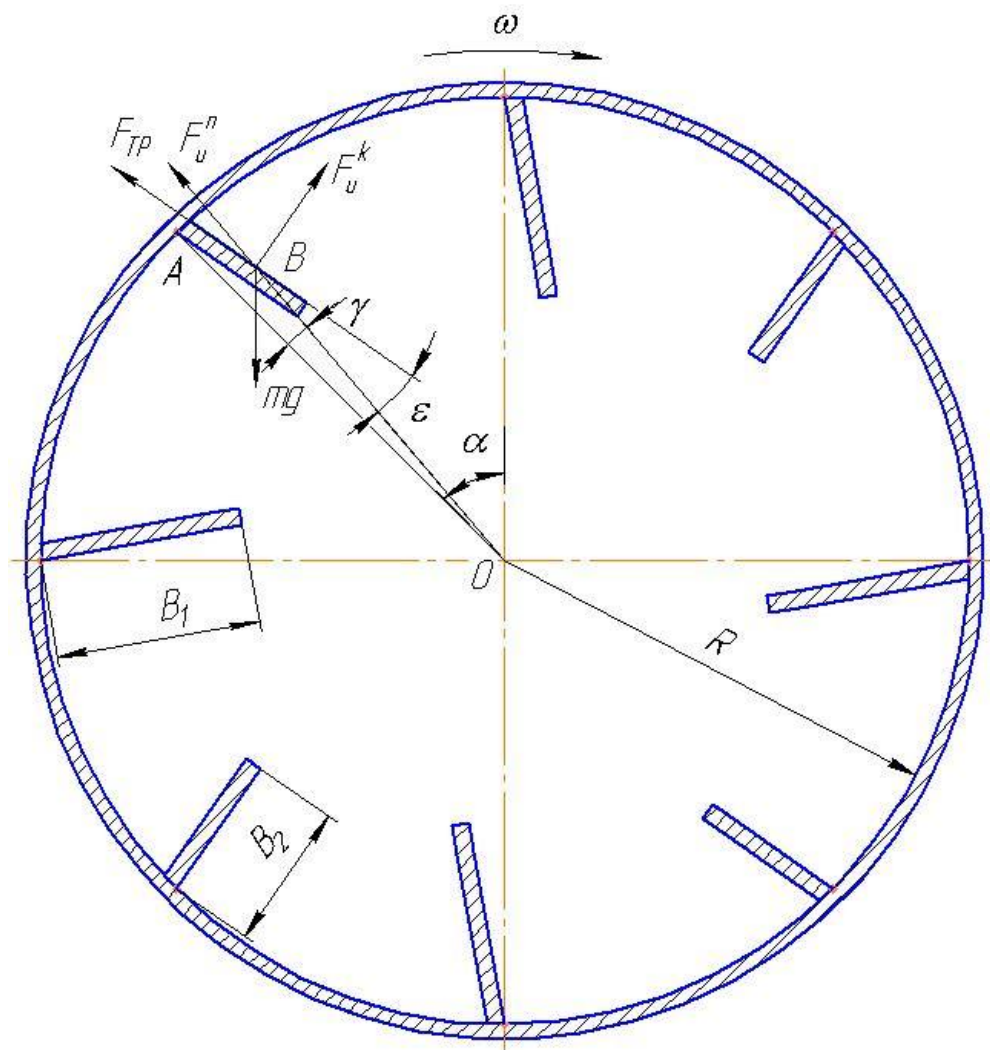


Рисунок 2.3 - Схема действия сил на частицу, находящуюся на лопасти.

Как видно из треугольника  $ABO$  (рис. 2.3), при отрыве частицы смеси от стенки барабана существует зависимость между углами  $\gamma$  и  $\varepsilon$ :

$$\sin \varepsilon = \frac{R \sin \gamma}{\sqrt{x^2 + R^2 - 2xR \cos \gamma}}, \quad \cos \varepsilon = \sqrt{\frac{x(x - 2R \cos \gamma) + R^2 \cos^2 \gamma}{x^2 + R^2 - 2xR \cos \gamma}}, \quad (2.10)$$

где  $x$  – расстояние от стенки барабана до исследуемой точки, м [79].

На частицу смеси при сходе ее с лопасти действуют следующие силы:

$mg$  - сила тяжести частицы,

$F_u^n$  - центробежная сила инерции ( $F_u^n = a^n \cdot m = m \cdot \omega^2 \cdot r_x$ ),

$F_u^k$  - Кориолисова сила инерции ( $F_u^k = a^k \cdot m = 2 \cdot m \cdot \omega V_r$ ),

$F_{тр}$  - сила трения.

Из анализа действующих на частицу сил можно записать условие схода частицы смеси с лопасти барабана:

$$mg \cos(\alpha + \varepsilon) \geq m \cdot \omega^2 \cdot r_x \cdot \cos \varepsilon + f (mg \sin(\alpha + \varepsilon) - m \cdot \omega^2 \cdot r_x \cdot \sin \varepsilon - 2 \cdot m \cdot \omega V_r), \quad (2.11)$$

где  $m$  – масса частицы смеси, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V_r$  – относительная линейная скорость движения частицы смеси по длине лопасти, м/с;

$f$  – коэффициент трения;

$r_x$  – расстояние от оси барабана до частицы смеси, м [79].

Как отмечалось ранее, наиболее благоприятные условия для процесса смешивания компонентов сапропеле-минеральной смеси будут при вполне определенном значении угла отрыва  $\alpha$ . Обеспечение схода частиц каждого слоя с лопасти при оптимальном значении угла отрыва, а также обеспечение лучшего перемешивания за счет увеличения времени до полного схода частиц достигается путем наклона лопасти на угол  $\gamma$  относительно своего радиального направления [39, 79].

Начало сбрасывания частиц смеси с лопасти происходит при равенстве правой и левой части уравнения, то есть

$$mg \cos(\alpha + \varepsilon) = m \omega^2 R \cos \varepsilon + f (mg \sin(\alpha + \varepsilon) - m \omega^2 R \sin \varepsilon - 2m \omega V_r), \quad (2.12)$$

Проведя необходимые преобразования в уравнении (2.12) получим полное неприведенное квадратное уравнение, из которого можно определить оптимальное значение частоты вращения барабана, при котором начинается сход частиц смеси с лопасти [40,79]:

$$(f \cdot R \sin \varepsilon - R \cos \varepsilon) \omega^2 + 2f \cdot V \omega + g \cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - g \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon) = 0 \quad (2.13)$$

Решая полученное уравнение относительно угловой скорости  $\omega$ , получим выражение:

$$\omega = -\frac{f \cdot V}{R(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)} + \sqrt{\frac{f^2 V^2}{R^2 (f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)^2} - \frac{g \cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - g \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon)}{R(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)}}. \quad (2.14)$$

Второй корень уравнения (2.13), содержащий знак «минус» перед радикалом, соответствует случаю схода частиц при тех же значениях углов  $\alpha_x$  и  $\varepsilon_x$  с внутренней стороны лопасти, считая по направлению вращения смесительной камеры [79].

Таким образом, частота вращения барабана зависит от коэффициента трения, угла наклона лопасти, угла отрыва, обратно пропорциональна радиусу барабана и прямо пропорциональна скорости движения частицы смеси по лопасти [62,79].

Для барабана с лопастью, установленной без наклона относительно своего радиального направления ( $\varepsilon = 0$ ) формула (2.14) примет вид:

$$\omega = \frac{f \cdot V}{R} + \sqrt{\frac{f^2 V^2}{R^2} - \frac{g(\cos \alpha - f \sin \alpha)}{R}}. \quad (2.15)$$

Исходя из выражения (2.14) оптимальную частоту вращения барабана, для момента начала схода частиц смеси, расположенных на внешнем от стенки барабана краю лопасти, когда  $V_e = 0$ , можно определить по формуле [64,79]:



$$\omega = \sqrt{\frac{g \cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - g \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon)}{R(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)}}. \quad (2.16)$$

Для барабана с радиально установленной лопастью ( $\varepsilon = 0$ ) формула (2.16) запишется в виде:

$$\omega = \sqrt{\frac{g(\cos \alpha - f \sin \alpha)}{R}}. \quad (2.17)$$

Из анализа полученной зависимости (2.14) видно, что для гладкостенного барабана без учета сил трения, когда  $f = 0$  и  $\varepsilon = 0$ , формула (2.14), если принять  $\pi^2 \cong g$  приводится к известному выражению (2.5) [66].

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{R}}; \quad n_{кр} = 30 \sqrt{\frac{\cos \alpha}{R}}.$$

С целью определения условий зависимости качества смеси от конструктивно-технологических параметров составим дифференциальное уравнение движения частицы смеси по лопасти рассматривая при этом плоскую систему сил [79]:

$$m\ddot{x} = mg \cos(\alpha + \varepsilon) - m\omega^2 r_x \cos \varepsilon - f[mg \sin(\alpha + \varepsilon) + m\omega^2 r_x \sin \varepsilon - 2m\omega V_r] \quad (2.18)$$

Выполнив преобразования, получим выражение:

$$m\ddot{x} - mg \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon + mg \sin \alpha \cdot \sin \varepsilon + m\omega^2 r_x \cos \varepsilon + fmg \sin \alpha \cos \varepsilon + \\ + fmg \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon + fm\omega^2 r_x \sin \varepsilon - 2m\omega V_r = 0 \quad (2.19)$$

Продифференцировав выражение (2.19) по  $d\varepsilon$  получим:

$$mg \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon + mg \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon - m\omega^2 r_x \sin \varepsilon - fmg \sin \alpha \sin \varepsilon + \\ + fmg \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon + fm\omega^2 r_x \cos \varepsilon = 0 \quad (2.20)$$

Из рисунка 2.3 можно установить, что

$$\begin{cases} r_x \cos \varepsilon = R \cos \varepsilon - x; \\ r_x \sin \varepsilon = R \sin \varepsilon. \end{cases} \quad (2.21)$$

Разделив каждый член уравнения на  $m \cdot \cos \varepsilon$ , с предварительной заменой  $r_x \cos \varepsilon$  и  $r_x \sin \varepsilon$ , и выразив из этого выражения угол  $\varepsilon$  получим:

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{g(\sin \alpha - f \cos \alpha) - f \omega^2 R}{\omega^2 R - g(\cos \alpha - f \sin \alpha)}, \quad (2.22)$$

Из уравнения (2.22) следует, что величина угла  $\varepsilon$  зависит от коэффициента трения смеси о лопасть  $f$ , радиуса барабана  $R$ , угловой скорости вращения  $\omega$  и угла отрыва  $\alpha$  [86].

Для определения необходимой ширины лопасти  $b$  и относительной скорости движения  $V_e$  воспользуемся уравнением (2.18). Преобразовывая это уравнение с учетом выражения (2.21), получим неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка [97]:

$$\ddot{x} - 2f\omega \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = g \cos(\alpha + \varepsilon) - fg \sin(\alpha + \varepsilon) - \omega^2 R(\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon), \quad (2.23)$$

где  $\ddot{x}, \dot{x}, x$  – соответственно ускорение, скорость и величина перемещения частицы по лопасти.

Найдем общее решение уравнения (2.23):

$$\ddot{x} - 2f\omega \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = 0. \quad (2.24)$$

Так как все коэффициенты уравнения (2.24) постоянны, то его общий интеграл определяется с помощью характеристического уравнения, корни которого равны [51]:

$$\theta_1 = \omega \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} ; \quad \theta_2 = \omega \frac{\sin \varphi - 1}{\cos \varphi}$$

где  $\varphi$  – угол трения сапропеле–минеральной смеси о материал лопасти.

Общее решение дифференциального уравнения (2.23) запишется в виде:

$$x_1 = C_1 e^{\theta_1 t} + C_2 e^{\theta_2 t} . \quad (2.25)$$

Правую часть уравнения (2.23) можно представить в общем, виде как:

$$x_2 = A \sin \omega t + B \cos \omega t ; \quad (2.26)$$

где  $\omega t = \alpha$  – угол поворота лопасти, соответствующий перемещению частицы по лопасти [51] на пути  $x$  за время  $t$ .

Для нахождения частного решения уравнения (2.23) необходимо взять первую  $\dot{x}_2$  и вторую  $\ddot{x}_2$  производные выражения (2.26) и подставить полученные значения  $\ddot{x}_2, \dot{x}_2, x_2$  в уравнение (2.23).

Первая и вторая производные уравнения (2.26) равны:

$$\dot{x}_2 = A \omega \cdot \cos \omega t - B \omega \cdot \sin \omega t ;$$

$$\ddot{x}_2 = -A \omega^2 \cdot \sin \omega t - B \omega^2 \cdot \cos \omega t .$$

После подстановки и соответствующих преобразований, получим:

$$\begin{aligned} & (2f\omega^2 B - 2\omega^2 A) \sin \omega t - (2f\omega^2 A + 2\omega^2 B) \cos \omega t - \omega^2 C = \\ & = -g(\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon) \sin \omega t + g(\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) \cos \omega t - \omega^2 R(\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Приравнивая в полученном уравнении постоянные коэффициенты обеих частей равенства, получим:

$$A = -\frac{g \sin \varepsilon}{2\omega^2}; \quad B = -\frac{g \cos \varepsilon}{2\omega^2}; \quad C = R(\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon).$$

Общее решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$x = x_1 + x_2 = C_1 e^{\theta_1 t} + C_2 e^{\theta_2 t} - \frac{g \sin \varepsilon}{2\omega^2} \sin \omega t - \frac{g \cos \varepsilon}{2\omega^2} \cos \omega t + R(\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon) \quad (2.28)$$

Продифференцировав уравнение (2.28) получим значение относительной скорости движения частиц [51]:

$$V_e = \dot{x} = \theta_1 C_1 e^{\theta_1 t} + \theta_2 C_2 e^{\theta_2 t} - \frac{g \sin \varepsilon}{2\omega} \cos \omega t + \frac{g \cos \varepsilon}{2\omega} \sin \omega t \quad (2.29)$$

Постоянные коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  в уравнениях (2.28) и (2.29) определяются из условия, когда в начальный момент времени  $t$  равна нулю, а, следовательно, перемещение частиц по лопасти и их относительная скорость также равны нулю. Тогда получим [108]:

$$C_1 = \frac{g \cos \varepsilon (2\omega - \theta_2) + 2\omega^2 R \theta_2 (\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon)}{2\omega^2 (\theta_1 - \theta_2)}; \quad (2.30)$$

$$C_2 = \frac{g \cos \varepsilon (\theta_1 - 2\omega) - 2\omega^2 R \theta_1 (\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon)}{2\omega^2 (\theta_1 - \theta_2)}. \quad (2.31)$$

Исходя из условий обеспечения качества смешивания с учетом физико-химических свойств смешиваемых материалов величина заполнения смесителя должна отвечать следующим условиям [79,125, 126]:

- обеспечивать наибольшее количество пересыпаний смешиваемых материалов при меньших значениях длины барабана и поступательной скорости движения массы в нем;

- обеспечить наибольшую длину траектории или дальность полета частиц смеси после отрыва их от стенки барабана и перехода с круговой траектории движения на параболическую;

- способствовать увеличению коэффициента заполнения межлопастного пространства в смесителях с лопастями на внутренней стенке барабана;

- обеспечить наибольшую производительность смесителя при наименьшем расходе энергии [79].

Из анализа схемы работы смесителя видно, что чем меньше площадь поперечного сечения потока массы в барабане, тем чаще компоненты смеси будут попадать в слой, захватываемый стенкой барабана или лопастью, то есть в единицу времени количество пересыпаний, а, следовательно, и интенсивность перемешивания возрастут [79,110].

С увеличением коэффициента заполнения  $\psi$ , а следовательно, и площади поперечного потока может наступить момент, когда частицы смеси, оторвавшись от стенки барабана и перешедшие с круговой траектории на параболическую, упадут не на стенку барабана, а на сапропеле–минеральную массу [79,112]. В этом случае продолжительность полета частиц смеси, и длина траектории резко уменьшаются, а, следовательно, интенсивность процесса смешивания снизится.

Во время работы смесителя при смешивании сапропеля с минеральными удобрениями, масса незахваченная лопастями, должна обеспечивать наилучшее заполнение межлопастного пространства и не допускать преждевременного выноса оттуда материала. Это способствует улучшению качества перемешивания и увеличению пропускной способности смесителя [114].

Выполнение условий по обеспечению качественного перемешивания компонентов смеси при меньших значениях радиуса барабана, его длины и

оптимальной пропускной способности способствует уменьшению энергозатрат [79].

Проведенный анализ показывает, что зависимость величины  $\psi$  от большего количества параметров не позволяет получить исчерпывающего аналитического выражения для ее определения, поэтому ее находят экспериментально.

Из опыта эксплуатации барабанных сушилок и смесительных установок известно, что наибольшая производительность при наименьшем расходе энергии и высоком качестве смешивания достигается при  $\psi$  равном от 0,08 до 0,32 [79].

### **2.3 Производительность смесителя с лопастью, расположенной на внутренней стенке барабана под углом по отношению к радиальному направлению**

Смеситель в технологической линии производства сапропеле–минеральных удобрений находится на завершающем этапе, и его производительность задается производительностью всей линии, состоящей из дозаторов–накопителей отдельных компонентов смеси. Следовательно, смеситель должен обеспечивать пропуск через себя сапропеле–минеральной массы, собранной со всей линии, улучшая ее качество за счет смешивания [62,79].

Для обеспечения непрерывной работы смесителя [79] и приготовления сапропеле–минеральной смеси высокого качества необходимо соблюдать условие [64]:

$$Q = Q_3 \text{ или } Q \geq Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \text{ или } Q \geq \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.32)$$

где  $Q$ ,  $Q_3$  – соответственно производительность смесителя и линии загрузки;

$Q_1, Q_2 \dots Q_n$  – производительность отдельных дозаторов–накопителей.

Производительность смесителя в общем случае равна:

$$Q = F_{\sigma} \cdot \psi \cdot \rho \cdot V_n \text{ или } Q = \pi \cdot R^2 \cdot \psi \cdot \rho \cdot V_n, \quad (2.33)$$

где  $F_{\sigma}$  – поперечное сечение барабана,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность сапропеле–минеральной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

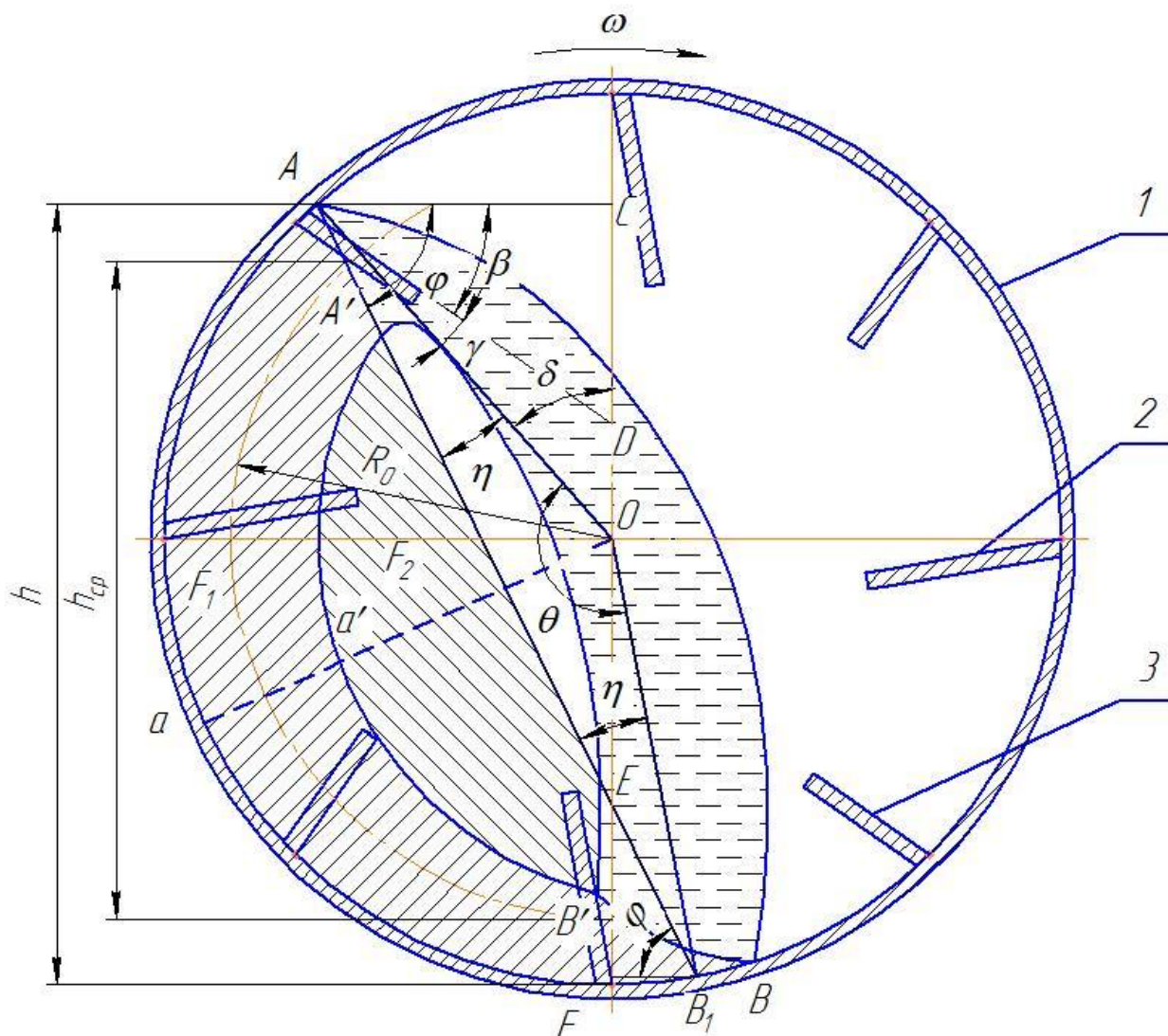
$V_n$  – поступательная скорость массы в барабане,  $\text{м}/\text{с}$ .

Следовательно, для определения производительности смесителя с учетом выражения (2.33) необходимо определить коэффициент заполнения  $\psi$ , подобрать необходимый радиус барабана  $R$  и определить скорость поступательного движения массы  $V_n$ , которая определяется влиянием лопастей и других параметров [79, 97].

Однако следует отметить, что на их величину накладываются условия обеспечения качества смешивания компонентов смеси с учетом ее физико–механических свойств.

Исходя из изложенного, рассмотрим смеситель, у которого лопасть расположена под углом на внутренней стенке барабана. Характерной особенностью [79] процесса смешивания сапропеля с минеральными удобрениями является то, что для получения смеси высокого качества необходимо произвести большое количество пересыпаний, перемешиваний и т.д. Выполнение этого условия возможно за счет увеличения времени пребывания или за счет уменьшения толщины слоя смешиваемой массы, захватываемого стенкой барабана и лопастью. Перемещение смешиваемого продукта в продольном направлении барабана в таких смесителях осуществляется за счет наклона его продольной оси в сторону выгрузки на угол  $\delta$  [79, 102].

Для определения производительности смесителя рассмотрим схему, приведенную на рисунке 2.4.



1 – барабан, 2 – четная лопасть, 3 – нечетная лопасть.

Рисунок 2.4 – Технологический процесс смешивания в барабанном смесителе.

Из схемы видно, что при вращении барабана с частотой  $n < n_{кр}$  поперечное сечение потока смешиваемого материала в барабане с достаточной степенью точности можно представить в виде сегмента  $AaB_1$ , у которого хорда  $AB_1$  проходит к горизонту под углом  $\varphi$ , равным углу обрушения материала [108].

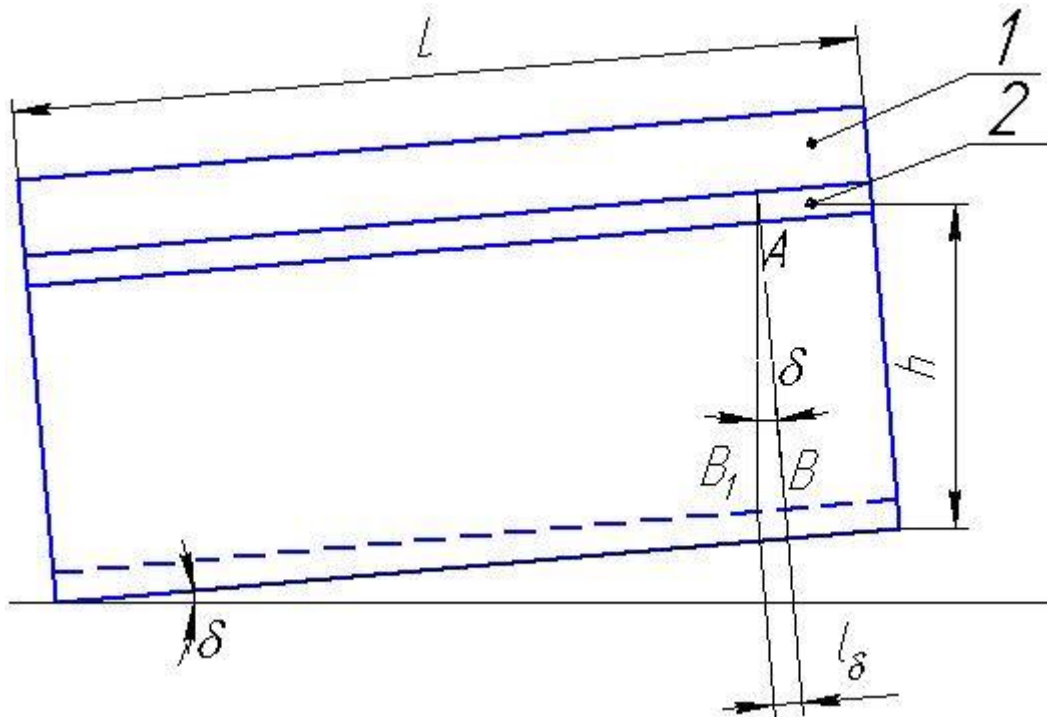
Площадь сечения сегмента  $F$  равна:

$$F = \pi R^2 \psi. \quad (2.34)$$



Лучи –  $OA$  и  $OB_1$  равные по длине радиусу барабана, ограничивают площадь сегмента, образуя центральный угол  $\theta$ .

Для определения скорости перемещения смешиваемой массы в продольном направлении барабана  $V_n$  необходимо найти величину перемещения  $l$  частицы смеси за один цикл кругового вращения, т.е. по траектории  $BaAB$ .



1 – барабан; 2 – наклонная лопасть.

Рисунок 2.5 – Схема перемещения частиц в продольном направлении в барабанно-лопастном смесителе.

Из рисунка 2.5 видно, что величина  $l_\delta$  равна  $l_\delta = h \operatorname{tg} \delta$ , (2.35)

где  $h$  – высота подъема частицы смеси до точки отрыва ее от стенки барабана, м;

$\delta$  – угол наклона продольной оси барабана.

Следовательно, прежде чем найти  $\delta$  необходимо, определить  $h$ , что можно сделать из анализа схемы, приведенной на рисунке 2.4.

$$h = CO + OE + EF \quad (2.36)$$

С достаточной степенью точности величину суммы отрезков  $OE+EF$  можно принять равной  $R$ . Отрезок  $CO$  из треугольника  $OAC$  равен

$$CO = CD+DO; \quad CO = R \sin(\gamma + \beta); \quad (2.37)$$

Из схемы видно, что сумма углов  $(\gamma + \beta)$  можно найти как разность угла  $\varphi$  (равного углу обрушения материала) и  $\eta$  т.е.

$$(\gamma + \beta) = \varphi - \eta \quad (2.38)$$

Угол  $\eta$  в свою очередь находится из треугольника  $OAD$  как разность углов:

$$\eta = 90 - \theta/2, \quad (2.39)$$

где  $\theta/2$  – половина центрального угла.

Следовательно, необходимо найти величину центрального угла. Из геометрии известно, что угол, составленный касательной и хордой (в нашем случае  $AB$ ), измеряется половиной дуги, заключенной внутри его, т.е.  $1/2$  дуги  $AaB_1$ . Также известно, что длина дуги, описываемой концом радиуса, пропорциональна величине соответствующего центрального угла [124].

Исходя из этого, угол  $\theta/2$  равен углу  $\eta$ , т.е. углу обрушения материала. Подставляя полученное значение в выражения (2.36) и (2.39) получим, что:

$$CO = R \sin(2\varphi - 90),$$

а высота  $h = R + R \sin(2\varphi - 90)$ , или

$$h = R [1 + \sin(2\varphi - 90)] \quad (2.40)$$

Тогда величина перемещения частицы смеси из выражения (2.35) будет равняться:

$$l_{\delta} = R \operatorname{tg} \delta [1 + \sin(2\varphi - 90)] . \quad (2.41)$$

Для определения скорости перемещения смешиваемого потока в продольном направлении барабана необходимо кроме  $l_{\delta}$  знать время  $T$ , за которое произошло это перемещение.

$$T = t_1 + t_2, \quad (2.42)$$

где  $t_1$  – время, затраченное на перемещение частицы по круговой траектории;

$t_2$  – время движения по параболической траектории (вниз).

Центральный угол  $AOB_1$ , соответствующий прохождению частицей круговой траектории, согласно приведенных расчетов и схемы технологического процесса (рис. 2.4) равен  $2\varphi$ .

При  $n, \text{с}^{-1}$  продолжительность одного оборота будет равна  $1/n$ , после чего, принимая, что на круговой траектории частицы движутся со скоростью, соответствующей скорости вращения барабана (скольжением частиц пренебрегаем), найдем:

$$t_1 = \frac{1}{n} \cdot \frac{2\varphi}{360} = \frac{\varphi}{180n}, \quad (2.43)$$

Время прохождения частицы по параболической траектории во многом зависит от физико–механических свойств смешиваемых компонентов, входящих в смесь.

Такие параметры, как плотность, геометрические размеры частиц, парусность и др. во время процесса смешивания изменяют свои свойства за счет

усреднения влажности, слипаемости, скручивания и т.д., поэтому вывод аналитического уравнения для определения  $t_2$  затруднен.

Для подсчета  $t_2$  следует пользоваться эмпирической формулой:

$$t_2 = \frac{0,345 \sin \varphi}{n}, \quad (2.44)$$

Из уравнений (2.43), (2.44) время одного цикла пересыпания частиц равно:

$$T = \frac{\varphi}{180n} + \frac{0,345 \cdot \sin \varphi}{n} = \frac{\varphi + 62,35 \sin \varphi}{180n}. \quad (2.45)$$

Число циклов  $m_1$ , которое совершит за один оборот цилиндра частица смеси, найдем из выражения

$$m_1 = \frac{180}{\varphi + 62,35 \sin \varphi}. \quad (2.46)$$

Определив величины перемещения частицы за один цикл и время одного цикла можно найти скорость перемещения сапропеле-минеральной смеси в продольном направлении барабана:

$$V_n = \frac{l_\delta}{T} = \frac{180R_0n \cdot \operatorname{tg} \delta [1 + \sin(2\varphi - 90)]}{\varphi + 62,35 \sin \varphi}, \text{ м/с} \quad (2.47)$$

где  $R_0$  – радиус круговой траектории, на которой частицы смеси движутся со средней скоростью (рис. 2.4), так частицы, соприкасающиеся со стенкой барабана, находятся на большом удалении от центра вращения, имеют большую скорость, и наоборот, частицы, находящиеся на конце лопасти, имеют меньшее значение скорости вращения.

Величину  $R_0$  можно найти как разницу между радиусом барабана  $R$  и половиной ширины лопасти  $b$ , т.е.  $R_0 = R - b/2$ .

Тогда выражение (2.47) преобразуется в следующий вид:

$$V_n = \frac{180n(R - b/2) \cdot \operatorname{tg} \delta [1 + \sin(2\varphi - 90)]}{\varphi + 62,35 \sin \varphi}, \text{ м/с} \quad (2.48)$$

Для определения  $Q$  кроме скорости  $V_n$  необходимо знать площадь поперечного сечения потока  $F_1$ , движущегося в продольном направлении барабана со скоростью  $V_n$ .

Из рисунка 2.4 видно, что величину  $F_1$  с достаточной степенью точности можно найти как разность площадей секторов  $OAA_1B$  и  $OA_1a_1B$ .

Площадь же сектора, как известно, равна произведению половины длины дуги на радиус, которым описана эта дуга. Зная также, что длина дуги, описываемой концом радиуса, пропорциональна величине соответствующего центрального угла можно записать [129]:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot R^2 \theta}{360} - \frac{\pi(R - b)^2 \theta}{360}$$

Проведя преобразования и подставляя вместо  $\theta$  его значение, окончательно получим:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot \varphi(2Rb - b^2)}{180}, \text{ м}^2 \quad (2.49)$$

Производительность барабанного смесителя с лопастью, расположенной на внутренней стенке барабана под углом к радиальному направлению будет равняться [79, 130]:

$$Q = F_1 \cdot \rho \cdot V_n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_v \quad \text{или} \\ Q = \frac{\pi \varphi(2Rb - b^2)}{180} \cdot \rho \cdot \frac{180 \cdot n \cdot \operatorname{tg} \delta (R - b/2) [1 + \sin(2\varphi - 90)]}{\varphi + 62,35 \sin \varphi} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_v. \quad (2.50)$$

Делая преобразования, получим:

$$Q = \frac{2\pi \cdot b \cdot \varphi \cdot \rho \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_v \cdot \operatorname{tg} \delta (R - b/2)^2 [1 + \sin(2\varphi - 90)]}{\varphi + 62,35 \sin \varphi}, \quad (2.51)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий изменение траектории полета индивидуальной частицы смеси во время полета в потоке после отрыва от стенки;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение производительности смесителя в результате приращения перемещения смеси за один цикл в продольном направлении барабана за счет движения от точки отрыва не сразу вертикально вниз (рис. 2.4), а по параболической траектории, т.е. за счет эффекта броска;

$k_v$  – коэффициент заполнения межлопастного пространства и изменения плотности смеси в этом пространстве. Величина коэффициента  $k_v$  зависит от количества лопастей в смесителе.

Произведение коэффициентов  $k_1$ ;  $k_2$  и  $k_v$  можно заменить одним  $k_Q$  – коэффициентом производительности [79].

Выражение (2.51) в окончательном виде будет:

$$Q = \frac{2\pi \cdot b \cdot \varphi \cdot \rho \cdot n \cdot k_Q \cdot \operatorname{tg} \delta (R - b/2)^2 [1 + \sin(2\varphi - 90)]}{\varphi + 62,35 \sin \varphi}. \quad (2.52)$$

На рисунке 2.6 показана теоретическая зависимость производительности от радиуса барабана при различной ширине лопасти ( $b = 0,1$  м.,  $b = 0,15$  м.,  $b = 0,2$  м.), и установлено, что при увеличении радиуса барабана производительность увеличивается. Данную зависимость следует использовать при проектировании смесителя.

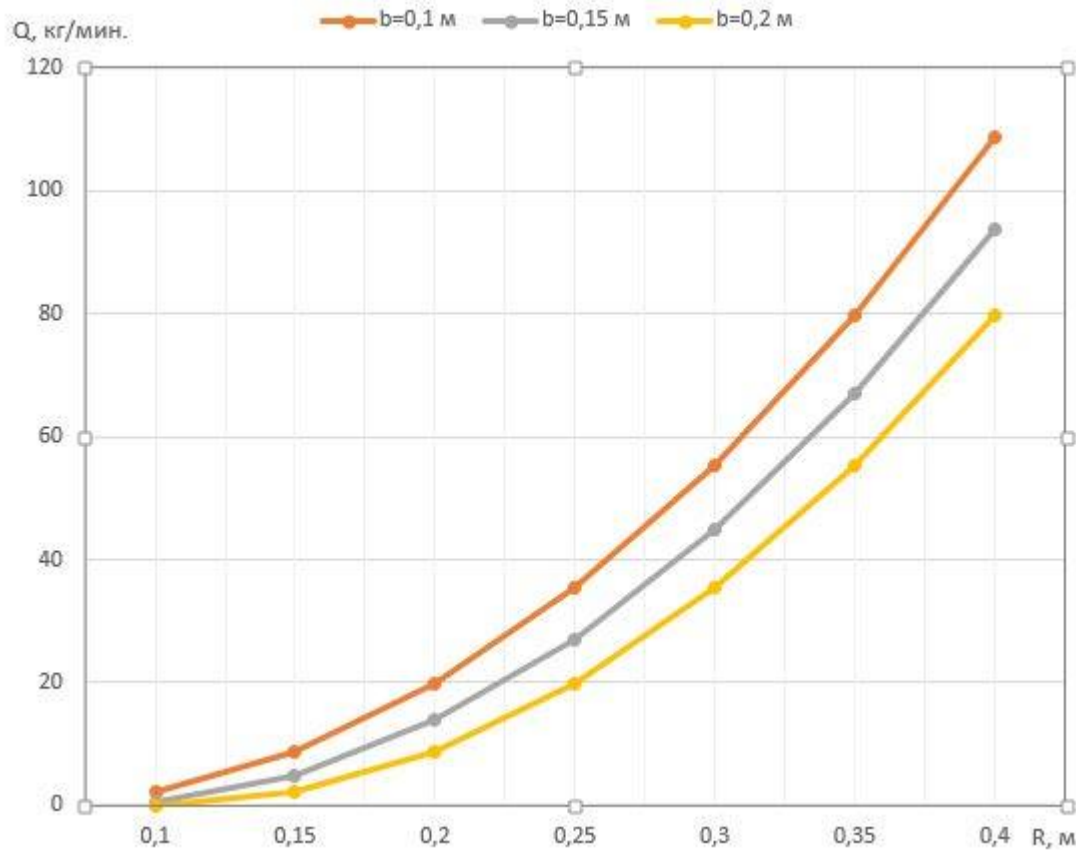


Рисунок 2.6 – Зависимость производительности смесителя от радиуса барабана при различной ширине лопасти.

#### 2.4 Определение конструктивных параметров барабанного смесителя

Приравнивая время  $t$  в полученном уравнении (2.28) равным времени поворота лопасти до момента полного схода частиц смеси, определим необходимую ширину лопасти [51]:

$$\begin{aligned}
 b = & \left[ \frac{g \cos \varepsilon (2\omega - \theta_2) + 2\omega^2 R \theta_2 (\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon)}{2\omega^2 (\theta_1 - \theta_2)} \right] \cdot e^{\theta_1 t} + \\
 & + \left[ \frac{g \cos \varepsilon (\theta_1 - 2\omega) - 2\omega^2 R \theta_1 (\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon)}{2\omega^2 (\theta_1 - \theta_2)} \right] \cdot e^{\theta_2 t} - \frac{g \sin \varepsilon}{2\omega^2} \sin \omega t - \\
 & - \frac{g \cos \varepsilon}{2\omega^2} \cos \omega t + R (\cos \varepsilon + f \sin \varepsilon).
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

Таким образом, получены основные конструктивные параметры барабанного смесителя позволяющие обеспечить производство качественных сапропеле-минеральных удобрений.

Из представленной формулы производительности (2.52) барабанного смесителя в результате преобразования получим требуемый радиус барабана:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot (\varphi + 62,35 \sin \varphi)}{2\pi \cdot b \cdot \varphi \cdot \rho \cdot n \cdot k_Q \cdot \operatorname{tg} \delta^2 [1 + \sin(2\varphi - 90)]}} - b/2, \quad (2.54)$$

Коэффициент производительности  $k_Q$  определим, проведя предварительные экспериментальные исследования.

Из анализа зависимости (2.54) можно сделать вывод, что если увеличить радиус барабана с 0,25 м до 0,4 м, то производительность увеличивается в 3,45 раза.

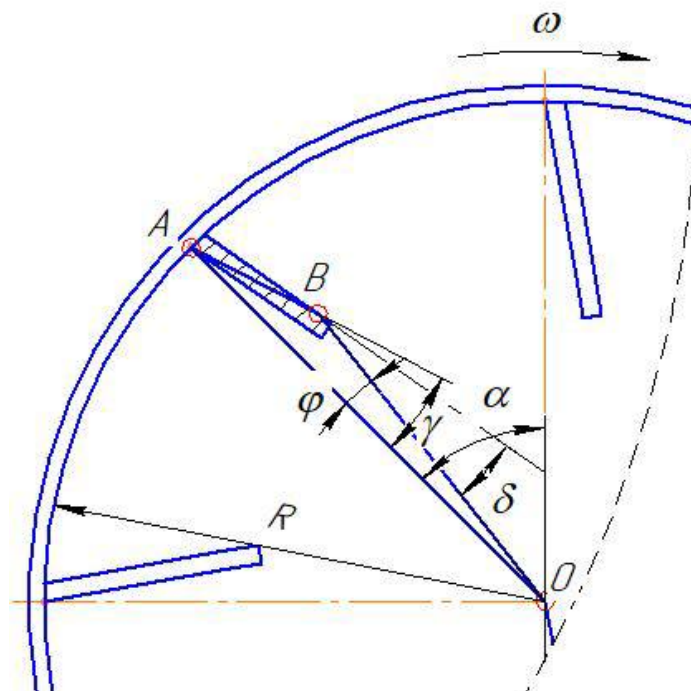


Рисунок 2.7 – Конструктивные параметры внутри барабана.

Для определения зависимости угла наклона лопасти  $\gamma$ , ширины лопасти  $b$  и радиуса барабана  $R$  рассмотрим треугольник  $OAB$  (рис 2.7) и используя теорему синусов определим требуемый угол  $\gamma$ .

$$\frac{\sin \gamma}{AO} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin(180 - \varepsilon)}{R} \quad (2.55)$$



$$\gamma = \varepsilon - \arcsin\left(\frac{\sin(180 - \varepsilon) \cdot b}{R}\right) \quad (2.56)$$

Качество смешивания сапропеле–минеральной смеси определяется количеством пересыпаний (перемешиваний)  $m$  компонентов смеси в смесителе по мере их продвижения в его продольном направлении. Показатель  $m$  – определяется экспериментально, при этом учитываются: высота подъема, скорость падения, степень измельчения массы и др. Зная количество циклов  $m$  и величину перемещения за один цикл, определим длину барабана [51]:

$$L = k_2 m l_i = k_2 m \operatorname{tg} \delta (R - b/2)[1 + \sin(2\varphi - 90)], \text{ м} \quad (2.57)$$

На рисунке 2.8 показана теоретическая зависимость длины барабана от радиуса при ширине лопасти ( $b = 0,1$  м.), и установлено, что при увеличении радиуса барабана длина его увеличивается. Данную зависимость следует использовать при проектировании смесителя.

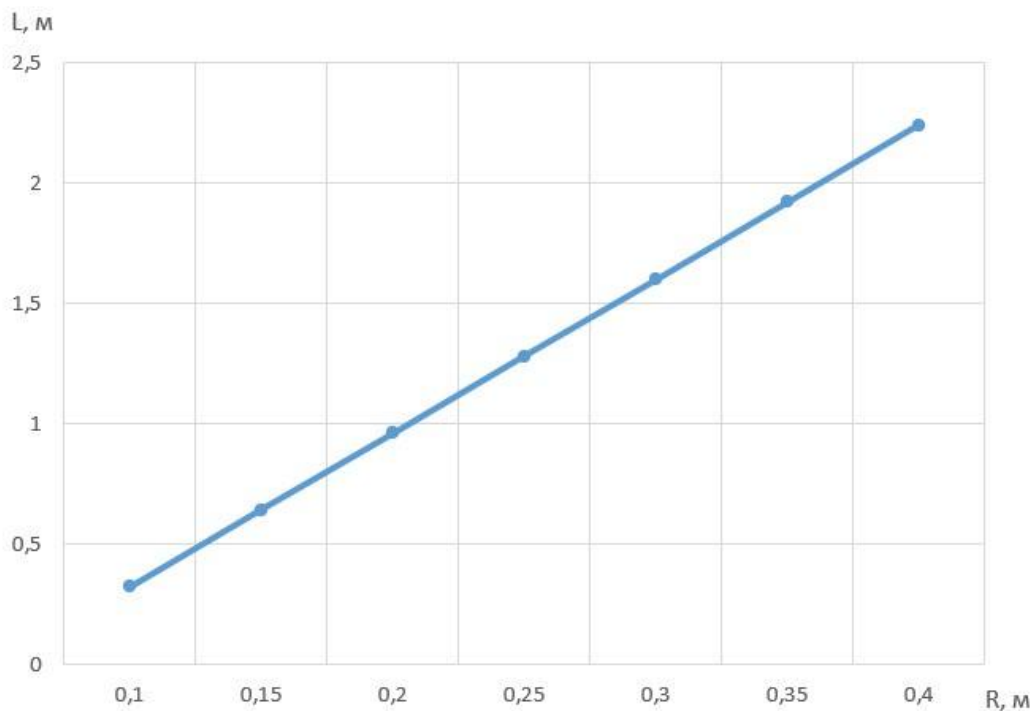


Рисунок 2.8 – Зависимость изменения длины барабана от радиуса.

Совмещая формулы производительности и длины барабана, получим уравнение производительности в зависимости от длины и радиуса барабана:

$$Q = \frac{2\pi b \varphi \rho n k_1 k_v \left(R - \frac{b}{2}\right) L}{m(\varphi + 62,35 \sin \varphi)} \quad (2.58)$$

После чего определили частоту вращения барабана необходимую для получения качественной сапропеле–минеральной смеси [51]:

$$n = \frac{m}{m_1} = \frac{m(\varphi + 62,35 \sin \varphi)}{180}. \quad (2.59)$$

Таким образом, получены основные конструктивные параметры барабанного смесителя позволяющие обеспечить производство качественных сапропеле-минеральных удобрений [51].

## 2.5 Основные положения и теоретический расчет затрат энергии на смешивание

Мощность, потребляемая барабанными смесителями, расходуется на совершение следующих работ: преодоления трения качения бандажей 2 барабана 1 по роликам 3 (рис. 2.9), трения скольжения цапфовоопорных роликов 3 в подшипниках, на подъем смешиваемых компонентов на сообщение им кинетической энергии, т.е. суммарное выражение совершаемых работ будет:

$$A_{общ} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (2.60)$$

Работу  $A_1$ , затрачиваемую по преодолению трения качения бандажей барабана по опорным роликам, можно найти из выражения [51]:

$$A_1 = \frac{(R_1 + r)k}{r} \cdot \frac{G_6 + G_c}{\cos \chi}, \text{ Дж} \quad (2.61)$$

где  $R_1$  – радиус бандажа, м;

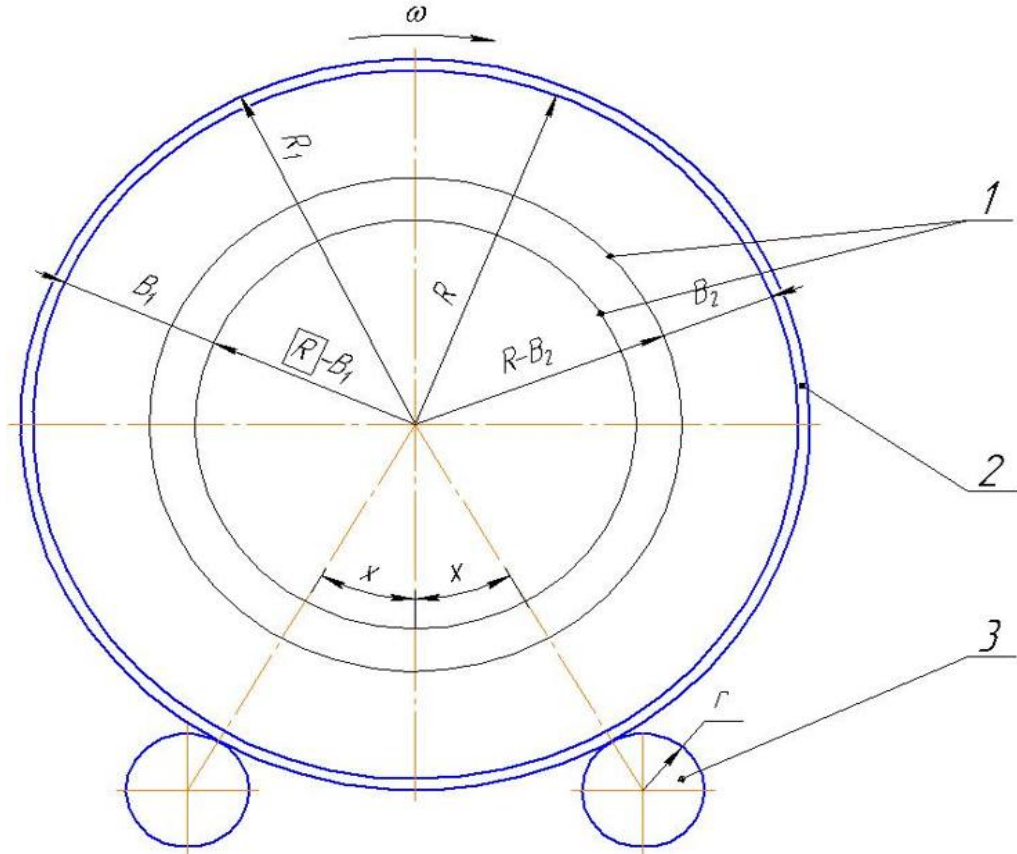
$r$  – радиус ролика, м;

$k$  – коэффициент трения качения, м;

$G_6$  – сила тяжести барабанов, Н;

$G_c$  – сила тяжести материала, Н;

$\chi$  – угол между вертикальной осью барабанов и линией центров барабана и ролика (рис. 2.9) [51].



1 – барабан; 2 – бандаж; 3 – опорный ролик.

Рисунок 2.9 – К определению мощности смесителя.

Работа  $A_2$  на преодоление трения скольжения цапф валов опорных роликов в подшипниках определяется из уравнения:

$$A_2 = \frac{f(R_1 \cdot r_1)}{r} \cdot \frac{G_6 + G_c}{\cos \chi}, \text{ Дж} \quad (2.62)$$

где  $r_1$  – радиус цапфы, м;

$f$  – коэффициент трения скольжения цапф роликов.

Работа  $A_3$ , необходимая для подъема материала (сапропеле–минеральной смеси) на определенную высоту, начиная с которой они движутся по параболической траектории, будет равна:

$$A_3 = G_c h, \text{ Дж} \quad (2.63)$$

где  $h$  – высота подъема частиц смеси от точки отрыва их до точки падения.

С учетом выражения (2.40) уравнение (2.63) запишется в следующем виде:

$$A_3 = G_c (R - b/2)[1 + \sin(2\varphi - 90^\circ)], \text{ Дж} \quad (2.64)$$

где  $R$  – радиус барабана, м;

$b$  – ширина лопасти, м;

$\varphi$  – угол обрушения.

Работа  $A_4$  для сообщения частицам смеси кинетической энергии равна:

$$A_4 = \frac{mV_0^2}{2} = \frac{G_c V_0^2}{2g}, \text{ Дж} \quad (2.65)$$

Заменяя в выражении (2.63)  $V_0$  через  $(\omega \cdot R_0)$ , где  $R_0 = (R - b/2)$ , и подставляя значение  $\omega$  из выражения (2.16), получим:

$$A_4 = \frac{G_c (R - b/2)[\cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon)]}{2(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)}, \text{ Дж} \quad (2.66)$$

Определив составляющие, получим общее уравнение работы [51]:

$$A_{\text{общ}} = \frac{(R_1 + r)k}{r} \cdot \frac{G_s + G_c}{\cos \chi} + \frac{f(R_1 \cdot r_1)}{r} \cdot \frac{G_s + G_c}{\cos \chi} + G_c (R - b/2)[1 + \sin(2\varphi - 90^\circ)] + \frac{G_c (R - b/2)[\cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon)]}{2(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)}, \text{ Дж} \quad (2.67)$$

Приведя подобные члены уравнения (2.67) и умножив его на величину  $\frac{n}{\eta}$ ,

получим выражение мощности:

$$N = \frac{n}{\eta} \left| \frac{G_o + G_c}{r \cdot \cos \chi} \right| \left[ k(R_1 + r) + f(R_1 \cdot r_1) \right] + G_c(R - b/2) \cdot \left\{ \left[ 1 + \sin(2\varphi - 90) \right] + \frac{\cos \alpha (\cos \varepsilon - f \sin \varepsilon) - \sin \alpha (\sin \varepsilon + f \cos \varepsilon)}{2(f \sin \varepsilon - \cos \varepsilon)} \right\}, \text{ Вт} \quad (2.68)$$

где  $n$  – частота вращения барабана,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\eta$  – коэффициент полезного действия привода смесителя.

На рисунке 2.10 показана теоретическая зависимость энергозатрат на технологический процесс смешивания от радиуса барабана при ширине лопасти ( $b = 0,1$  м.) [51], установлено, что при увеличении радиуса барабана энергозатраты плавно увеличиваются до радиуса  $R = 0,25$  м., а затем резко возрастают. Данную зависимость следует использовать при проектировании смесителя.

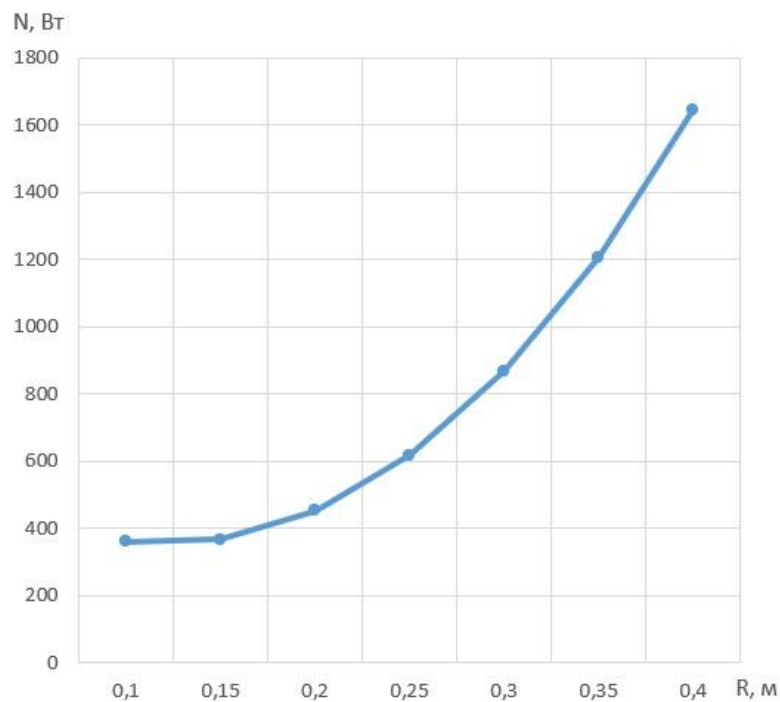


Рисунок 2.10 – Зависимость энергозатрат от радиуса барабана.

Следует отметить, что величину силы тяжести  $G_c$  сапропеле–минеральной смеси, находящейся в смесителе, можно выразить через  $mg$ , а массу  $m$  – через объем массы в барабане и его размеры, т.е.

$$G_c = mg = \pi \cdot R^2 \cdot \psi \cdot L \cdot \rho \cdot g, \text{ Н} \quad (2.69)$$

где  $\rho$  – плотность сапропеле–минеральной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Полученное уравнение с достаточной степенью точности отражает зависимость энергозатрат  $N$  от конструктивно–режимных параметров барабанного смесителя. Анализ выражений (2.68) и (2.69) показывает, что наибольшее влияние на  $N$  оказывают такие параметры, как радиус барабана  $R$ , его длина  $L$ , ширина лопасти  $b$ , плотность сапропеле–минеральной смеси  $\rho$ , частота вращения  $n$  и физико–механические свойства сапропеле–минеральной смеси, такие как угол обрушения  $\varphi$  и коэффициент трения  $f$ , которые являются функцией от размеров частиц смеси, влажности и т.д [51].

Формулы, полученные в результате теоретических предположений, содержат ряд эмпирических коэффициентов, требующих экспериментального исследования. Поэтому для того, чтобы иметь конкретные значения для расчетов, задачей экспериментальных исследований является определение основных физико-механических свойств минеральной смеси сапропеля, а также постоянных коэффициентов, включенных в полученные теоретические зависимости.

Полученные в результате теоретических предпосылок формулы содержат ряд эмпирических коэффициентов, которые требуют экспериментального исследования. Поэтому, чтобы иметь конкретные величины для расчетов, в задачу экспериментального исследования входит определение основных физико–механических свойств сапропеле–минеральной смеси, а также постоянных коэффициентов, входящих в полученные теоретические зависимости.

### **Выводы:**

1. Для обоснования конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя необходимо использовать математические модели, позволяющие определить частоту вращения барабана (2.14), ширину лопасти (2.53), продольную скорость перемещения сапропеле-минеральной массы (2.48), зависимость длины барабана от радиуса (2.57).

2. В результате исследований выявлены зависимости: производительность смесителя (2.52), общая работа, совершаемая в процессе смешивания компонентов (2.67), затраченная мощность (2.68). Установлено, что наибольшее влияние на эти показатели оказывают конструктивные параметры: радиус и частота вращения барабана, его длина, ширина лопасти, а также физико-механические свойства смеси [51].

3. Для обеспечения однородности сапропеле-минеральных удобрений, повышения эффективности технологического процесса и для обоснования установки лопастей внутри барабана следует использовать разработанные математические модели радиуса барабана (2.54) и угла наклона лопасти (2.56).

4. Из графических зависимостей (рис. 2.6, рис. 2.8, рис. 2.10) следует, что для достижения необходимой производительности в условиях крестьянско-фермерских хозяйств достаточно при проектировании экспериментальной установки принять радиус барабана  $R = 0,25$  м. и длину  $L = 1,5$  м.

### **3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ САПРОПЕЛЕ- МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ**

#### **3.1 Программа экспериментальных исследований процесса смешивания сапропеле-минеральной смеси**

Для проведения исследований разработана программа, которая состоит из следующих этапов

Целью экспериментальных исследований является подтверждение теоретических положений, обоснование конструктивных и технологических параметров установки для смешивания сапропелево-минеральной смеси и выявление общих закономерностей процесса смешивания [2].

Для того чтобы обеспечить методичное проведение экспериментальной работы, необходимо соблюдать последовательность в работе, то есть иметь программу экспериментальных исследований.

Программа экспериментальных исследований состоит из следующих этапов:

Первым этапом является разработка программы и методологии, обеспечивающей проведение экспериментальных исследований с минимальными затратами времени; выбор независимых и зависимых переменных, подлежащих изучению; выбор качественного и количественного уровней, изучаемых факторов и построение математической модели процесса [19, 37].

Второй этап-подготовка экспериментальной установки и измерительного оборудования; проведение экспериментов и математическая обработка полученных данных; сравнение результатов экспериментальных исследований с теоретическими предпосылками; корректировка теоретических моделей и при необходимости постановка дополнительных экспериментов [39, 41].



Третий этап-обобщение результатов двух предыдущих этапов; внедрение результатов в производство; определение ожидаемого экономического эффекта [43,].

Эти этапы неразрывно связаны с подготовительной и теоретической частью работы.

Подготовительная часть включает в себя сбор, изучение и анализ имеющейся информации по этим вопросам, формирование возможных направлений исследований [62, 63].

Программа экспериментальных исследований предусматривает решение следующих задач:

а) определить факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс смешивания [66].

б) исследовать влияние конструктивных и технологических параметров процесса на качество смешивания [68].

в) определить рациональные параметры и режимы работы установки и дать технико-экономическую оценку [78].

При проведении экспериментов объектом исследования являлась сапропеле-минеральная смесь рецептурой, рассчитанной для внесения под зерновые культуры, включающая органический сапропель и минеральные добавки в виде карбамида, двойного суперфосфата и хлористого калия. Данные минеральные компоненты были выбраны исходя из условий смешиваемости, которые позволяют смешивать эти виды удобрений за неопределенное время до внесения в почву. В соответствии с рекомендациями, соотношение азота, фосфора и калия равное 1:1:1,2 является оптимальным при внесении данных удобрений в дерново-подзолистые почвы под зерновые культуры [84].

Выше перечисленные виды минеральных удобрений содержат следующие количества действующего вещества: карбамид – 46% N. двойной суперфосфат - 50%  $P_2O_5$ , хлористый калий - 60%  $K_2O$  [44, 87]. Исходя из принятого соотношения удобрений, а также, учитывая, что средняя рекомендуемая норма внесения азотных удобрений под зерновые равна 73,6 кг/га в действующем

веществе (160 кг/га карбамида), а норма внесения СМУ - 1 т/га, необходимое количество остальных минеральных компонентов смеси рассчитывали по формуле:

$$g^i = \frac{Q^N}{10} \cdot \left( \frac{d.v.^N}{d.v.^i} \right), \quad (3.1)$$

где  $Q^N$  - норма внесения карбамида, кг/га;

$d.v.^N$  - количество действующего вещества в карбамиде, %;

$d.v.^i$  - количество действующего вещества в рассчитываемом компоненте, %.

В таблице 3.1 представлен рецептурный состав исследуемой смеси [44].

Таблица 3.1. Рецептурный состав сапропеле-минеральной смеси

Компоненты смеси	Содержание компонента, %
Органический сапропель	54,6
Карбамид	16,0
Двойной суперфосфат	14,7
Хлористый калий	14,7

В процессе проведения всех экспериментов хранение смесей осуществляли в герметизированных эксикаторах. Это позволяло сохранить влажность образцов постоянной на протяжении всего времени [97].

### 3.2 Устройство и рабочий процесс экспериментальной установки и методика исследований процесса смешивания в барабанном смесителе

Исследования конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя с лопастями, расположенными на внутренней стенке барабана под углом по отношению к радиальному направлению проводили на лабораторной установке, изготовленной Великолукской ГСХА. Общий вид установки представлен на рисунке 3.1 [5]. Привод барабана осуществляли от электродвигателя постоянного тока 4 типа 2ПН112 МУХЛ4, частоту вращения

которого изменяли регулятором оборотов двигателя 5 за счет электрической схемы управления.



1 - барабан; 2 – загрузная воронка; 3 - рама; 4 – электродвигатель привода барабана смесителя; 5 – регулятор оборотов электродвигателя; 6 – транспортер; 7 – дозатор минеральных удобрений; 8 – дозатор сапропеля; 9 – электродвигатель привода транспортера; 10 – электродвигатель привода дозаторов; 11 – выгрузная воронка.

Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментальной установки

При технологическом процессе сапропель и минеральные удобрения из дозаторов 8 и 7 с помощью транспортера подавались через воронку 2 в барабан 1. При вращении барабана с помощью лопастей смесь перемешивалась и в результате установки барабана под углом к горизонту перемещалась в осевом направлении к выгрузной воронке 11 [21].

При определении производительности смесителя компоненты сапропеле-минеральной смеси подавали равномерно в соответствии с рецептом и коэффициентом заполнения. Производительность смесителя определяли при установившемся режиме работы [38]. Для этого одновременно с включением

секундомера в течение определенного промежутка времени производили отбор сапропеле-минеральной смеси, которую затем взвешивали на лабораторных весах с точностью до 5 г. Реальную часовую производительность барабанного смесителя рассчитывали по формуле [43]:

$$Q_{см} = \frac{3,6M}{t}, \quad (3.2)$$

где  $Q_{см}$  - часовая производительность барабанного смесителя, т/ч;

$M$  - масса образца сапропеле-минеральной смеси, кг;

$t$  - время заполнения части барабана, с.

Качество смешивания устанавливали согласно существующих методик [11, 60, 119, 134].

Учитывали, что смесь считается хорошей, если степень однородности  $\lambda > 92$  %, удовлетворительной при  $\lambda = 90 \dots 92$  %, плохой при  $\lambda < 85$  %.

Для сравнения равномерности распределения сапропеля использовали показатели вариационной статистики, которые определяли по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{x_{ср}} 100\%, \quad (3.3)$$

где  $V$  - коэффициент вариации,

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{ср})^2}{n-1}}, \quad (3.4)$$

где  $x_i$  - количество сапропеля в пробе, г;

$n$  - количество проб;

$x_{ср}$  - среднее значение случайной выборки, г,

$$x_{ср} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (3.5)$$

Степень однородности рассчитывали по формуле:

$$\lambda = 100 - V. \quad (3.6)$$

Среднюю степень однородности определяли по трем повторностям.

Конструктивно-технологические параметры барабанного смесителя определяли с помощью многофакторного эксперимента [62, 63]. В качестве математической модели производительности, энергозатрат и степени однородности нами была выбрана зависимость вида:

$$y = f(x_1, x_2, \dots). \quad (3.7)$$

В качестве переменных факторов выбирали следующие параметры:

a – количество лопастей на внутренней стенке барабана, шт;

b – ширина лопасти, мм;

n - частота вращения барабана, об/мин;

ε - угол наклона лопасти, град.

Для определения оптимальных конструктивных параметров установки в режиме смешивания и достижения необходимой однородности смеси более 85% после реализации двухфакторных экспериментов (приложение Г) были определены следующие значения факторов и уровней их варьирования [52], которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Факторы и уровни варьирования

Фактор и единица измерения	Натуральные обозначения	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования натуральные			Уровни варьирования кодовые		
				верхний	нулевой	нижний	верхний	нулевой	нижний
количество лопастей, шт.	a	X <sub>1</sub>	2	8	6	4	+1	0	-1
ширина лопасти, мм.	b	X <sub>2</sub>	30	180	150	120	+1	0	-1
частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	n	X <sub>3</sub>	20	60	40	20	+1	0	-1
угол наклона лопасти, град.	ε	X <sub>4</sub>	4	20	16	12	+1	0	-1

В качестве критериев оптимизации выбирали:

Q - производительность смесителя, кг/мин;

λ - степень однородности сапропеле-минеральной смеси, %;

N - затраты мощности, Вт.

Матрицы результатов экспериментов приведены в таблицах Б1...Б5.

Полученные экспериментальные данные, обработанные с помощью пакетов программ: Statgraphics Centurion XVI.И, STATISTICA V.12. По полученным уравнениям строили графические интерпретации, которые позволяют определить конструктивные и технологические параметры рабочего органа, при которых он работает в оптимальном технологическом режиме [91, 101, 109].

### **3.3 Измерительные приборы, оборудование и методика исследования влияния сапропеле-минеральной смеси на рост и развитие сельскохозяйственных культур и агрохимические показатели почвы.**

При помощи электрической схемы управления частоту вращения барабана изменяли в диапазоне от 20 до 60 мин<sup>-1</sup>.

Частоту вращения барабана определяли часовым тахометром (рис. 3.2) [30, 63].



Рисунок 3.2 – Часовой тахометр

При измерении частоты вращения вручную соединяли приемный валик с валом барабана. При этом одновременно включали счетчик и секундомер. Замеры производили в течении одной минуты [30, 68].

Мощность, затрачиваемую на приготовление сапропеле-минеральной смеси, определяли при помощи мультиметров, представленных на рисунке 3.3.

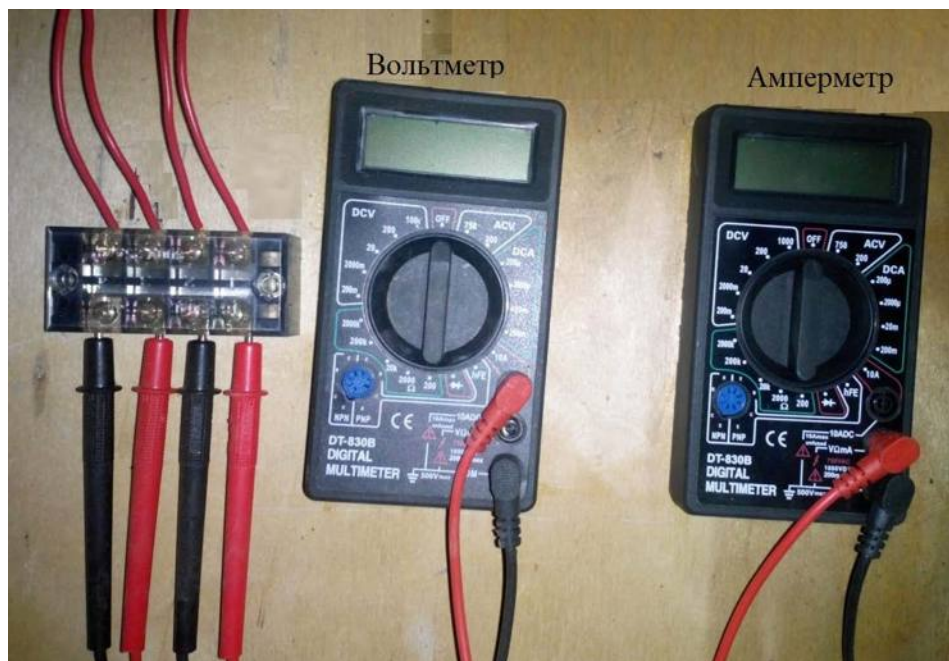


Рисунок 3.3 – Схема подключения мультиметров для измерения затрат мощности на смешивание компонентов.

Относительную влажность сапропеля определяли в соответствии с ГОСТом 26712-85 [83]. Сапрпель сушили в шкафу ШС-80-01-СПУ (рис. 3.4) до установившейся массы и определяли влажность сапропеля по формуле:

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} 100 \%, \quad (3.8)$$

где  $W$  - влажность сапропеля, %;

$M_1$  - масса навески сапропеля с контейнером до сушки, г;

$M_2$  - масса навески высушенного сапропеля с контейнером, г;

$M_3$  - масса пустого высушенного контейнера, г [29].





Рисунок 3.4 – Сушильный шкаф ШС-80-01-СПУ.

Содержание воды определяли согласно принятой методики [83].

Массу сапропеля до и после высушивания определяли на лабораторных весах AND, модели ЕК-300i (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Лабораторные весы.



Влажность сапропеля изменяли добавлением воды в зависимости от необходимого количества, которое рассчитывали по формуле:

$$\Delta M_B = M \cdot \frac{W_K - W_H}{100 - W_K}, \quad (3.9)$$

где  $M$  – масса навески сапропеля, г;

$W_K$  – конечная (задаваемая) относительная влажность сапропеля, %;

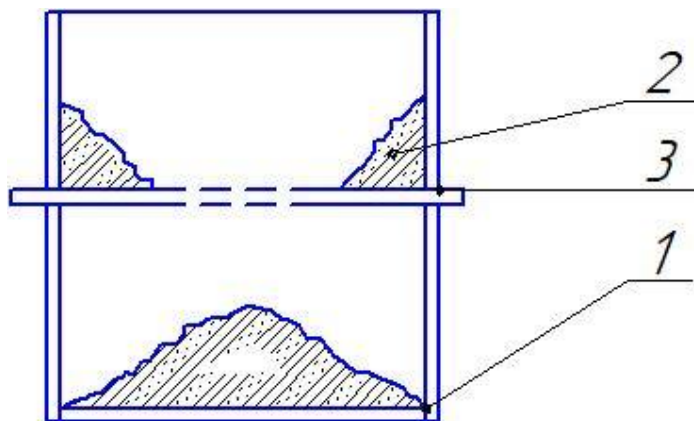
$W_H$  – исходная относительная влажность сапропеля, %.

Относительную влажность сапропеле-минеральной смеси рассчитывали по формуле:

$$W_c = \frac{X_1 \cdot W_1 + X_2 \cdot W_2 + X_3 \cdot W_3 + X_4 \cdot W_4}{100}, \quad (3.10)$$

где  $X_1 \dots X_4$  – процентное содержание компонентов различной влажности в смеси, %.

Углы обрушения и естественного откоса сапропеле-минеральной смеси определяли при помощи приспособления (рис. 3.6).

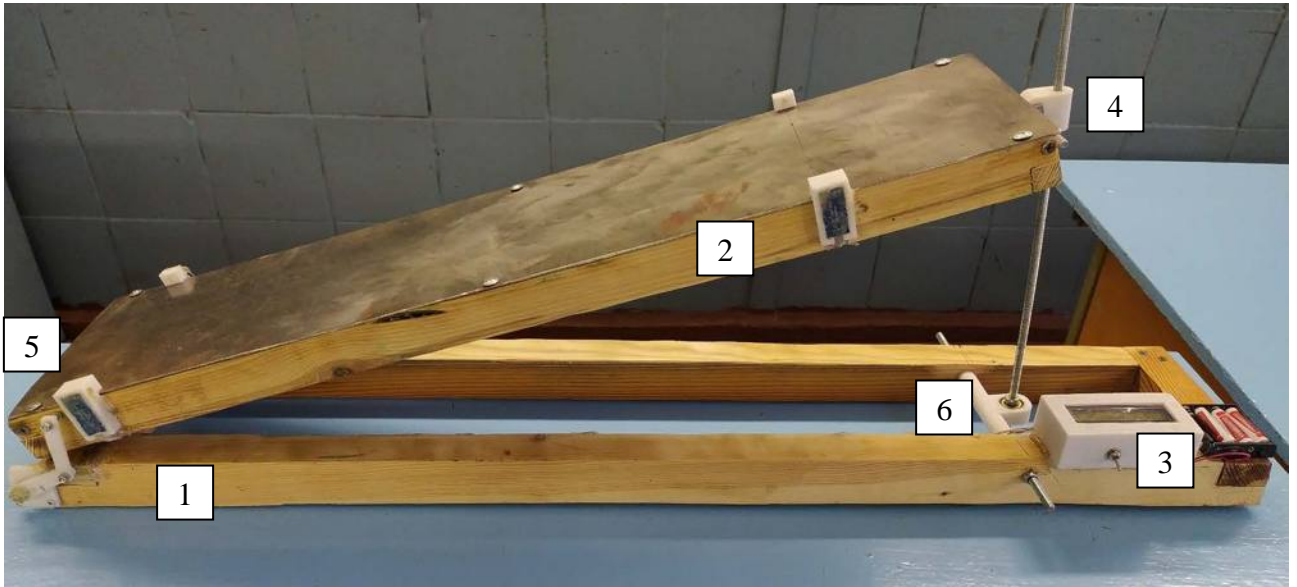


1 — контейнер; 2 — сапропеле-минеральная смесь; 3 — задвижка.

Рисунок 3.6 – Приспособление для исследования углов обрушения и откоса

Для определения углов обрушения и откоса приспособление загружали сапропеле-минеральной смесью массой 4 – 5 кг. Затем раздвигали задвижки в стороны до постоянного истечения материала через щель. По завершению процесса истечения материала проводили замеры углов обрушения и естественного откоса с помощью транспортира.

Углы трения сапропеле-минеральной смеси по различным материалам определяли при помощи прибора (рис. 3.7). Прибор состоит из основания 1, на котором жестко смонтирован шарнир 5 соединяющий основание с плоскостью 2. К нижней части основания крепится шкала отсчета 3, стопор 4. Перемещение плоскости производится подъемным механизмом 6. В плоскости 2 имеются зажимы для крепления пластин-образцов.



1 — основание; 2 — наклонная плоскость; 3 — измеритель углов наклона, 4 — стопор, 5 — шарнир, 6 — подъемный механизм.

Рисунок 3.7 – Устройство прибора для определения углов трения

Определения на приборе проводили следующим образом: на плоскости 2 прибора закрепляли пластину из конструкционного материала. Навеску сапропеле-минеральной смеси подавали на пластину. При помощи механизма подъема 6, перемещали плоскость с пластиной на некоторый угол. На отсчетной шкале 3 замеряли угол трения. Момент движения образца СМС по пластине определяли визуально и фиксировали стопором 4. Тарирование прибора осуществляли на эталонном образце, в качестве которого была взята навеска почвы с известным углом трения о металл [98].

Влияние сапропеле-минеральных удобрений на рост и развитие пшеницы, и на агрохимические показатели почвы исследовали по трехвариантной схеме в

соответствии с методикой З.И. Журбицкого: 1) сапрпель - фон; 2) NPK в соотношении 1:1:1,2; 3) СМУ из расчета 1 т/га. Для повышения точности и достоверности результатов опытов каждый вариант имел три повторности [100].

Сравнительную оценку почв по содержанию подвижного азота определяли количеством легкогидролизуемого азота по методу И.В. Тюрина и М.М. Кононовой. По рекомендациям почвенного института им. В.В. Докучаева количество нитратного азота в образцах почвы определяли экспресс-методом [44]. Подвижной фосфор и обменный калий определяли по методу А.Т. Кирсанова [106, 130].

Для обработки и последующего анализа экспериментальные данные по опыту и геохимическим исследованиям почв фиксировали в журнале.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САПРОПЕЛЕ- МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ И ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В БАРАБАННО-ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ

##### 4.1. Определение показателей физико-механических свойств сапропеле-минеральной смеси

Влажность сапропеля может влиять на многие физико-механические свойства сапропеле-минеральной смеси: текучесть, коэффициент внутреннего трения, смерзаемость, сводообразование, плотность и т.д., поэтому, необходимо знать значения влажности смеси сапропеля с минеральными удобрениями, углы откоса и обрушения [37, 58, 59].

Значения относительной влажности смеси составляли от 30,7 до 39,0% в соответствии с рецептурным составом и принятым диапазоном влажности сапропеля от 55 до 70%, причем очевидно, что на влажность смеси в существенной мере влияет исходная влажность сапропеля [63].

Величина угла естественного откоса зависит от сил трения, возникающих при перемещении частиц сыпучего материала относительно друг друга, и сил сцепления между ними [116, 127].

Среднее значение углов откоса и обрушения компонентов исследуемой смеси представлены в таблице 4.1 [131, 135].

Таблица 4.1 – Значение углов откоса и обрушения компонентов смеси

Сыпучий материал	Угол, град	
	откоса	обрушения
Органический сапропель	40	55
Карбамид	35	50
Двойной суперфосфат	36	52
Хлористый калий	38	53

В результате проведенных исследований определения угла трения сапропеле-минеральной смеси по различным материалам были получены

данные, которые представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения углов трения сапропеле-минеральной смеси различной плотности.

Материал	Плотность сапропеле-минеральной смеси, кг/м <sup>3</sup>				
	1063	1065	1070	1075	1081
	Угол трения (град.)				
Резина	50	55	62	75	90
Металл (окрашенный)	35	40	53	66	85
Металл(неокрашенный)	40	41	55	70	87
Пластмасса	33	36	45	56	73

Установлено, что угол трения сапропеле-минеральной смеси возрастает с увеличением плотности [139]. Наибольшее значение угла трения наблюдалось при движении образца по резине, а наименьшее по пластмассе [143].

Так, при плотности образцов сапропеле-минеральной смеси 1065 кг/м<sup>3</sup>, угол трения по резине равен 55<sup>0</sup>, а по пластмассе 36<sup>0</sup>. Таким образом, заменяя металлические и резиновые детали технологического оборудования пластмассовыми можно значительно снизить энергозатраты [147, 148].

#### **4.2. Математическое моделирование влияния конструктивных и технологических параметров смесителя на качество сапропеле-минеральных удобрений, производительность и энергозатраты процесса смешивания**

При испытаниях, приближенных к производственным условиям, основные конструктивно-технологические параметры смесителя определяли согласно разработанной методике на установившихся режимах [38].

В качестве основных характеристик смесителя задавали степень однородности сапропеле-минеральной смеси, производительность и потребляемую мощность [53].

В результате проведенного многофакторного эксперимента и регрессионного анализа, выполненного на основе результатов исследований, установлена зависимость степени однородности сапропеле-минеральной смеси от количества лопастей, частоты вращения барабана, ширины лопасти и угла её наклона (таблица 3.2). После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, получили уравнение регрессии [52, 55]:

$$\lambda = -219,26 + 64,79 \cdot a - 1,22 \cdot n + 17,74 \cdot \varepsilon - 0,035 \cdot b + 0,093 \cdot a \cdot n - 0,07 \cdot a \cdot \varepsilon + 0,015 \cdot a \cdot b - 0,001 \cdot \varepsilon \cdot b - 5,68 \cdot a^2 - 0,53 \cdot \varepsilon^2 \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  - степень однородности смеси;

$a$  – количество лопастей, шт.;

$b$  – ширина лопасти, мм.;

$n$  - частота вращения барабана, об/мин;

$\varepsilon$  - угол наклона лопасти, град.

Из представленных в приложении данных можно сделать вывод, о том, что модель (1) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик ( $R$  - квадрат равен 99,3%), полученная модель объясняет 98,9% изменения  $\lambda$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах нет, т.к. статистика Durbin-Watson (DW) больше, чем 1,4 [80].

Принимая во внимание значения коэффициентов полученной математической модели, анализируя поверхность отклика (рис. 4.1), установлено, что наилучшее качество перемешивания при количестве лопаток 6 штук. При этом, частота вращения барабана находится в пределах 20...60 мин<sup>-1</sup>, [52] дальнейшее её увеличение влечет нарушение процесса перемешивания, что связано с увеличением влияния центробежной силы, действующей на смешиваемые материалы [92]. При этом процесс осыпания материала с перегородок при вращении барабана нарушается [115].

Также установлено, что наилучшее значение  $\lambda$  степени однородности смеси достигается при ширине лопасти от 150 до 170 мм, дальнейшее увеличение снижает качество перемешивания за счет того, что материал при вращении не успевает осыпаться с лопасти (рис. 4.2) [52, 92].

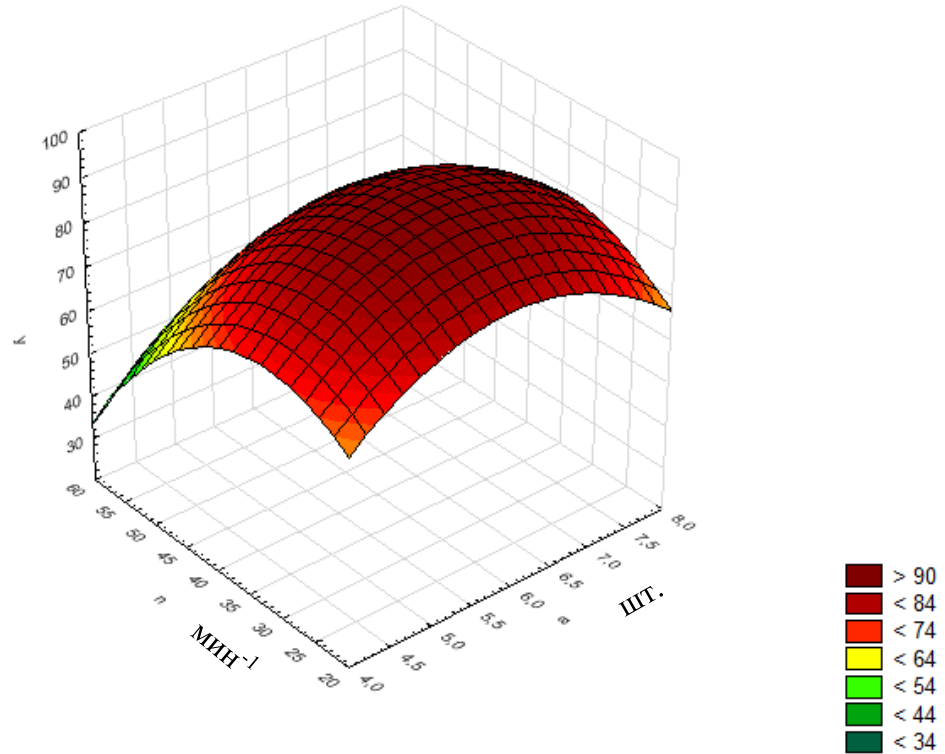


Рисунок 4.1 – Зависимость степени однородности смеси от количества лопастей и частоты вращения барабана

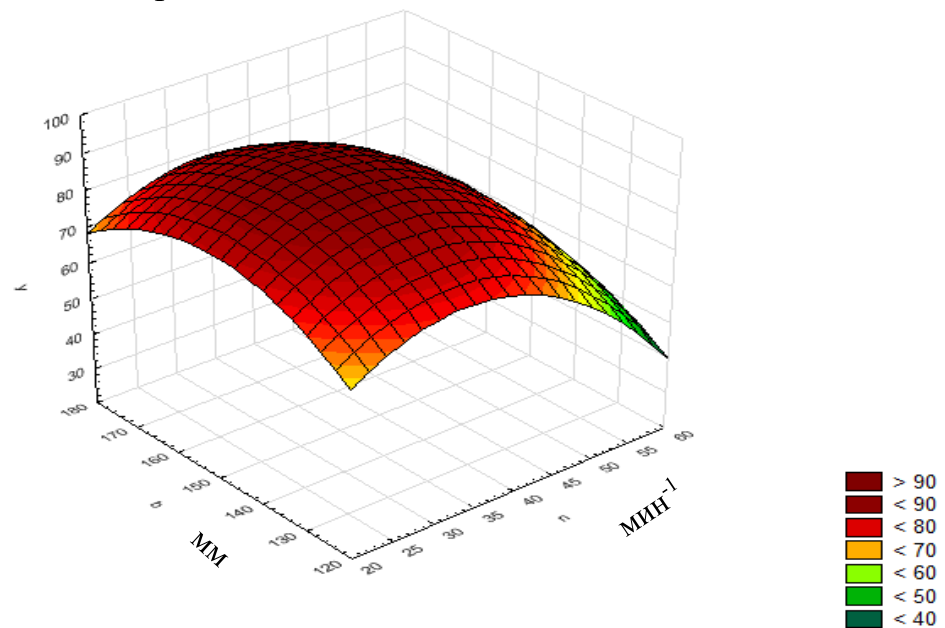


Рисунок 4.2 – Зависимость степени однородности получаемой смеси от частоты вращения барабана и ширины лопасти

В результате многофакторного эксперимента и регрессионного анализа, выполненного на основе результатов исследований, установлена зависимость производительности смесителя от факторов  $a$ ,  $n$ ,  $\varepsilon$ ,  $b$  (таблица 3.2). После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, получено уравнение регрессии:

$$Q = -9,73 + 8,9 \cdot a + 0,011 \cdot n + 0,19 \cdot \varepsilon + 0,013 \cdot b - 0,72 \cdot a^2 \quad (4.2)$$

где  $Q$  – производительность смесителя, кг/мин.

Из представленных в приложении данных табл. П1 можно сделать вывод, что модель (4.2) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик ( $R$  - квадрат равен 96,0%), полученная модель объясняет 94,6% изменения  $Q$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах нет, т.к. статистика Durbin-Watson (DW) больше, чем 1,4.

Принимая во внимание значения коэффициентов полученной математической модели, анализируя поверхность отклика (рис. 4.3), отмечаем существенное влияние на производительность смесителя количества лопастей. Наибольшая производительность 23 кг/мин. достигается при их количестве 6 шт. Вне этого диапазона происходит резкое снижение производительности смесителя.

Во всем исследуемом диапазоне наблюдается прямая зависимость производительности от частоты вращения барабана. Наиболее рациональная производительность 23 кг/мин., при которой обеспечивается качественная смесь, достигается при частоте вращения барабана 40-45 мин<sup>-1</sup>. Однако с увеличением угла  $\varepsilon$  свыше 16°, производительность постепенно снижается при частоте вращения барабана выше 40 мин<sup>-1</sup>.



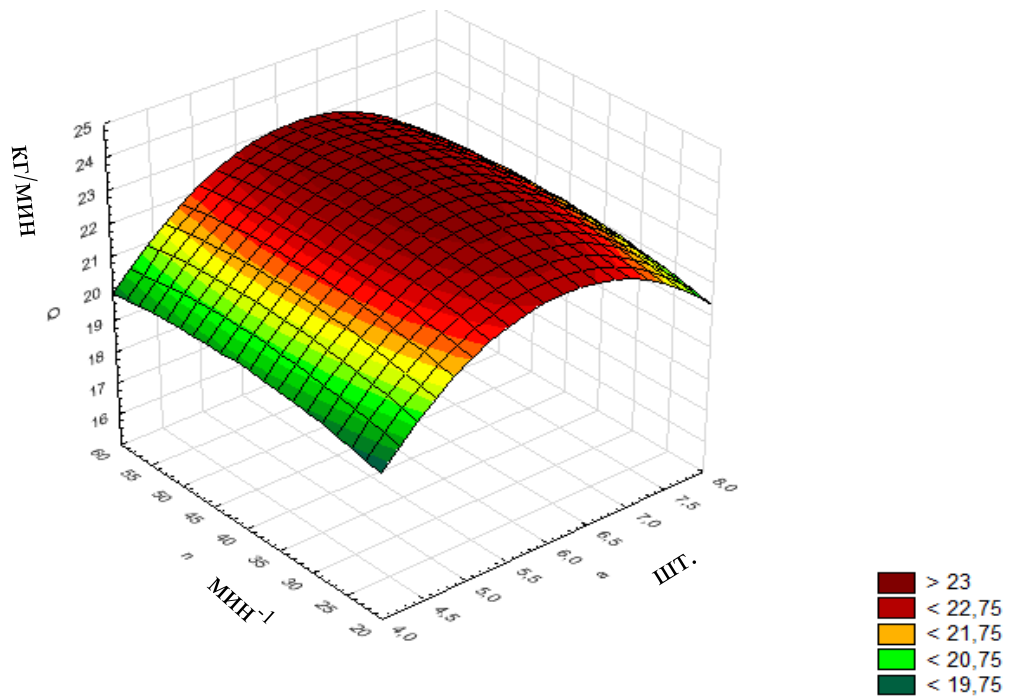


Рисунок 4.3 – Зависимость производительности смесителя от количества лопастей и частоты вращения барабана

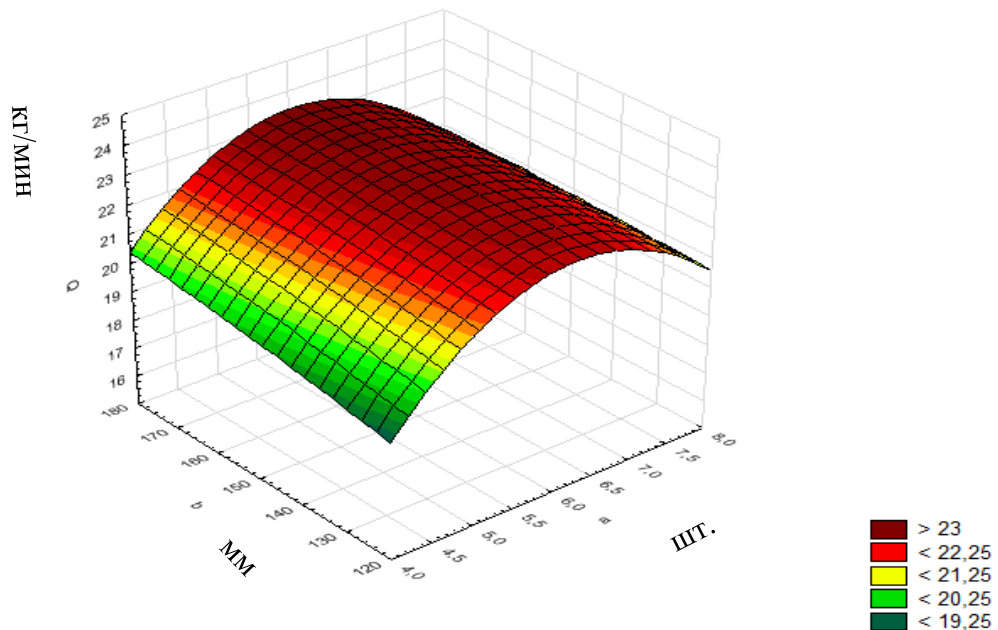


Рисунок 4.4 – Зависимость производительности смесителя от количества и ширины лопастей

Анализируя поверхность отклика (рис. 4.4) зависимости производительности смесителя от количества и ширины лопастей установлено, что рациональное количество лопастей 6 шт., а наибольшая производительность достигается при ширине лопасти 140-160 мм.

В результате многофакторного эксперимента и регрессионного анализа, установлена зависимость энергозатрат на процесс смешивания от факторов  $a$ ,  $n$ ,  $\varepsilon$ ,  $b$  (таблица 3.2). После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа, без учета незначимых эффектов, получено уравнение регрессии:

$$N = 4680,02 - 233,96 \cdot a - 27,24 \cdot n - 155,14 \cdot \varepsilon - 26,2 \cdot b + 0,17 \cdot a \cdot n - 0,29 \cdot a \cdot \varepsilon - 0,11 \cdot a \cdot b - 0,12 \cdot n \cdot \varepsilon + 20,77 \cdot a^2 + 0,47 \cdot n^2 + 5,02 \cdot \varepsilon^2 + 0,091 \cdot b^2 \quad (4.3)$$

Из представленных в приложении данных (Приложение В) можно сделать вывод, о том, что модель (4.3) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик ( $R$  - квадрат равен 98,1%), полученная модель объясняет 96,3% изменения  $N$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах нет, т.к. статистика Durbin-Watson больше, чем 1,4.

Принимая во внимание значения коэффициентов полученной математической модели (4.3), анализируя поверхность отклика (рис. 4.5), отмечаем значительное влияние на энергозатраты частоты вращения барабана смесителя. Во всем исследуемом диапазоне наблюдается резкое возрастание затрат энергии при увеличении частоты вращения свыше 35 мин<sup>-1</sup>. И наименьшие затраты энергии 510 Вт. достигаются при частоте вращения барабана 40 мин<sup>-1</sup> и ширине лопасти 150 мм. Количество лопастей влияет на энергозатраты и наименьшие значение 510 Вт достигаются при количестве лопастей 6 штук и частоте вращения барабана 40 мин<sup>-1</sup> [52].

Угол наклона лопасти  $\varepsilon$  не оказывает значительного влияния на затраты мощности при работе смесителя. Зато увеличение ширины лопасти свыше 155 мм, влечет рост энергозатрат. При ширине лопасти менее 130 мм, так же наблюдается рост потребления энергии. За счет снижения интенсивности смещения перемешиваемой массы вдоль барабана, накопления её в барабане и как следствие увеличения сопротивления вращению барабана.

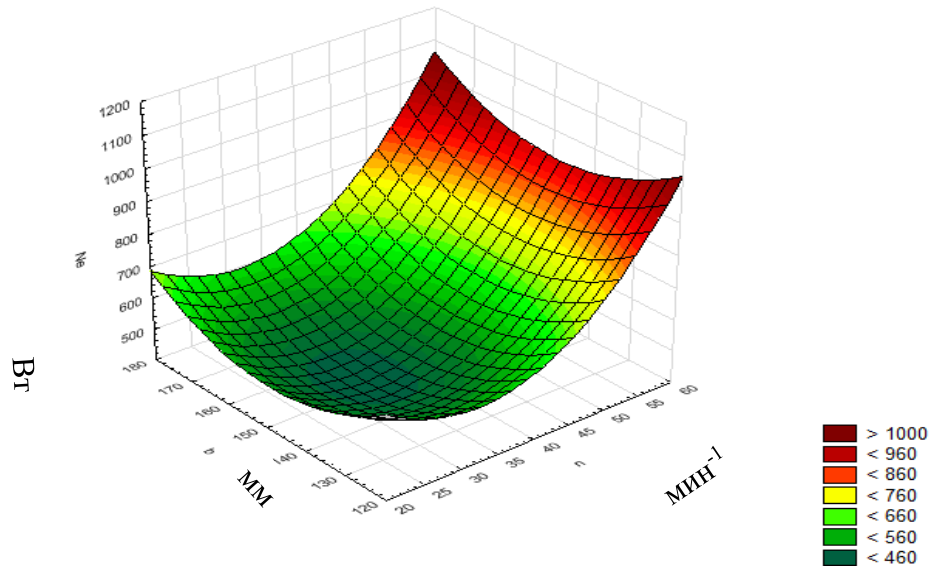


Рисунок 4.5 – Зависимость энергозатрат смесителя от частоты вращения барабана и ширины лопасти

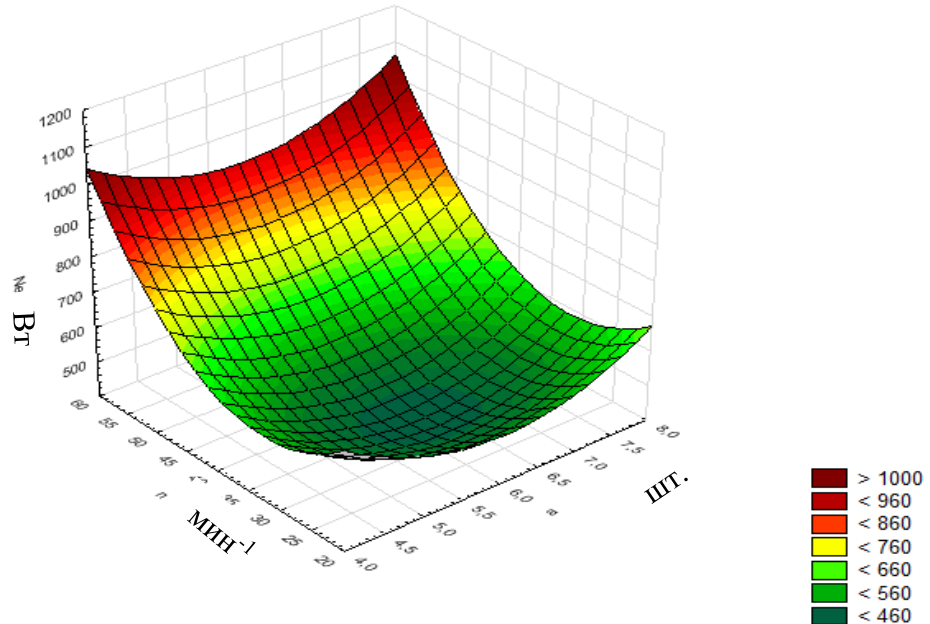


Рисунок 4.6 – Зависимость затрат мощности смесителя от количества лопастей и частоты вращения барабана

Для определения оптимальных конструктивных и технологических параметров работы смесителя необходимо исследовать полученную систему уравнений (4.1) ... (4.3). Значение показателя степени однородности смеси должно быть более 92%, при оптимальной энергоёмкости процесса смешивания, характеризуемой отношением затрачиваемой энергии к производительности смесителя. Для чего примем критерий оптимизации  $K_{opt}$

$$K_{opt} = \frac{N}{Q} \gamma \rightarrow \min \quad (4.4)$$

Решив систему уравнений (4.1) ... (4.4) с использованием компьютерных программ находим удовлетворяющие исходным параметрам значения факторов.

В результате исследований в соответствии с требованиями к качеству смеси удобрения установили рациональные конструктивные и технологические параметры смесителя, которые представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Конструктивные и технологические параметры барабанного смесителя

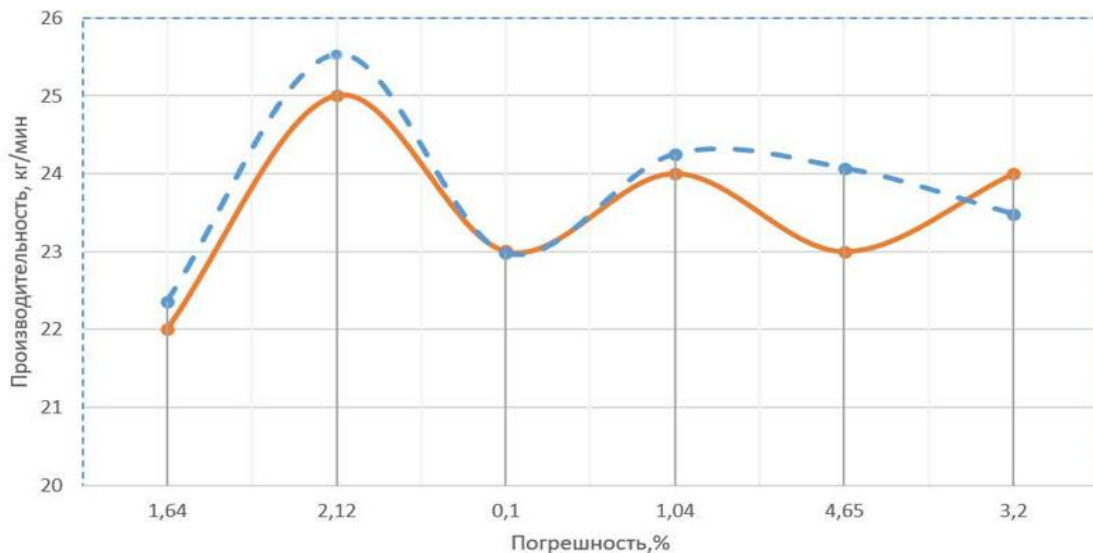
Внутренний диаметр барабана, м	Угол наклона лопасти, град.	Число лопастей, шт.	Длина рабочей части барабана смесителя, м	Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	Ширина лопасти, мм.
0,5	16-20	6	1,5	40-45	140 - 160

Для анализа соответствия математической модели (2.51) по определению производительности смесителя были проведены экспериментальные исследования. В таблице 4.7 приведено сравнение производительности смесителя при одинаковых конструктивных параметрах, полученное в результате эксперимента и с помощью математической зависимости.

Таблица 4.7. Экспериментальные и теоретические значения производительности.

Частота вращения барабана n, мин <sup>-1</sup>	Угол наклона лопасти ε, град	Ширина лопасти b, мм	Производительность эксперимент Q <sub>э</sub> , кг/мин	Производительность теория Q <sub>т</sub> , кг/мин	Погрешность, %
20	16	150	22	22,36	1,64
60	16	150	25	25,53	2,12
40	12	150	23	22,98	0,1
40	20	150	24	24,25	1,04
40	16	120	23	24,07	4,65
40	16	180	24	23,48	3,2

Проведя сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими, можно заметить, что максимальная погрешность не превышает 4,7 % и математическая модель по определению производительности смесителя описывает процесс смешивания с необходимой точностью (рис. 4.7).



— экспериментальная зависимость; - - - теоретическая зависимость

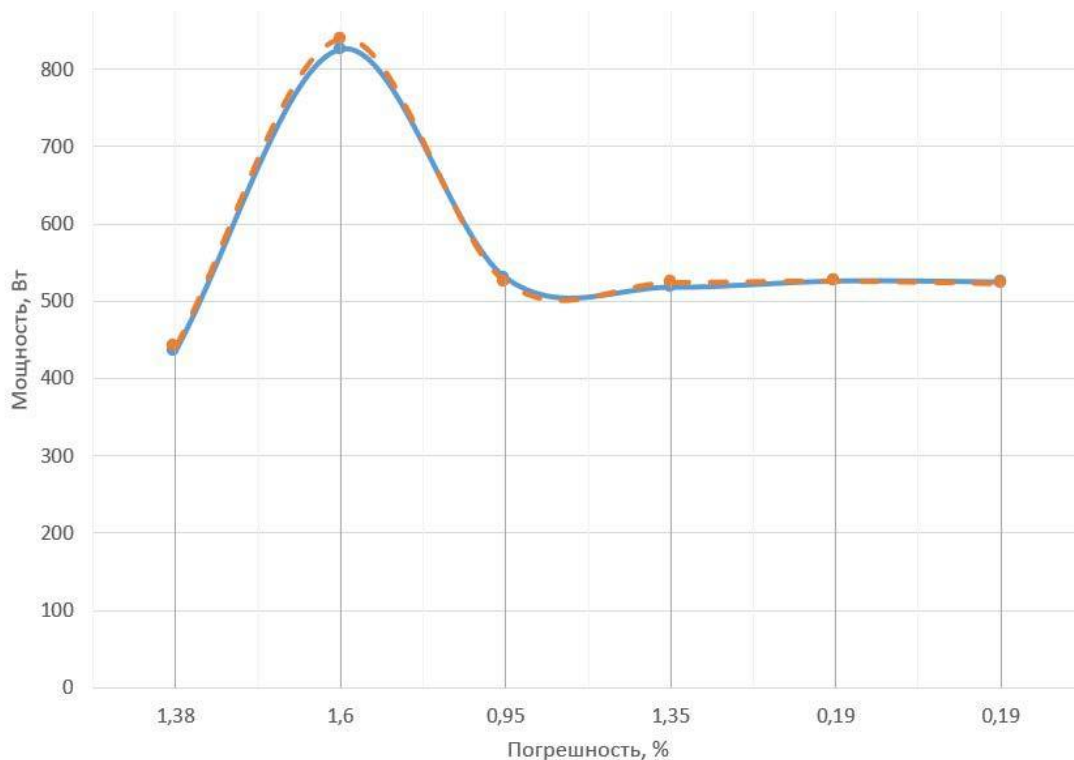
Рисунок 4.7 – Сравнение производительности теоретических и экспериментальных данных

Для анализа соответствия математической модели (2.68) по определению мощности, затрачиваемой на процесс смешивания были проведены экспериментальные исследования. В таблице 4.8 приведено сравнение мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, [52] при одинаковых конструктивных параметрах, полученное в результате эксперимента и с помощью математической зависимости.

Таблица 4.8. Экспериментальные и теоретические значения мощности.

Частота вращения барабана $n$ , мин <sup>-1</sup>	Угол наклона лопасти $\varepsilon$ , град	Ширина лопасти $b$ , мм	Мощность эксперимент $N_э$ , Вт	Мощность теория $N_т$ , Вт	Погрешность, %
20	16	150	435,9	441,91	1,38
60	16	150	826,1	839,63	1,6
40	12	150	529,9	524,83	0,95
40	20	150	517,8	524,54	1,35
40	16	120	525,9	526,44	0,19
40	16	180	524,6	523,09	0,19

Проведя сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими, можно заметить, что максимальная погрешность не превышает 1,4% и математическая модель по определению мощности смесителя описывает процесс смешивания с необходимой точностью. (рис. 4.8)



— экспериментальная зависимость; - - - теоретическая зависимость

Рисунок 4.8 – Сравнение мощности теоретических и экспериментальных данных

Сравнительные характеристики экспериментальных и теоретических данных подтвердили совпадение полученных значений производительности барабанного смесителя и затраченной мощности на технологический процесс [119, 120].

### **4.3 Исследование влияния сапропеле-минеральных удобрений на рост и развитие сельскохозяйственных культур и на агрохимические показатели почвы.**

Так как вегетационные опыты помогают глубже понять действие удобрений в последующих полевых опытах, а также позволяют определить запасы в почве усвояемых питательных веществ, которые могут быть взяты

растениями при оптимальных условиях их роста, данный метод исследования был выбран для определения влияния сапропеле-минеральных удобрений на рост и развитие пшеницы, и на агрохимические показатели почвы [7, 96].

Для реализации эксперимента была определена трехвариантная схема: 1) сапропель; 2) NPK в соотношении 1:1:1,2; 3) СМУ. Повторность каждого варианта была трехкратной. В течение вегетации растений велись наблюдения, результаты которых представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9. Динамика развития пшеницы в зависимости от вида вносимого удобрения [52].

	I			II			III		
	Сапропель			NPK 1:1:1,2			СМУ		
	Повторности			Повторности			Повторности		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Всходы	08.05	08.05	08.05	07.05	08.05	07.05	06.05	07.05	07.05
Кущение	22.05	22.05	22.05	21.05	22.05	22.05	19.05	20.05	20.05
Выход в трубку	29.05	28.05	29.05	27.05	28.05	28.05	26.05	27.05	26.05
Колошение	18.06	17.06	17.06	14.06	14.06	15.06	13.06	13.06	13.06
Цветение	28.06	28.06	27.06	23.06	24.06	24.06	22.06	22.06	23.06
Молочная спелость	23.07	23.07	22.07	19.07	20.07	20.07	17.07	17.07	18.07
Восковая спелость	07.08	06.08	06.08	03.08	03.08	04.08	31.07	31.07	01.08
Полная спелость	18.08	17.08	17.08	13.08	14.08	14.08	11.08	11.08	11.08

Из таблицы видно, что растения пшеницы во всех фазах во втором и третьем вариантах, при использовании минеральных удобрений и СМУ, развивались быстрее чем, удобренные чистым сапропелем. В фазе кушения было заметно более слабое развитие растений в первом варианте, что наглядно видно на рисунке 4.9. Однако, сам процесс кушения их был активнее, что стало причиной образования большего числа колосьев, чем в других вариантах, хотя и меньшего размера.



1 - сапрпель;

2 - минеральные удобрения (NPK 1:1:1,2);

3 - сапрпеле-минеральные удобрения.

Рисунок 4.9 – Развитие пшеницы в фазу кущения в зависимости от вида удобрения.

Установлено положительное влияние СМУ на рост и развитие пшеницы, что объясняется замедленным действием сапрпеле-минеральных удобрений. Известно, что для каждой культуры характерны изменения в соотношении элементов питания и темпах их усвоения в процессе роста и развития. Исследованиями установлено, что наиболее интенсивно зерновые растения потребляют элементы питания в конце фазы кущения - начале фазы выхода в трубку [26, 27, 52]. Нами установлено, что растворение СМУ при нормальных условиях увлажнения почвы происходит в течение 19...23 дней, т.е. минеральные элементы полностью высвобождаются к началу фазы выхода в трубку, что благоприятно сказывается на режиме питания растений [52].

Основные характеристики растений, зафиксированные после их уборки в фазу полной спелости, представлены в таблице 4.10.



Таблица 4.10. - Влияние удобрений на основные характеристики растений

Варианты	Средняя высота стебля, мм	Средняя длина колоса, мм	Масса стеблей на один сосуд, г	Масса зерна на один сосуд, г	Урожайность, ц/га
Сапропель	512	65	12,9	10,1	25,3
НРК 1:1:1,2	553	70	13,2	10,6	26,5
СМУ	596	78	14,6	11,5	28,7

Для оценки влияния удобрений на содержание в почве основных элементов питания нами проведены лабораторные исследования, результаты которых представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11. - Содержание в почве основных минеральных элементов в зависимости от вида удобрения.

Вид удобрения	Содержание азота		Подвижный фосфор	Обменный калий
	Легкогидролизуемый	Нитратный		
Сапропель	4,9	2,8	5,2	7,9
НРК 1:1:1,2	3,8	4,6	6,2	11,8
СМУ	6,3	4,2	7,8	13,5

По данным таблицы 4.11 видно, что внесение сапропеля в чистом виде и, особенно, в смеси с минеральными добавками способствовало накоплению легкогидролизуемого азота, тогда как образцы почвы после внесения минеральных удобрений содержали наибольшее количество нитратного азота и наименьшее количество легкогидролизуемого. Нитратный азот легко усваивается растениями, и содержание его в почве также является важным показателем обеспеченности растений азотом [42, 63].

Содержание подвижных соединений фосфора и калия в образцах почвы во всех вариантах находилось в пределах среднего по классификации А.Т. Кирсанова, хотя наблюдалось увеличение количества данных элементов при внесении минеральных удобрений и СМУ [46, 47].

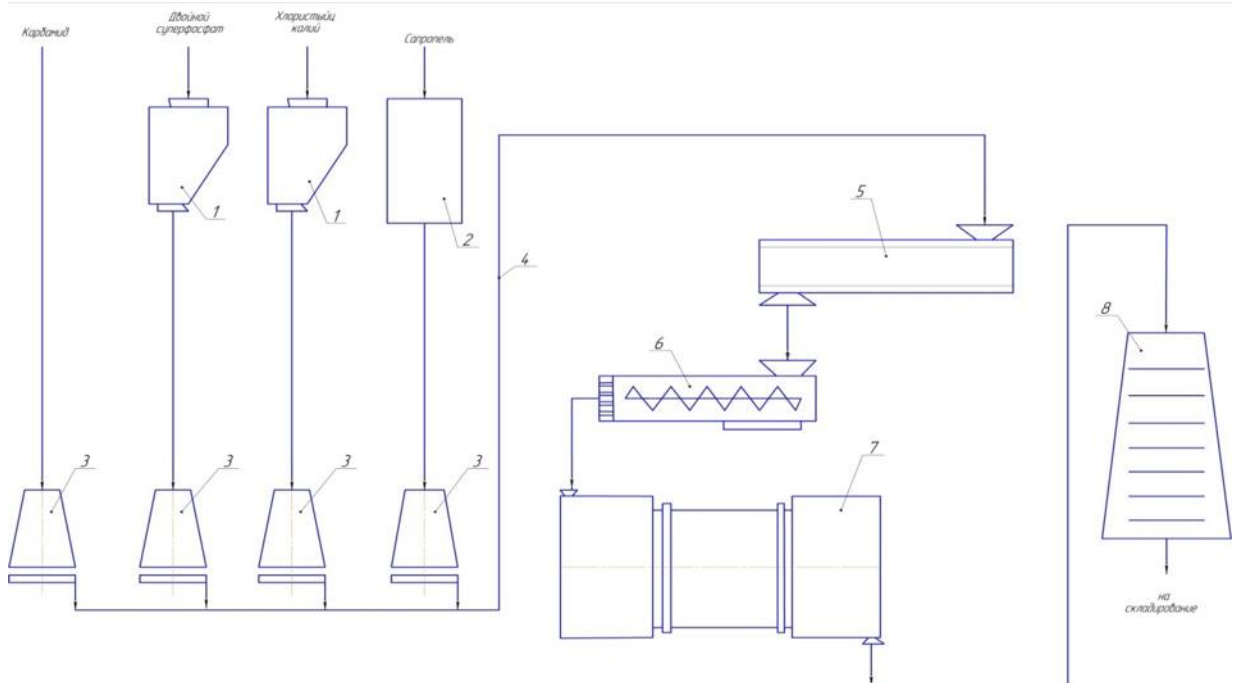
Таким образом, проведенные исследования позволили выявить положительное влияние сапропеле-минеральных удобрений на рост и развитие пшеницы за счет их замедленного действия, что характеризовалось улучшением физиологии растений и высокой урожайностью [48, 49]. Также следует отметить улучшение основных агрохимических показателей почвы при внесении СМУ и, особенно, увеличение количества легкогидролизуемого азота, который является показателем оценки почв по содержанию подвижных соединений данного элемента [136, 138, 149].

#### **4.4 Технологическая линия для поточного производства сапропеле-минеральных удобрений**

Использование сапропеля на удобрение при возделывании сельскохозяйственных культур положительно влияет не только на повышение урожайности, но и при взаимодействии с почвой улучшает ее агрегатное состояние. Поэтому учитывая его сорбирующие свойства и способность при высыхании образовывать прочные гранулы, которые медленно размягчаются под действием влаги и микроорганизмов, при производстве сапропелевых удобрений целесообразно его смешивать с минеральными удобрениями [63].

Для производства сапропеле-минеральных удобрений (СМУ) с помощью установки для добычи сапропеля его извлекают из залежи естественной влажности шнековым насосом и подают в бункер установки. Затем после разгрузки бункера сапропель транспортными средствами перевозится на площадку для дальнейшего обезвоживания. В процессе обезвоживания и подготовки его для производства удобрения проводят щелевание, дискование, рыхление, фрезерование сельскохозяйственными машинами. При влажности 40% сапропель погрузчиком грузят в транспортное средство и перевозят в цех для производства удобрений. Далее сапропель и минеральные удобрения из бункеров поступают на измельчение 1, 2 и через дозаторы 3 по внутреннему транспортеру 4 подаются в барабанно-лопастной смеситель 5 (рис. 4.10).

После смешивания компонентов удобрение поступает в гранулятор 6 и приготовленные гранулы перемещаются в барабанную сушилку 7. При достижении влажности гранул 12-15% процесс сушки завершается и после охлаждения гранулы поступают на хранение (рис. 4.10).



1 - молотковая дробилка; 2 - шнековый измельчитель; 3 - тарельчатый дозатор; 4 - внутрицеховой транспорт; 5 – барабанно-лопастной смеситель; 6 – шнековый пресс-гранулятор; 7 – барабанная сушилка; 8 – хранение

Рисунок 4.10 – Технологическая схема приготовления СМУ.

Предлагаемая технология позволяет более эффективно использовать сапропель при производстве программированных сапропеле-минеральных удобрений в зависимости от плодородия почвы и планируемой урожайности с экономией минеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур [98].

### Выводы:

1. Производственные испытания разработанного барабанно-лопастного смесителя диаметром барабана 0,5 м., длиной рабочей части барабана 1,5 м. показали, что при рациональных параметрах и режимах работы степень однородности сапропели-минеральной смеси равна 92 %. Наиболее существенное влияние на процесс смешивания сапропеля и минеральных

удобрений оказывают конструктивные и технологические параметры смесителя. Взаимная связь которых определяется уравнениями регрессии (4.1-4.3) и наилучшая степень однородности смеси 92% достигается при частоте вращения барабана 40-45 мин<sup>-1</sup>, количестве лопастей 6 шт., угле наклона 16-20°, ширине лопастей 140-160 мм.

2. Использование сапропеле-минеральных удобрений влажностью полученной смеси 40% оказывает положительное влияние на агрохимические свойства почвы: содержание легкогидролизуемого азота повышается в 1,66 раза, подвижного фосфора в 1,25 раза, обменного калия в 1,14 раза, а также на рост и развитие пшеницы: полная спелость наблюдалась на 7 дней раньше, а урожайность повысилась на 2,2 ц/га [52].

## 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА САПРОПЕЛЕ-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Внедрение в производство предлагаемого смесителя оправдано только тогда, когда он обеспечивает экономический эффект. Чтобы рассчитать технико-экономический эффект от внедрения в технологический процесс смешивания сапропеле-минеральных удобрений барабанно-лопастного смесителя использовали данные за 2019 год [52].

Общие затраты при внедрении предлагаемого смесителя определяли по показателю приведенных затрат, который рассчитывали по формуле:

$$Зп = С + Ен*К, \quad (5.1)$$

- где
- Зп – приведенные затраты;
  - С – текущие затраты;
  - Ен – нормативный коэффициент экономической эффективности единовременных затрат (0,15);
  - К – единовременные затраты.

Для определения экономического эффекта внедрения предлагаемого смесителя необходимо сравнить приведенные затраты базового и предлагаемого варианта. Для этой цели использовали показатель годового экономического эффекта:

$$Э = Эг - Ен*К, \quad (5.2)$$

- где
- Э – годовой экономический эффект;
  - Эг – годовая экономия (прибыль), вызванная внедрением предлагаемого смесителя;
  - К – единовременные затраты, связанные с покупкой комплектующих деталей;
  - Ен – нормативный коэффициент.

Годовой экономический эффект представляет собой абсолютный показатель эффективности. Система считается эффективной, если  $\Delta > 0$ .

Сравнение величины годового экономического эффекта по различным вариантам даёт возможность выбора наиболее эффективного варианта внедрения предлагаемого смесителя с наименьшими размерами годовых приведенных затрат.

Показатель эффективности является относительной величиной, сравнивающей результаты с затратами:

$$E = \Delta / K, \quad (5.3)$$

где  $K$  – затраты на модернизацию смесителя.

Эффективность единовременных затрат рассчитывали, как отношение разности между текущими затратами базового и предполагаемого вариантов к сумме единовременных затрат предполагаемого варианта [128].

Большое значение имеет определение времени, в течение которого полностью окупятся все единовременные затраты, связанные с внедрением смесителя. Срок окупаемости является обратной величиной коэффициента эффективности:

$$T = K / \Delta \quad (5.4)$$

Для определения экономической эффективности предлагаемого барабанно-лопастного смесителя для производства сапропеле-минеральных удобрений сравнивали его со смесителем, который может быть использован для смешивания сапропеля с минеральными удобрениями. (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Техничко-экономическая характеристика базового и предлагаемого смесителей сапропеле-минеральных удобрений

Показатель	Базовый смеситель	Предлагаемый смеситель
1	2	3
Производительность, т/ч	5	1,2
Установленная мощность, кВт	7,5	0,5

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3
Объем смесителя, м <sup>3</sup>	0,5	0,3
Частота вращения вала, мин <sup>-1</sup>	65	45
Длина/ширина/высота, мм	2000*1350*1600	1250*500*500
Вес, кг	650	360
Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1

На основе технико-экономических показателей смесителей определили экономическую эффективность предлагаемого смесителя.

Таблица 5.2 – Расчет экономической эффективности предлагаемого смесителя

Показатель	Базовый смеситель СС-500	Предлагаемый смеситель
Производительность, т/ч	5	1,2
Производительность с учетом требуемого качества смеси, т/ч	5	1,2
Установленная мощность, кВт	7,5	0,5
Стоимость оборудования, руб.	384 259	65 000
Расход электроэнергии на тонну сапропеле-минерального удобрения, кВт	1,50	0,42
Стоимость 1 кВт электроэнергии, руб.	7	7
Стоимость электроэнергии на 1 тонну удобрений, руб.	10,50	2,92
Годовой объем производства органоминеральных удобрений, т	2 000	2 000
Затраты на электроэнергию при производстве органоминеральных удобрений, руб.	21 000	5 833
Экономия затрат, руб.	0	15 167
Нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений	0,15	0,15
Приведенные затраты, связанные с использованием смесителей удобрений, руб.	157 836	38 917
Текущие (эксплуатационные) затраты, руб.	100 197	29 167
Годовой экономический эффект, руб.	-	5 417

Расчеты показывают, что предлагаемый смеситель удобрений позволяет значительно экономить эксплуатационные затраты. При его использовании затраты на электроэнергию по сравнению с базовыми моделями падают в 3,6 раза (21 000/5 833). Экономия затрат на электроэнергию составляет 15 167 руб. в год.

По сравнению с базовой моделью смесителя меньше величины приведенных затрат, что говорит о хорошей экономической эффективности использования предлагаемого барабанно-лопастного смесителя. Приведенные затраты по сравнению со базовым смесителем меньше на 118 919 руб., или в 4,1 раза.

Дополнительная величина прибыли за год которая может быть получена при использовании предлагаемого барабанно-лопастного смесителя составляет величину годовой экономии затрат 478 887 руб. Исходя из этого срок окупаемости смесителя составит 0,7 года.

**Выводы:** Использование разработанного барабанно-лопастного смесителя для производства сапропеле-минеральных удобрений позволяет снизить энергозатраты в 3,6 раза. Получить дополнительный доход 478 887 руб. в год при сроке окупаемости 0,7 года.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования процесса смешивания сапропеля с минеральными удобрениями в барабанном смесителе позволяют сделать следующие выводы:

1. Для повышения плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур необходимо в растениеводстве использовать медленнодействующие органоминеральные удобрения и для повышения эффективности процесса смешивания сапропеле-минеральных удобрений рекомендуется использовать барабанный смеситель непрерывного действия.

2. Для обоснования конструктивных и технологических параметров барабанного смесителя необходимо использовать математические модели, позволяющие определить частоту вращения барабана (2.14), ширину лопасти (2.53), продольную скорость перемещения сапропеле-минеральной массы (2.48), зависимость длины барабана от радиуса (2.57). Также в результате теоретических исследований были выявлены зависимости: производительность смесителя (2.52), общая работа, совершаемая в процессе смешивания компонентов (2.67), затраченная мощность (2.68) и установлено, что наибольшее влияние на эти показатели оказывают конструктивные параметры радиус и частота вращения барабана, его длина, ширина лопасти и физико-механические свойства смеси.

3. Для обеспечения однородности сапропеле-минеральных удобрений и повышения эффективности технологического процесса производства целесообразно использовать разработанные математические модели радиуса барабана (2.54) и угла наклона лопасти (2.56) для обоснования установки лопастей внутри барабана.

4. Производственные испытания разработанного барабанно-лопастного смесителя диаметром барабана 0,5 м., длиной рабочей части барабана 1,5 м. показали, что при рациональных параметрах и режимах работы степень однородности сапропели-минеральной смеси равна 92 %. Наиболее

существенное влияние на процесс смешивания сапропеля и минеральных удобрений оказывают конструктивные и технологические параметры смесителя. Взаимная связь которых определяется уравнениями регрессии (4.1-4.3) и наилучшая степень однородности смеси достигается при частоте вращения барабана 40-45 мин<sup>-1</sup>, количестве лопастей 6 шт., угле наклона 16-20°, ширине лопастей 140-160 мм.

5. Использование сапропеле-минеральных удобрений влажностью полученной смеси 40% оказывает положительное влияние на агрохимические свойства почвы: содержание легкогидролизуемого азота повышается в 1,66 раза, подвижного фосфора в 1,25 раза, обменного калия в 1,14 раза, а также на рост и развитие пшеницы: полная спелость наблюдалась на 7 дней раньше, а урожайность повысилась на 2,2 ц/га. Использование барабанно-лопастного смесителя для производства сапропеле-минеральных удобрений позволяет снизить энергозатраты в 3,6 раза. Получить дополнительный доход 478 887 руб. в год при сроке окупаемости смесителя 0,7 года.

## РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Для увеличения содержания в почве основных минеральных элементов и повышения урожайности сельскохозяйственных культур, рекомендуется использовать сапропеле-минеральные удобрения. А для интенсификации процесса смешивания необходимо использовать разработанный барабанно-лопастной смеситель. Результаты исследований могут быть использованы предприятиями, занимающимися возделыванием сельскохозяйственных культур.

2. Работу по дальнейшему совершенствованию научных исследований целесообразно продолжить по производству программированных сапропеле-минеральных удобрений под различные сельскохозяйственные культуры и виды почв.

## Принятые обозначения

$\alpha$  – угол отрыва частиц, град;

$\omega$  – угловая скорость вращения барабана,  $c^{-1}$ ;

$R$  – радиус барабана, м;

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

$V_r$  – относительная линейная скорость движения частицы смеси по длине лопасти, м/с;

$f$  – коэффициент трения;

$r_x$  – расстояние от оси барабана до частицы смеси, м;

$\ddot{x}, \dot{x}, x$  – соответственно ускорение, скорость и величина перемещения частицы по лопасти;

$\varphi$  – угол трения сапропеле–минеральной смеси о материал лопасти;

$Q, Q_3$  – соответственно производительность смесителя и линии загрузки;

$Q_1, Q_2 \dots Q_n$  – производительность отдельных дозаторов–накопителей;

$F_b$  – поперечное сечение барабана,  $m^2$ ;

$\rho$  – плотность сапропеле–минеральной смеси,  $kg/m^3$ ;

$V_n$  – поступательная скорость массы в барабане, м/с;

$h$  – высота подъема частицы смеси до точки отрыва ее от стенки барабана, м;

$\delta$  – угол наклона продольной оси барабана;

$t_1$  – время, затраченное на перемещение частицы по круговой траектории;

$t_2$  – время движения по параболической траектории (вниз);

$R_0$  – радиус круговой траектории;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий изменение траектории полета индивидуальной частицы смеси во время полета в потоке после отрыва от стенки;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение производительности смесителя в результате приращения перемещения смеси за один цикл в продольном направлении барабана за счет движения от точки отрыва не сразу вертикально вниз, а по параболической траектории, т.е. за счет эффекта броска;

- $k_v$  – коэффициент заполнения межлопастного пространства и изменения плотности смеси в этом пространстве. Величина коэффициента  $k_v$  зависит от количества лопастей в смесителе;
- $R_1$  – радиус бандажа, м;
- $r$  – радиус ролика, м;
- $k$  – коэффициент трения качения, м;
- $G_b$  – сила тяжести барабанов, Н;
- $G_c$  – сила тяжести материала, Н;
- $\chi$  – угол между вертикальной осью барабанов и линией центров барабана и ролика;
- $r_1$  – радиус цапфы, м;
- $f$  – коэффициент трения скольжения цапф роликов;
- $R$  – радиус барабана, м;
- $b$  – ширина лопасти, м;
- $\varphi$  – угол обрушения;
- $n$  – частота вращения барабана, об/с;
- $\eta$  – коэффициент полезного действия привода смесителя;
- $\rho$  – плотность сапропеле-минеральной смеси, кг/м<sup>3</sup>;
- $Q^N$  – норма внесения карбамида, кг/га;
- $\partial v^N$  – количество действующего вещества в карбамиде, %;
- $\partial v^i$  – количество действующего вещества в рассчитываемом компоненте, %;
- $Q_{act}$  – часовая производительность барабанного смесителя, т/ч;
- $M$  – масса образца сапропеле-минеральной смеси, кг;
- $t$  – время заполнения части барабана, с;
- $V$  – коэффициент вариации;
- $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;
- $x_i$  – количество сапропеля в пробе, г;
- $n$  – количество проб;

- $x_{ср}$  - среднее значение случайной выборки, г;
- $y$  - критерий оптимизации;
- $x_1, x_2, x_3, x_4$  - кодовое значение факторов;
- $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$  - коэффициенты при соответствующих значениях  $x_i$ ;
- $n$  - количество опытов эксперимента;
- $m$  - число уровней варьирования;
- $k$  - число факторов в серии опытов;
- $b_i$  - коэффициент уравнения регрессии;
- $\Delta b_i$  - доверительный предел;
- $t$  - критерий Стьюдента при 5%-ном уровне значимости;
- $W$  - влажность сапропеля, %;
- $M_1$  - масса кюветы с навеской сапропеля до сушки, г;
- $M_2$  - масса кюветы с навеской высушенного сапропеля, г;
- $M_3$  - масса пустой высушенной кюветы, г;
- $M$  - масса навески сапропеля, г;
- $W_K$  - конечная (задаваемая) относительная влажность сапропеля, %;
- $W_H$  - исходная относительная влажность сапропеля, %;
- $Z_p$  - приведенные затраты;
- $C$  - текущие затраты;
- $E_n$  - нормативный коэффициент экономической эффективности единовременных затрат (0,15);
- $K$  - единовременные затраты;
- $\mathcal{E}$  - годовой экономический эффект;
- $\mathcal{E}_г$  - годовая экономия (прибыль), вызванная внедрением предлагаемого смесителя;
- $K$  - единовременные затраты, связанные с покупкой комплектующих деталей;
- $E$  - норма прибыли;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимия в вопросах и ответах / А. А. Калининский, И. Р. Вилдфлуш, В. А. Ионас [и др.]. – Минск : Урожай, 1991. – 215 с. – ISBN 5-7860-0518-6. – Текст : непосредственный.
2. Адеева, Л. Н. Гуминовый сорбент из сапропеля для очистки сточных вод от нефти / Л. Н. Адеева, Д. С. Платонова. – Текст : непосредственный // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства, Омск, 24–28 апреля 2017 года. – Омск : Омский государственный технический университет, 2017. – С. 38-39.
3. Адеева, Л. Некоторые характеристики гуминовых кислот, выделяемых из сапропеля Омской области / Л. Адеева, Д. Платонова, Т. Диденко. – Текст : непосредственный // Прикладные нанотехнологии и нанотоксикология : 2-я Международная школа-конференция. – Листвянка, 2013. - С. 146-147.
4. Антипов, С. О. Совершенствование технологических процессов использования сапропеля на кормовые добавки путем обоснования послышной разработки залежи и конструктивных параметров смесителя : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антипов Скергей Олегович. – Великие Луки, 1999. – 176 с. – Текст : непосредственный.
5. Багинскас, Б. П. Содержание микроэлементов в сапропелях Литовской ССР / Б. П. Багинскас, А. Б. Жямайтис, И. М.Кичинскас. – Текст : непосредственный // Микроэлементы в биологии и их применение в медицине и сельском хозяйстве. Том. 3. – Чебоксары, 1986. – С. 40-41.
6. Биогеохимические особенности образования сапропеля в недренированных озерах Прибайкалья (на примере озера Очки) / Г. А. Леонова, В. А. Бобров, С. К. Кривоногов [и др.]. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2015. – Выпуск 56, № 5. – С. 745-761.
7. Богданов, В. В. Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Е. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. - Ленинград : Химия : Ленинградское отделение, 1989. - 224 с. – (Химия - промышленности). – ISBN 5-

7245-0286-0. – Текст : непосредственный.

8. Булавко, А. Г. Водные ресурсы и человек / А. Г. Булавко. – Минск : Наука и техника, 1976. – 39 с. – Текст : непосредственный.

9. Васильев, В. А. Справочник по органическим удобрениям / В. А. Васильев, Н. В. Филиппова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Росагропромиздат, 1988. - 255 с. – ISBN 5-260-00453-1. – Текст : непосредственный.

10. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – Москва : Колос, 1973. – 195 с. – Текст : непосредственный.

11. Вимба, Б. Я. Химический состав сапропелей Латвийской ССР и их классификация / Б. Я. Вимба, Е. Я. Лапса, Я. С. Краулер. – Текст : непосредственный // Научные труды / Латвийская СХА. – Елгава, 1970. – Выпуск 24, Часть 2. – С. 157-168.

12. Влияние добавления сапропеля на отдельные свойства почвы и урожайность полевых томатов в Юго-Западной Сибири / Н. Наумова, Т. Нечаева, Н.Смирнова [и др.]. – Текст : непосредственный // Азиатский журнал почвоведения и питания растений. – 2017. – Том 1, № 3. – С. 1-11.

13. Войтов, П. И. Механизация приготовления и внесения органоминеральных смесей / П. И. Войтов. – Москва : Московский рабочий, 1964. – 119 с. – Текст : непосредственный.

14. Вопросы земледельческой механики. Том 2 / под редакцией М. Н. Мацепуро, Б. Н. Ярушкевича, И. В. Манюта. – Минск: Государственное издательство БССР, Редакция сельскохозяйственной литературы, 1959. – 324 с. – Текст : непосредственный.

15. ГОСТ 26712-94. Межгосударственный стандарт. Удобрения органические. Общие требования к методам анализа : введен в действие Постановлением Госстандарта России N 89 от 01 марта 1995 года : взамен ГОСТ 26712-85 : дата введения 1 января 1996 года / разработан Центральным научно-исследовательским институтом агрохимического обслуживания сельского



хозяйства. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс. – Режим доступа : локальный ; по договору. – Обновление еженедельно.

16. Грантина-Иевина, Л. Влияние пресноводного сапропеля на растения в отношении его активности, влияющей на рост, и содержания культивируемых микроорганизмов / Л. Грантина-Иевина, А. Карлсон, У. Андерсон-озола. – DOI 10.13080/z-a.2014.101.045. – Текст : непосредственный // Земдирбисте-Сельское хозяйство. – 2014. – Том 101, № 4. – С. 355-366. – ISSN 1392-3196.

17. Даугвилиене, Д. Изменение свойств камбизола супесей при применении известкового сапропеля и известняка / Д. Даугвилиене, А. Бурба, Е.Баксиене. – Текст : непосредственный // Журнал продовольствия, сельского хозяйства и окружающей среды. – 2014. – Том 12, № 1. – С. 491-495.

18. Дудин, В. М. Зависимость основных свойств сапропеля оз. Неро от глубины залежи / В. М. Дудин // Научные труды / Ярославский политехнический институт. – Ярославль, 1989. – 17 с. – Текст : непосредственный.

19. Евдокимова, Г. А. Биологическая активность продуктов химической модификации сапропелей / Г. А. Евдокимова, О. М. Яночкина, О. М. Букач. – Текст : непосредственный // Торфяная промышленность. – 1987. - № 3. – С. 18-20. – ISSN 0040-9472.

20. Евдокимова, Г. А. Виды сапропелевого сырья Белоруссии для производства удобрений / Г. А. Евдокимова, Т. К. Будай. – Текст : непосредственный // Торфяная промышленность. – 1987. - № 2. – С. 16-17. – ISSN 0040-9472.

21. Жевлаков, П. К. Исследование процессов смешения кормов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жевлаков, Павел Кузьмич; Ленинградский сельскохозяйственный институт. - Ленинград, 1958. - 17 с. – Текст : непосредственный.

22. Жуков, Ф. А. Сапропель – чудо Нечерноземья / Ф. А. Жуков. – Текст : непосредственный // Химия и жизнь. – 1981. - № 6. – С. 8. – ISSN 1727-5903.

23. Иванец, Г. Е. Разработка вибрационных смесителей с прямым и обратными контурами рециклов смешиваемых потоков : автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.04.09 / Иванец Галина Евгеньевна. – Москва, 1990. – 16 с. – Текст : непосредственный.

24. Иванова, Т. А. Кинетика конвективной сушки сапропелей / Т. А. Иванова // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 57-61. – ISSN 2308-8583. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/309943> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

25. Игнатенков, В. Г. Анализ функций шнекового смесителя / В. Г. Игнатенков, А. М. Лебедко. – Текст : непосредственный // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного производства Псковской области : сборник научных трудов / Великолукская ГСХА. – Великие Луки, 2004. – С. 4-5.

26. Игнатенков, В. Г. Влияние производства зеленой кормовой добавки на основе сапропеля на экологическое состояние водоемов / В. Г. Игнатенков. – Текст : непосредственный // Единое экологическое пространство – основа устойчивого развития : материалы региональной экологической научно-практической конференции. – Великие Луки, 2004. – С. 74-75.

27. Игнатенков, В. Г. Определение зависимости насыпной плотности сапропеля от влажности / В. Г. Игнатенков, А. М. Лебедко, А. Ю. Шлепетинский. – Текст : непосредственный // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного производства Псковской области : сборник научных трудов / Великолукская ГСХА. – Великие Луки, 2004. – С. 3.

28. Игнатенков, В. Г. Повышение эффективности производства витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля путем обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя-измельчителя : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Игнатенков Валерий Геннадьевич. – Великие Луки, 2005. – 180 с. – Текст : непосредственный.

29. Игнатенков, В. Г. Результаты экспериментальных исследований универсального смесителя-измельчителя для производства витаминно-кормовых добавок на основе сапропеля / В. Г. Игнатенков, Е. Л. Лаппо, Д. М. Быченков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6. – С. 166-171. – ISSN 1996-4277. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/309116> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

30. Игнатенков, Г. И. Создание комплекса специализированных вагонов на основе метода адаптивного конструирования : монография / Г. И. Игнатенков. – Великие Луки, 2001. – 202 с. – Текст : непосредственный.

31. Использование возможностей торцевой зубчатой передачи для измельчения материалов / В. А. Титов, В. С. Секацкий, Н. А. Колбасина, Н. В. Мерзликина. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. - №4 – С.99-105. – ISSN 0234-6206.

32. Исследование процесса сушки органического сапропеля / С. Н. Кокошин, А. С. Кизуров, Б. О. Киргинцев, М. А. Бухаленков // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 6. – С. 129-132. – ISSN 2073-0853. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/313661> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

33. Исследование процесса сушки органического сапропеля / С. Н. Кокошин, А. С. Кизуров, Б. О. Киргинцев, М. А. Бухаленков // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 6. – С. 129-132. – ISSN 2073-0853. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/313661> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

34. Исследование работы барабанного ячеистого дозатора универсального смесителя-измельчителя витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля / В. Г. Игнатенков, К. А. Богданов, Е. А. Иванов [и др.] //

Вестник Курганской ГСХА. – 2020. – № 1. – С. 62-65. – ISSN 2227-4227. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/313388> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

35. Карасев, Ю. А. Повышение эффективности обезвоживания сапропеля естественной влажности путем совершенствования конструктивных и технологических параметров шнекового пресса : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Карасев Юрий Александрович. – Великие Луки, 1999. – 148 с. – Текст : непосредственный.

36. Кононов, Б. В. Классификация и анализ смесителей кормов / Кононов Б. В., Шпагин Н. Г. / Сборник научных работ / Саратовский СХИ. – Саратов, 1978. – Выпуск 123. – С. 26-34.

37. Коптев В. В. Основы научных исследований и патентования / В. В. Коптев, В. А. Богомягких, М. Ф. Трифонова. – Москва : Колос, 1993. – 144 с. – ISBN 5-10-000028-7. – Текст : непосредственный.

38. Коршиков, Ю. А. Разработка и исследование барабанного смесителя непрерывного действия для перерабатывающей пищевой промышленности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.18.04 / Коршиков Юрий Алексеевич. – Кемерово, 1996. – 187 с. – Текст : непосредственный.

39. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – Москва : Наука, 1980. – 208 с. – Текст : непосредственный.

40. Крайнев, А. Ф. Словарь-справочник по механизмам / А. Ф. Крайнев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 560 с. – Текст : непосредственный.

41. Лесненко, В. К. Псковские озера / В. К. Лесненко. – Ленинград : Лениздат, 1988. – 112 с. – ISBN 5-289-00110-7. – Текст : непосредственный.

42. Лопотко, М. З. Сапропели и продукты на их основе / М. З. Лопотко, Г. А. Евдокимова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 190 с. – Текст : непосредственный.

43. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. –

Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с. – Текст : непосредственный.

44. Малноч, А. О. Совершенствование технологического процесса приготовления сапропелеминеральных гранулированных удобрений путем обоснования конструктивных и технологических параметров прессующего устройства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Малноч Алексей Олегович. – Великие Луки, 2000. – 187 с. – Текст : непосредственный.

45. Математическое обоснование эффективности работы лопаток шнекового смесителя / В. Г. Игнатенков, Ю. И. Волошин, А. Г. Максимов, Г. И. Игнатенков. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – №2. – С. 19-21. – ISSN 0131-7105.

46. Мацепуро М. Е. Изменение сил, действующих на дрениер в зависимости от его параметров / М. Е. Мацепуро, К. А. Пилкаускас. – Текст : непосредственный // Вопросы земледельческой механики. Том 3. – Минск : Государственное издательство БССР, Редакция сельскохозяйственной литературы, 1960. – С. 211-274.

47. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Роцин. – Ленинград : Колос, 1980. – 168 с. – Текст : непосредственный.

48. Мещеряков Б. В. Повысить производительность шнекового пастоприготовителя / Б. В. Мещеряков. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 1965. - № 2. – С. 27-29. – ISSN 0131-7105.

49. Моисеев, П. И. Анализ рабочих процессов смесителей жидких и влажных кормов / П. И. Моисеев. – Текст : непосредственный // Вклад вузовских ученых в создание наукоемкой продукции высокого уровня : тезисы докладов научно-технологической конференции. – Псков, 1989. – С. 86-87.

50. Морозов, В. В. Изучение зависимости плотности сапропеля от давления сжатия / В. В. Морозов, В. Г. Игнатенков. – Текст : непосредственный // Агропромышленный комплекс: состояние и перспективы развития : сборник научных трудов / Великолукская ГСХА. – Великие Луки, 2005. – С. 127-128.

51. Морозов, В. В. Обоснование параметров барабанного смесителя сапропеле-минеральных удобрений / В. В. Морозов, Л. Н. Савельева. – Текст : непосредственный // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2016. – № 22 (27). – С. 15-21. – ISSN 2075-3756.

52. Морозов, В. В. Пути повышения качества сапропеле-минеральных удобрений / В. В. Морозов, Л. Н. Савельева. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55. – С. 228-235. – ISSN 2078-1318.

53. Морозов, В. В. Сапропелевые кормовые добавки в свиноводстве / В. В. Морозов, В. Г. Игнатенков, А. М. Лебедко // Информационный листок ЦНТИ. – Псков, 2003. – № 59-015-03. – 3 с. – Текст : непосредственный.

54. Морозов, В. В. Сапропель - природный ресурс органического сырья для производства сапропеле-минеральных удобрений / В. В. Морозов, Л. Н. Савельева // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 1. – С. 41-45. – ISSN 2308-8583. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/293341> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

55. Морозов, В. В. Тенденции развития фермерских (крестьянских) хозяйств в регионе Псковско-Чудского озера / В. В. Морозов, З. И. Курбатова. – Текст : непосредственный // Псковский региональный журнал. – 2007. – № 4. – С. 9-15. – ISSN 2219-7931.

56. Морозов, В. В. Теоретическое исследование изменения давления в экструдере для производства кормов с добавлением сапропеля / В. В. Морозов, К. А. Богданов, В. Г. Игнатенков // Вестник Курганской ГСХА. – 2020. – № 2. – С. 75-80. – ISSN 2227-4227. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/313389> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

57. Морозов, В. В. Технология и комплекс машин для послойной разработки сапропеля на удобрения : автореферат диссертации на соискание

ученой степени доктора технических наук : 05.20.01 / Морозов Владимир Васильевич. - Санкт-Петербург, 1995. – 39 с. – Текст : непосредственный.

58. Морозов, В. В. Технология и комплекс машин для послышной разработки сапропеля на удобрении : учебное пособие / В. В. Морозов. – Великие Луки, 1995. – 70 с. – Текст : непосредственный.

59. Морозов, В. В. Технология получения и использования витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля / В. В. Морозов, В. Г. Игнатенков. – Текст : непосредственный // XIII Российская школа по проблемам науки и технологий. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – С. 319-321.

60. Морошкин, Б. Н. Измерительные приборы локомотивов / Б. Н. Морошкин. – Москва : Машиностроение, 1975. – 210 с. – Текст : непосредственный.

61. Мудров, А. Г. Рекомендации по использованию новых смесителей в кормопроизводстве / А. Г. Мудров. – Казань : Татарское книжное издательство, 1982. – 51 с. – Текст : непосредственный.

62. Новые виды удобрений на основе сапропеля и торфа / Л. Агафонова, И. Алсина, Г. Соколов [и др.]. – Текст : непосредственный // Среда. Технология. Ресурсы : материалы 10-й Международной научно-практической конференции. Том II. – Резекне, Латвия. – С. 20-26.

63. Обоснование конструктивных параметров устройства для подачи сапропеля / В. С. Сечкин, В. В. Белов, С. О. Антипов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2004. – № 76. – С. 75-87. – ISSN 0131-5226. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/294267> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

64. Основные конструкции пищевых аппаратов : учебное пособие / Д. М. Бородулин, В. Г. Менх, А. Б. Шушпанников, А. Н. Потапов; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2009. - 167 с. – ISBN 978-5-89289-531-6. – Текст : непосредственный.

65. ОСТ 70.19.2-83 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методы испытаний : дата введения 01.08.1984. – Москва, 1984. – 30 с. – Текст : непосредственный.

66. Павлов, А. Н. Повышение эффективности использования сапропеля естественной влажности на удобрение путем улучшения качественных характеристик и конструкции шнекового нагнетателя : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Павлов Алексей Николаевич. – Санкт-Петербург, 1998. – 187 с. – Текст : непосредственный.

67. Патент №2277836 Российская Федерация, МПК А23N017/00 В02С009/00. Смеситель-измельчитель для приготовления кормов : № 2004112491/13 : заявл. 23.04.2004 : опубл. 20.06.2006 / Игнатенков В. Г., Морозов В. В., Волошин Ю. И., Игнатенков Г. И. – 3 с. – Текст : непосредственный.

68. Перельман, В. Е. Формование порошковых материалов / В. Е. Перельман. – Москва : Металлургия, 1979. – 232 с. – Текст : непосредственный.

69. Перспективы использования сапропеля в сельском хозяйстве / Н. Н. Новых, Л. И. Корсакова, Н. В. Исупова [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 2. – С. 64-68. – ISSN 1817-5457. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/311556> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

70. Пидопличко, А. П. Некоторые итоги изучения сапропелевых отложений Белорусской ССР / А. П. Пидопличко, Р. И. Грищук. – Текст : непосредственный // Химия и генезис торфа и сапропелей. – Минск : Издательство АН БССР, 1962. – С. 258-274.

71. Платонова, Д. С. Использование гуминового сорбента из сапропеля для извлечения ионов палладия из хлоридных растворов / Д. С. Платонова, Л. Н. Адеева. – Текст : непосредственный // Open Eng. – 2018. – №8. – С. 176-181.

72. Поваркова С. С. О химическом составе растений сапропелеобразователей / С. С. Поваркова, В. Е. Раковский. – Текст :



непосредственный // Химия и генезис торфа и сапропелей. – Минск: Издательство АН БССР, 1962. – С. 289-298.

73. Попков, А. Н. Создание метода расчета барабанных смесителей сыпучих материалов непрерывного действия с винтовой рабочей поверхностью : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.04.09 / Попков Александр Николаевич. – Ярославль, 1990. – 143 с. – Текст : непосредственный.

74. Практикум по агрохимии / Б. А. Ягодин, И. П. Дерюгин, Ю. П. Жуков [и др.]; под редакцией Б. А. Ягодина. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 511 с. – Текст : непосредственный.

75. Применение органических удобрений на основе сапропеля и торфа в странах Ближнего Востока / М. Островский, И. Зейдан, С. В. Цуканов [и др.]. – Текст : непосредственный // Европейский агрофизический журнал. – 2014. – Том 1, № 3. – С. 114.

76. Расчет параметров аппарата для приготовления сапропелевой смеси / В. Г. Игнатенков, Ю. И. Волошин, В. В. Морозов, Г. И. Игнатенков. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – №5. – С. 8-9. – ISSN 0131-7105.

77. Результаты экспериментальных исследований шнекового пресса для обезвоживания сапропеля естественной влажности / В. Г. Игнатенков, М. А. Фомичев, В. В. Шлапаков, Д. А. Александров // Вестник Курганской ГСХА. – 2020. – № 2. – С. 62-66. – ISSN 2227-4227. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/313389> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

78. Рыжова, Г. Л. Определение жирных кислот в продуктах вибромагнитной обработки сапропеля методом хроматографии - масс-спектрометрии / Г. Л. Рыжова, М. А. Тюнина, К. А. Дычко. – Текст : непосредственный // Аналитическая химия. – 2013. – Выпуск 68, № 8. – С. 736-742.

79. Савельева, Л. Н. Расчетно-теоретические предпосылки к обоснованию технологических параметров барабанного смесителя непрерывного действия / Л. Н. Савельева, Е. А. Евентьева. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2008. – № 1 (1). – С. 32-36. – ISSN 2072-0297.

80. Сапропелевые удобрения / под редакцией А. С. Мееровского. – Минск : Наука и техника, 1983. – 120 с. – Текст : непосредственный.

81. Сапропели Латвийской ССР и их использование в качестве удобрения / Б. Я. Вимба, Е. Я. Лапса, Н. А. Бракис, З. А. Малдавс. – Текст : непосредственный // Научные труды / Свердловский СХИ. – Свердловск, 1962. – Том 10. – С. 221-228.

82. Сапропель важнейший источник органических удобрений / В. В. Морозов, А. Н. Павлов, И. В. Кокунова, А. О. Малноч. – Текст : непосредственный // Земледелие. – 2001. – №5. – ISSN 0044-3913.

83. Сапропель как связующее: свойства и возможности применения композиционных материалов / В. Обука, М. Шинка, М. Клявиньш [и др.]. – DOI: 10.1088 / 1757-899X / 96/1/012026. – Текст : непосредственный // 2-я Международная конференция по инновационным материалам, конструкциям и технологиям/ ИОР. – Серия: Материаловедение и инженерия. – 2015. – 012026.

84. Селезнев, А. Д. Исследование и обоснование основных параметров смесителей комбикормов для условий сельскохозяйственного производства : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Селезнев Арнольд Дмитриевич. - Минск, 1975. - 27 с. – Текст : непосредственный.

85. Селезнев, А. Д. Исследование и обоснование основных параметров смесителей комбикормов для условий сельскохозяйственного производства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Селезнев Арнольд Дмитриевич. - Минск, 1975. – 195 с. – Текст : непосредственный.

86. Скользаев, В. А. Основы энергетического расчета

пастоприготовителей / В. А. Скользаев, И. В. Сысоев. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1965. - № 3. – С. 22-24. – ISSN 0206-572X.

87. Смесители барабанные : каталог. – Москва, 1958. – Текст : непосредственный.

88. Спектральный анализ редкоземельных элементов в золе сапропеля и его фракциях / Н. Н. Струнина, Т. А. Коваленко, Б. Т. Байсова [и др.]. – Текст : непосредственный // Журнал прикладной спектроскопии. – 2009. – Выпуск 76, №2. – С. 257-259.

89. Способ обезвоживания сапропеля с использованием пульпосгустителей / Д. М. Быченков, В. Г. Игнатенков, Е. Л. Лаппо, В. В. Морозов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4. – С. 148-152. – ISSN 1996-4277. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/302041> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

90. Станкевица, К. Анализ микробного сообщества сапропеля (gyttja), полученного из небольших зарастающих озер в Восточной Латвии / К. Станкевица, О. Мутер, З. Винчевица-Гайле. – Текст : непосредственный // Труды 2-го Конгресса микробиологов Балтии. – Хиого, Япония, 2015. – С. 66 –82.

91. Станкевица, К. Пресноводный сапропель (gyttja): его описание, свойства и возможности использования в современном сельском хозяйстве / К. Станкевица, З. Винчевица-Гайле, М.Клавиныш. – Текст : непосредственный // Агрономические исследования. – 2016. – Том 14, № 3. – С. 929-947.

92. Станкевица, К. Сапропель и возможности его использования / К.Станкевица, М. Клявиныш. – Текст : непосредственный // Научное приложение к журналу Химия. – 2014. – Выпуск 29. – С. 109.

93. Сторчак, И. М. Технологические указания по разборке, ремонту деталей, сборке и регулировке пастоизготовителя ПЗГ-2 / И. М. Сторчак, Л. С. Загорулько. – Москва : ГОСНИТИ, 1966. – 18 с. – Текст : непосредственный

94. Струс, О. Ю. Изучение экстрактов сапропеля из природных месторождений Прибыча / О. Ю. Струс. – Текст : непосредственный // Фармацевтическая химия. – 2015. – Том 7, № 6. – С. 133-137.

95. Стукалин, Ф. Г. Исследование кормосмесителей непрерывного действия и методика их расчетов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Стукалин Ф. Г. – Ленинград : Пушкин, 1965. – 21 с. – Текст : непосредственный.

96. Суркова, Л. В. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в непрерывнодействующих барабанных смесителях и разработка методики их расчета : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.04.09 / Суркова Людмила Васильевна. – Москва, 1975. – 16 с. – Текст : непосредственный.

97. Сыроватка, В. И. Методика проведения испытаний машин для смешивания кормов / В. И. Сыроватка, Е. В. Алябьев. – Москва : Научно-методический отдел ВИЭСХа, 1971. – 55 с. – Текст : непосредственный.

98. Таршис, М. Ю. Метод расчета смесителя сыпучих материалов с волнообразным движением рабочего органа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.04.09 / Таршис Михаил Юльевич. – Ярославль, 1989. – 16 с. – Текст : непосредственный.

99. Теоретическое исследование многофункционального шнекового смесителя-измельчителя витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля / В. В. Морозов, В. Г. Игнатенков, Ю. И. Волошин [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4. – С. 172-177. – ISSN 1996-4277. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/307901> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

100. Технологический менеджмент технического сервиса машин и оборудования / В. Н. Шиловский [и др.]. – Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, - 2005. – 232 с. – ISBN 5-8021-0402-3. – Текст : непосредственный.

101. Титов, Е. М. Химическая характеристика пресноводных сапропелей

и вопросы их классификации / Е. М. Титов. – Текст : непосредственный // Научные труды / Свердловский СХИ. – Свердловск, 1962. – С. 42-56.

102. Уникальные свойства гуминовых веществ из сапропеля / В. А. Румянцев, А. С. Митюков, Л. Н. Крюков, Г. С. Ярошевич. – Текст : непосредственный // Доклады наук о Земле. – 2017. – Том 473, № 2. – С. 482-484.

103. Управление качеством измельчаемого сырья и производительностью работы на универсальном измельчителе с торцевой зубчатой передачей / Н. В. Мерзликина, Ю. А. Пикалов, В. А. Титов, В. С. Секацкий. – Текст : непосредственный // Управление качеством в современной организации : труды V Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2010. – С.73-76.

104. Фролов, В. А. Математические модели и методы оптимального конструирования ЭВА и РЭА / В. А. Фролов. – Харьков : Вища школа, 1985. – 136 с. – Текст : непосредственный.

105. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – Москва : Колос, 1994. – 169 с. – ISBN 5-10-003090-9. – Текст : непосредственный.

106. Хуснутдинов, Б. К. Кинематика, динамика и кинетика смесителя с базовым пространственным шарнирным семизвенником : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.18 / Хуснутдинов Бильгуар Киямович. – Казань, 1994. – 23 с. – Текст : непосредственный.

107. Чикида, В. К. Конструктивные и технологические параметры смесителя кормов для кормоцехов звероферм : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.01 / Чикида Виктор Кириллович. – Ленинград : Пушкин, 1987. – 252 с. – Текст : непосредственный.

108. Шайдак, Л. В. Сапропель в сельском хозяйстве / Л. В. Шайдак, А. Сакович. – Текст : непосредственный // Международный торфяной конгресс. – 2012. – Том 37.

109. Шпагин, Н. Г. Исследование и обоснование основных параметров

теории смешивания кормов в барабанном смесителе непрерывного действия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : / Шпагин Н. Г. – Ленинград : Пушкин, 1985. – Текст : непосредственный.

110. Штин, С. М. Озерные сапропели и их комплексное освоение : учебное пособие / С. М. Штин. – Москва : Горная книга, 2005. – 373 с. – ISBN 5-7418-0216-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/3279> (дата обращения: 11.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

111. Щербина, В. А. Ресурсосберегающие процессы гранулирования и брикетирования кормов шестеренными прессами : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.20.01 / Щербина Виталий Иванович. – зерноград, 2004. – 328 с. – Текст : непосредственный.

112. Экономическое обоснование внедрение мероприятий научно-технического прогресса в АПК (методические рекомендации и примеры расчет) / Ю. А. Конкин, А. Ф. Пацкалев, В. И. Осинов [и др.]. – Москва : МИИСП, 1991. – 79 с. – Текст : непосредственный.

113. Adeeva, L. N. Humic sorbent from sapropel for purification of waste waters from petroleum / L. N. Adeeva, D. S. Platonova. – Text : direct // AIP Conference Proceedings. - 2017. – № 2. – P. 56-59.

114. Adeeva, L. Some characteristics of the humic acids emitted from sapropel of the Omsk region / L. Adeeva, D. Platonova, T. Didenko. – Text : direct // Applied Nanotechnology and Nanotoxicology : 2-nd International School-Conference . – Listvyanka, 2013. - P. 146-147.

115. Application of organic fertilizers based on sapropel and peat in countries of middle east / M. Ostrovskij, I. Zeidan, S. V. Tsukanov [et al.] . – Text : direct // European Agrophysical Journal. – 2014. – Volume 1, № 3. – P. 114.

116. Biogeochemical specifics of sapropel formation in Cisbaikalian undrained lakes (exemplified by Lake Ochki) / G. A. Leonova, V. A. Bobrov, S. K. Krivonogov [et al.] . – Text : direct // Russ. Geol. Geophys. – 2015. – Volume 56, № 5. – P. 745–761.

117. Daugviliene, D. Changes of sandy loam cambisol properties at application for calcareous sapropel and limestone / D. Daugviliene, A. Burba, E. Bakšienė. – Text : direct // Journal of Food, Agriculture and Environment. – 2014. – Volume 12, no. 1. – P. 491–495.

118. Effect of sapropel addition on selected soil properties and field tomato yield in Southwest Siberia / N. Naumova, T. Nechaeva, N. Smirnova [et al.] . – Text : direct // Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2017. – Volume 1, № 3. – P. 1–11.

119. Grantina-Ievina, L. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content / L. Grantina-ievina, A. Karlsons, U. Andersone-ozola. – DOI 10.13080. – Text : direct // Zemdirbyste-Agricultureю – 20147. – Volume 101, № 4. – P. 355-366. – ISSN 1392-3196.

120. New kinds of sapropel and peat based fertilizers / L. Agafonova, I. Alsina, G. Sokolov [et al.] . – DOI: 10.17770/etr2015 . – Text : direct // Environment. Technology. Resources : Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – Rezekne, Latvia. – 2015. – Volume II. – P. 20-26

121. Platonova, D. S. Use of Humic Sorbent from Sapropel for Extraction of Palladium Ions from Chloride Solutions / D. S. Platonova, L. N. Adeeva. – Text : direct // Open Eng. – 2018. – №8. –P. 176-181.

122. Ryzhova, G. L. Determination of fatty acids in products of the vibromagnetic treatment of sapropel by chromatography- mass spectrometry / G. L. Ryzhova, M. A. Tyunina, K. A. Dychko. – Text : direct // J. Anal. Chem. – 2013. – Volume 68, № 8. – P. 736–742.

123. Sapropel as a binder: Properties and application possibilities for composite materials. IOP / V. Obuka, M. Šinka, M. Kļaviņš [et al.] . – DOI 10.1088/1757-899X. – Text : direct // 2-nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies IOP Publishing. – Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – 012026.

124. Spectral analysis of rare-earth elements in ash of sapropel and its fractions / N. N. Strunina, T. A. Kovalenko, B. T. Baisova [et al.]. – Text : direct // Journal of Applied Spectroscopy. - 2009. - Volume 76, №2. - P. 257-259.

125. Stankevica, K. Freshwater sapropel (gyttja): its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture / K. Stankevica, Z. Vincevica-Gaile, M. Klavins. – Text : direct // Agronomy Research. – 2016. – Volume 14, № 3. – P. 929–947.

126. Stankevica, K. Microbial community analysis of sapropel (gyttja) derived from small overgrowing lakes in the eastern Latvia / K. Stankevica, O. Muter, Z. Vincevica-Gaile. – Text : direct // In Proceedings of the 2nd Congress of Baltic Microbiologists. – Hyogo, Japan, 2015. – P. 66–82.

127. Stankeviča, K. Sapropelis un tā izmantošanas iespējas / K. Stankeviča, M. Kļaviņš. – Text : direct // Mater. Sci. Appl. Chem. – 2014. – Volume 29, № 29. – P. 109, 2014.

128. Strus, O. Y. Study of sapropel extracts from Prybych natural deposits / O. Y. Strus. – Text : direct // J. Chem. Pharm. Res. – 2015. – Volume 7, № 6. – P. 133–137.

129. Szajdak, L. W. Sapropel in agriculture / L. W. Szajdak, A. Sakowicz. – Text : direct // International Peat Congress. – 2012. – Volume 37.

130. Unique properties of humic substances from sapropel / V. A. Rumyantsev, A. S. Mityukov, L. N. Kryukov, G. S. Yaroshevich. – Text : direct // Doklady Earth Sciences. – 2017. – Volume 473, № 2. – P. 482–484.



## Приложения

## Приложение А

**Справка**

об использовании результатов научно-исследовательской работы аспиранта  
кафедры «Автомобили, тракторы и сельскохозяйственные машины»  
Савельевой Л.Н. в учебном процессе

В результате выполнения научно-исследовательской работы «Совершенствование технологического процесса смешивания сапропеле-минеральных удобрений с обоснованием параметров смесителя» в период с 2016 года по 2020 год, получены следующие основные результаты: в соответствии с агрохимическими и физико-механическими свойствами сапропеле-минеральной смеси обоснованы конструктивные и технологические параметры барабанно-лопастного смесителя непрерывного действия и его применения в технологическом процессе приготовления сапропеле-минеральных удобрений.

Созданная экспериментальная установка, результаты исследований физико-механических свойств сапропеле-минеральных удобрений, математические модели конструктивных и технологических параметров смесителя, влияние сапропеле-минеральных удобрений на агрохимические свойства почвы, рост и развитие сельскохозяйственных культур используются при изучении дисциплины «Современные методики научных исследований», при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, а также в программе курсов повышения квалификации для специалистов АПК на кафедре «Автомобили, тракторы и сельскохозяйственные машины».

Декан инженерного факультета  
Великолукской ГСХА, к.т.н., доцент

Проректор по учебной работе  
Великолукской ГСХА, к.т.н., доцент

26.04.2021 г.

  
А.Н. Павлов  
  
М.Б. Тельпук

## Приложение Б

Таблица Б1 - Матрица планирования эксперимента Бокса (В4) для определения затраченной мощности на процесс смешивания

Входные параметры				Выходной параметр мощности, Вт			
а, шт.	п, мин <sup>-1</sup>	ε, град.	в, мм	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>ср</sub>
4	20	12	120	680,2	685	688	684,4
8	20	12	120	670,3	650,2	706	675,5
4	60	12	120	980,2	965,7	1100	1015,3
8	60	12	120	1080,2	1100	1136	1105,4
4	20	20	120	670,2	675,2	685	676,8
8	20	20	120	664,3	670,1	660,3	664,9
4	60	20	120	1000,4	1100,1	1033,3	1044,6
8	60	20	120	1025	1055	1019	1033
4	20	12	180	700,3	710	703,2	704,5
8	20	12	180	660,4	640	694	664,8
4	60	12	180	1000,2	1150,2	1153,2	1101,2
8	60	12	180	1060,2	1100,1	1094,1	1084,8
4	20	20	180	705,4	710,2	720,1	711,9
8	20	20	180	715,1	710,3	744,2	723,2
4	60	20	180	1050,1	1060	1080,1	1063,4
8	60	20	180	1059,1	1032	1100	1063,7
4	40	16	150	500,1	502,4	510,4	504,3
8	40	16	150	540,4	535,2	571,1	548,9
6	20	16	150	425,2	430,4	452,1	435,9
6	60	16	150	825,1	830	823,2	826,1
6	40	12	150	525,2	530,4	534,1	529,9
6	40	20	150	510,1	515,2	528,1	517,8
6	40	16	120	520,4	523,1	534,2	525,9
6	40	16	180	522,2	525,4	526,2	524,6

Таблица Б2 - Матрица планирования эксперимента Бокса (В4) для определения производительности смесителя сапропеле-минеральных удобрений

Входные параметры				Выходной параметр производительности, кг/мин			
а, шт.	п, мин <sup>-1</sup>	ε, град.	в, мм	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>ср</sub>
4	20	12	120	12	15	18	15
8	20	12	120	14	16	18	16
4	60	12	120	21	20	25	22
8	60	12	120	23	25	27	25
4	20	20	120	20	21	22	21
8	20	20	120	19	26	24	23
4	60	20	120	18	17	19	18
8	60	20	120	18	19	20	19
4	20	12	180	17	18	16	17
8	20	12	180	19	18	17	18
4	60	12	180	22	24	26	24
8	60	12	180	24	23	25	24
4	20	20	180	20	24	25	23
8	20	20	180	19	23	24	22
4	60	20	180	17	22	18	19
8	60	20	180	19	21	20	20
4	40	16	150	17	20	23	20
8	40	16	150	20	19	21	20
6	20	16	150	19	23	24	22
6	60	16	150	26	25	24	25
6	40	12	150	24	22	23	23
6	40	20	150	23	24	25	24
6	40	16	120	21	23	25	23
6	40	16	180	25	23	24	24

Таблица Б3 - Матрица планирования эксперимента Бокса (В4) для определения степени однородности смеси

Входные параметры				Выходной параметр степени однородности смеси, %			
а, шт.	п, мин <sup>-1</sup>	ε, град.	в, мм	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>ср</sub>
4	20	12	120	61,3	63,4	66,1	63,6
8	20	12	120	63,2	65,5	64,2	64,3
4	60	12	120	30,1	31,5	35,3	32,3
8	60	12	120	40,5	42,4	45,2	42,7
4	20	20	120	68,2	69,4	71,8	69,8
8	20	20	120	62,2	64,1	67,2	64,5
4	60	20	120	34,1	36,4	35,1	35,2
8	60	20	120	42,8	46,7	43,1	44,2
4	20	12	180	68,4	65,5	67,4	67,1
8	20	12	180	66,4	65,8	67,3	67,5
4	60	12	180	30,2	32,4	31,6	31,4
8	60	12	180	45,5	46,2	47,2	46,3
4	20	20	180	68,2	67,5	72,2	69,3
8	20	20	180	63,5	66,4	67,2	65,7
4	60	20	180	32,2	35,6	43,5	34,1
8	60	20	180	49,7	50,5	54,3	51,5
4	40	16	150	72,1	76	74,8	74,3
8	40	16	150	82,5	84,7	86,6	84,6
6	20	16	150	84,6	86,8	89,3	86,9
6	60	16	150	60,9	64,6	62,3	62,6
6	40	12	150	90,2	91,9	94,5	92,2
6	40	20	150	93,8	96,3	95,8	95,3
6	40	16	120	79,5	81	81,9	80,8
6	40	16	180	81,6	82,2	84	82,6

Таблица Б4 – Кодированная матрица планирования эксперимента Бокса (В4) для многофакторного регрессионного анализа

Входные параметры				Выходные параметры		
x1	x2	x3	x4	N, Вт	Q, кг/мин.	$\lambda$ , %
-1	-1	-1	-1	684,4	15	63,6
1	-1	-1	-1	675,5	16	64,3
-1	1	-1	-1	1015,3	22	32,3
1	1	-1	-1	1105,4	25	42,7
-1	-1	1	-1	676,8	21	69,8
1	-1	1	-1	664,9	23	64,5
-1	1	1	-1	1044,6	18	35,2
1	1	1	-1	1033	19	44,2
-1	-1	-1	1	704,5	17	67,1
1	-1	-1	1	664,8	18	67,5
-1	1	-1	1	1101,2	24	31,4
1	1	-1	1	1084,8	24	46,3
-1	-1	1	1	711,9	23	69,3
1	-1	1	1	723,2	22	65,7
-1	1	1	1	1063,4	19	34,1
1	1	1	1	1063,7	20	51,5
-1	0	0	0	504,3	20	74,3
1	0	0	0	548,9	20	84,6
0	-1	0	0	435,9	22	86,9
0	1	0	0	826,1	25	62,6
0	0	-1	0	529,9	23	92,2
0	0	1	0	517,8	24	95,3
0	0	0	-1	525,9	23	80,8
0	0	0	1	524,6	24	82,6

Таблица Б5 - Матрица планирования эксперимента Бокса (В4) для многофакторного регрессионного анализа

Входные параметры				Выходные параметры		
а, шт.	п, мин <sup>-1</sup>	ε, град.	в, мм	N, Вт	Q, кг/мин	λ, %
4	20	12	120	684,4	15	63,6
8	20	12	120	675,5	16	64,3
4	60	12	120	1015,3	22	32,3
8	60	12	120	1105,4	25	42,7
4	20	20	120	676,8	21	69,8
8	20	20	120	664,9	23	64,5
4	60	20	120	1044,6	18	35,2
8	60	20	120	1033	19	44,2
4	20	12	180	704,5	17	67,1
8	20	12	180	664,8	18	67,5
4	60	12	180	1101,2	24	31,4
8	60	12	180	1084,8	24	46,3
4	20	20	180	711,9	23	69,3
8	20	20	180	723,2	22	65,7
4	60	20	180	1063,4	19	34,1
8	60	20	180	1063,7	20	51,5
4	40	16	150	504,3	20	74,3
8	40	16	150	548,9	20	84,6
6	20	16	150	435,9	22	86,9
6	60	16	150	826,1	25	62,6
6	40	12	150	529,9	23	92,2
6	40	20	150	517,8	24	95,3
6	40	16	120	525,9	23	80,8
6	40	16	180	524,6	24	82,6

## Приложение В – Результаты многофакторного регрессионного анализа

### Ridge Regression - Q

Dependent variable: Q

Independent variables:

a  
n  
e  
b  
a\*n  
a\*e  
a\*b  
n\*e  
n\*b  
e\*b  
a^2  
n^2  
e^2  
b^2

Number of complete cases: 24

### Model Results for Ridge Parameter = 0,0

		<u>Variance</u>
		<u>Inflation</u>
<u>Parameter</u>	<u>Estimate</u>	<u>Factor</u>
CONSTANT	-33,2819	
a	9,36736	308,125
n	0,429792	171,25
e	0,951736	499,75
b	0,117083	746,125
a*n	0,0015625	15,625
a*e	-0,0296875	29,125
a*b	-0,00479167	39,25
n*e	-0,0084375	23,5
n*b	-0,00133333	33,625
e*b	-0,00208333	47,125
a^2	-0,666667	258,281
n^2	-0,00116667	115,781
e^2	0,00208333	457,781
b^2	0,000037037	714,281

R-Squared = 99,9852 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 99,9622 percent

Standard Error of Est. = 0,0355729

Mean absolute error = 0,0185185

Durbin-Watson statistic = 2,21426

Lag 1 residual autocorrelation = -0,193259



**Residual Analysis**

	<i>Estimation</i>	<i>Validation</i>
n	24	
MSE	0,00126543	
MAE	0,0185185	
MAPE	0,0888988	
ME	-1,77636E-15	
MPE	-0,000514456	

**The StatAdvisor**

This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

$$Q = -33,2819 + 9,36736*a + 0,429792*n + 0,951736*e + 0,117083*b + 0,0015625*a*n - 0,0296875*a*e - 0,00479167*a*b - 0,0084375*n*e - 0,00133333*n*b - 0,00208333*e*b - 0,666667*a^2 - 0,00116667*n^2 + 0,00208333*e^2 + 0,000037037*b^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,9852% of the variability in Q. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,9622%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0355729. The mean absolute error (MAE) of 0,0185185 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.

**Ridge Regression - Q**

Dependent variable: Q

Independent variables:

a  
n  
e  
b  
a^2

Number of complete cases: 24

**Model Results for Ridge Parameter = 0,0**

		<i>Variance</i>
		<i>Inflation</i>
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Factor</i>
CONSTANT	-9,72778	
a	8,90278	145,0
n	0,0108333	1,0
e	0,190278	1,0
b	0,0127778	1,0
a^2	-0,722222	145,0

R-Squared = 72,1231 percent  
 R-Squared (adjusted for d.f.) = 64,3795 percent  
 Standard Error of Est. = 1,09155  
 Mean absolute error = 0,64537  
 Durbin-Watson statistic = 1,15707  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,301858

### Residual Analysis

	<u>Estimation</u>	<u>Validation</u>
n	24	
MSE	1,19148	
MAE	0,64537	
MAPE	3,2581	
ME	-1,33227E-15	
MPE	-0,238912	

### The StatAdvisor

This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

$$Q = -9,72778 + 8,90278*a + 0,0108333*n + 0,190278*e + 0,0127778*b - 0,722222*a^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 72,1231% of the variability in Q. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 64,3795%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 1,09155. The mean absolute error (MAE) of 0,64537 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.

**Ridge Regression - Ne**

Dependent variable: Ne

Independent variables:

a  
n  
e  
b  
a\*n  
a\*e  
a\*b  
n\*e  
n\*b  
e\*b  
a^2  
n^2  
e^2  
b^2

Number of complete cases: 24

**Model Results for Ridge Parameter = 0,0**

		<u>Variance</u>
		<u>Inflation</u>
<u>Parameter</u>	<u>Estimate</u>	<u>Factor</u>
CONSTANT	4772,77	
a	-233,963	308,125
n	-27,424	171,25
e	-160,467	499,75
b	-26,8165	746,125
a*n	0,174375	15,625
a*e	-0,289063	29,125
a*b	-0,106458	39,25
n*e	-0,116875	23,5
n*b	0,00125	33,625
e*b	0,0355208	47,125
a^2	20,7656	258,281
n^2	0,468656	115,781
e^2	5,01953	457,781
b^2	0,0907917	714,281

R-Squared = 99,5445 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 98,8359 percent

Standard Error of Est. = 24,9557

Mean absolute error = 12,7083

Durbin-Watson statistic = 2,93791

Lag 1 residual autocorrelation = -0,502158

**Residual Analysis**

	<i>Estimation</i>	<i>Validation</i>
n	24	
MSE	622,785	
MAE	12,7083	
MAPE	1,71041	
ME	5,44749E-14	
MPE	-0,0537021	

**The StatAdvisor**

This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

$$Ne = 4772,77 - 233,963*a - 27,424*n - 160,467*e - 26,8165*b + 0,174375*a*n - 0,289063*a*e - 0,106458*a*b - 0,116875*n*e + 0,00125*n*b + 0,0355208*e*b + 20,7656*a^2 + 0,468656*n^2 + 5,01953*e^2 + 0,0907917*b^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,5445% of the variability in Ne. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,8359%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 24,9557. The mean absolute error (MAE) of 12,7083 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.

**Ridge Regression - Ne**

Dependent variable: Ne

Independent variables:

a  
n  
e  
b  
a\*n  
a\*e  
a\*b  
n\*e  
a^2  
n^2  
e^2  
b^2

Number of complete cases: 24

**Model Results for Ridge Parameter = 0,0**

		<i>Variance</i>
		<i>Inflation</i>
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Factor</i>
CONSTANT	4680,02	
a	-233,963	308,125
n	-27,2365	143,125
e	-155,139	471,625
b	-26,1982	723,625
a*n	0,174375	15,625
a*e	-0,289063	29,125
a*b	-0,106458	39,25
n*e	-0,116875	23,5
a^2	20,7656	258,281
n^2	0,468656	115,781
e^2	5,01953	457,781
b^2	0,0907917	714,281

R-Squared = 99,5201 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 98,9966 percent

Standard Error of Est. = 23,1689

Mean absolute error = 12,7479

Durbin-Watson statistic = 2,87096

Lag 1 residual autocorrelation = -0,481482

**Residual Analysis**

	<i>Estimation</i>	<i>Validation</i>
n	24	
MSE	536,797	
MAE	12,7479	
MAPE	1,73411	
ME	1,20792E-13	
MPE	-0,0562337	

**The StatAdvisor**

This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

$$\text{Ne} = 4680,02 - 233,963*a - 27,2365*n - 155,139*e - 26,1982*b + 0,174375*a*n - 0,289063*a*e - 0,106458*a*b - 0,116875*n*e + 20,7656*a^2 + 0,468656*n^2 + 5,01953*e^2 + 0,0907917*b^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,5201% of the variability in Ne. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,9966%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 23,1689. The mean absolute error (MAE) of 12,7479 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.

**Ridge Regression -  $\lambda$** Dependent variable:  $\lambda$ 

Independent variables:

a

n

e

b

a\*n

a\*e

a\*b

n\*e

n\*b

e\*b

a<sup>2</sup>n<sup>2</sup>e<sup>2</sup>b<sup>2</sup>

Number of complete cases: 24

**Model Results for Ridge Parameter = 0,0**

		<u>Variance</u>
		<u>Inflation</u>
<u>Parameter</u>	<u>Estimate</u>	<u>Factor</u>
CONSTANT	-292,176	
a	34,8712	308,125
n	2,17486	171,25
e	-2,38021	499,75
b	3,45387	746,125
a*n	0,0929688	15,625
a*e	-0,0695312	29,125
a*b	0,0148958	39,25
n*e	0,00429687	23,5
n*b	0,00015625	33,625
e*b	-0,00130208	47,125
a <sup>2</sup>	-3,18385	258,281
n <sup>2</sup>	-0,0435885	115,781
e <sup>2</sup>	0,0977865	457,781
b <sup>2</sup>	-0,0116505	714,281

R-Squared = **99,568** percentR-Squared (adjusted for d.f.) = **98,8961** percentStandard Error of Est. = **2,03435**Mean absolute error = **1,02332**

Durbin-Watson statistic = 2,98567

Lag 1 residual autocorrelation = -0,53773

**Residual Analysis**

	<i>Estimation</i>	<i>Validation</i>
n	24	
MSE	4,13859	
MAE	1,02332	
MAPE	1,80943	
ME	1,25825E-14	
MPE	-0,0376006	

**The StatAdvisor**

This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

$$\lambda = -292,176 + 34,8712*a + 2,17486*n - 2,38021*e + 3,45387*b + 0,0929688*a*n - 0,0695312*a*e + 0,0148958*a*b + 0,00429687*n*e + 0,00015625*n*b - 0,00130208*e*b - 3,18385*a^2 - 0,0435885*n^2 + 0,0977865*e^2 - 0,0116505*b^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,568% of the variability in y. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 98,8961%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 2,03435. The mean absolute error (MAE) of 1,02332 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.

**Ridge Regression -  $\lambda$** 

Dependent variable:  $\lambda$

Independent variables:

a  
n  
e  
b  
a\*n  
a\*e  
a\*b  
e\*b  
a^2  
e^2

Number of complete cases: 24



**Model Results for Ridge Parameter = 0,0**

		<i>Variance</i>
		<i>Inflation</i>
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Factor</i>
CONSTANT	-219,263	
a	64,7864	259,911
n	-1,22003	11,125
e	17,7351	409,536
b	-0,0350231	29,125
a*n	0,0929688	15,625
a*e	-0,0695312	29,125
a*b	0,0148958	39,25
e*b	-0,00130208	47,125
a^2	-5,67679	209,732
e^2	-0,525446	371,732

R-Squared = 83,4851 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 70,7814 percent

Standard Error of Est. = 10,466

Mean absolute error = 5,36045

Durbin-Watson statistic = 1,61654

Lag 1 residual autocorrelation = 0,180258

**Residual Analysis**

	<i>Estimation</i>	<i>Validation</i>
n	24	
MSE	109,538	
MAE	5,36045	
MAPE	7,69536	
ME	8,28967E-15	
MPE	-1,44535	

**The StatAdvisor**

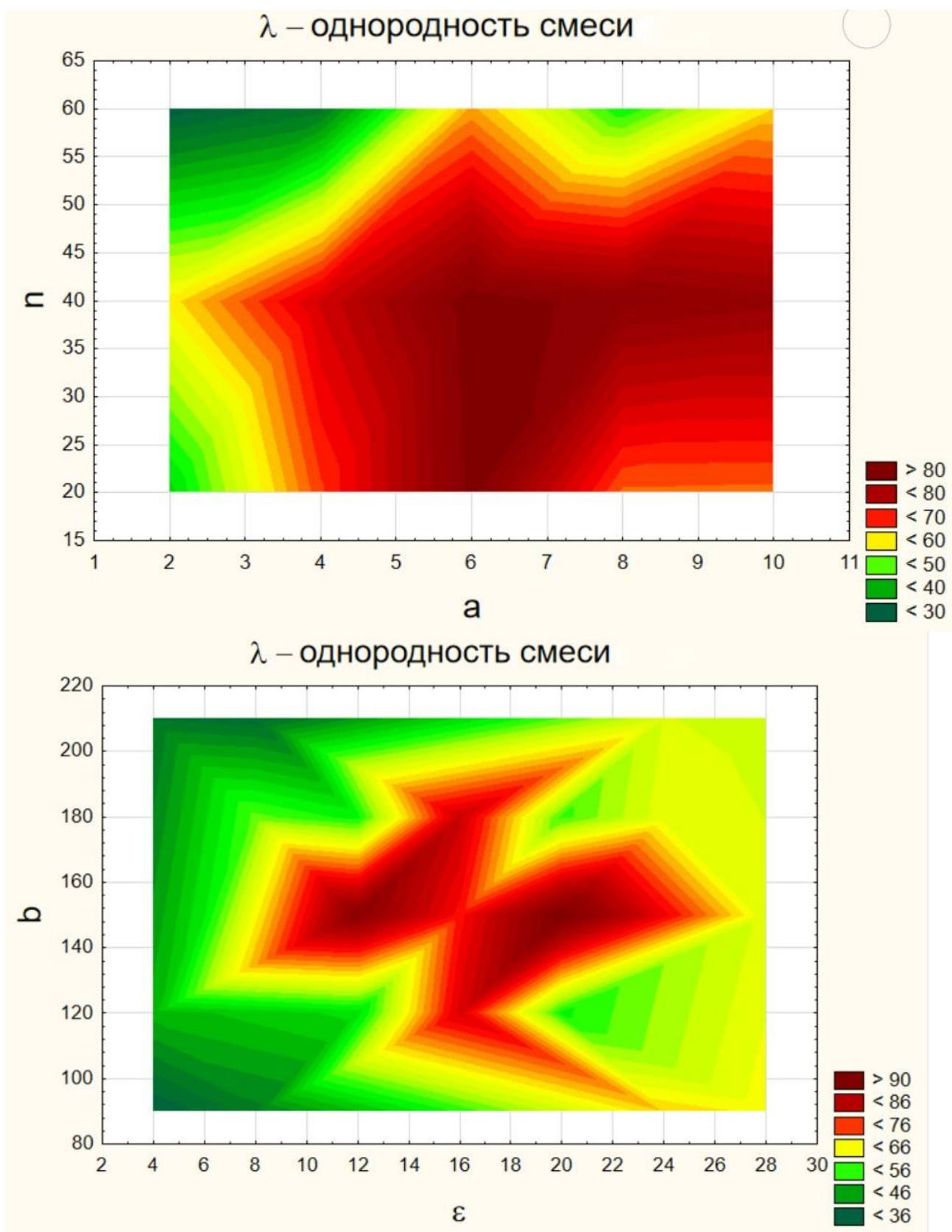
This procedure is designed to provide estimates of regression coefficients when the independent variables are strongly correlated. By allowing for a small amount of bias, the precision of the estimates can often be greatly increased. In this case, the fitted regression model is

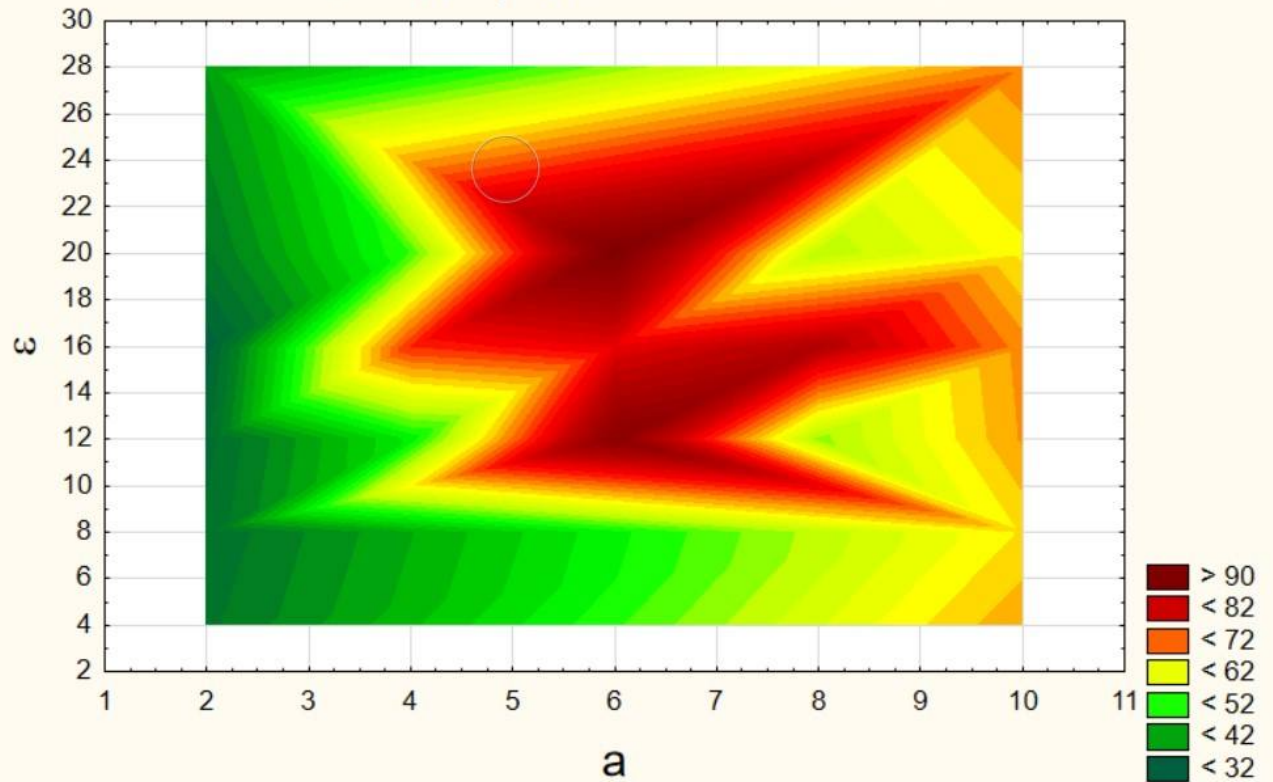
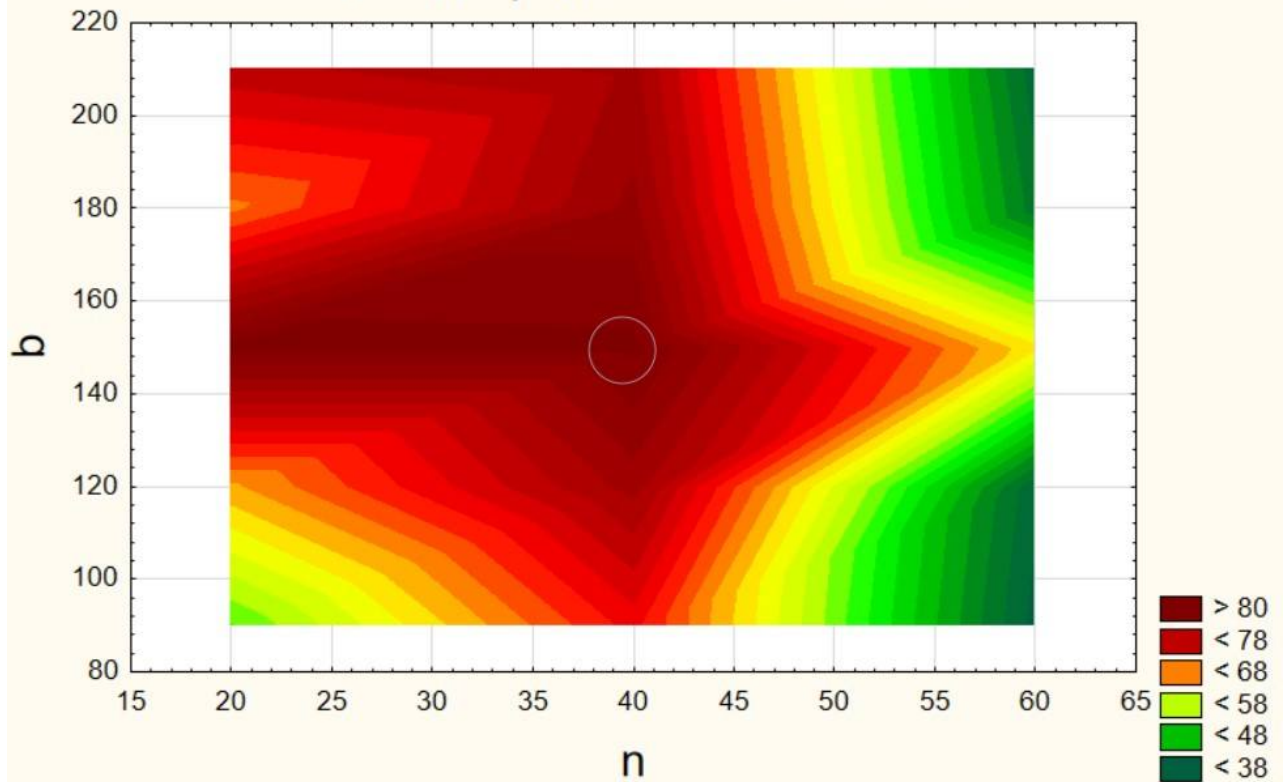
$$\lambda = -219,263 + 64,7864*a - 1,22003*n + 17,7351*e - 0,0350231*b + 0,0929688*a*n - 0,0695312*a*e + 0,0148958*a*b - 0,00130208*e*b - 5,67679*a^2 - 0,525446*e^2$$

The current value of the ridge parameter is 0,0, which is equivalent to ordinary least squares. To change the ridge parameter, press the alternate mouse button and select Analysis Options. The ridge parameter is usually set between 0 and 1. In order to determine a good value for the ridge parameter, you should examine the standardized regression coefficients or the variance inflation factors. These values are available on the lists of Tabular and Graphical Options.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 83,4851% of the variability in y. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 70,7814%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 10,466. The mean absolute error (MAE) of 5,36045 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.

Приложение Г – Значение однородности смеси предварительных двухфакторных экспериментов для определения уровней варьирования входных параметров многофакторного регрессионного анализа



$\lambda$  – однородность смеси $\lambda$  – однородность смеси



## Приложение Д

СОГЛАСОВАНО:  
Врио ректора ФГБОУ ВО  
Великолукской ГСХА  
  
Морозов В.В.  
«16» сентября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ИП «КФХ Михайлов М.В.»  
Великолукского района Псковской области  
  
Михайлов М.В.  
«17» сентября 2020 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и  
технологических работ в высших учебных заведениях

Заказчик ИП «КФХ Михайлов М.В.» Великолукского района Псковской области  
(наименование организации,

Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы Совершенствование  
технологического процесса смешивания сапропеле-минеральных удобрений с  
обоснованием параметров смесителя

(наименование темы, № гос. регистрации)

выполненной в ФГБОУ ВО «Великолукская ГСХА»

(наименование ВУЗа, НИИ, КБ)

Выполняемой с 2016 по 2020 г.

(сроки выполнения)

внедрены в ИП «КФХ Михайлов М.В.» Великолукского района Псковской области

(наименование предприятия, где осуществлялось внедрение)

1. Вид внедрённых результатов эксплуатация барабанного смесителя для

(эксплуатация изделия, работы, технологии)

смешивания сапропеля с минеральными удобрениями, с последующим внесением  
полученных удобрений под яровую пшеницу.

Производство (изделия, работы, технологии)

Функционирование (систем)

2. Характеристика масштаба внедрения единичное

(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Форма внедрения: Совершенствование технологического процесса смешивания  
сапропеля с минеральными удобрениями

(методика, метод)

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ Обоснованы конструктивно-  
технологические параметры барабанного смесителя в технологическом процессе  
смешивания.

(пионерские, принципиально, новые, качественно новые, модификации)

5. Опытно-промышленная проверка

(указать номер и дату актов испытаний,

Проведена в ИП «КФХ Михайлов М.В.» Великолукского района Псковской области в  
период май – сентябрь 2020 года.

наименование предприятия, период)

6. Внедрены:

- в промышленное производство \_\_\_\_\_

(участок, цех, процесс)

- в проектные работы \_\_\_\_\_

(указать объект, предприятие)

7. Годовой экономический эффект:

ожидаемый Экономия на смешивание 15167 руб.

(от внедрения в проект)

фактический Экономия 46372 руб/т на приготовление сапропеле-минеральных удобрений

в том числе долевое участие \_\_\_\_\_

(%, цифрами и прописью)

8. Удельная экономическая эффективность внедрённых результатов \_\_\_\_\_

22820 руб./га

9. Объем внедрения 10 т удобрений под яровую пшеницу на площади 15 га.

10. Социальный и научно-технический эффект \_\_\_\_\_

Рациональное использование

(охрана окружающей среды, недр;

минеральных удобрений и сапропеля, повышение урожайности сельскохозяйственных

улучшение условий труда, совершенствование структуры управления, научно-

культур, снижение уровня загрязнения водоемов, обоснование параметров смесителя

техническое направление, специальное направление и т.д.)

От ВУЗа

Проректор по НИР и международным  
связям ФГБОУ ВО Великолукской ГСХА



Федорова Ю.Н.

От предприятия

Ответственный за внедрение: Агроном




Михайлов А.М.

## Приложение Е – Заявка на полезную модель

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение

 «Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

## УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

<b>29.06.2021</b>	<b>040244</b>	<b>2021119120</b>
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

Заявление о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель.

П. 1. ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации оригиналов документов заявки) 2. ИЮН 2021	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №  (85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу	ВХОДЯЩИЙ №
Ф. И. О. (86) Д. И. П. Т. (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица либо наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) – заявитель <input type="checkbox"/> (87) (номер и дата международной публикации международной заявки) <input type="checkbox"/> (96) (номер европейской заявки и дата ее подачи) <input type="checkbox"/> (97) (номер и дата публикации европейской заявки)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ (почтовый адрес, факс и контактный телефон заявителя) 182112 Псковская обл. г. Великие Луки пр. Ленина д.2, ФГБОУ ВО ВГСХА Телефон: (81153) 7-52-82 Факс: (81153) 7-52-82 E-mail: ygshta@marl.ru Телефон: Факс: E-mail:	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель		
В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация		
(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ БАРАБАШНО-ЛОПАСТНОЙ СМЕСИТЕЛЬ		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) – Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия» пр. Ленина, д.2, г. Великие Луки, Псковская обл., 182112, Россия <input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование) <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ (указать наименование) Контракт от №	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1026000903720 КПП 602501001 ИНН 6025001751 СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он установлен) ВОИС ст. 3 RU	
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, выполняющего адвокатские функции) представитель для ведения дел по изобретению является он/она/они в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или является таковым в силу закона)	<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону	

ОТ Д. № 17  
01 ИЮЛ 2021  
240-60-15

Общее количество документов в листах	10	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	Хохлова И.Л.
Количество платежных документов	0	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: <a href="http://www.fips.ru/registers-web">www.fips.ru/registers-web</a>		