

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»**

На правах рукописи

Мавлюдова Яна Александровна

**Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на
основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов**

2.6.13 - Процессы и аппараты химических технологий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Макаренков Дмитрий Анатольевич

Москва-2026

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Анализ состояния технологии получения топливных гранул на основе вторичных древесных и растительных отходов и методов расчета процессов формирования и прессования на гранулирующем оборудовании	12
1.1 Общие сведения о составах топливных гранул и методов оценки их качества	13
1.2. Обоснование выбора компонентов топливных гранул.....	14
1.3 Технология производства гранулированного биотоплива методами прессования.....	17
1.4 Оборудование и анализ методов получения гранул на основе древесных и растительных отходов	22
1.5 Особенности реологических свойств и деформирования гранулируемых систем.....	25
1.6 Физико-химическая модель биотоплива как объект гранулирования .	36
1.7 Способы определения энергосиловых характеристик при гранулировании многокомпонентных полидисперсных смесей	40
Выводы по главе 1	43
Глава 2. Лабораторные установки и методики проведения экспериментов	45
2.1 Описание лабораторных установок и методик определения пластической прочности и сыпучести	45
2.2 Описание экспериментальных установок и методик определения деформационно-прочностных характеристик прессовок при компрессионных испытаниях	49
2.3 Описание установки для исследования процесса проходного прессования и определения коэффициента бокового давления.....	52
2.4 Лабораторная установка и методика проведения исследования по определению теплофизических свойств гранулированного биотоплива	55

2.5 Описание конструкции роторного гранулятора с плоской модернизированной матрицей с каналами переменного сечения и принцип его работы.....	58
Выводы по главе 2	60
Глава 3 Теоретическо-экспериментальное исследование процесса гранулирования МПС в роторном грануляторе с плоской матрицей с математическим описанием процессов, протекающих в каналах переменного сечения	61
3.1 Расчетно-аналитическое исследование напряженного состояния в рабочей зоне плоскоматричного роторного пресса.....	61
3.2 Математическое описание процесса гранулирования МПС на основе вторичных материальных ресурсов в канале переменного сечения роторного гранулятора.....	66
Выводы по главе 3	72
Глава 4. Результаты экспериментального определения реологических свойств гранулируемых МПС и деформационно-прочностных характеристик гранул.....	73
4.1 Результаты определения пластической прочности и сыпучести.....	73
4.2 Результаты компрессионных испытаний процесса уплотнения МПС в канале переменного сечения (режим проходного прессования) и в закрытой матрице.....	78
4.2.1 Результаты исследования процесса проходного прессования с изменением реологических свойств МПС за счет термического воздействия и определение коэффициента бокового давления	79
4.2.2 Результаты исследования в закрытой матрице.....	82
4.3 Исследование распределения давления по длине канала переменного сечения при гранулировании топливных композиций различного состава	88
4.4 Результаты определения теплофизических свойств топливных гранул с различной морфологией	91

4.5 Результаты исследований процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей с каналами переменного сечения	100
Выводы по главе 4	108
Глава 5. Расчёт технологических параметров и себестоимости гранулирования	111
5.1 Инженерная методика расчета технологических и силовых параметров роторных грануляторов	111
5.2 Экономическая эффективность производства топливных гранул из многокомпонентных смесей	115
Выводы по главе 5	119
Заключение	120
Список сокращений и условных обозначений	122
Список литературы	124
Приложение 1. Акт об использовании результатов научно-практического исследования, полученных в рамках выполнения диссертационной работы ...	138
Приложение 2. Акт опытно-промышленных испытаний по разработке технологии гранулирования растительных отходов на основе столовых корнеплодных и клубнеплодных культур	140
Приложение 3. Справка об использовании результатов научно-прикладных исследований по переработке сырья методами гранулирования	143
Приложение 4. Справка о перспективности использования биотоплива в виде пеллет на основе органических отходов.....	144
Приложение 5. Справка Комитета ESG МКПП(р) ТиНАО о практическом внедрении результатов научного исследования	146
Приложение 6. Технологическая схема производства пеллет из смеси опилок и стеблей топинамбура производительностью 250 кг/ч	148

Введение

Актуальность темы исследования. Разработка технологий гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей на основе вторичных ресурсов (ВМР) – это актуальная задача, находящаяся на стыке технологического прогресса и государственной экологической политики. Данное направление напрямую регулируется и стимулируется федеральным законодательством, в частности, законами № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» и № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», которые создают правовую основу для переработки крупнотоннажных отходов в целевой продукт [1,2].

В отличие от существующих производств однокомпонентных пеллет (например, из древесных отходов), данное исследование фокусируется на создании нового вида биотоплива – композиционных гранул из растительных, древесных и техногенных отходов. Этот подход позволяет не только решить экологическую задачу по утилизации отходов, получив целевой продукт для маломощных котельных, но и соответствует требованиям техносферной безопасности.

Ключевой проблемой является неэффективность существующих методов гранулирования в роторных грануляторах при работе с многокомпонентными полидисперсными смесями. Существующие технологии не учитывают реологические, структурно-деформационные и прочностные характеристики такого сырья, а также отсутствуют данные по теплофизическим свойствам готовых топливных гранул.

Степень разработанности темы. Исследованиям физико-механических свойств материалов и аппаратного обеспечения процессов гранулирования материалов различной природы посвящены работы М.Б. Генералова, В.П. Классена, И.Г. Гришаева, В.И. Назарова, М.В. Севостьянова, Ю.А. Таран, Д.А. Макаренкова, Д.Н. Коновалова, О. Д. Мюллера и других авторов. В настоящее время процессы гранулирования биотоплива из древесных и растительных отходов изучены в научно-прикладной литературе достаточно широко с исследованием их

свойств. Однако недостаточно изучены процессы гранулирования многокомпонентных смесей из различных типов отходов, а также не учитываются их реологические свойства. Кроме того, отсутствует описание процесса уплотнения гранулируемых смесей в канале переменного сечения профильного оборудования (роторные грануляторы, валковые прессы). В данной работе при изучении процесса гранулирования в канале переменного сечения роторного гранулятора учитывались пластическая прочность, коэффициент бокового давления и сыпучесть смесей, так как они характеризуют изменение напряженно-деформационного состояния в процессе подготовки материала и активного нагружения. Исследованы также теплофизические и технологические свойства гранул, такие как теплотворная способность, время сгорания, зольность и проведено сравнение с действующими стандартами. Впервые для описания процесса горения многокомпонентных гранул предложена четырёхстадийная модель горения, последовательно описывающая прогрев влажной гранулы, сушку, пиролиз с горением летучих и дожигание коксового остатка.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – разработка процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской перфорированной матрицей топливных композиций на основе древесных, растительных и техногенных отходов с учётом их реологических и структурно-деформационных характеристик.

Для достижения поставленной цели решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. Анализ и обобщение современных методов гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей и методов расчета силовых характеристик процесса гранулирования в роторных грануляторах с плоской матрицей.

2. Изучение особенностей реологического поведения МПС на стадиях подготовки и прессования. Проведение исследований по определению реологических и структурно-деформационных характеристик МПС и готовых гранул для прогнозирования качества продукции и совершенствования технологических режимов.

3. Исследование напряженно-деформационного состояния слоя МПС на поверхности матрицы и получение математического описание процесса гранулирования при движении материала в цилиндроконическом канале плоской матрицы за счёт воздействия на формуемую массу прессующих роликов.

4. Исследование процесса гранулирования топливных композиций при прессовании в закрытой матрице, в единичном цилиндроконическом канале проходного прессования с нагревом и в опытно-промышленном роторном грануляторе с модернизированной плоской матрицей.

5. Определение теплофизических характеристик и исследование процесса горения твердотопливных композиций различных составов.

6. Разработка инженерной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей, с учетом реологических характеристик материала.

7. Промышленная апробация и масштабирование технологии гранулирования отходов клубнеплодных культур на производственных мощностях предприятия ООО «ВИВА» (Костромская область) с целью организации промышленного выпуска топливных гранул, соответствующих установленным нормативам качества.

8. Оценка экономической эффективности производства топливных гранул из многокомпонентных полидисперсных смесей в сравнении с традиционными однокомпонентными составами.

Методология и методы исследования. В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования, направленные на получение уравнений и графических зависимостей, позволяющих рассчитывать параметры процесса гранулирования в роторном грануляторе. При этом выявляется взаимосвязь силовых параметров гранулирования со структурно-деформационными и реологическими характеристиками МПС. Решения задач базируются на известных положениях механики твёрдых дисперсных сред, математического моделирования и использовании многофакторных методов планирования эксперимента с обработкой результатов в программе Statistica 6.0.

Научная новизна работы:

1. Разработан механизм гранулирования, учитывающий движение материала через канал переменного сечения, и получены математические выражения, описывающие изменение напряжённно-деформированного состояния смеси, а также эпюры распределения давления по длине цилиндрикоконического канала.

2. Методами многофакторного планирования эксперимента при проведении компрессионных испытаний получены уравнения и номограммы в зависимости от соотношения влажности смеси и удельного давления прессования.

3. По результатам комплексных экспериментальных исследований получены значения пластической прочности и коэффициента бокового давления, характеризующие изменения реологического состояния системы МПС в процессе гранулирования.

4. Установлены закономерности влияния соотношения компонентов на теплотворную способность, зольность и процесс горения топливных гранул, представленные в виде графических зависимостей.

5. Установлены стадии и закономерности горения топливных гранул из МПС, и выявлены зависимости времени воспламенения от состава и плотности, а также продолжительности полного сгорания от геометрических размеров, определяющих механизм окисления.

Теоретическая значимость работы:

1. Предложено комплексное математическое описание процесса гранулирования МПС на всех этапах: от захвата и уплотнения смеси на поверхности матрицы до выхода готовой гранулы. Данный подход позволяет рассчитывать процесс уплотнения сырьевых компонентов для широкого класса топливных гранул с различной морфологией.

2. Получены уравнения, описывающие распределение контактных напряжений в зонах формования и уплотнения, а также уравнения распределения давления в каналах матрицы.

3. Предложена комплексная методология анализа процесса структурообразования гранул на всех стадиях процесса, учитывающая изменения параметров предельного состояния и реологических свойств.

Практическая значимость работы:

1. Усовершенствована и отработана комплексная технология гранулирования МПС в опытно-промышленном роторном грануляторе. Получено конкурентоспособное биотопливо, адаптированного к требованиям котельного оборудования малой мощности для фермерских хозяйств. Данная технология передана предприятию ООО «ВИВА» (Костромская область) для гранулирования отходов клубнеплодных культур.

2. Разработаны новые рецептуры топливных гранул с повышенной теплотворной способностью за счет введения высококалорийных компонентов (лузги подсолнечника, пивной дробины, березовых листьев, торфа) и инициатора горения – пирокарбона. Определены теплотворная способность и зольность топливных гранул из МПС.

3. Разработана модернизированная конструкция матрицы роторного гранулятора за счет изменения соотношения геометрических размеров цилиндрической и конической части.

4. Предложена уточненная инженерная методика расчёта основных параметров гранулирования МПС и потребляемой мощности в роторном грануляторе с вращающейся плоской матрицей. При этом учитываются реологическое состояние материала и соотношение размеров каналов переменного сечения с толщиной прокатываемого слоя.

5. Экспериментально определены производительность и удельная энергоёмкость роторного гранулятора с плоской матрицей, а также плотность и прочность полученных топливных гранул. Построены графические зависимости этих параметров от влажности и содержания древесных отходов.

6. Результаты научно-практических исследований одобрены Комитетом по устойчивому развитию для практического внедрения, получили положительную оценку Союза органического земледелия. Они используются в учебном процессе

Московского политехнического университета и в исследовательских работах в ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм гранулообразования при постадийном уплотнении в канале переменного сечения плоской матрицы и математические выражения, описывающие процесс гранулирования дисперсных материалов.

2. Результаты комплексных исследований реологических характеристик МПС и структурно-деформационных свойств готовых гранул.

3. Результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик гранулированного биотоплива в зависимости от соотношения компонентов.

4. Закономерности четырехстадийного процесса горения топливных гранул со сложной морфологической структурой.

5. Инженерные методы расчета силовых параметров процесса гранулирования МПС в роторных грануляторах с плоской матрицей с учетом процессов, протекающих на поверхности матрицы и в каналах переменного сечения.

Соответствие паспорту научной специальности. Основная область исследования соответствует паспорту специальности 2.6.13 «Процессы и аппараты химических технологий», а именно пунктам: 6-«Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратного оформления», 10-«Методы изучения, совершенствования и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, в том числе разработка химико-технологических процессов переработки отходов.»

Достоверность и обоснованность результатов основаны на получении большого объема экспериментальных данных, корректном использовании теоретических положений математического описания процессов и аппаратов химических технологий, расчётных зависимостей на основе полученных

экспериментальных данных, использовании метрологически аттестованных средств измерений.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования были представлены на международных и всероссийских конференциях: «Актуальные проблемы лесного комплекса», Брянск, 2012 год; «Рациональное природопользование: традиции и инновации», Москва, 2012 год; «Управление реологическими свойствами пищевых продуктов», Москва, 2012 год; «Нестационарные, энергосберегающие и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии», Москва, 2013 год; XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Екатеринбург, 2016 год; «Современные проблемы экологии», Тула 2025 год; «Химическая технология на современном этапе развития минерально-сырьевой базы», Москва, 2025 год. Полученные результаты апробированы и внедрены в деятельность государственных и коммерческих организаций, что подтверждено 2 актами и 3 справками о внедрении.

Личный вклад автора. Личный вклад автора включает постановку целей и задач, анализ научной литературы, планирование и проведение экспериментов, обработку и интерпретацию данных, формулировку выводов, подготовку методических рекомендаций и итоговое обобщение результатов.

Публикации. Основные положения диссертации получили полное отражение в 15 статьях, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и GeoRef. В материалах международных и всероссийских конференций опубликовано 7 докладов.

Структура и объем диссертации. Работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 125 источников и шесть приложений. Общий объем составляет 148 страниц печатного текста, в которых содержатся 15 таблиц и 44 иллюстрации.

Глава 1. Анализ состояния технологии получения топливных гранул на основе вторичных древесных и растительных отходов и методов расчета процессов формирования и прессования на гранулирующем оборудовании

В данной главе проведен аналитический обзор литературы по использованию композиций из растительных и древесных отходов для получения топливных гранул (ТГ). Выявлены и проанализированы перспективные материалы, являющиеся крупнотоннажными отходами, которые при прессовании образуют плотно-прочную прессовку, характеризующуюся необходимыми свойствами как по прочности, так и по теплотворной способности.

Рассмотрены технологии прессового гранулирования в роторных грануляторах с кольцевой и плоской матрицей. Результаты исследований показали, что процессом гранулирования многокомпонентных смесей (МПС) можно управлять, используя рецептуры гранул. Ключевыми управляющими факторами при этом выступают: вариация гранулометрического состава полидисперсной смеси и введение в нее вторичных продуктов (отходов), связующих, пластифицирующих добавок и инициаторов горения. Установлено, что процесс прессования дисперсных материалов можно описать уравнениями, описывающими равновесие и состояние компонентов материала, с учетом их реологических свойств. В ходе комплексного исследования технологических параметров прессового гранулирования на оборудовании с плоской матрицей установлена зависимость качества конечного продукта от исходных характеристик перерабатываемого материала. Рассмотрено движение материала внутри канала матрицы с переменным сечением, а также проанализировано влияние распределения давления вдоль канала на уплотнение прессовок. Проведенный обзор показал, что для прогнозирования силовых характеристик при прессовании разработанных многокомпонентных смесей (МПС) в канале переменного сечения отсутствует их математическое описание. Показано, что стандартные модели не

учитывают сочетания характеристик МПС таких как химический и гранулометрический состав, морфологическая структура прессовки, коэффициент бокового давления и внешнее трение.

1.1 Общие сведения о составах топливных гранул и методов оценки их качества

В настоящее время наряду с природными видами топлив (уголь, торф) в кусковой форме широкое распространение находит гранулированное топливо на основе растительных отходов в виде цилиндрических гранул (пеллет) и брикетов [1,4]. Пеллеты являются экологически чистым топливом с небольшим содержанием золы [29].

Достоинством пеллет по сравнению с традиционными твердыми топливами являются: 1) высокая теплотворная способность, причём их теплота сгорания сравнима с калорийностью угля; 2) гомогенность по фракционному составу и плотности; 3) высокая насыпная плотность; 3) малая зольность (0,5-1) % от общей массы; 4) форма гранул, которая позволяет контролировать и автоматизировать их подачу в котельный агрегат.

Перспективность использования топливных гранул в России обусловлена отработанной технологией их сжигания в стандартизированном оборудовании – пеллетных котлах. Так при сжигании топливных гранул (основной компонент – биомасса) выделяется столько углекислого газа, сколько древесина накопила во время роста [102]. В то же время в случае непрерывной подачи пеллет в котельную установку к качеству топлива предъявляются жесткие требования. Пеллеты не должны иметь трещин и вздутий. Диаметр качественных гранул составляет 4, 6, 8 и 10 мм. Хранение гранул в неблагоприятных условиях приводит к потере теплотворной способности [118]. В таблице 1 приведены международные стандарты качества топливных гранул [102].

Основными характеристиками пеллет являются теплотворная способность, влажность, зольность, истираемость. Можно сделать вывод, что топливные гранулы (пеллеты) на основе отходов по сравнению с традиционным топливом обладают высокой энергоемкостью, экологичностью, транспортабельностью и низкими затратами на производство.

Таблица 1 – Сравнительный анализ стандартов качества древесных топливных гранул [102]

Параметр качества	Единица измерения	Премиум-класс ENplus-A1	Промышленный ENplus-A2	Стандарт EN-B	Немецкий DINplus
Диаметр	мм	6 (±1)	6 (±1)	6 (±1)	6 (±1)
Длина	мм	3,15-40	3,15-40	3,15-40	3,15-40
Насыпная плотность	кг/м ³	≥600	≥600	≥600	-
Механическая прочность	%	≥98	≥97,5	≥97,5	≥97,5
Теплота сгорания	МДж/кг	≥16,5	≥16,5	≥16,0	-
Влажность	%	≤10	≤10	≤10	≤10
Зольность	%	≤0,7	≤1,2	≤2,0	≤0,7
Пылеобразование	%	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5
Температура размягчения	°С	≥1200	≥1100	≥1100	-

1.2. Обоснование выбора компонентов топливных гранул

В настоящее время в различных отраслях образуются отходы, являющиеся вторичными материальными ресурсами. К ним относятся: древесные отходы (опилки), растительные отходы (лuzга подсолнечника, пивная дробина, листья, стебли топинамбура), торф, пивная дробина.

При выборе компонентов для исследований с целью получения функционального биотоплива были рассмотрены отходы крупнотоннажных производств, обладающих низкой стоимостью и необходимыми теплофизическими характеристиками.

Рассмотрим характеристики основных видов растительных и древесных отходов, массовое накопление которых создает проблему в области техносферной безопасности, связанную с риском биологического разложения, выделением токсичных газов и возгоранием.

Пивная дробина (ПД) является отходом после отделения жидкой фазы при изготовлении пива. Она представляет собой смесь сложных углеводов, растительных, микробных белков, органических кислот. Обладает специфическим запахом и вкусом ячменного солода. Дробина содержит около 20% сухих веществ с высоким уровнем протеина. На пивоваренных заводах России не предусмотрена переработка пивной дробины, что приводит к образованию сотен тысяч тонн её отходов. При гниении дробина выделяет токсичные газы, а химические продукты распада увеличивают концентрацию тяжелых элементов в почве. Такие отходы актуально перерабатывать в топливные гранулы (пеллеты, брикеты) [71].

Другим многотоннажным отходом является лузга, образующаяся при изготовлении подсолнечного масла. На полигонах лузга тлеет, выделяет неприятный запах, а также способна к возгоранию. В связи с этим ее также необходимо утилизировать [112].

К перспективным растительным отходам относятся опавшие листья, массовое сезонное образование которых создает серьезные проблемы для коммунального хозяйства. Эти проблемы решают преимущественно путем захоронения или сжигания листьев. Вовлечение данного вида отходов в производство топливных гранул позволяет не только снизить экологическую нагрузку, но и обеспечить высокую теплотворную способность конечного продукта благодаря специфическому элементному составу исходного сырья [88].

Основным компонентом используемым в получении пеллет являются опилки. Они образуются в процессе лесопиления, деревообработки и подвержены самовоспламенению, а из-за малой насыпной плотности их трудно складировать.

Современные исследования подтверждают эффективность применения брикетов спрессованного торфа в качестве топлива для печных установок и автоматических котлов. По данным источника [62], такая замена обеспечивает на 30-45% меньше вредных выбросов по сравнению с привычными энергоносителями (уголь, газ, нефтепродукты). Недостатком брикетов является их низкая прочность, высокая зольность, сложность регулирования соосности ячеек брикетных прессов. Более перспективным является использование торфа в качестве компонента пеллет. Однако это требует тщательного подбора составов пеллет с использованием торфа [29, 98].

Пирокарбон-это продукт пиролиза автомобильных покрышек, представляет собой мелкодисперсный пылящийся порошок с высокой теплотворной способностью. Утилизация покрышек представляет сложную экологическую задачу, так как они не подвержены биологическому разложению и огнеопасны. Перспективными направлениями являются их использование в виде резиновой крошки для дорожных покрытий, а также введение пирокарбона в состав комбинированных топливных гранул. В частности, применение пирокарбона увеличивает теплотворную способность топливных гранул [70].

Таким образом, вышеперечисленные отходы (лузга подсолнечника, пивная дробина, листья, опилки, пирокарбон) являются вторичными материальными ресурсами, которые можно использовать в процессе получения пеллет.

Основу для выбора компонентов топливных гранул составляет их ключевое общее свойство: все они являются углеродсодержащими и горючими материалами. Высокое содержание углерода (от 50% до 99%) напрямую определяет их способность выделять энергию при сгорании. Классические компоненты – опилки, лузга, листья, торф горят благодаря лигноцеллюлозной структуре. Таким образом, горючесть, обеспечиваемая углеродом является фундаментальным критерием, который позволяет использовать эти отходы для создания топлива. Конкретный

подбор комбинаций направлен уже на улучшения теплотворной способности, экологичности и прочности гранул.

1.3 Технология производства гранулированного биотоплива методами прессования

Современные технологии производства гранул используют такие методы, как окатывание в тарельчатых и барабанных грануляторах, таблетирование в таблет-прессах, компактирование на валковых прессах с гладкой поверхностью, формование в шнековых экструдерах, а также прокатку в роторных грануляторах с кольцевой или плоской матрицей. При этом необходимо проведение операций подготовки отходов переработки, за счет дополнительных совмещенных процессов [49, 50]. К ним относятся измельчение, смешение и транспортировка компонентов в зону очага деформации гранулятора, что обеспечивает после гранулирования получение прессовок заданной формы и прочности с требуемыми теплофизическими свойствами. При этом важен правильный подбор компонентов, его гранулометрический состав, выбор связующего, вспомогательных добавок (инициаторов горения) [49, 50].

На рисунке 1 представлена типовая технологическая схема получения топливных гранул из отходов методом прокатки в роторном грануляторе [15].

Установка работает следующим образом. Исходный продукт поступает в загрузочный бункер, соединённый с молотковой дробилкой. После измельчения продукт поступает в материалопровод, куда также подаётся нагретый теплоноситель из теплогенератора (топка). Далее поток воздуха с опилками в режиме пневмотранспорта поступает в барабанную сушилку. Выходящая смесь теплоносителя с опилками поступает в циклон, снабжённый вентилятором. Вентилятор обеспечивает отсос воздуха, а опилки ссыпаются в нижнюю часть циклона, затем самотеком поступают в пресс-гранулятор. Готовый продукт выходит из гранулятора и подаётся на упаковку.

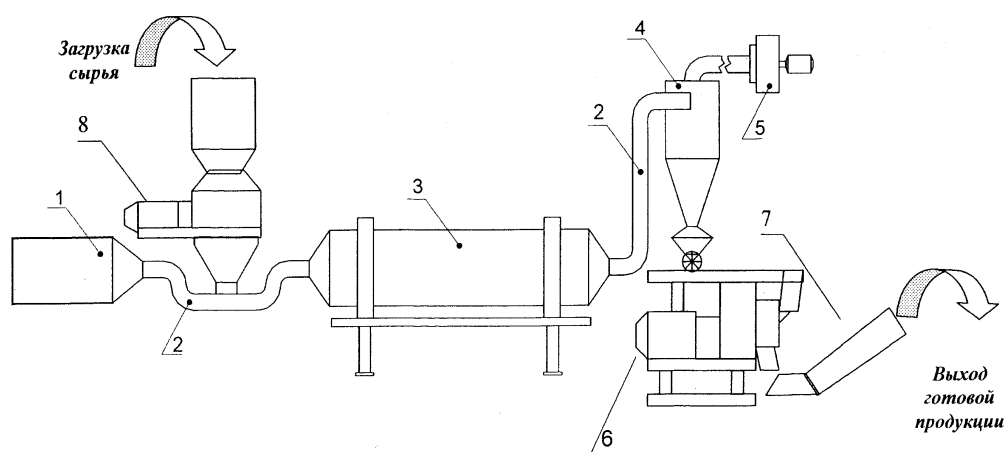


Рисунок 1 – Технологическая схема получения твердотопливных гранул на основе отходов: 1 – теплогенератор; 2 – материалопровод; 3 – барабанная сушилка; 4 – циклон; 5 – вентилятор; 6 – пресс-гранулятор; 7 – охладитель-просеиватель гранул; 8 – дробилка молотковая с загрузочным устройством

В более общем виде (применительно к роторным грануляторам с плоской матрицей) процесс прессования включает несколько этапов. На первом этапе сырьё, поступающее из бункера, подаётся на специальный транспортер, который обеспечивает его подачу в смеситель. После смешивания смесь подвергается измельчению в дробильном оборудовании, что позволяет получить смесь частиц с заданным гранулометрическим составом. После этого подготовленная смесь подвергается сушке в сушильном агрегате, где удаляется избыточная влага. Для обеспечения заданной степени однородности высушенная смесь подвергается помолу. Подготовленный материал с заданными реологическими свойствами после бункера-накопителя подаётся в роторный гранулятор с плоской матрицей. Использование дозатора обеспечивает равномерное распределение и уплотнение массы в рабочей зоне гранулятора, что позволяет получать гранулы с заданными характеристиками. После завершения процесса гранулирования готовые гранулы, прошедшие стадию охлаждения, направляются на упаковку, что позволяет сохранить их качество и готовность к последующему использованию.

Продукты, с различной влажностью, могут подвергаться как дополнительному увлажнению, так и сушке. В процессе производства обычно

используются барабанные и ленточные сушилки, которые обеспечивают требуемую влажность. Для стабильной и эффективной работы роторного гранулятора необходимо доизмельчить сырьё до размера частиц не более 4 мм.

При влажности продукта менее 8% требуется дополнительное увлажнение сырья или ввод связующего, а процесс смешения осуществляется с использованием шнековых смесителей.

Процесс гранулирования, направленный на получение плотно-прочных пеллет или плиток, осуществляется в роторных грануляторах или в валковых прессах. В промышленности используются роторные грануляторы, оснащенные плоской или кольцевой матрицей. На рынке представлен широкий выбор оборудования от различных производителей, таких как CPM, Andritz, Salmatec, AmandusKahl, Buhler, Munch и другие.

1. Гранулирующие прессы с кольцевыми или плоскими матрицами работают по следующему принципу. Исходный материал подается в рабочую зону между вращающимися роликами и поверхностью матрицы и в процессе прокатки создается необходимое давление прессования. После прохождения материала через каналы матрицы, на выходе из нее образуются цилиндрические гранулы. Изначально прессы с кольцевой матрицей разрабатывались для применения в таких отраслях, как комбикормовая, пищевая и химическая, что делает их высокоэффективными в различных производственных процессах. В то же время, плоско-матричные прессы изначально предназначались для переработки промышленных и бытовых отходов. Гранулы, имеющие цилиндрическую форму, на выходе из матрицы отрезаются при помощи специализированных ножей. Увеличение давления и температуры материала способствуют значительному улучшению качества гранул. Однако превышение температуры выше 120°C приводит к изменению свойств, получаемых гранул. Применение охлаждения и кондиционирования получаемых пеллет, обеспечивает постоянство их структурно-деформационных и физических свойств [55].

При получении твердотопливных гранул из МПС на основе вторичных материальных ресурсов использует ту же технологию, что и в производстве гранул

из древесных опилок. Важную роль при этом играют процессы дробления и помола. Используемое оборудование обеспечивает получение частиц с заданным гранулометрическим составом. Это упрощает процесс сушки смеси и предотвращает образование слежавшихся или комковатых структур. Для обеспечения эффективного технологического процесса обработки древесины необходимо поддерживать минимальный уровень влажности на уровне 8%. Такая влажность достигается при термической обработке смеси насыщенным паром или введением гидрофильных связующих типа лигносульфонатов. При производстве топливных гранул из вторичных материалов их необходимо дополнительно измельчать до размера частиц от 0,5 до 3 мм. В процессе прессования в роторном грануляторе температура смеси, при движении через канал матрицы, может достигать 70-90°C, что инициирует образование жидкой пластифицирующей фазы.

На качество гранул также влияет распределение частиц по размерам. Однородный состав частиц способствует более высокой плотности гранул и повышает их прочность.

Важным аспектом является контроль температуры процесса. Превышение температуры может привести к деградации органических компонентов и снижению механической прочности гранул. С другой стороны, небольшая температура не обеспечит необходимой пластификации и затруднит формирование связей между частицами. Мониторинг технологических режимов работы гранулятора и регулирование температуры смеси являются определяющими для получения гранул с заданными характеристиками.

Использование связующих веществ, таких как лигносульфонаты, может значительно улучшить прочность гранул, особенно при работе с материалами, обладающими гидрофобными свойствами. Связующие вещества способствуют образованию более прочных межчастичных связей, повышают прочность гранул и их устойчивость к разрушению при транспортировке и хранении [49].

После формования гранулы подвергаются сушке для удаления излишней влаги. Слишком высокая влажность может привести к развитию плесени и гниению, а слишком низкая – к повышенной хрупкости.

Наличие отходов, обладающих различной теплотворной способностью, а также потребность в топливе обеспечивающим интенсивное и стабильное горение, потребовало разработки составов специализированных топливных гранул. Эти гранулы содержат компоненты, которые значительно улучшают их воспламеняемость и обеспечивают более высокую энергетическую эффективность при сжигании. При производстве таких гранул используются роторные грануляторы с плоской матрицей, которые обеспечивают получение гранул с высокой прочностью и плотностью конечного продукта.

Для повышения эффективности применяются грануляторы роторного типа, в которых матрица остается неподвижной, а гранулирование происходит за счет вращения приводного вала с роликами вокруг своей оси от двигателя [69].

Для небольших объемов производства (от 80 до 400 кг/ч) применяются роторные грануляторы, где вращение матрицы обеспечивается нижним приводом, а прижимные ролики, закрепленные на неподвижном валу, вращаются за счет контакта с поверхностью матрицы [75]. Часто ролики устанавливаются с зазором над поверхностью матрицы и контакт происходит через слой материала. Данная схема является наиболее компактной и надежной для малых производственных линий.

Электропривод гранулятора снабжен частотным преобразователем, который обеспечивает плавное изменение скорости вращения матрицы до заданной частоты. Это позволяет точно настраивать время прессования и производительность агрегата под конкретный тип сырья. Увеличение перфорации рабочей поверхности матрицы (живое сечение) до 62% способствует равномерному распределению материала, устранению застойных зон сырья на поверхности матрицы и снижению пиковых нагрузок на привод. Часто используется площадь выходных конических отверстий (39% от площади матрицы), позволяющая производить пеллеты стандартных диаметров (6-8 мм) увеличенного размера до 14 мм без замены матрицы. Регулируемый зазор между роликами и матрицей обеспечивает снижение энергопотребления на 15-20%. Это

уменьшает износ рабочих органов роторного гранулятора и поддерживает стабильное качество гранул на протяжении времени эксплуатации оборудования.

Таким образом технологическая цепочка производства топливных пеллет включает ряд стадий: первичное измельчение сырья, термическую сушку до оптимальной влажности 8-12%, вторичное дробление до требуемой фракции 1-3 мм, обработку связующим и непосредственно гранулирование в роторном грануляторе с плоской матрицей [55].

1.4 Оборудование и анализ методов получения гранул на основе древесных и растительных отходов

Уплотнение сложных многокомпонентных полидисперсных систем сопровождается структурными изменениями, обусловленными молекулярным взаимодействием частиц, влиянием адсорбционных и поверхностных термодинамических сил.

П.В. Классен в работе [40] показал, что методы гранулирования можно разделить на следующие группы: «сухое гранулирование, которое происходит без участия жидкой фазы, а агломераты образуются при воздействии молекулярных, электростатических сил и при механическом взаимодействии частиц; граничное гранулирование реализуется при минимальных зазорах между частицами, где свойства адсорбционных слоев жидкости становятся определяющими; жидкостное (влажное) гранулирование обеспечивается взаимодействием с жидкой фазой, где ключевым фактором является вязкость среды, а не структура частиц» [40].

При гранулировании отходов используется прессовое гранулирование, обеспечивающее за счет силового воздействия механическое уплотнение дисперсных систем.

Методы гранулирования классифицируют, исходя из влажности исходной смеси, ($W, \%$) прессование (таблетирование, брикетирование, компактирование);

формование (экструзия, роторное гранулирование с кольцевой/плоской матрицей), а также окатывание (в тарельчатых или барабанных грануляторах) [40].

Метод окатывания для гранулирования топливных гранул не рационален, так как необходим дополнительный помол исходных материалов. Для производства топливных гранул методом прессования применяются роторные грануляторы с плоской и кольцевой матрицей, изображенные на рисунках 2 и 3.

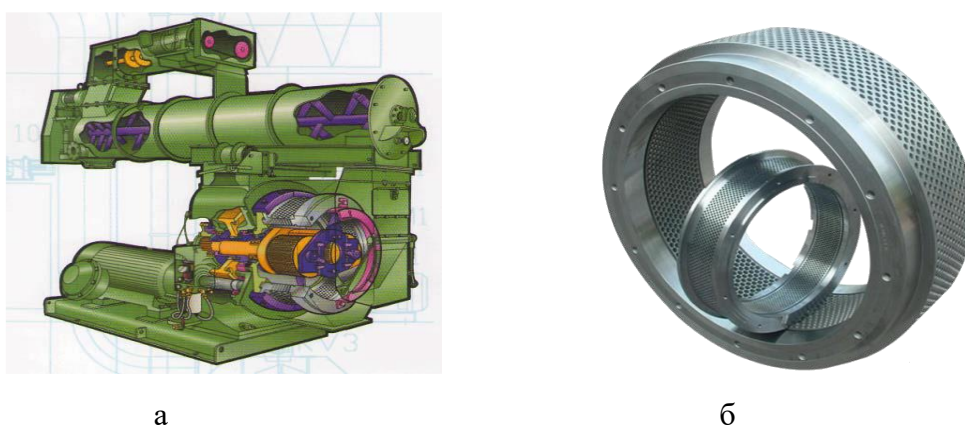


Рисунок 2 – Гранулятор с кольцевой матрицей: а – общий вид пресс-гранулятора СРМ; б – вертикальная кольцевая матрица

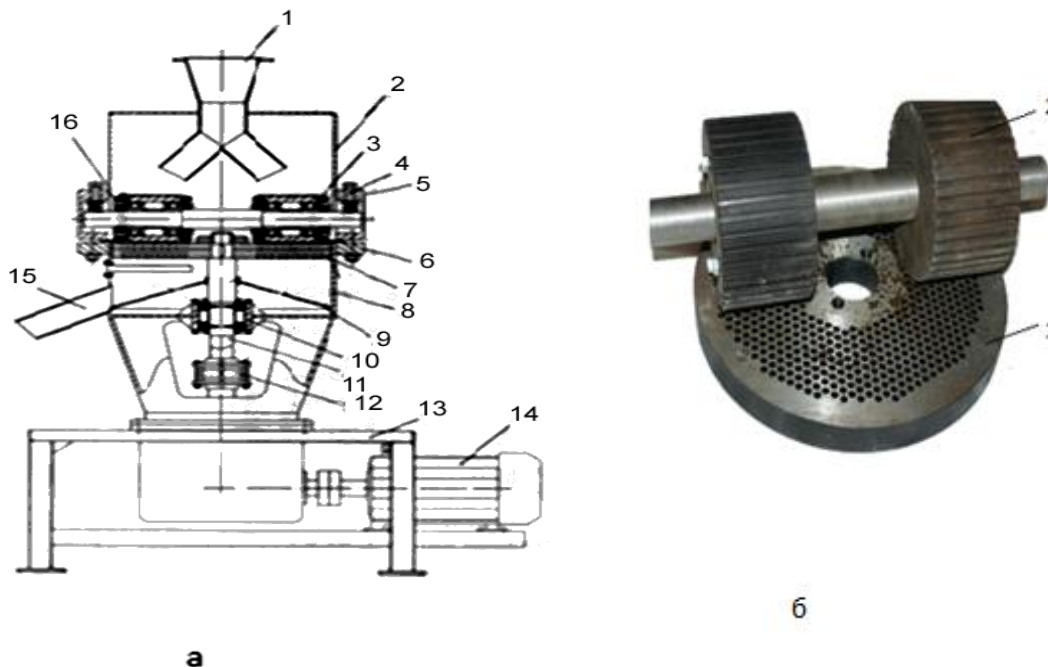


Рисунок 3 – Гранулятор с плоской матрицей: а – общий вид гранулятора; 1– загрузочный бункер; 2 – верхний корпус; 3 – ролик; 4– регулировочный болт; 5 – кожух вала роликов; 6 – фланец; 7 – матрица; 8 – нижний корпус; 9 – коническая вставка; 10 – опора вала; 11 – вал; 12 – муфта; 13 – опора; 14 – привод; б – узел плоской матрицы с прокатывающими роликами: 1 – матрица; 2 – валки

В обоих типах грануляторов вращающиеся ролики взаимодействуют со слоем сырья, находящегося на поверхности матрицы. Ролики создают контактное напряжение смятия исходной смеси на матрице и продавливают её через каналы с образованием цилиндрических гранул. На выходе из канала они срезаются ножами.

Роторные грануляторы, широко применяемые в агропромышленном комплексе, характеризуются надежной и прочной конструкцией. Их ключевые рабочие органы – матрица и прессующие ролики – изготавливаются из специальных износостойких материалов, часто это закаленные легированные стали или сплавы.

Широкое распространение получили грануляторы с кольцевой матрицей, которая фиксируется с помощью системы бандажных колец. Внутри этого кольца расположены прессующие ролики. Реализованы две основные конструкции таких грануляторов. Одна из них с вращающейся кольцевой матрицей, а другая – с неподвижной кольцевой матрицей. Кольцевые матрицы имеют ряд недостатков: сложная конструкция, необходимость принудительной подачи сырья в зону прессования, высокая стоимость изготовления самой матрицы, а также ускоренный и неравномерный износ матрицы и роликов.

Грануляторы с плоскими матрицами, обладают рядом эксплуатационных преимуществ: упрощенная конструктивная схема, повышенная ремонтпригодность, увеличенный ресурс работы. Конфигурация прессовальных каналов в таких матрицах может быть цилиндрической, конической и комбинированной.

Гранулирование древесных и растительных отходов требует значительных усилий для прессования. В процессе прессования древесное сырье уплотняется до состояния прочной гранулы. Энергопотребление составляет 30-50 кВт/ч на тонну продукции. Высокая температура в каналах матрицы (до 100 °С) обусловлена трением и адиабатическим сжатием сырья.

Гранулирование методом формования подходит только для материалов с высокой пластичностью, достигаемой за счет добавления связующих веществ.

Таким образом, энергоемкость процесса определяется механизмом формирования гранул, который, в свою очередь, зависит от выбранного способа гранулирования и используемого оборудования.

При выборе технологии гранулирования для МПС необходимо проводить комплексный анализ следующих факторов: состав сырья и реологические параметры. Также необходимо определять теплофизические характеристики топливных гранул различных составов и особенности процесса их горения. Эти факторы крайне важны, поскольку смесь является многокомпонентной и включает в себя компоненты с разными свойствами: пластичностью, хрупкостью и гигроскопичностью и различной теплотворной способностью [94].

1.5 Особенности реологических свойств и деформирования гранулируемых систем

Рассматриваемые смеси обладают способностью к необратимым изменениям объема, что предопределяет их неконтролируемое поведение под действием различных внешних факторов: механических, термических, химических. Мелкодисперсные материалы, обладая высоким уровнем сжатия и расширения, способны со временем менять свое напряженно-деформационное состояние, что может существенно влиять на их эксплуатационные характеристики. Кроме того, одной из основных и наиболее значимых характеристик анализируемых веществ является нелинейная связь между напряжением и деформацией. Этот фактор усложняет проведение исследований технологических процессов в инженерных задачах.

При проектировании прессового оборудования необходимо учитывать реологическое поведение материала. От этого зависят основные технологические и конструктивные характеристики оборудования. Вязкоупругие свойства сырья определяют требуемую мощность привода и энергопотребление процесса гранулирования. Реология материала диктует требования к геометрии рабочих

узлов. Их конфигурация должна обеспечить равномерное уплотнение и исключить появление локальных пиков давления. Одним из критических последствий несоответствия геометрических размеров канала реологическим свойствам материала является забивание отверстий матрицы, что приводит к остановке технологического процесса.

Для описания поведения смесей при уплотнении и гранулировании используются такие параметры, как уплотняемость – способность материала уменьшать объем под нагрузкой; формуемость – сохранение формы после снятия давления; сыпучесть – подвижность частиц в свободном состоянии; вязкость и пластичность – сопротивление течению и способность к остаточным деформациям.

В общем виде реологическое уравнение состояния учитывает следующие напряжения [10]:

$$P = P_s + P_f, \quad (1)$$

где P – термодинамическое напряжение,

P_s – структурное напряжение,

P_f – вязкое напряжение, направленное на преодоление сил внутреннего трения системы.

Для описания структурообразования (P_s) дисперсных сред используется зависимость между нормальными σ_n и касательными напряжениями τ_n в виде уравнения Кулона-Мора:

$$\tau_n \leq f \cdot \sigma_n + C, \quad (2)$$

где $f = \operatorname{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения;

φ – угол внутреннего трения;

C – коэффициент сцепления.

Вторая составляющая в уравнении 1 (P_f) описывается комбинацией сложных реологических моделей, таких как Кельвина – Фогта, Бингама, Шведова, Максвелла [56].

В исследованиях Д.А. Макаренкова [55] предложен подход к моделированию реологического поведения многокомпонентных систем на основе растительного

сырья. Автор показал, что структурно-механические свойства таких МПС могут быть адекватно описаны через комбинации базовых физических элементов:

1. Упругий компонент (рисунок 4а) – характеризует способность материала к обратимой деформации, что особенно важно для начальной стадии прессования;
2. Демпфирующий элемент (рисунок 4б) – отражает вязкостные характеристики смеси, определяющие энергопотребление при обработке;
3. Фрикционный модуль (рисунок 4в) – моделирует пластические свойства и предельные состояния материала.

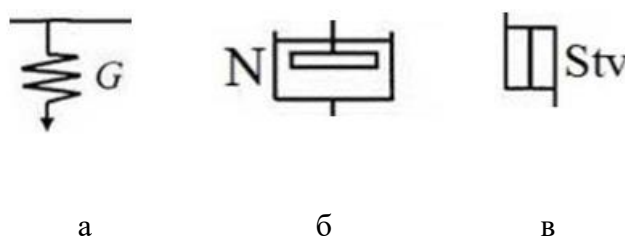


Рисунок 4 – Механические модели для описания реологического поведения смесей: а – упругий элемент; б – нелинейно-вязкий элемент; в – пластичный элемент

При описании механического поведения материалов важную роль играет упругий компонент, математически описываемый через соотношения Гука. Данная зависимость устанавливает прямую пропорциональность между касательными напряжениями и угловой деформацией, нормальными напряжениями и линейной деформацией:

$$\tau = \nu \cdot G, \quad (3)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (4)$$

где G, E – модули сдвиговой и продольной упругости, Па;

τ, σ – напряжения сдвига и растяжения, Па;

ν, ε – угловая и линейная деформационные характеристики.

В реологии ньютоновские жидкости представляют особый класс сред, демонстрирующих линейную зависимость между напряжением и скоростью деформации. В исследованиях Ю.А. Мачихина «соотношение выражается

фундаментальными уравнениями для сдвиговых деформаций:

$$\tau = \eta \cdot v, \quad (5)$$

Для продольных деформаций:

$$\sigma = \eta \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где η – вязкость при сдвиге, Па·с;

v – скорость сдвига, с;

η – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

ε – скорость продольного течения, м/с» [64].

Идеально-пластичная среда описывается моделью Сен-Венана, которая характеризует процесс деформации при движении элемента трения.

Моделирование поведения упруго - пластической среды осуществляется с помощью последовательного соединения двух элементов: упругого (Гука) и пластического (Сен-Венана), схематично представленных на рисунке 5а. В случае, когда касательное напряжение τ не превышает предела текучести τ_T , наблюдается исключительно упругая деформация. При достижении условия $\tau = \tau_T$ материал переходит в режим пластического течения.

Упруго-вязкие релаксирующие среды описываются моделью Максвелла, которая показана на рисунке 5б. Данная модель представляет собой последовательное соединение пружины и демпфера, в котором оба элемента испытывают одинаковое напряжение. При кратковременной нагрузке преобладает упругая деформация, при длительной – течение. Поведение среды (вязкое/упругое) зависит от соотношения времени релаксации и длительности нагружения и описывается уравнением:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\tau}{G} + \frac{\tau}{\eta} \quad (7)$$

Модель Кельвина-Фогта, изображенная на рисунке 5в характеризует поведение упруго-вязкой среды через параллельное сочетание упругого элемента (Гука) и вязкого компонента (Ньютона). Эта модель позволяет анализировать временную зависимость деформации: приложенное напряжение вызывает постепенное нарастание деформации до установившегося значения, тогда как

после снятия нагрузки наблюдается релаксационное затухание деформационных процессов.

Представленные реологические модели находят практическое применение при анализе механизмов уплотнения сыпучих сред в различных типах грануляционного оборудования [49,50]. Как установлено в исследовании [36], реологическое поведение растительных отходов при гранулировании в роторных грануляторах имеет сходство с процессом формирования песчано-смоляных смесей в части механизма пластического течения и уплотнения под давлением, которое обеспечивается действием связующих компонентов.

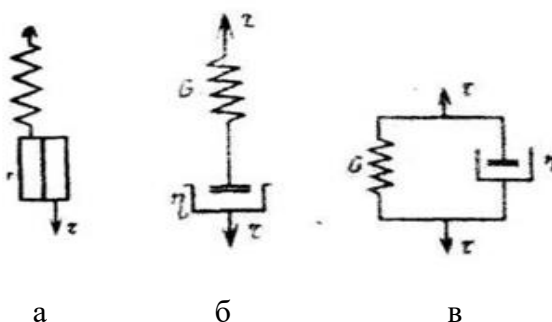


Рисунок 5 – Механическая модель упругой среды: а – модель упруго - пластической среды; б – модель Максвелла; в – модель Кельвина- Фогта

МПС на основе древесных и растительных отходов характеризуются сложным упруго-вязкопластическим поведением. На начальном этапе движения через канал с переменным сечением смесь проявляет упругие свойства, подчиняясь закону Гука. При достижении критического напряжения сдвига наблюдается переход к вязкому течению с линейной зависимостью скорости деформации от приложенного напряжения [36].

Гранулирование топливных композиций сопровождается нагревом материала в фильере и термоактивацией связующих компонентов (смола, лигнина). При этом реологические свойства изменяются от сухого до вязкого состояния и происходит снижение рабочего давления в системе.

Модель поведения смеси из древесных и растительных отходов основана на последовательной комбинации трех реологических элементов. Для учета свойств

связующего на основе лигносульфонатов вводится вязкий элемент Ньютона (N_{dc}). Деформационно-прочностные характеристики материала описываются с помощью упругого элемента Гука (H_{do}), отвечающего за обратимые деформации, и пластического элемента Сен-Венана (stv_d), который определяет порог текучести.

«Таким образом, реологическое поведение МПС при сдвиговых нагрузках может быть описано последовательной комбинацией трех элементов:

$$D O_d = N_{dc} - \frac{H_{do}}{stv_d}, \quad (8)$$

где $D O_d$ – сдвиговая деформация древесных опилок;

N_{dc} – вязкий элемент Ньютона, характеризующий вязкие свойства связующего (лигнина) при сдвиге;

H_{do} – упругий элемент Гука при сдвиге;

stv_d – пластический элемент Сен-Венана» [50].

Исследуемая смесь из древесных и растительных отходов представляет собой полидисперсную систему, содержащую: твердую фазу (древесные и растительные частицы), жидкую составляющую (связующие, влага), газовую компоненту (в порах).

Согласно современным представлениям [44], технологические добавки и связующие не выделяются в самостоятельную фазу, формируя с твердыми частицами единый комплекс, что позволяет рассматривать систему как бинарную (твердая фаза + газ).

При получении топливных гранул, кроме растительных отходов, в состав смеси также входят опилки. Древесные отходы имеют сложное строение и относятся к разряду волокнисто-слоисто-пористых анизотропных материалов. Зависимость прочности древесных отходов от скорости нагружения является прямым следствием их реологических свойств. Будучи по своей природе естественным полимером, древесина демонстрирует ярко выраженное вязко-упругое поведение, которое описывается методами инженерной реологии.

Деформационное поведение материалов на основе древесных и растительных отходов при механическом нагружении изучено недостаточно, а их адекватная реологическая модель в настоящее время отсутствует.

В работе [44] была предпринята попытка моделирования реологического поведения древесины с использованием тела Бюргера, изображенного на рисунке 6, учитывающего упругие, эластические и вязкие деформации. Однако, данная модель недостаточно точна, поскольку элемент Ньютона, входящий в её состав, описывает непрерывный рост деформаций во времени, что не соответствует реальному поведению древесины.

Современные реологические модели древесины (упруго-эластические, упруго-вязкие и другие) используют только элементы Гука и Ньютона, игнорируя модель Сен-Венана, описывающую пластичность. При этом, несмотря на отсутствие учета пластичности в моделях, авторы часто упоминают пластические деформации, отождествляя их с вязкими. Экспериментально наблюдаемые остаточные деформации $\varepsilon_{\text{ост}}$, возникающие после снятия нагрузки и выдержки образца из древесных и растительных отходов, также указывают на наличие пластических свойств.

В работе [109] говорится о том, что остаточные деформации древесины отражают ее пластические свойства.

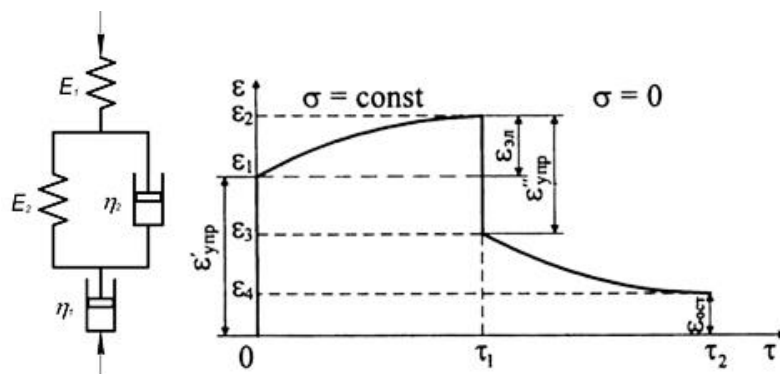


Рисунок 6 – Модель тела Бюргера и зависимость деформации древесины от времени действия нагрузки: E_1 – модуль упругости первого рода, E_2 – модуль упругости второго рода; η_2 – коэффициент эластичности; η_1 – коэффициент вязкости

В исследовании [44] анализируется совместное влияние трех фазовых состояний, обусловленное различной прочностью клеточных структур биомассы и древесины. Предлагаемая реологическая модель для области мгновенных остаточных деформаций включает несколько компонентов сухого трения с разными прочностными характеристиками. Под действием нагрузки слабые поверхностные слои мгновенно разрушаются, поскольку приложенное напряжение превышает их предельную прочность. Одновременно часть клеточных стенок начинает пластически деформироваться, преодолевая внутреннее трение. Это приводит к постепенно замедляющейся деформации вплоть до достижения предела устойчивости. При этом нагрузка на эти клетки соответствует их пределу текучести, не превышая уровня хрупкого разрушения. Более плотные внутренние слои при такой нагрузке проявляют упругие свойства, так как напряжение не достигает их предела текучести, и после снятия нагрузки полностью восстанавливают первоначальную форму.

Таким образом, реологическое поведение древесных и растительных смесей может быть представлено в виде упруго-пластично-вязкой модели, схематически изображённой на рисунке 7 [44]. Модель демонстрирует, что сложное поведение материала можно достаточно точно описать, правильно комбинируя элементы с разными свойствами. Важно отметить, что соотношение между этими компонентами не является постоянным и зависит от типа биомассы, ее влажности и температуры процесса.

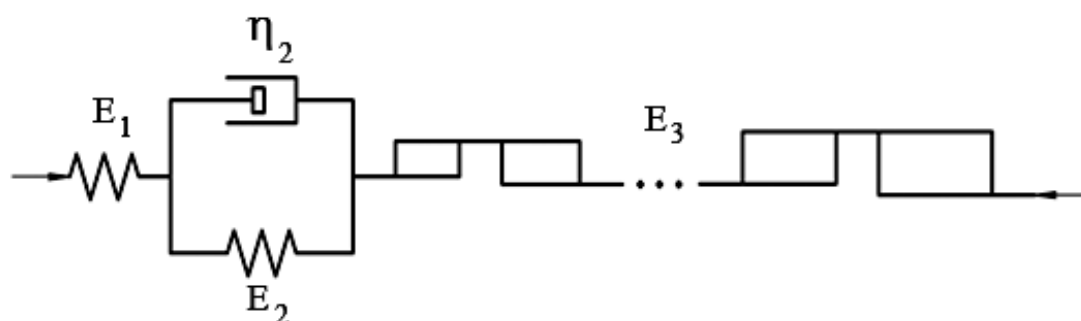


Рисунок 7 – Схематическое представление упруго-пластично-эластичной модели

Совокупная деформация материала под нагрузкой описывается следующим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_3} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 \tau}{\eta_2}}\right), \quad (9)$$

где σ – приложенное механическое напряжение, Па;

ε – полная деформация;

E_1 – модуль мгновенной упругой деформации, Па;

E_3 – параметр пластической составляющей деформации, Па;

E_2 – модуль упругого последействия, Па;

η_2 – коэффициент эластической релаксации, Па·с ;

τ – продолжительность нагружения, с;

e – основание натурального логарифма [109].

Так в работе [64] описано поведение комбикормовой смеси при гранулировании. При постоянном напряжении σ , большем предельного напряжения σ_0 реализуется несколько типов деформации. Это мгновенная упругая деформация ε_0 , затухающая упруго-вязкая (эластичная) деформация ε_1 , вязкое течение, мгновенный упругий сброс деформации и упруго-вязкий (эластичный) сброс деформации. После затухания эластичной деформации возникает остаточная объемная деформация $\varepsilon_{\text{ост}}$. Такому поведению комбикормовой смеси при $\sigma > \sigma_0$ соответствует реологическая модель упруго-эластично-вязко-пластичного тела – модель Шофильда–Скотта–Блэра. Она изображена на рисунке 8 и состоит из последовательного соединения моделей Бингама и Кельвина. Упругие и вязкие характеристики указанных моделей на рисунке 8 обозначены соответственно индексами 1 и 2.

Реологическое уравнение выбранной модели имеет вид:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{\xi_2}\right) + \exp\left(-\frac{E_2 \tau}{\xi_2}\right) + \frac{\sigma - \sigma_0}{\xi_1} \quad (10)$$

Исключив напряжение и деформации в уравнениях отдельных элементов, получим зависимость между напряжением и деформацией следующего вида:

$$\xi_1 n_2 \ddot{\varepsilon} + \xi_1 \dot{\varepsilon} = (\sigma - \sigma_0) + \left(n_1 + n_2 + \frac{n_2}{k}\right) \sigma + n_1 n_2 \sigma, \quad (11)$$

где σ – напряжение, Па;

σ_0 – предельное напряжение сдвига модели Бингама, Па;

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с^{-1} ;

$\ddot{\epsilon}$ – ускорение деформации, с^{-2} ;

τ – время, с;

E_1, E_2 – модули упругости, Па;

ξ_1, ξ_2 – коэффициенты вязкости демпферов, Па·с;

$n_1 = \xi_1/E_1$ – время релаксации, с;

$n_2 = \xi_2/E_2$ – время упругого последствия, с;

$k = \xi_2/\xi_1$ – безразмерный коэффициент вязкости.

Таким образом, уплотнение материала можно описывать реологическими моделями, которые учитывают деформационные свойства реальных материалов.

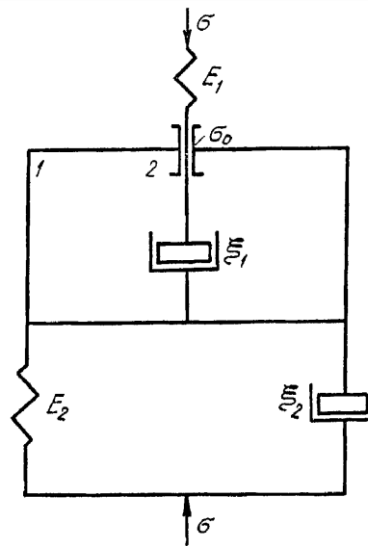


Рисунок 8 – Модель Шофильда – Скотта – Блэра

В данных моделях связь между деформацией и напряжением определяется реологическими коэффициентами смеси. Управление реологическими свойствами смеси достигается путем введения пластификаторов и связующих. Именно контролируемое изменение реологических свойств в конечном счете и определяет качество конечных гранул. Для повышения эффективности процесса необходимо определять реологические параметры, обеспечивающие требуемую плотность и

прочность гранул, что позволит снизить энергозатраты. Процесс гранулирования многофазных систем требует учета реологических свойств компонентов, которые обеспечивают качество конечного продукта. Эти реологические свойства необходимо анализировать совместно с характеристиками структурных и деформационных параметров, поскольку они существенно влияют на прочность и устойчивость получаемой гранулированной структуры. Описание данного процесса основывается на решении уравнений равновесия и состояния, которые учитывают разнообразные реологические параметры. Это позволяет предсказывать поведение многофазных систем под влиянием внешних воздействий.

Поведение материала описывается различными реологическими параметрами на каждой стадии процесса. На стадии подготовки ключевыми являются пластическая прочность и сыпучесть. При уплотнении в очаге деформации поведение материала определяется комплексом параметров: коэффициентами внутреннего и внешнего трения, а также коэффициентом бокового давления. Наконец, на стадии упругого последействия оцениваются уже конечные свойства – плотность и прочность готовых гранул.

Выбор метода гранулирования определяется совокупностью этих реологических параметров. Для обоснованного выбора метода гранулирования, необходим комплексный анализ, включающий реологические константы материала (пластическая прочность, внутреннее трение), а также производные от них и от граничных условий параметры (коэффициенты бокового давления и внешнего трения).

Такой подход позволяет рассчитать оптимальное усилие сжатия и прогнозировать поведение материала в зоне прессования.

Кроме того, учет этих характеристик помогает выбрать тип оборудования и настроить его рабочие режимы для достижения максимальной производительности и качества гранул. При этом реологические параметры взаимосвязаны с технологическими факторами, такими как влажность, фракционный состав и температура смеси, что требует их совместного учета при проектировании процесса.

Комплексный реологический анализ является основой для научно обоснованного выбора метода гранулирования и оптимизации технологических режимов.

1.6 Физико-химическая модель биотоплива как объект гранулирования

Единая теория гранулирования отдельных классов веществ не разработана из-за сложности, многообразия и малоизученности процессов гранулирования. Это относится к таким многокомпонентным системам, как смеси на основе древесных и растительных отходов, чьи свойства сильно варьируются в зависимости от исходного сырья и условий переработки.

Механическая смесь из растительных отходов состоит из двух (твердой и газообразной) или из трех (твердой, жидкой и газообразной) фаз. При воздействии внешних сил смесь способна уплотняться благодаря смещению твердых частиц, а также из-за остаточных (необратимых) и упругих (обратимых) деформаций и вытеснения газов.

На первом этапе уплотнения происходит сближение частиц, что приводит к образованию более плотной структуры. Частицы из зон с высоким давлением перемещаются в области с более низким давлением, и уплотнение осуществляется преимущественно за счет вытеснения газовой фазы, что замедляет их подвижность и увеличивает контактную площадь.

На втором этапе процесса наблюдаются упругопластические деформации, которые сопровождаются разрушением некоторых частиц материала. Эти разрушения могут быть вызваны различными механическими нагрузками, что в свою очередь приводит к более плотной укладке оставшихся компонентов и укреплению структуры в целом. Таким образом, изменения в размере и форме частиц ведут к перераспределению напряжений внутри материала, что способствует его дополнительной стабилизации и увеличению прочностных характеристик. На данном этапе газы вытеснение продолжает играть ключевую

роль: при достаточном количестве жидкой фазы она перемещается к краям твердых частиц, формируя благоприятные условия для последующего уплотнения. В этот момент, благодаря вязкостному течению жидкости, общий объем системы сокращается несущественно, а плотность материала постепенно достигает значений, близких к «истинной».

На третьей стадии доминируют упругие деформации частиц и сжатого газа, в результате чего даже значительный рост внешнего давления не вызывает заметного повышения плотности. Вместе с тем, на этой стадии важно учитывать, что уже достигнутое состояние уплотненности делает материал менее восприимчивым к дальнейшим деформациям, что является результатом предыдущих этапов [35].

Физическая сущность процесса образования брикетов или гранул выражается различными теориями прессования. Наиболее известны такие теории: капиллярная, гуминово кислотная, коллоидная, молекулярная и другие.

Капиллярная теория предполагает, что сцепление частиц обусловлено силами поверхностного натяжения жидкости. Для этого требуется достаточное количество жидкости, заполняющей капилляры, образовавшиеся между частицами.

Гуминово кислотная теория предполагает, что лишь свободные гуминовые кислоты могут склеивать прессуемый мелкофракционный материал в прочные гранулы и брикеты.

Коллоидная теория объясняет сцепление частиц действием молекулярных сил сцепления, или когезионных типа сил Ван-дер-Ваальса.

По теории В.М. Наумовича наличие сил молекулярного притяжения между атомами и молекулами приводит к появлению сил между макроскопическими телами, аналогичных силам прилипания [91].

В контексте технологий гранулирования и брикетирования ключевую роль играет адгезионная прочность, рассчитываемая на единицу площади контакта. Данный параметр определяется следующим уравнением:

$$N = \pi r f(0) \frac{1}{4r^2}, \quad (12)$$

где N – адгезионная прочность, Па (или Н/м²);

r – средний радиус гранулируемых частиц, м;

$f(0)$ – удельная энергия, необходимая для разделения адгезионно связанных частиц, Дж/м².

Во время сближения частиц преодолеваются упругие силы их внутренней структуры, нарушается растительное и клеточное строение, происходит освобождение газов, а также наблюдаются адгезионные эффекты и другие явления, включая образование гидратных групп. Эти процессы оказывают значительное влияние на упруго-вязко-пластичные свойства материала [23].

Применительно к биомассе актуальна гипотеза, которую выдвинул П.М. Дарманьян в своей работе [32], согласно которой механизм гранулообразования обусловлен физико-химическими и химическими превращениями биополимеров.

Исследуемые смеси, на основе древесных и растительных отходов, представляют собой многокомпонентную систему взаимосвязанных природных полимеров. Они отличаются преимущественно жесткой неэластичной полимерной цепью и специфической структурой. Это дает основания для проведения аналогии между процессами, протекающими в синтезированных полимерных материалах при их технологической переработке, и превращениями биополимеров, происходящими при гранулировании биомассы.

Для успешного гранулирования необходимо разрушить исходную систему биополимеров, уменьшить степень межмолекулярного взаимодействия. Это осуществляется за счет изменения влажности (применения связующих), повышающих пластичность и связность системы, а также за счет механического измельчения и нагрева материала [49].

Таким образом, при гранулировании используются технологические связующие, различные добавки и механическое измельчение. Данные способы позволяют управлять структурообразованием гранул и получать гранулированный продукт с заданными характеристиками при меньших энергозатратах.

Измельчение биомассы полностью разрушает её макрокапиллярную структуру, что, в свою очередь, изменяет кинетику её сушки. Это способствует снижению энергетических затрат при удалении избыточной влаги и повышает потенциал для формирования новых межмолекулярных связей, улучшая качество гранул. Известно, что в увлажненной биомассе влага сосредоточена, главным образом, в поверхностных слоях частиц. В этой области происходят процессы сорбции, диффузии и набухания, которые завершаются формированием гелеобразных структур, где цепи макромолекул обладают высокой гибкостью. Дальнейшее проникновение влаги изменяет надмолекулярное строение материала, что увеличивает его пластичность и способность к деформациям при относительно низких температурах и нагрузках [109]. Максимальный эффект наблюдается, когда влага сосредотачивается преимущественно в поверхностных слоях частиц. Повышение температуры изменяет релаксационные состояния полимеров в биомассе. Эти изменения сложны, но универсальны. Во-первых, аморфные компоненты проходят через стекловидное, высокоэластичное и вязкотекучее состояния с повышением температуры. Во-вторых, переходы полимеров между состояниями происходят в определённом температурном диапазоне. При одинаковых температурах различные компоненты могут находиться в разных релаксационных состояниях. Заключительная стадия – этап охлаждения – обеспечивает окончательную стабилизацию структуры сформированных гранул. При охлаждении снижается температура гранул и происходит активное удаление остаточной влаги. Испарение влаги играет критически важную роль, так как, приводит к сближению цепей макромолекул биополимеров и между ними начинают действовать силы межмолекулярного взаимодействия (водородные связи, силы Ван-дер-Ваальса). Это обеспечивает непосредственное контактное взаимодействие и, как итог, долговременную стабилизацию всей трёхмерной структуры получаемых гранул с необходимой прочностью. Полнота протекания процессов межмолекулярного взаимодействия зависит от времени нахождения гранул в зоне охлаждения и условий теплообмена с окружающей средой.

1.7 Способы определения энергосиловых характеристик при гранулировании многокомпонентных полидисперсных смесей

При расчете процессов гранулирования в роторных грануляторах важным фактором является знание распределения давления по длине каналов с различной геометрией в матрице. При этом учитываются процессы, протекающие при движении ролика по поверхности матрицы и его взаимодействие со слоем материала [17,101,110].

А.В. Ветюговым показано, что усилие прессования, действующее со стороны уплотняющего ролика, зависит от толщины уплотняемого материала и угла захвата материала роликом [20].

Согласно исследованиям М.В. Севостьянова [101], процесс экструдирования порошковых материалов через фильеру с переменным сечением характеризуется нелинейной зависимостью требуемого давления от геометрических и реологических параметров системы. В работе [101] установлено, что «необходимое для экструзии давление подчиняется экспоненциальной зависимости, описываемой уравнением 13.

$$P_0 = \sigma_{cp} \exp \frac{2\xi f_0 (D_k - d_\phi)}{D_k \operatorname{tg} \beta} \left[\frac{D_k^2}{d_\phi^2} f_i + \left(\cos \beta + \frac{\sin \beta}{\xi} \right) f_0 + \xi f_0 \right] - E_1 \frac{P - P_k}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_1} \right) \right], \quad (13)$$

где σ_{cp} – среднее напряжение в предэкструзионной зоне, (Н/м²);

ξ – коэффициент бокового давления;

D_k – диаметр конического входа фильеры, (м);

d_ϕ – диаметр цилиндрического канала, (м);

β – угол конусности, (град);

f_i, f_0 – коэффициенты внутреннего и внешнего трения;

E_1 – мгновенный модуль упругости, (Н/м²);

E_2 – модуль эластичности, (Н/м²);

$(P - P_k)$ – напряжение, поддерживающее стационарный поток, (Па);

η_1 – пластическая вязкость, (Па·с);

t – временной параметр, (с)

В основе расчетной модели лежит анализ среднего нормального напряжения (σ_{cp}), воздействующего на элементарный объем материала в зоне предэкструзионного деформирования [101,24,25]. Для прогнозирования параметров процесса необходимо учитывать геометрические характеристики цилиндроконического канала, реологические свойства материала и взаимодействие упругопластических деформаций. Особенность модели заключается в учете временной зависимости реологических характеристик, взаимосвязи геометрических параметров фильеры с силовыми характеристиками, а также комбинированного влияния упругопластических свойств материала на процесс экструзии.

В работе А.С. Федоренчика и Д.М. Гайдукевича [110] представлена модель распределения давления при прессовании древесных опилок, основанная на анализе напряженно-деформационного состояния элементарного слоя материала. Рассматривается равновесие элементарного объема под действием разнонаправленных нормальных напряжений. Характер изменения давления вдоль оси цилиндрической части фильеры вычисляется по формуле 14:

$$P(x) = P_{i\delta} \cdot l \cdot x \cdot P\left(\frac{4f \cdot \mu}{D}\right) \cdot x, \quad (14)$$

где $P_{i\delta}$ – отношение предельного давления к атмосферному;

l – длина рабочей зоны фильеры, (м);

x – глубина распределения давления по фильере, (м);

f – коэффициент трения;

μ – коэффициент Пуассона;

D – диаметр цилиндрической части фильеры, (м)» [110].

В работе [17] И.А. Булатова установлены зависимости между геометрией канала матрицы и параметрами системы при прессовом гранулировании мелкодисперсных материалов. На рисунке 9 представлено распределение сил, действующих на материал в канале матрицы.

Были получены зависимости для определения давления P_1 , P_2 , P_3 на разных участках по длине канала. Была получена экспоненциальная зависимость для определения давления на конечном участке канала:



Рисунок 9 – Схема сил, действующих на материал в канале матрицы

$$P_3 = P_0 \cdot \exp \left(2f \cdot \xi \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \ln \left(1 - 2 \sin \alpha \frac{\ell_2}{d_1} \right) - 4f \cdot \xi \left(\frac{\ell_1}{d_1} + \frac{\ell_3}{d_2} \right) \right), \quad (15)$$

где l – длина канала, (м);

l_1, l_2, l_3 – длина первого, второго и третьего участков канала, (м);

f – коэффициент внешнего трения;

ξ – коэффициент бокового давления;

d_1, d_2 – диаметры канала на первом и третьем участках, (м);

2α – угол при вершине конуса на втором участке канала, (рад).

Из приведенного уравнения видно, что для уменьшения потери давления на проталкивание материала по каналу матрицы необходимо стремиться к уменьшению длины канала, коэффициента трения и коэффициента бокового давления. С уменьшением же диаметра канала потери давления будут возрастать. Отсюда следует, что необходимым условием движением материала по каналу

является превышение силы давления на материал над силой трения. С учетом этих факторов длина канала определяется по зависимости:

$$\ell < \left(1 - \exp\left(-\frac{4}{d_1} \cdot f \cdot \xi \cdot \ell_1\right)\right) \frac{d_1}{4 \cdot \xi \cdot f} + \left(1 - \exp\left(2f \cdot \xi \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \ln\left(1 - 2 \sin \alpha \frac{\ell_2}{d_1}\right)\right)\right) \frac{d_1 + d_2}{8 \cdot \xi \cdot f \cdot \cos \alpha} + \frac{d_2}{4 \cdot \xi \cdot f}, \quad (16)$$

Полученное выражение является необходимым условием формования и устанавливает связь между геометрическими размерами канала матрицы и свойствами гранулируемой системы. При этом ξ связано с величиной пластической плотности. Произведение коэффициента бокового давления на коэффициент трения практически не изменяется по длине канала, то есть является постоянной величиной.

Важным параметром работы гранулятора является его производительность. Максимальная часовая производительность гранулятора вычисляется по формуле [17]:

$$Q_{\max} = 120 \cdot \pi \cdot z \cdot n_{\max} \cdot \rho_{\text{нас}} \cdot R \cdot (r_{\text{н}}^2 - r_{\text{вн}}^2) \cdot \sin^2 \frac{\alpha_{\text{ф}}}{2} \cdot K, \quad (17)$$

где z – количество формующих роликов, (шт.);

n_{\max} – предельная скорость вращения вала, (об/мин);

$\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность материала, (кг/м³);

R – радиус формующего ролика, (м);

$r_{\text{н}}, r_{\text{вн}}$ – радиусы поверхности матрицы, описываемые наружным и внутренним торцами ролика соответственно, (м);

$\alpha_{\text{ф}}$ – угол формования, (град);

K – константа, учитывающая реологическое состояние перерабатываемого материала (определяется экспериментально).

После анализа различных подходов по расчету параметров процесса гранулирования в роторном грануляторе можно сделать выводы. Для обеспечения точности расчетов принципиальное значение имеют знания физико-механических и реологических характеристик смесей, а также силовых параметров процесса прокатки.

Выводы по главе 1

1. Производство топливных гранул, основанное на переработке техногенных отходов, соответствует принципам ресурсосбережения, обеспечивая как их утилизацию, так и создание продукта с улучшенными эксплуатационными свойствами.

2. Сравнительный анализ методов переработки показал преимущества метода гранулирования, осуществляемого в роторном грануляторе с плоской матрицей. Данное оборудование обеспечивает высокую производительность и стабильное качество продукции.

3. Исследования структурно-реологических свойств смесей выявили необходимость пластифицирования материала путем введения связующих компонентов и термической обработки для повышения эффективности гранулирования.

4. Существующие методы расчета силовых параметров грануляторов не учитывают взаимодействие прокатывающего ролика со слоем материала находящегося на поверхности матрицы и механизм движения смеси по цилиндрико-коническому каналу.

5. Отсутствуют графические зависимости изменения давления по длине канала, учитывающие геометрические характеристики и реологические свойства гранулируемых материалов.

Глава 2. Лабораторные установки и методики проведения экспериментов

Содержание данной главы посвящено описанию экспериментальной базы исследования. Приведены методики, используемые для комплексного анализа свойств перерабатываемых сред, а также техническое описание лабораторного оборудования и измерительных комплексов.

2.1 Описание лабораторных установок и методик определения пластической прочности и сыпучести

В процессе подготовки смеси важными параметрами являются пластическая прочность (P_m) и сыпучесть (C), в то время как при прессовании в очаге деформации критически важным становится коэффициент бокового давления (ξ).

Данные коэффициенты определяют реологическую модель поведения рассматриваемых смесей, характеризуя переход материала из сыпучего состояния в связанное пластичное тело в процессе деформации.

Одним из ключевых параметров выступает пластическая прочность структуры. Измерения проводятся при малых деформациях и низких градиентах скорости, чтобы оценить пластическую прочность системы [50]. Для проведения подобных исследований применяются пенетрометры с коническими наконечниками, физический принцип работы которых основан на измерении глубины погружения (пенетрации) калиброванного металлического конуса в исследуемый образец под действием нагрузки. При погружении конуса в исследуемую смесь увеличивается площадь контакта между обеими поверхностями. Это в свою очередь, приводит к повышению сопротивления, вызванного сдвиговыми напряжениями, возникающими в момент взаимодействия конуса с материалом. Когда конус достигает полной глубины h , нагрузка F

начинает уравниваться величиной этой силы P_m , отнесенной к единице площади соприкосновения конуса с материалом.

Величина P_m отражает пластическую прочность материала и доказывает стабильность структуры при низких скоростях деформации [40]. Согласно работе Р.П. Нечипоренко [83] расчет пластической прочности выполняется согласно формуле 18:

$$P_m = K_\alpha \cdot \frac{F}{h^2} \quad (18)$$

где K_α – константа конуса, зависящая только от угла при его вершине.

При измерении глубины погружения конуса в миллиметрах она рассчитывается по формуле [83]:

$$K_\alpha = \frac{1}{\pi} \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (19)$$

где α – угол при вершине конуса, град;

F – нагрузка, равная массе груза, кг;

h – предельная глубина погружения, мм» [83].

В исследованиях использовали конический полуавтоматический пенетромтр модели S166 (рисунок 10). Данный прибор предназначен для стандартизированной оценки реологических свойств пластичных материалов, в частности, их сопротивления проникновению (пенетрации) при строго фиксированных условиях механического нагружения, временного интервала и температуры окружающей среды.

Порядок проведения испытания включал несколько последовательных этапов. Первоначально осуществляется подготовка прибора к работе: конус устанавливается в нижней части ползунка, после чего ползунок поднимается до соприкосновения его верхней части со стержнем-указателем и фиксируется в этом положении с помощью крепежной рукоятки.

Подготовленный образец смеси помещается в стандартную латунную чашку, которая устанавливается на подставку прибора. Непосредственно перед измерением острие конуса с помощью рукоятки опускается до соприкосновения с

поверхностью образца. Показанием прибора является глубина погружения конуса, определяемая по шкале индикатора.



Рисунок 10 – Прибор для измерения пластической прочности пенетромтр S166: 1 – столик из легкого сплава с винтами; 2 – устройство микрометрической вертикальной регулировки; 3 – латунный ползунок свободного падения; 4 – градуированный диск 3600 (деление 0.1мм с диаметром 150мм); 5 – проникающий конус (угол 600); 6 – латунные чашечки для образцов: d55xh35мм и d70xh45мм; 7 – магнитное устройство; 8 – головка ползунка; 9 – кнопка освобождения ползунка; 10 – стержень(наводчик); 11 – главный выключатель; 12 – индикатор; 13 – рукоятка регулировки; 14 – корпус; 15 – вертикальный штатив

Важной реологической характеристикой смеси является её сыпучесть. Она позволяет определять продолжительность операции дозирования материала из бункера в «очаг» деформации гранулирующего оборудования.

«Сыпучесть C ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) растительно-древесных смесей определяется по формуле:

$$C = \frac{M}{HL} \cdot \tau, \quad (20)$$

где M – масса материала, прошедшего через зазор за время испытания, кг;

τ – продолжительность высыпания материала, с;

HL – площадь зазора щели, m^2 ;

H – высота щели, m ;

L – длина щели, m » [14].

На рисунке 11 изображено устройство для оценки сыпучести МПС.

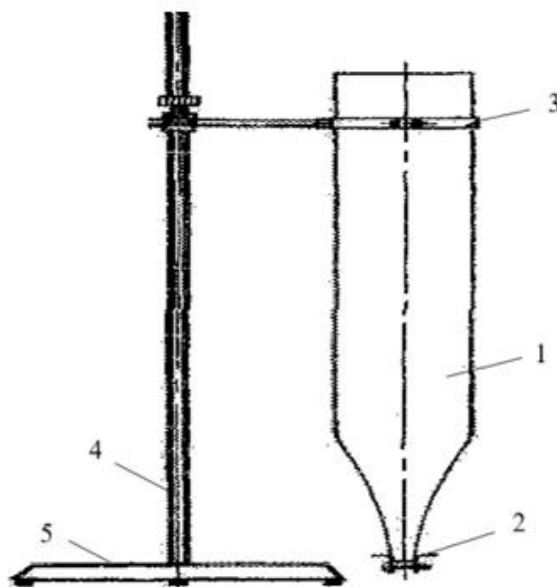


Рисунок 11 – Устройство для оценки сыпучести МПС: 1 – загрузочная емкость цилиндрической формы; 2 – механизм калибровки выходного отверстия; 3 – крепежный обруч; 4 – вертикальная опора; 5 – основание

Конструкция устройства представляет собой металлический цилиндр высотой 660 мм и диаметром 100 мм, который выполняет роль загрузочной камеры. Его нижняя часть плавно сужается, формируя выходной канал для истечения материала. Регулировка размера выходного потока обеспечивается узлом изменения зазора, который состоит из двух уголков, закрепленных в сужающейся части цилиндра. Уголки стянуты парными винтами, что позволяет плавно изменять величину выходного зазора в диапазоне от 1 до 15 мм при длине щели 160 мм. Для надежной фиксации в рабочем положении цилиндр с помощью хомута крепится к вертикальной стойке, установленной на массивной подставке.

Данное устройство предназначено для обеспечения стабильной и дозированной подачи сыпучего материала непосредственно в зону гранулирования роторного гранулятора с плоской матрицей. Устройство позволяет предотвратить

«зависание» и образование «пробок» материала в загрузочном бункере и улучшить стабильность подачи смеси. Регулируемый зазор позволяет контролировать количество загружаемого материала и интенсивность подачи в зону прессования. За счет равномерности подачи материала без разрыва сплошности потока обеспечивается стабильность формирования гранул.

2.2 Описание экспериментальных установок и методик определения деформационно-прочностных характеристик прессовок при компрессионных испытаниях

Компрессионные испытания для анализа деформационно-прочностных характеристик прессовок проводили в специализированной закрытой пресс-форме (рисунок 12) с использованием гидравлического пресса ПГПР (рисунок 13).

Компрессионные испытания в закрытой матрице позволяют экспериментально определять плотность ρ и прочность σ получаемых прессовок в зависимости от свойств смеси и удельного давления прессования [50].



Рисунок 12 – Комплектующие пресс-формы: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – поддон

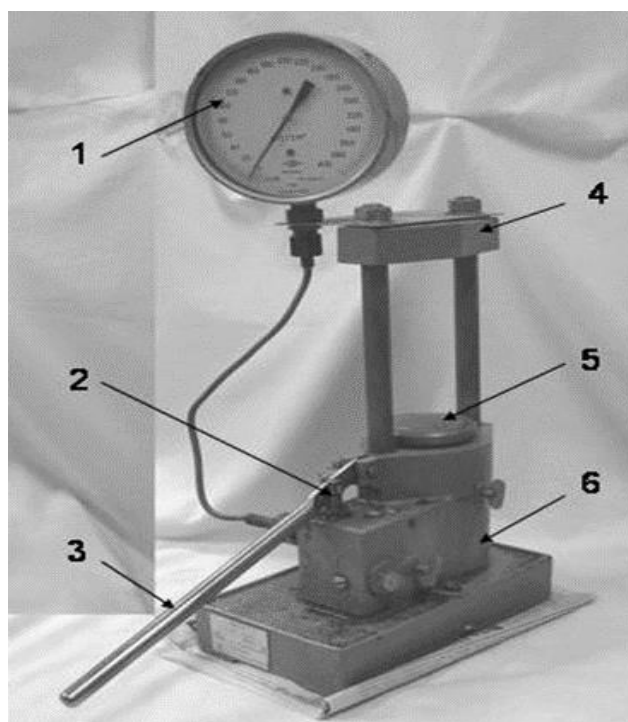


Рисунок 13 – Гидравлический пресс ППР: 1 – измерительный манометр; 2 – поршень малого диаметра; 3 – управляющий рычаг; 4 – верхняя плита; 5 – основной поршень; 6 – опорная станина

У полученных прессовок определяли плотность и предел прочности на раскалывание. Плотность вычисляли по стандартной формуле как отношение массы прессовки к ее объему, измеренному геометрическим методом. Прочностные характеристики и параметры предельно напряжённого состояния определяли на приборах «Измеритель прочности таблеток и гранул YD-II» и «Измеритель прочности гранул ИПГ-1М», изображённых на рисунках 14 и 15 соответственно.

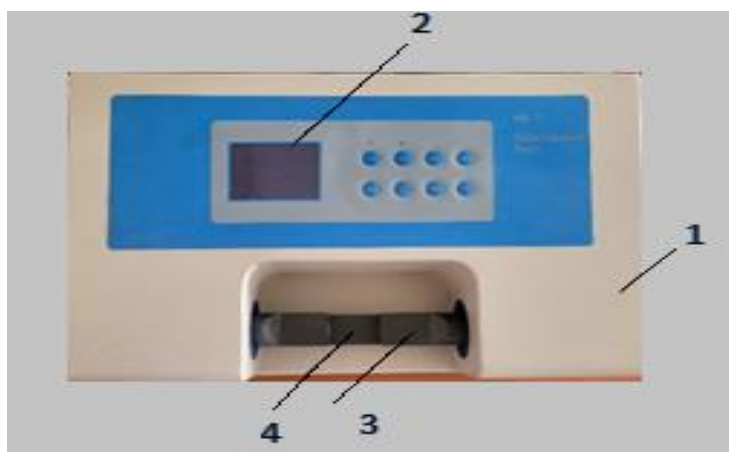


Рисунок 14 – Тестер твердости таблеток и гранул YD-II: 1 – корпус; 2 – цифровой датчик; 3 – подвижный шуп; 4 – площадка для установки таблетки

Данные параметры характеризует способность гранул выдерживать ударные и сдвиговые нагрузки при транспортировке и погрузке.

Тестер твердости YD-II предназначен для определения прочности таблеток и гранул различной геометрической формы. Он состоит из корпуса, цифрового датчика, на котором отображается величина усилия, пружины, подвижного щупа и площадки для установки таблетки. Принцип действия прибора: таблетка помещается на площадку торцевой поверхностью к щупу, после чего подаётся усилие на сжатие таблетки, цифровое значение которого отображается на индикаторе. Конечное значение измерения фиксируется при разрушении таблетки.



Рисунок 15 – Лабораторный анализатор механической прочности гранул ИПГ-1М: 1 – опорная платформа; 2 – блок электронного управления; 3 – рабочая камера с матрицей; 4 – силовой узел с пуансонным блоком; 5 – механизм фиксации образца; 6 – пуансон; 7 – направляющий шток; 8 – панель ввода параметров; 9 – выключатель питания; 10 – дисплей контроля прилагаемого усилия (Н); 11 – счетчик циклов испытаний

Использование этих приборов обеспечивает системный подход к анализу свойств материалов. Проведение компрессионных испытаний для определения плотности и прочности прессовок позволяет прогнозировать деформационно-прочностное поведение материала в процессе прессования.

Специализированный лабораторный анализатор ИПГ-1М представляет собой

установку периодического действия, предназначенную для точного измерения разрушающего усилия отдельных гранул и оценки статической прочности гранулированных продуктов.

Принцип действия прибора основан на измерении величины минимальной силы, при которой происходит разрушение гранулы в вертикальном направлении при ее сжатии между двумя параллельными плоскостями. Прибор представляет собой устройство, которое измеряет и фиксирует на индикаторе «Усилие Н» величину силы, воздействующей на гранулу в момент начала ее разрушения.

На основе полученных данных построена компрессионная кривая – графическая зависимость плотности и прочности прессовки от приложенного давления. Эта кривая позволяет определить минимальное давление для получения плотно-прочной прессовки, а также давление, необходимое для достижения заданных характеристик продукта.

2.3 Описание установки для исследования процесса проходного прессования и определения коэффициента бокового давления

Для определения коэффициентов бокового давления и проведения исследования процесса проходного прессования с термонагревом использовалась установка, изображенная на рисунке 16. Коэффициент бокового давления ξ является важной характеристикой для расчета силовых параметров процесса прессования [92]. Его определяют экспериментально при прессовании смесей в закрытой матрице.

Конструкция установки включает цилиндрическую матрицу с верхним и нижним пуансонами. В пространство между пуансонами загружается исследуемая смесь. На поверхности матрицы, в зоне расположения смеси, закреплены тензорезисторы, регистрирующие деформацию её стенок под действием бокового давления.



Рисунок 16 – Общий вид экспериментальной установки для исследования процессов проходного прессования и определения бокового давления: 1 – пуансон, 2 – температурный датчик, 3 – матрица проходного прессования, 4 – нагревательный элемент, 5 – полый цилиндр, 6 – гидравлический пресс ПГПР, 7 – термометр контактный

Определение коэффициента бокового давления (ξ) проводится в следующей последовательности. При прессовании скорость перемещения материала у верхнего пуансона равна скорости движения самого пуансона, а у нижнего пуансона нулю. Таким образом, по высоте образца градиент скорости изменяется от максимума до нуля.

Вследствие разности осевых и радиальных деформаций материал при прессовании стремится расширяться в радиальном направлении, оказывая давление на стенки матрицы (боковое давление, P_6). Под действием этого давления и силы трения материала о стенки возникает осевая составляющая силы, стремящаяся сместить матрицу вниз. Это смещение ограничивается и измеряется с помощью упругого элемента. По величине его деформации и известной жёсткости определяется суммарная осевая сила, действующая на матрицу со стороны материала. Таким образом, в процессе прессования регистрируются две ключевые величины: осевое давление (P), создаваемое пуансоном, и боковое давление (P_6), рассчитываемое по реакции упругого элемента и геометрии матрицы.

При этом расчетная величина ξ определяется по зависимости:

$$\xi = \frac{P_6}{P}, \quad (21)$$

где P_6 – радиальное давление действующее со стороны смеси на боковую поверхность матрицы;

P – осевое давление прессования.

Из литературы известно, что увеличение давления не только приводит к возрастанию бокового давления на стенки матрицы, но и ухудшает эксплуатационные характеристики пресс - инструмента [92].

На этой установке проводились исследования воздействия нагрева на свойства материала в канале проходного прессования. Для этого установка снабжена терморегулируемым матричным блоком (диапазон температуры 20-200°C).

Анализ научных публикаций показал, что отсутствуют данные по геометрии конических каналов. Для восполнения этого пробела были сконструированы и изготовлены матрицы с коническими каналами (1, 2, 3, 4) градуса и пуансоны соответствующей геометрии.

Эксперимент проводился по следующей схеме: формирующая камера устанавливалась в нагревательный элемент. После достижения заданной температуры в неё загружался материал, после чего начиналось прессование с дозированной подачей, имитирующей движение вала в роторном прессе. По завершении формирования гранул заданного объёма температура изменялась, и эксперимент повторялся для нового режима. В ходе испытаний регистрировалось давление прессования. На заключительном этапе измерялись плотность и прочность полученных гранул.

Таким образом данная установка позволяет воспроизвести процесс одностороннего сжатия материала в канале и непосредственно измерить возникающий при этом коэффициент бокового давления (ξ). Интегрированная система термонагрева даёт возможность исследовать совместное влияние температуры и давления на формирование гранул, имитируя реальные

производственные условия. Установка позволяет выявить взаимосвязи между технологическими параметрами (давление, температура, геометрия канала) и конечными свойствами продукта (прочность, плотность) в контролируемых лабораторных условиях.

2.4 Лабораторная установка и методика проведения исследования по определению теплофизических свойств гранулированного биотоплива

Важной характеристикой получаемого гранулированного биотоплива на основе отходов является его теплотворная способность и особенности процесса горения многокомпонентных гранул на основе древесных и растительных отходов. Для определения теплотворной способности топливных гранул использовался калориметр модели АБК-1В (рисунок 17). В процессе исследования определялась удельная теплота сгорания и время сжигания топливных гранул. Калориметр снабжен компьютером, что позволяет контролировать процесс определения удельной теплоты сгорания и наблюдать динамику процесса. Используемое программное обеспечение позволяет архивировать все экспериментальные данные. Количество выделяющейся при горении энергии прямо пропорционально произведению удельной теплоты сгорания вещества на его массу. Для проведения измерений теплотворной способности съемный цилиндрический сосуд предварительно заполняется дистиллированной водой и точно взвешивается на электронных весах с автоматической передачей данных в компьютер. Далее этот сосуд помещается в калориметр с двухслойной коаксиальной теплоизоляционной системой, создающей воздушную прослойку между цилиндрическими оболочками для минимизации теплопотерь в окружающую среду, что обеспечивает точность измерений с погрешностью менее 1% и позволяет достоверно определять энергетические характеристики исследуемых образцов с учетом теплоемкости самого измерительного сосуда. Удельная теплота сгорания определяется во время сжигания образца в калориметрической бомбе, заполненной сжатым кислородом.



Рисунок 17 – Внешний вид калориметра сгорания бомбового АБК-1В: 1 – калориметрическая бомба; 2 – калориметрический сосуд; 3 – откидная крышка; 4 – контакты цепи зажигания и термометр

На следующей стадии калориметрическая бомба с исследуемым материалом помещается в сосуд, и калориметр закрывается крышкой, оснащенной контактами для зажигания и термометром. В ходе процесса сгорания температура сосуда повышается. Внутренняя оболочка также укомплектована термометром высокой чувствительности, который позволяет измерять температуру с точностью до $0,00001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Программное обеспечение осуществляет расчёт увеличения температуры в калориметрическом сосуде с учётом корректировки на теплообмен с его оболочкой. Когда происходит сгорание топливной пробы, температура воды в калориметрическом сосуде увеличивается, фиксируясь термометром сопротивления с высокой точностью. Таким образом, контролируется температура поверхности оболочки, через которую совершается теплообмен.

Программное обеспечение позволяет выполнять последующие корректировки результатов измерений удельной энергии сгорания топлива. При этом учитывается энергия образования и растворения серной и/или азотной кислот, а также рассчитывается низшая теплота сгорания в соответствии с установленными стандартами.

Калориметр АБК-1В классифицируется как устройство изопериболического типа, где изменение температуры калориметрической жидкости с учётом корректировки на теплообмен пропорционально количеству выделенной энергии во время сгорания, причём коэффициент пропорциональности определяется заранее, исходя из измеренного энергетического эквивалента.

Энергетический эквивалент калориметра представляет собой теплоемкость системы, включающей воду, калориметрический сосуд и бомбу, и показывает количество теплоты, необходимое для нагрева этой системы на 1 К. Данную величину определяют экспериментально в процессе калибровки прибора: сжигают навеску эталонной бензойной кислоты, удельная теплота сгорания которой составляет 26434,4 кДж/кг. В дальнейшем при исследовании любого образца количество выделившейся теплоты находят как произведение энергетического эквивалента на измеренное повышение температуры, после чего, разделив на массу навески, получают удельную теплоту сгорания исследуемого вещества.

Энергетический эквивалент рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{m_1 Q_{б.к.}}{\Delta T_1}, \quad (22)$$

где m_1 – масса навески бензойной кислоты, г;

$Q_{б.к.}$ – удельная теплота сгорания эталонного образца бензойной кислоты, кДж/г;

ΔT_1 – величина подъёма температуры в опыте с бензойной кислотой, К.

Определение теплоты сгорания образцов для исследуемых материалов рассчитывается по модифицированной формуле:

$$Q_{топлива} = C \frac{\Delta T_2}{m_2} = \frac{m_1 \Delta T_2}{m_2 \Delta T_1} Q_{б.к.}, \quad (23)$$

где $Q_{топлива}$ – удельная теплота сгорания исследуемого топлива, кДж/г;

m_2 – масса навески топлива, г;

ΔT_2 – подъём температуры в опыте с топливом, К» [7].

Этот метод позволяет оценивать калорийность топливных гранул, и соответственно их коммерческую ценность.

2.5 Описание конструкции роторного гранулятора с плоской модернизированной матрицей с каналами переменного сечения и принцип его работы

Гранулятор с плоской матрицей, изображенный на рисунке 3 в первой главе, представляет собой современное оборудование для переработки измельченных отходов агро-лесопромышленного комплекса в высококачественные топливные гранулы и работает следующим образом. Привод мощностью 11 кВт через муфту передает вращение на вал, приводя во вращение матрицу. Над матрицей на кожухе вала роликов установлены два ролика, которые свободно вращаются вокруг своих осей и прижимаются к матрице с усилием, регулируемым с помощью регулировочных болтов. При вращении матрицы ролики, контактирующие с ее поверхностью, под действием сил трения вращаются вокруг своих осей, перемещаясь относительно матрицы. В загрузочный бункер непрерывно подается подготовленная МПС, материал попадает в зазор между плоской матрицей и роликом, а затем роликом закатывается в каналы. Давление, необходимое для гранулирования, создается за счет регулируемого прижатия роликов к матрице и геометрии каналов переменного сечения, обеспечивающей последовательное нарастание сопротивления материала сжатию по мере его продвижения. При прокатывании ролика по поверхности материал в каналах подвергается силовому воздействию, в результате которого частицы сырья сближаются, удаляется воздух, и за счет активации природного связующего (лигнина) происходит образование цилиндрической гранулы (пеллеты). Конструкция каналов переменного сечения выполнена в соответствии с патентом РФ № 2527998 [57]. Благодаря последовательному расположению зон: первоначального уплотнения (цилиндрический участок), основного сжатия (конический сужающийся участок), калибровки (цилиндрический участок) и релаксации (конический расширяющийся участок), обеспечивается управляемое нарастание и снижение давления по длине канала. Это позволяет снизить энергозатраты и исключить хрупкое разрушение

гранул при выходе из матрицы. Пеллеты после выхода из каналов попадают на коническую вставку, которая направляет их в бункер выгрузки, а затем подаются на упаковку.

Установка обеспечивает производство пеллет с высокой плотностью и теплотворной способностью, соответствующих международным стандартам качества.

Преимуществом установки является применение специализированного дозирующего устройства с регулируемым зазором 1-15 мм, которое обеспечивает стабильную и контролируемую подачу сырья непосредственно в зону гранулирования. Данное решение устраняет ключевые недостатки традиционных бункерных систем: образование пробок в каналах и налипание излишков материала в матрице.

Рабочий узел с плоскоматричной системой включает перфорированную матрицу и пару профилированных валцов прессующего типа, изготовленных из легированной стали. Использование специализированных стальных сплавов повышает износостойкость рабочих органов по сравнению со стандартными материалами.

В отличие от конструкций с неподвижной матрицей и вращающимися роликами [57], в данной установке вращается матрица, а ролики не имеют собственного привода и вращаются под действием сил трения, что упрощает конструкцию и обеспечивает более равномерное распределение нагрузки. Использование специализированных стальных сплавов повышает износостойкость рабочих органов по сравнению со стандартными материалами.

Технологический процесс гранулирования осуществляется с помощью электродвигателя мощностью 11 кВт. В ходе обработки материала происходит нагрев рабочей пары «матрица-ролик» до температуры 60-80°C за счет трения сырья о стенки каналов и деформации в зоне сжатия. Такой температурный режим способствует активации природного связующего – лигнина, содержащегося в растительном сырье, что обеспечивает формирование прочных гранул без применения дополнительных связующих компонентов.

Для стабильного качества гранул и минимизации энергозатрат сырьё должно иметь влажность 12–18% и размер частиц около 1 мм в диаметре. Это, в сочетании с дозатором с регулируемым зазором, оптимизирует гранулообразование.

Выводы по главе 2

1. Предложены методики и рассмотрены лабораторные установки для комплексной оценки реологических свойств материалов на основе древесных и растительных отходов: пластической прочности и сыпучести.

2. Представлены экспериментальные установки и методические подходы, разработанные для проведения компрессионных испытаний и анализа деформационно-прочностных характеристик гранул.

3. Создана установка для проведения процесса проходного прессования с применением тепловой пластификации, а также для определения коэффициента бокового давления.

4. Представлена лабораторная установка и методика для проведения исследований по определению теплофизических характеристик гранулированного биотоплива.

5. Приведена конструкция и принцип работы опытно-промышленного роторного гранулятора с плоской вращающейся матрицей с каналами переменного сечения. Показана необходимость модернизации геометрических характеристик каналов матрицы с учетом свойств МПС.

Глава 3. Теоретическо-экспериментальное исследование процесса гранулирования МПС в роторном грануляторе с плоской матрицей с математическим описанием процессов, протекающих в каналах переменного сечения

В разделе рассмотрено напряжённо-деформационное состояние материала в зоне пластической деформации. Также проанализирована динамика изменения давления в процессе движения гранулируемой смеси по каналу с переменным сечением в матрице. Разработано математическое описание процесса уплотнения МПС, протекающего в канале матрицы с учётом воздействия прокатывающего ролика на формуемую массу.

3.1 Расчетно-аналитическое исследование напряженного состояния в рабочей зоне плоскоматричного роторного пресса.

Формующие каналы в матрицах могут выполняться как цилиндрическими, так и цилиндроконические. Различные типы прессующих каналов показаны на рисунке 18.

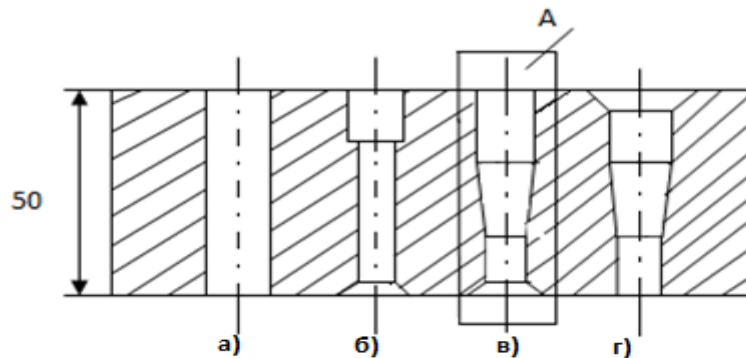


Рисунок 18 – Типы прессующих каналов матрицы роторного гранулятора

Предпочтительнее является канал проходного прессования с конической частью (рисунок 19). Наибольшая эффективность работы гранулятора достигается за счет использования двух или трех прижимных роликов, которые перемещаются

по перфорированной поверхности матрицы. В процессе их движения осуществляется поэтапное вдавливание сырьевой массы в каналы матрицы отдельными порциями. Постепенное продвижение материала вдоль канала приводит к его постепенному уплотнению, в результате чего формируется прочная структура гранулы.

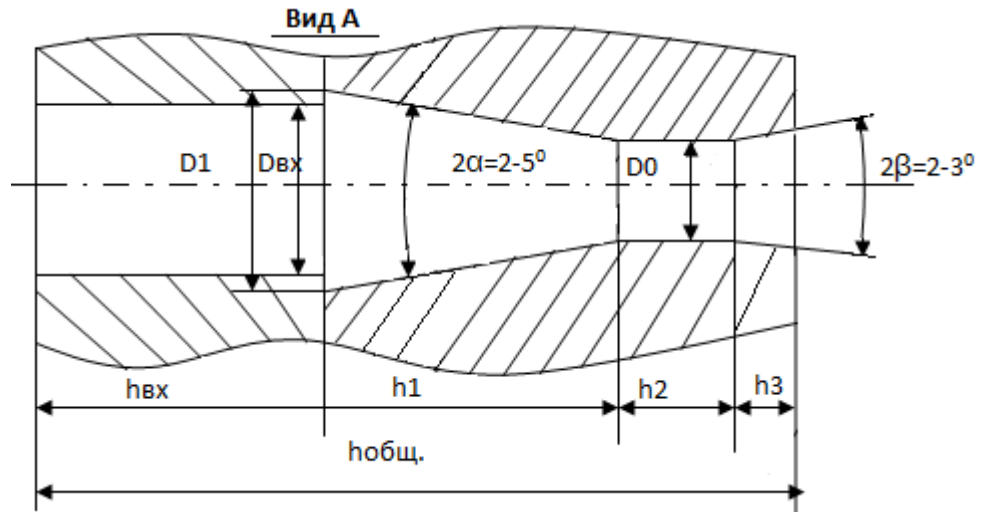


Рисунок 19 – А-профиль канала проходного прессования

В конической (сужающейся) части канала матрицы длиной h_1 возникает значительное встречное давление материала за счёт плавного уменьшения проходного сечения. Конструктивной особенностью является минимальный угол конусности (1-2 град), который способствует формированию необходимого сопротивления движению гранулируемой массы. Высота конуса h_1 определяется как $(1,5 - 2,5) D_0$, где D_0 – диаметр калиброванного участка. На длине участка h_2 происходит окончательное формирование размеров поперечного сечения изделия. Это цилиндр, у которого соотношение высоты к диаметру (h_2/D_0) варьируется от 0,5 до 0,8. Дополнительный участок с расширением длиной h_3 способствует устранению упругих деформаций. Это снижает вероятность возникновения трещин как на внешней поверхности, так и внутри гранул в момент их выхода из прессующего оборудования. Этот участок матрицы выполнен как расширяющийся конус с полным углом раскрытия от 2 до 3 градусов и имеет длину $h_3 = (0,4 - 0,6) D_0$.

Общая длина формующего канала матрицы h равна сумме $h_{вх}$, h_1 , h_2 и h_3 и составляет $(2,5 - 4,0) D_0$. Для большинства многокомпонентных полидисперсных смесей отношение D_0/D_1 варьируется от 0,85 до 0,95. В процессе уплотнения каждой порции смеси из-за внешнего трения плотность распределяется неравномерно по высоте и поперечному сечению отдельных запрессовок. Однако при небольшом количестве материала и малой высоте $H_{п}$ отдельной прессовки по сравнению с диаметром калибровочного канала D_0 , неравномерность плотности минимальна. При соотношении $H_{п}/D_0 = 0,20 - 0,25$ неравномерность плотности не превышает 1 - 2%. В связи с этим рекомендуются пресс-формы с полным углом раскрытия в зоне с длиной h_1 от 1 до 3 градусов [49, 50, 55].

Воздействие вала на материал вызывает его уплотнение, что приводит к росту внутренних напряжений. Эти напряжения возникают под воздействием двух видов сил: горизонтальных, возникающих в результате давления вала на материал при его движении, и вертикальных, связанных с силой прижима и весом самого вала.

Процесс гранулирования в роторных установках реализуется через четкую последовательность фаз: начальный захват сыпучей среды и её предварительное уплотнение, пластическое деформирование, движение через каналы матрицы и выход сформированных гранул.

Исследование поля напряжений в зоне контакта ролика с матрицей в изотермическом режиме рассмотрим, как двумерную деформационную задачу.

На рисунке 20 изображен контрольный объем материала ABCD, ограниченный поверхностями рабочих органов, где он испытывает силовое воздействие вала.

Очаг деформации – это область материала, ограниченная криволинейным клином ABC между рабочими поверхностями вала и матрицы. В пределах данного объема на материал оказывается механическое воздействие со стороны формующего вала, приводящее к деформации материала.

В пределах участка, определяемого углом захвата α , наблюдается комплексное воздействие на гранулируемую массу, включающее как формование, так и

объемное уплотнение.

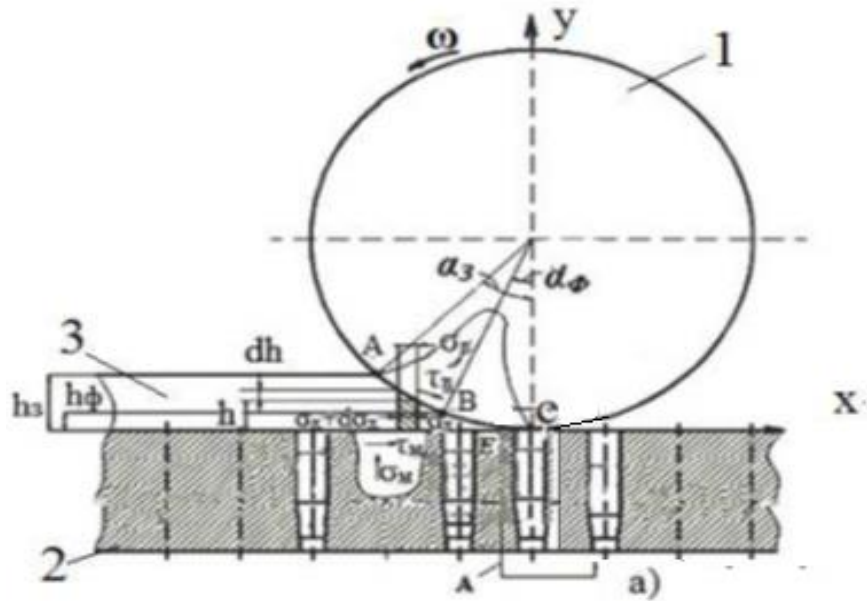


Рисунок 20 – Кинематическая схема силового взаимодействия при гранулировании: 1 - формообразующий ролик; 2 - перфорированная матрица; 3 - слой перерабатываемого материала

Разделение технологических зон осуществляется посредством угла формования α_{ϕ} , характеризующего переходный участок, где одновременно реализуются процессы уплотнения материала и его транспортировка в цилиндрические каналы матрицы. В работе [49] геометрические параметры очага деформации, показанные на рисунке 20, вычисляются по формулам 24 и 25:

$$h_{\phi 3} = 2R \left(\frac{\alpha_{\phi 3}}{2} \right)^2, \quad (24)$$

$$l_{3\phi} = R \cdot \alpha_{\phi 3}, \quad (25)$$

где $h_{\phi 3}$ – высота зоны захвата (формования), мм;

$l_{3\phi}$ – длина контактной дуги между материалом и валком, мм;

R – радиус формующего валка, мм;

$\alpha_{\phi 3}$ – угол захвата (формования), рад.

Для областей формования и уплотнения гранулируемого материала уравнения статического равновесия, описывающие воздействие на дифференциальный элемент dx , выводятся по аналогии с процессами компактирования на валковом прессе [17,49,50]. После выполнения ряда математических операций получаем следующее выражение для поля контактных

напряжений в зоне уплотнения:

$$\sigma_B(\alpha) = B \cdot \operatorname{Sec} \alpha \cdot \exp \left[B \left[\left(\frac{1}{\alpha} + \alpha \right) - \left(\frac{1}{\alpha_\phi} + \alpha_\phi \right) \right] \right], \quad (26)$$

$$B = [3\sigma_{cp}(1 + \sin \varphi) + K \cdot C \cdot \cos \varphi] \cdot \cos \alpha_\phi, \quad B = \xi \cdot f \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \text{при } \alpha_\phi \leq \alpha \leq \alpha_3,$$

$\sigma_B(\alpha)$ – контактное напряжение на поверхности вала, Па;

α – текущий угол, соответствующий длине дуги зоны прессования, рад;

α_ϕ – угол формования, рад;

φ – угол внутреннего трения, рад;

σ_{cp} – среднее нормальное напряжение, Па;

P_M^{\max} – максимальная пластическая прочность, Па;

P_M^{\min} – минимальная пластическая прочность, Па;

$K = P_M^{\max} / P_M^{\min}$ – константа, учитывающая реологическое состояние МПС;

C – сцепление материала, Па;

ξ – коэффициент бокового давления;

f – коэффициент внешнего трения материала о стенку канала матрицы.

Для зоны формования получим зависимость распределения контактных напряжений:

$$\sigma_e(\alpha) = B \cdot \exp \left[B \left(\frac{1}{\alpha_\phi} - \frac{1}{\alpha} \right) \right], \quad (27)$$

$$B = 3\sigma_{cp}(1 + \sin \varphi) + K \cdot C \cdot \cos \varphi; \quad B = 2 \cdot \xi \cdot f \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_\phi$$

Проведенный анализ показал, что уравнения 26 и 27 дают возможность количественно оценить силовые характеристики процесса прессования при известных реологических свойствах перерабатываемого сырья.

При моделировании контактного взаимодействия рабочих органов с перфорированной матрицей требуется учитывать изменение контактного напряжения σ_{cp} от коэффициента перфорации ψ :

$$\sigma_{cp} = f(\psi), \quad (28)$$

где параметр ψ характеризует относительную площадь живого сечения (долю перфорации) от 70% до 40%.

Входящие в математическое описание коэффициенты, а именно f (коэффициент внешнего трения), φ (угол внутреннего трения) и ξ (коэффициент бокового давления), являются реологическими характеристиками, которые определяются экспериментально. Их значения зависят от комплекса физико-химических свойств: гранулометрического состава, формы и шероховатости частиц и влажности.

Особенностью данной работы является рассмотрение нетрадиционного сырья – многокомпонентных смесей на основе древесных и растительных отходов с нестандартным реологическим поведением.

Для описания процесса гранулирования основные реологические коэффициенты устанавливаются экспериментально, что обеспечивает достоверность описания процесса гранулирования.

3.2 Математическое описание процесса гранулирования МПС на основе вторичных материальных ресурсов в канале переменного сечения роторного гранулятора

При транспортировке материала через каналы матрицы формируются макроструктуры в виде цилиндрических гранул. В ходе этого процесса может возникнуть «прилипание к стенкам», что отражается на динамике перемещения материала [56]. Этот эффект связан с релаксацией напряжений, возникших при движении гранулированной массы через канал. «Мелкие» частицы, в этом случае, стремятся к поверхности трения, где наблюдаются наибольшие касательные напряжения. С повышением нормального давления и скорости скольжения интенсивность формирования пристенного жидкого слоя возрастает.

Процесс движения материала начинается только тогда, когда осевая сила становится больше общего трения. Ролик работает циклически, и после выхода из контакта с каналом осевое давление стремительно падает до нуля. При этом предполагается, что канал обладает абсолютной жесткостью.

Угол при вершине конуса, обозначаемый как 2α , играет главную роль в данном процессе. От него зачастую зависит способность материала проходить через канал. Увеличение угла может привести к закупорке, препятствующей движению материала. Корректировка реологических свойств смеси (пластическая прочность, сыпучесть) и изменение угла конуса 2α могут быть эффективными методами решения этой проблемы.

Рассмотрим модель движения материала через цилиндриконический канал, основанную на следующих допущениях: 1) в цилиндрической части канала наблюдается снижение давления из-за трения, величина которого зависит от коэффициента внешнего трения f и уровня бокового давления; 2) конический канал разбивается на n расчётных элементов (шагов) равной длины; 3) условия равновесия для каждого расчётного объёма формулируются в виде системы уравнений, которая решается численно кусочно-аналитическим методом.

Анализ давления вдоль канала сосредоточен на равновесии материала в различных частях цилиндриконического канала. Канал длиной $h_{\text{общ}}$ разделен на участки: $h_{\text{вх}}$, h_1 , h_2 и h_3 , где P_0 , P_1 , P_2 , P_3 и P_4 обозначают давления на входе и выходе с каждого участка соответственно; P – давление на слой исходной смеси; T – сила трения; P_6 – боковое давление; 2α и 2β – углы у вершин конусов; $D_{\text{вх}}$ – диаметр канала на входе [49].

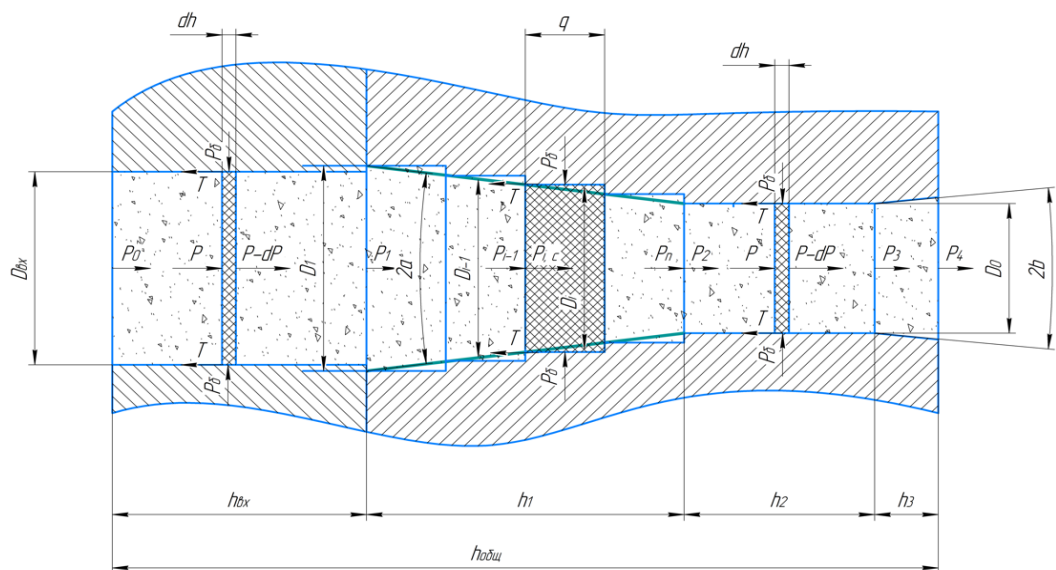


Рисунок 21 – Схема сил, действующих на материал в канале проходного прессования

Уравнения силы трения и давления на боковую поверхность записываем в виде:

$$dT = -\pi \cdot d \cdot P \cdot f \cdot \xi \cdot dl, \quad (29)$$

$$P_{\xi} = P \cdot \xi, \quad (30)$$

где dT – сила трения, действующая на боковую поверхность элемента канала, Н;

P – осевое давление в рассматриваемом сечении, Па;

P_{ξ} – боковое давление на стенку канала, Па;

ξ – коэффициент бокового давления;

f – коэффициент внешнего трения;

d – текущий диаметр расчётного элемента, м;

dl – длина (толщина) данного расчётного элемента, м [81].

В уравнении 29 знак «минус» отражает факт того, что сила трения направлена против движения материала, что приводит к снижению эффективного давления по длине канала. В исследовании [17] этот важный фактор не был учтен, что не позволило получить точные расчеты давления.

В рамках данной модели принято допущение о постоянстве реологических коэффициентов – бокового давления ξ и внешнего трения f для данной технологической системы (материал–матрица) на всём протяжении канала. В ходе вычислений мы определяем угол 2α при вершине конуса на втором участке, что позволяет при известном h_1 определить диаметр D_0 на третьем участке канала, используя следующую формулу:

$$D_0 = D_{\text{вх}} - 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot h_1 \quad (31)$$

где D_0 – диаметр в начале третьего (цилиндрического) участка канала, мм;

$D_{\text{вх}}$ – входной диаметр второго (конического) участка, мм;

α – половина угла при вершине конуса, рад;

h_1 – длина второго (конического) участка, мм

Рассмотрим силы, которые действуют на материал, находящийся внутри цилиндрического канала длиной $h_{\text{вх}}$. Обратим внимание на отдельный элемент материала, имеющий заданный диаметр $D_{\text{вх}}$ и длину dh . Примем, что положительное направление действующей силы соответствует направлению

удельного давления, которое сжимает элемент материала по ходу его перемещения в канале. Такая ориентация обусловлена принятой моделью рассмотрения, в которой движущийся материал рассматривается как сжимаемая среда. Распределение давления определяется по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}
 P \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{BX}}^2}{4} - T &= (P - dP) \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{BX}}^2}{4}, \\
 -T &= dP \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{BX}}^2}{4}, \\
 -(-\pi \cdot D_{\text{BX}} \cdot P \cdot f \cdot \xi \cdot dh) &= -dP \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{BX}}^2}{4}, \\
 P \cdot f \cdot \xi \cdot dh &= -dP \cdot \frac{D_{\text{BX}}}{4}, \\
 \frac{dP}{P} &= -\frac{4}{D_{\text{BX}}} \cdot f \cdot \xi \cdot dh
 \end{aligned} \tag{32}$$

Выполнив операцию интегрирования, получаем искомую зависимость для участков 1 и 3.

$$\begin{aligned}
 \int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P} &= -\frac{4}{D_{\text{BX}}} \cdot f \cdot \xi \cdot \int_0^{h_{\text{BX}}} dh, \\
 \ln\left(\frac{P_{\text{BX}}}{P_0}\right) &= -\frac{4}{D_{\text{BX}}} \cdot f \cdot \xi \cdot h_{\text{BX}}, \\
 P_1 &= P_0 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_{\text{BX}}} \cdot f \cdot \xi \cdot h_{\text{BX}}\right)
 \end{aligned} \tag{33}$$

Участок длиной h_2 имеет постоянный диаметр D_0 , поэтому давление P_3 рассчитывается по аналогичной формуле:

$$P_3 = P_2 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_0} \cdot f \cdot \xi \cdot h_2\right) \tag{34}$$

Как следует из полученных зависимостей (33 и 34), давления в цилиндрических участках 1 и 3 канала снижаются по экспоненциальному закону.

Конструктивные особенности второго сегмента, представляющего собой правильный усечённый конус, обуславливают особые условия для течения МПС, влияющие на её реологическое поведение. Элементарный объем длиной dh в данной области, даже если он имеет минимально возможный размер, формирует поперечное сечение, которое представляет собой равнобедренную трапецию с

изменяющимся диаметром. Изменение формы сечения вдоль длины канала (dh) подчиняется квадратичной зависимости, что существенно влияет как на удельное давление материала, так и на силу трения, возникающую между материалом и стенками канала. Исследование динамики давления в канале требует решения дифференциального уравнения второго порядка, представляющего значительный научный интерес. Для упрощения вычислений геометрия конического участка представлена ступенчатой комбинированной поверхностью, сочетающей конические и цилиндрические элементы. Поток материала, который движется через канал, можно представить как набор из n цилиндрических дисков с постоянной толщиной и с изменяющимся диаметром. Предполагается, что распределение сил трения и бокового давления на каждом ступенчатом элементе аналогично тому, что наблюдается на первом и третьем участках канала. При этом влияние сопротивления от вертикальных стенок не учитывается, что упрощает общую модель. Из рисунка 21 видно, что коническая часть канала условно делится на 4 секции, причем больший диаметр конического сегмента обозначается как $D_{вх}$ и отличается от D_0 в силу технологических особенностей, возникающих при изготовлении матрицы. В соответствии с применяемым кусочно-аналитическим подходом конический участок длиной h_1 разбивается на n расчётных сегментов равной длины, которая вычисляется по формуле 35:

$$q = \frac{h_1}{n} \quad (35)$$

где q – длина (шаг) конечного элемента, мм;

h_1 – полная длина конического участка канала, мм;

n – количество конечных элементов, на которые разбивается участок h_1 .

С увеличением n – частей участка улучшается точность описания рабочего давления, так как увеличивается количество дисков и диаметр меняется более плавно.

Для определения диаметра на конце конического канала было принято, что диаметр первого диска ($i = 1$) при любом числе делений n равен $D_{вх}$, и тогда

изменение диаметра i -го диска в канале конического сечения определяется по зависимости:

$$D_i = D_{\text{вх}} - 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot q \cdot (i - 1), \quad (36)$$

где i – номер участка, $0 < i \leq n$.

Соответственно, диаметр последнего участка ($i = n$):

$$D_n = D_{\text{вх}} - 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot q \cdot (n - 1) \quad (37)$$

Тогда, диаметр на конце конического канала:

$$D_0 = D_{\text{вх}} - 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot q \cdot n \quad (38)$$

На каждом участке рабочее давление будем рассчитывать аналогично как на цилиндрическом:

$$P_i = P_{i,c} \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_i} \cdot f \cdot \xi \cdot q \cdot i\right) \quad (39)$$

Величина давления на материал изменяется скачкообразно, подчиняясь приведенному математическому выражению:

$$P_{i-1} \cdot \frac{\pi \cdot D_{i-1}^2}{4} = P_{i,c} \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4},$$

$$P_{i,c} = P_{i-1} \cdot \frac{D_{i-1}^2}{D_i^2}, \quad (40)$$

где P_{i-1} и $P_{i,c}$ – давление на конце $i - 1$ и начале i участка соответственно.

Давление на конце конического участка определяется по зависимости:

$$P_2 = P_n \cdot \frac{D_n^2}{D_0^2} \quad (41)$$

где P_n – давление на выходе последнего (n -го) элемента, рассчитанное по формуле 39.

В соответствии с полученными уравнениями, процесс вычисления профиля давления в коническом канале осуществляется поэтапно: начиная с первого сегмента ($i = 1$) и завершая последним ($i = n$). После нахождения давления P_n , можно вычислить P_2 , используя формулу 41.

В конической части длиной h_1 происходит увеличение рабочего давления P из-за сужения канала, однако это увеличение частично компенсируется потерями

давления, связанными с трением материала о стенки, которые могут значительно влиять на процесс. То есть конечное распределение давления (рост или падение) в канале переменного сечения зависит от реологических свойств материала, геометрических размеров канала и качества его внутренней поверхности. На участке длиной h_3 увеличение поперечного сечения вызывает релаксацию внутренних напряжений в материале, что приводит к полному снятию давления ($P_4 \rightarrow 0$) [80].

Выводы по главе 3

1. Уравнения, описывающие распределение контактных напряжений в зонах формования и уплотнения деформационного очага позволяют количественно оценить силовые характеристики процесса гранулирования.

2. Установлены аналитические зависимости для определения сил, возникающих в цилиндрических и конических участках каналов матрицы.

3. Предложено математическое описание процесса в канале переменного сечения, которое показало, что распределение давления имеет сложный нелинейный характер: итоговый профиль давления по длине канала формируется под совместным влиянием геометрии и сил трения.

4. Для точного описания процесса гранулирования МПС ключевые реологические параметры (коэффициенты трения, бокового давления) должны определяться экспериментально, а геометрия канала (углы конусности, длина участков) – подбираться под конкретный материал.

5. Для численного решения задачи определения поля давлений в коническом канале был применен метод последовательных цилиндрических сечений. Это позволяет с заданной точностью избежать решения дифференциальных уравнений второго порядка.

Глава 4. Результаты экспериментального определения реологических свойств гранулируемых МПС и деформационно-прочностных характеристик гранул

В данной главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования, устанавливающие взаимосвязь между реологическими свойствами сырья, параметрами процесса прессования и деформационно-прочностными характеристиками получаемых топливных гранул. На первом этапе исследований определяют базовые реологические свойства многокомпонентных смесей, такие как пластическая прочность и сыпучесть. Далее исследовали процесс уплотнения в двух основных режимах: проходное прессование в канале переменного сечения, моделирующее работу роторного гранулятора с плоской матрицей, и прессование МПС в закрытой матрице. Особое внимание уделено влиянию температуры на реологические свойства материала и определению коэффициента бокового давления. Экспериментальные данные были получены в широком диапазоне изменения удельных давлений, влажности, плотности и прочности получаемых прессовок. На основе многофакторного планирования эксперимента получены уравнения регрессии и номограммы для определения плотности и прочности гранул. Также было экспериментально исследовано распределение давления по длине канала переменного сечения в зависимости от состава топливных композиций. Оценены теплофизические свойства топливных гранул. Проведены комплексные испытания на промышленном роторном грануляторе с плоской матрицей, подтвердившие лабораторные данные.

4.1 Результаты определения пластической прочности и сыпучести

В различных отраслях производства образуются крупнотоннажные отходы, относящиеся к вторичным материальным ресурсам. Несмотря на разное

происхождение, их объединяет ряд общих черт, делающих их ценным сырьем. Прежде всего, это схожий химический состав, характеризующийся высоким содержанием углерода, а также наличием лигнина и целлюлозы. Для данных смесей характерна значительная дисперсность и пористость, что обуславливает их низкую насыпную плотность и высокую удельную поверхность. Доступность, низкая стоимость, а также вытекающие из состава и структуры достаточные теплофизические характеристики позволили рассматривать такие отходы, как пивная дробина, лузга подсолнечника, пирокарбон, древесные опилки, листья в качестве перспективных компонентов для создания композиционных материалов. В таблице 2 приведен состав исследованных смесей с различным соотношением компонентов.

Таблица 2– Компоненты анализируемых топливных пеллет (1-13) [69]

Компоненты смесей, % масс.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Древесные и растительные отходы													
Березовые опилки	34	43	33				31		40	40	40	18	83
Лузга подсолнечника	31			40		42	22						
Листья березовые					40			86					
Промышленные и химические отходы													
Активный ил			23	40									
Пирокарбон		40			40						50		
Лигносульфонат (50% р-р)	13	17		20	20	16		14	4				
Добавки на основе технических лигносульфонатов (50% р-р)			11				16			4	10	10	17
Пищевые и органические отходы													
Пивная дробина	22		33						28	28		36	
Природный органический материал													
Торф верховой						42	31		28	28		36	

Однако детально были изучены только композиции № 1, 2, 5, 6 и 9, полученные на основе опилок, пивной дробины, лузги подсолнечника, пирокарбона, торфа, листьев и связующего лигносульфоната. Остальные составы,

в которые входили активный ил и связующее «Биопан», были исключены из-за качества получаемых гранул. Они обладали небольшой механической прочностью и крошились при хранении и транспортировке. Каждый компонент выбранных смесей выполняет свою функцию: пивная дробина, лузга подсолнечника, торф служат основными горючими компонентами, обеспечивая теплотворную способность. Листья являются дополнительным возобновляемым топливным ресурсом. Пирокарбон регулирует влажность смеси, а лигносульфонат выступает связующим, обеспечивая прочность и целостность гранул.

Для усовершенствования процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей необходимо регулировать ключевые реологические свойства материала на каждой стадии за счет таких процессов, как введение связующего или механическое измельчение. На стадии подготовки смеси критически важны такие параметры, как пластическая прочность и сыпучесть, обеспечивающие равномерную подачу смеси в канал. На стадии уплотнения в очаге деформации ключевую роль играет коэффициент бокового давления, определяющий эффективность прессования. На стадии упругого последействия оцениваются итоговые свойства гранул – их плотность и прочность.

Пластическая прочность представляет собой параметр, отражающий устойчивость структуры гранулированных дисперсных смесей при незначительных скоростях деформации. Согласно теории П.А. Ребиндера, важнейшими механическими свойствами являются прочность, пластичность и вязкость, которые определяют способность материалов противостоять деформациям и разрушительным воздействиям извне. Для оценки пластической прочности используется метод измерения глубины, на которую конус проникает в материал при постоянной нагрузке [97].

Измерение пластической прочности проводили методом пенетрации на приборе S166, описанном в главе 2. На основе данных, представленных на рисунке 22, можно наблюдать чёткую взаимосвязь между уровнем влажности смеси и её пластической прочностью. Анализ результатов исследований с учетом специфики структурообразования изучаемых материалов позволяет глубже понять и

объяснить экстремальный характер зависимости $P_m = f(W)$. Важно подчеркнуть, что пластичность материала определяется не только уровнем влаги, но и типом связи этой влаги с твердой фазой.

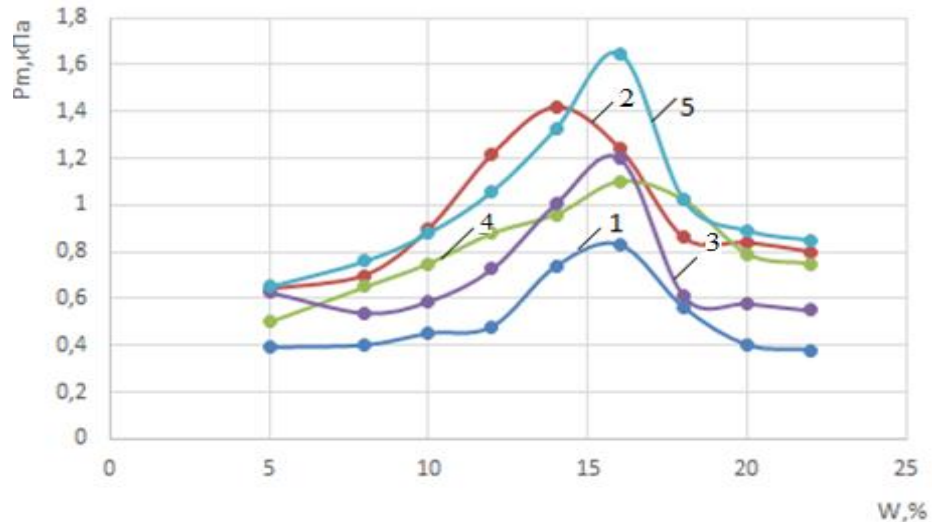


Рисунок 22 – Зависимость изменения пластической прочности P_m , кПа от влажности W , %: Зависимость изменения пластической прочности P_m , кПа от влажности W , %: 1– смесь №1; 2 – смесь №6; 3 – смесь №5; 4 – смесь №2; 5 – смесь №9

При влажности 5-12% происходит равномерная пропитка материала, усиливая образование структурных связей. Параллельно наблюдается возрастание количества структурных элементов, стабилизированных капиллярными силами, что существенно повышает механическую целостность системы. При достижении порогового значения влажности 12% в материале активизируются сложные физико-химические процессы, приводящие к качественному изменению его механических свойств. В этом критическом диапазоне наблюдаются интенсивное образование водородных мостиков между частицами, активация капиллярных эффектов в межфазных границах, формирование устойчивых гидратных оболочек. Оптимум прочности наблюдается при 14-16% влажности. Превышение до 18% снижает прочность из-за избыточной пластификации.

Рекомендуемый диапазон для гранулирования – 12-18%, обеспечивающий баланс пластичности и прочности. Последующие исследования также показали, что изменение пластической прочности тесно связано с температурой: с ее ростом

наблюдается заметное увеличение пластической прочности. Подъем температуры в процессе обработки способствует улучшению механического сцепления между частицами за счет выделения лигнина, что, в свою очередь, активизирует процесс гранулообразования.

Второй важной характеристикой на этапе подготовки является сыпучесть материала, определяющая эффективность его подачи в зону формования. Этот комплексный параметр зависит от следующих факторов: насыпная плотность и коэффициент внутреннего трения, гранулометрический состав, гигроскопичность и критическая влажность связующего. Специализированный загрузочный модуль с щелевым дозатором обеспечивает равномерное распределение материала по рабочей поверхности.

На рисунках 23 и 24 представлены зависимости сыпучести от размеров проходного сечения (величины зазора дозатора) и уровня влажности.

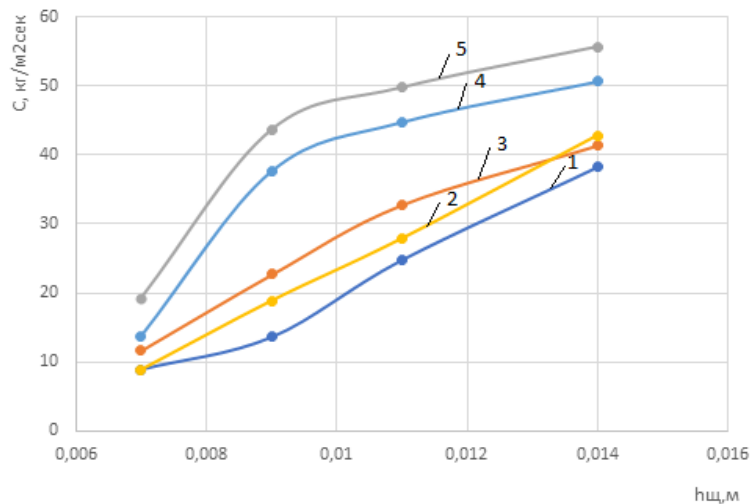


Рисунок 23 – Зависимость сыпучести МПС C , кг/м²сек от величины зазора h , м: 1 – смесь №1; 2 – смесь №2; 3 – смесь №5; 4 – смесь №6; 5 – смесь №9

Для составов №1, 2 и 5 наблюдается четкая линейная зависимость между шириной рабочего зазора и показателем сыпучести. Торфосодержащие смеси № 6 и 9 демонстрируют нелинейную зависимость с экстремумом при 10-12 мм, что обусловлено особыми реологическими свойствами торфа. Торф при добавлении в составы топливных смесей используется как дешевое природное сырье с низкой

теплотворной способностью. При величине зазора меньше 7 мм смесь не просыпается без внешнего воздействия поскольку силы сцепления и трения превосходят силу тяжести.

Для всех смесей при повышении влажности сыпучесть падает. Экспериментальные исследования выявили существенные различия в поведении отобранных рецептур смесей в зависимости от технологических параметров. Повышение влажности с 8% до 18% приводит к 2-3-кратному снижению сыпучести для МПС и зависит от природы связующего компонента.

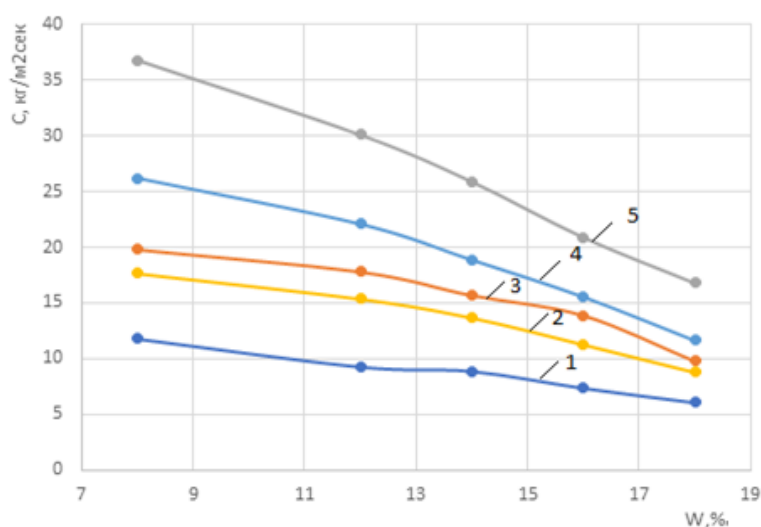


Рисунок 24 – Зависимость сыпучести МПС C , кг/м²сек от влажности W , % при величине зазора 9 мм: 1 – смесь №1; 2 – смесь №6; 3 – смесь №2; 4 – смесь №9; 5 – смесь №5

4.2 Результаты компрессионных испытаний процесса уплотнения МПС в канале переменного сечения (режим проходного прессования) и в закрытой матрице

В данном разделе представлены результаты экспериментального исследования основных параметров процесса прессования многокомпонентных полидисперсных смесей. Изучено влияние термонагрева на реологические свойства материала и прочностные характеристики получаемых гранул. Определены закономерности изменения коэффициента бокового давления в

зависимости от состава смеси и режимов прессования. Методами статистического планирования эксперимента установлены аналитические зависимости плотности и прочности прессовок от удельного давления, влажности и пластической прочности исходных смесей. Полученные уравнения регрессии служат основой для прогнозирования свойств конечного продукта и усовершенствования технологических режимов гранулирования.

4.2.1 Результаты исследования процесса проходного прессования с изменением реологических свойств МПС за счет термического воздействия и определение коэффициента бокового давления

Исследования показали, что термическая обработка значительно влияет на пластификацию многокомпонентных смесей. Нагрев высвобождает смолистые вещества, переводя материал из сыпучего в вязко – пластичное состояние. Это улучшает распределение жидкой фазы между частицами, позволяя получать более прочные гранулы при меньших давлениях прессования. Анализ графиков 25 и 26 демонстрирует, что увеличение температуры приводит к росту прочности гранул.

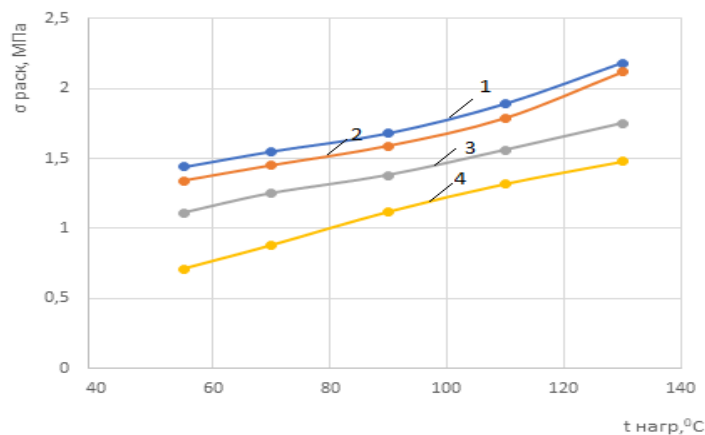


Рисунок 25 – Зависимость изменения предела прочности на раскалывание $\sigma_{\text{раск}}$, МПа ТГ от температуры нагрева $t_{\text{нагр}}$, $^{\circ}\text{C}$ при различной конусности матрицы для смеси №9: 1 – $\alpha=1$ град, 2 – $\alpha=2$ град, 3 – $\alpha=3$ град, 4 – $\alpha=4$ град

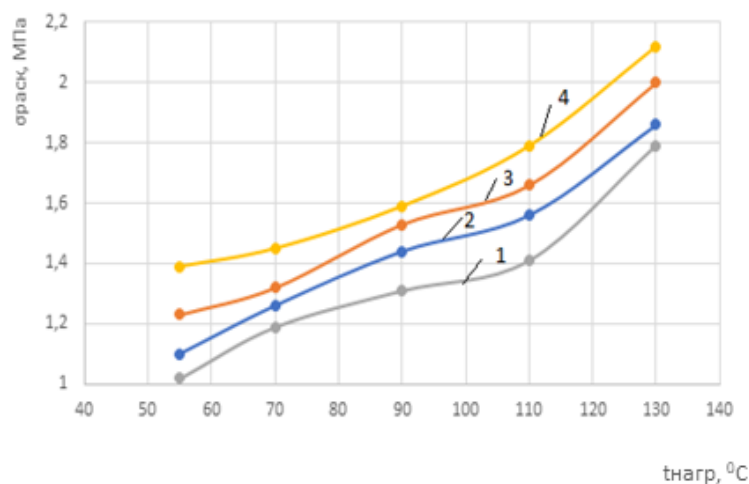


Рисунок 26 – Зависимость изменения предела прочности на раскалывание $\sigma_{раск}$, МПа ТГ от температуры нагрева $t_{нагр}$, °C при конусности угла $\alpha=2$ град : 1 – смесь №1; 2 – смесь №5; 3 – смесь №2; 4 – смесь №9

Контролируемое термовоздействие эффективно совершенствует гранулирование сложных композиционных систем. Установлено, что повышение температуры обусловлено комплексными физико-химическими преобразованиями в гетерогенной структуре МПС, содержащей клетчатку (целлюлозные волокна), лигнинные соединения, низкомолекулярные углеводы, натуральные смолы.

При температурном воздействии происходят последовательные структурные изменения. Сыпучее состояние (меньше 55°C) – характерно для сухих дисперсных систем, сыпуче-пластичное состояние (55-110°C) – частичная потеря сыпучести, условно-пластичное состояние (выше 110°C) – образование связной структуры.

Процесс проходного прессования с термонагревом изучался на специализированной установке, которая приведена во второй главе работы.

На рисунке 25 видно, что прочность гранул на раскалывание растёт с увеличением температуры для всех конусностей матрицы, но максимальные значения достигаются при угле 1-2 градуса. Меньший угол обеспечивает более плавное и длительное уплотнение, благодаря чему сырьё лучше прогревается, лигнин эффективнее переходит в вязкое состояние, а воздух успеваает полностью выйти. Это позволяет создать монолитную структуру без внутренних напряжений. С увеличением угла конусности уплотнение становится более резким и неравномерным, что приводит к образованию внутренних пустот и снижению

прочности. Таким образом, сочетание высокой температуры и минимальной конусности матрицы даёт наиболее прочные гранулы.

При расчёте силовых параметров при прокатке на роторном грануляторе через канал переменного сечения использовали полученные экспериментально на установке, приведенной в главе 2, значения коэффициентов бокового давления ζ .

Далее на рисунке 27 приведены графические зависимости коэффициента бокового давления от удельного давления прессования для смесей № 1, 2, 5, 6, 9.

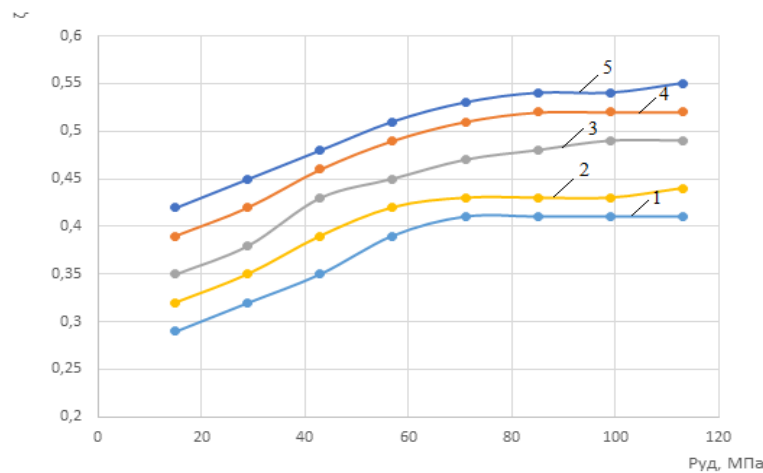


Рисунок 27 – Зависимость изменения коэффициента бокового давления ζ от удельного давления прессования Руд, МПа: 1 – смесь №9; 2 – смесь №2; 3 – смесь №5; 4 – смесь №6; 5 – смесь №1

Как видно из графиков, наблюдается устойчивая взаимосвязь между приложенным давлением и коэффициентом бокового давления ζ .

Для всех исследованных композиций характерен монотонный рост ζ при увеличении давления прессования. Коэффициент ξ определяли непосредственно в канале проходного прессования матрицы, поскольку данная методика адекватно моделирует процесс прессования в роторном грануляторе с плоской матрицей. С ростом давления прессования коэффициент ξ увеличивается от 0,3 до 0,56, а после 70 МПа его рост прекращается из-за достижения материалом максимальной плотности.

Наибольшие значения ξ наблюдаются у смесей с пониженной пластической прочностью, так как меньшее внутреннее сцепление таких материалов приводит к повышенному давлению на стенки матрицы.

Полученные экспериментальные зависимости используются при проектировании роторных грануляторов, определении диапазона режимов прессования, расчёте усилий прессования для топливных гранул и модернизации геометрии рабочих элементов оборудования.

4.2.2 Результаты исследования в закрытой матрице с использованием методов многофакторного эксперимента

Эксперименты по прессованию в закрытой матрице показали, что формирование плотно-прочных прессовок происходит при удельном давлении от 20–70 МПа. В этом диапазоне происходит интенсивная переориентация и взаимное сцепление частиц, обеспечивающее необходимые структурно-механические свойства. Дальнейшее увеличение давления не приводит к существенному росту плотности, что свидетельствует о достижении структурного предела уплотнения материала. На рисунке 28 представлена зависимость плотности прессовок от давления при влажности 8-15%.

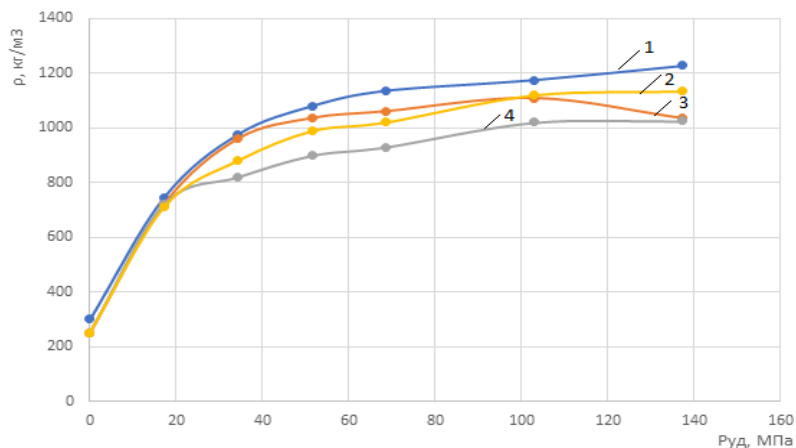


Рисунок 28 – Зависимость плотности ТГ ρ , кг/м³ от удельного давления прессования $P_{уд}$, МПа при исходной влажности МПС: 1 – смесь 9 - $W_{исх.} = 14,9\%$; 2 – смесь 12 - $W_{исх.} = 12,4\%$; 3 – смесь 10 - $W_{исх.} = 11,1\%$; 4 – смесь 11 - $W_{исх.} = 8,7\%$.

График 29 иллюстрирует зависимость прочности гранул из смеси №1 от удельного давления и влажности. Прочность увеличивается в пределах от 0,05 до

0,25 МПа, достигая максимума при пластической прочности материала $P_m = 0,8$ кПа и влажности смеси $W = 16\%$.

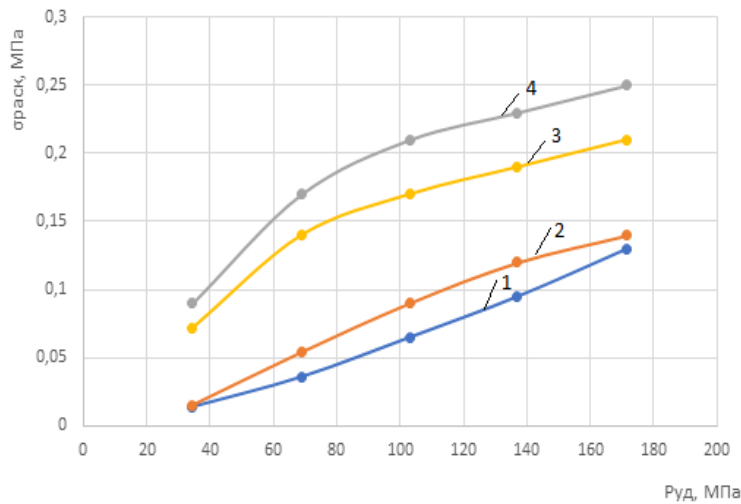


Рисунок 29 – Зависимость изменения прочности на раскалывание ТГ $\sigma_{раск}$, МПа от удельного давления прессования $P_{уд}$, МПа при различных композициях смеси №1: 1 – при $P_m=0,4$ кПа, $W=9\%$; 2 – при $P_m=0,5$ кПа, $W=11\%$; 3 – при $P_m=0,6$ кПа, $W=18\%$; 4 – при $P_m=0,8$ кПа, $W=16\%$.

Исследование реологических характеристик смеси №2 выполняли с использованием методов статистического планирования эксперимента, что обеспечило системный подход к анализу влияния различных факторов. Исследуемая система – это сложная многокомпонентная смесь, включающая пирокарбон – 40% масс., березовые опилки – 43% масс. и лигносульфонат в качестве связующего – 17% масс.

В целях систематического изучения влияния режимных параметров на свойства готовой продукции был проведен комплексный анализ компрессионных зависимостей, которые представлены на рисунках 30 и 31.

Основной задачей данного этапа работы было определение функциональных диапазонов изменения плотности и предела прочности на раскалывание образцов в зависимости от варьируемых факторов – давления прессования и исходной влажности материала.

Эксперимент был построен на основе трехуровневого ортогонального плана второго порядка для двух факторов [47]. Детализация условий (таблица 3) и полная

матрица опытов (таблица 4) обеспечивают воспроизводимость и позволяют провести точную количественную оценку вклада каждого параметра в свойства конечного продукта.

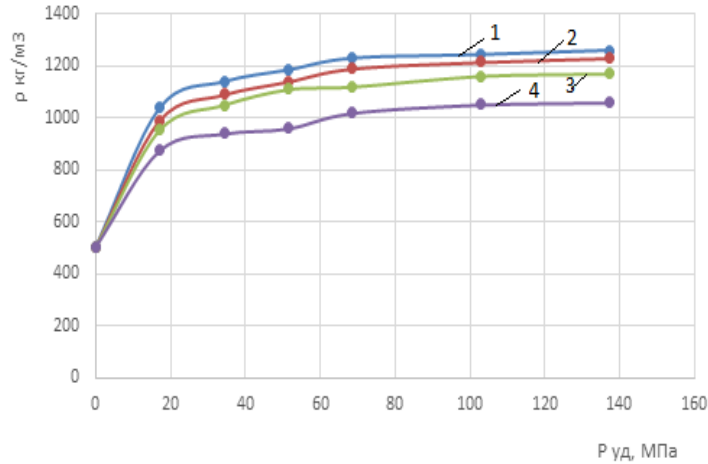


Рисунок 30 – Зависимость плотности ТГ ρ , кг/м³ от удельного давления прессования $P_{уд}$, МПа и исходной влажности W , % смеси №2: 1 – $W_{исх.}=11\%$; 2 – $W_{исх.}=12\%$; 3 – $W_{исх.}=13\%$; 4 – $W_{исх.}=15\%$

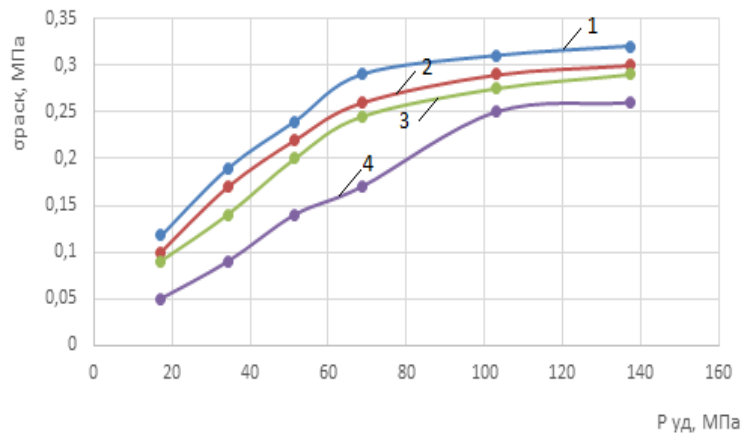


Рисунок 31 – Зависимость изменения прочности на раскалывание ТГ $\sigma_{раск}$ от удельного давления прессования $P_{уд}$, МПа и исходной влажности W , % смеси №2: 1 – $W_{исх.}=11\%$; 2 – $W_{исх.}=12\%$; 3 – $W_{исх.}=13\%$; 4 – $W_{исх.}=15\%$

Связи между кодовым и натуральным выражением факторов для топливных гранул определяли по формулам:

$$X_1 = \frac{w - w_0}{\Delta w} = \frac{w - 13}{2} = 0,5w - 6,5, \quad (42)$$

$$X_2 = \frac{P - P_0}{\Delta P} = \frac{P - 60}{43} = 0,023P - 1,4 \quad (43)$$

Таблица 3 – Граничные и базовые значения факторов эксперимента

Исследуемый параметр	Кодировка	Граничные значения			Шаг изменения Δx_i
		Максимум (+)	Базовый (0)	Минимум (-)	
Влажность W, (%)	X1	15	13	11	2
Давление P, МПа	X2	103	60	17	43

Таблица 4 – Матрица планирования и полученные данные

Номер опыта	Уровни факторов						Опытные данные	
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ '	X ₂ '	ρ кг/м ³	σ , МПа
1	+	-	-	+	+1/3	+1/3	1038	0,118
2	+	-	+	-	+1/3	+1/3	1244	0,307
3	+	+	+	+	+1/3	+1/3	1052	0,25
4	+	+	-	-	+1/3	+1/3	875	0,05
5	+	+	0	0	+1/3	-2/3	1000	0,15
6	+	-	0	0	+1/3	-2/3	1220	0,28
7	+	0	+	0	-2/3	+1/3	1161	0,275
8	+	0	-	0	-2/3	+1/3	953	0,09
9	+	0	0	0	-2/3	-2/3	1100	0,225

где $X_1' = X_1^2 - 2/3$; $X_2' = X_2^2 - 2/3$

Результаты эксперимента показали прямую зависимость плотности прессовок от давления: при $\rho_{\text{нас}} = 500\text{--}800$ кг/м³ и $P = 20\text{--}140$ МПа конечная плотность возрастает до $900\text{--}1300$ кг/м³. Прочность на раскалывание увеличивается в 4 раза за счет увеличения контактной поверхности между частицами и усиления сил межчастичного сцепления, возникающего при пластической деформации (от 0,05 до 0,31 МПа) в диапазоне удельных давлений от 17 МПа до 103 МПа. Области максимальной прочности соответствует $P_{\text{уд}} = 40\text{--}90$ МПа.

Для анализа влияния технологических факторов – удельного давления и влажности – на плотность и прочность прессовок были получены уравнения регрессии второго порядка и построены номограммы, изображенные на рисунке 32. Как видно из них, изолинии постоянной плотности и прочности демонстрируют параболическую зависимость от указанных параметров. Увеличение количества связующего при постоянной плотности и прочности прессовок приводит к росту удельного давления прессования.

Для вычисления плотности прессовок применяется уравнение, которое в общепринятом виде выражается следующим образом:

$$\rho = 1430 - 43,96w + 6,83 - 0,084wP_{уд} + 0,042w^2 - 0,029P_{уд}^2 \quad (44)$$

Уравнение для расчета предела прочности на раскалывание записывается в виде:

$$\sigma = 0,141 + 0,0039w + 0,0042P_{уд} + 3,2 \cdot 10^{-5}wP_{уд} - 0,00104w^2 - 2 \cdot 10^{-5}P_{уд}^2 \quad (45)$$

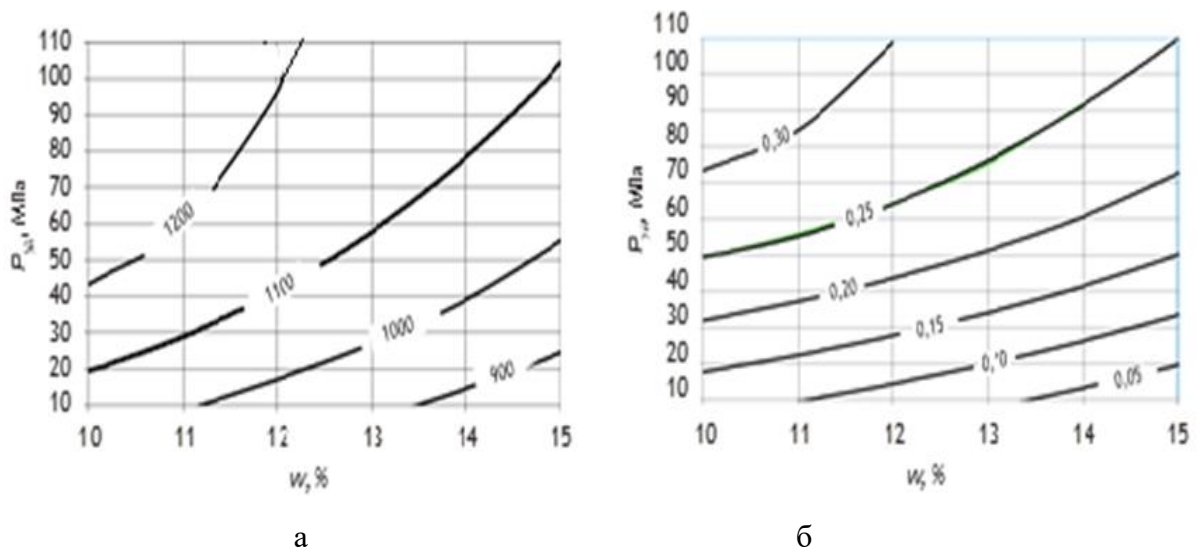


Рисунок 32 – Линии изоуровней для удельного давления прессования $P_{уд}$, МПа и влажности W , % смеси №2: а – в зависимости от плотности ТГ, ρ , кг/м³; б – в зависимости от прочности на раскалывание ТГ, $\sigma_{раск}$, МПа

Для смеси №1 на основе опилок, лузги подсолнечника, пивной дробины и водного раствора лигносульфоната исследовали влияние давления $P_{уд}$ (X_1), пластической прочности P_m (X_2) на качество изделия (параметр оптимизации y). За качественный показатель изделия принимали $\sigma_{раск}$.

В таблице 5 представлены конкретные уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов, которые были выбраны на основе предварительного анализа.

В таблице 6 приведена соответствующая матрица планирования эксперимента, отражающая структуру проведения опытов

Таблица 5 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Код	Уровни			Интервал варьирования Δx_i
		Верхний (+)	Нулевой (0)	Нижний (-)	
$P_{уд}$, МПа	X_1	130	100	70	30
P_m , кг/м ²	X_2	0,58	0,49	0,4	0,09

Таблица 6 – Матрица планирования и результаты опытов

Номер замера, u	Уровни факторов			Данные производства			$Y_{расч.}$
	X_0	X_1	X_2	Y_1	Y_2	$Y_{ср}$	
1	+1	-	-	0,039	0,042	0,04	0,044
2	+1	+	-	0,12	0,10	0,11	0,11
3	+1	-	+	0,17	0,13	0,15	0,15
4	+1	+	+	0,22	0,20	0,21	0,216

Обработка результатов эксперимента позволила вывести уравнение регрессии первой степени (уравнение 46) и построить номограмму (рисунок 33) для расчёта прочности на раскалывание топливных пеллет из смеси №1.

$$\sigma_p = 0,001P_{уд} + 0,59P_m - 0,26 \quad (46)$$

Статистический анализ подтвердил адекватность модели и выявил влияние таких факторов, как давление прессования и пластическая прочность на прочность полученных гранул из многокомпонентных полидисперсных смесей.

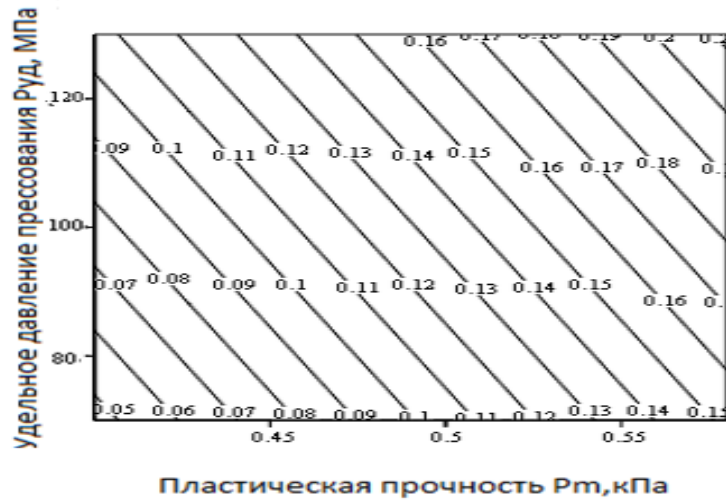


Рисунок 33 – Зависимость прочности на раскалывание ТГ $\sigma_{раск}$, МПа от удельного давления прессования Р_{уд}, МПа и пластической прочности R_м, кПа смеси № 1

Полученная номограмма является практически инструментом, который позволяет определять рациональные параметры гранулирования для достижения заданной прочности без проведения дополнительных экспериментов [47].

4.3 Исследование распределения давления по длине канала переменного сечения при гранулировании топливных композиций различного состава

Для проверки теоретических положений, изложенных в разделе 3.2 главы 3, было выполнено численное моделирование процесса гранулирования. При решении уравнений изменения давления по длине канала использовали язык программирования Python, среда разработки IDE PyCharm [80]. Геометрия канала задавалась следующими параметрами: входной диаметр $D_{вх} = 8$ мм, базовый диаметр $D_0 = 6$ мм, при длинах участков $h_{вх} = 19$ мм, $h_1 = 19,5$ мм, $h_2 = 7,5$ мм, $h_3 = 4$ мм и коэффициенте внешнего трения $f = 0,2$. Исследовались смеси № 1, 2, 5, 6 и 9, сформированные на основе опилок, пивной дробины, лузги подсолнечника, пирокарбона, торфа, листьев и связующего лигносульфоната.

Приняли величины входного давления $P_0 = 20$ и 50 МПа. Выбор величин входного давления ($P_0 = 20$ и 50 МПа) обусловлен ключевыми стадиями

технологического процесса. Так, $P_0 = 20$ соответствует порогу гранулообразования, при котором начинается устойчивое формирование гранул, а $P_0 = 50$ МПа отражает стандартный рабочий режим промышленного оборудования. Сравнение этих двух режимов позволяет проанализировать изменение силовых параметров и потерь на трение от момента начала процесса до стабильного прессования.

Для указанных смесей были экспериментально получены коэффициенты бокового давления: при $P_0 \approx 20$ МПа ($\xi = 0,42; 0,40; 0,37; 0,33; 0,3$) и $P_0 \approx 50$ МПа ($\xi = 0,5; 0,47; 0,45; 0,42; 0,38$). Эпюры распределения давления по длине канала для пяти типов смесей представлены на рисунке 34. Экспериментально установлено, что в диапазоне входного осевого давления от 20 до 50 МПа коэффициент бокового давления ξ монотонно возрастает. Это указывает на опережающий рост бокового давления по сравнению с осевым.

На первом и третьем цилиндрических участках длиной $h_{вх}$ и h_2 давление демонстрирует классический экспоненциальный спад, так как сечение постоянно и энергия потока необратимо расходуется на преодоление сил вязкого трения.

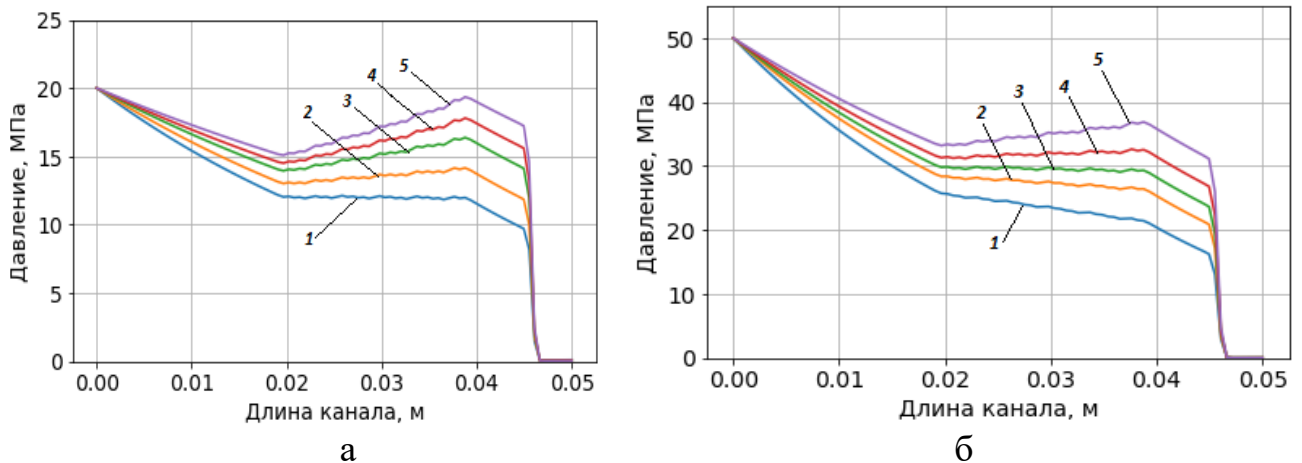


Рисунок 34 – Распределение давлений в канале переменного сечения плоской матрицы роторного гранулятора в зависимости от состава смеси при начальном давлении валка: а – $P = 20$ МПа; б – $P = 50$ МПа; (1 – смесь №9; 2 – смесь № 6; 3 – смесь № 5; 4 – смесь № 2; 5 – смесь № 1)

В коническом участке канала (длина h_1) на давление действуют два противоположно направленных фактора: с одной стороны, сужение сечения

вызывает рост давления за счет уплотнения материала; с другой – силы трения материала о стенки способствуют его снижению. Таким образом, результирующий профиль давления на этом участке определяется балансом этих сил и зависит от реологических свойств смеси, геометрии канала и качества его поверхности.

На выходном цилиндрическом участке (длина h_3) давление резко падает до атмосферного. Это связано с тем, что прессовка, выходя из зоны уплотнения, под действием накопленных упругих деформаций расширяется, увеличивая свои размеры, и давление полностью сбрасывается.

Таким образом, итоговый профиль представляет собой сложную кривую, где плавные экспоненциальные спады на цилиндрических участках прерываются пиком и спадом в конической зоне, завершаясь резким падением до нуля на выходе.

На рисунке 35 представлена эпюра распределения давления вдоль канала для смеси №2, построенная в зависимости от угла конусности. Данная зависимость позволяет определить угол при вершине конуса матрицы, обеспечивающий стабильное течение материала при заданном рабочем давлении и степени пластификации. Установлено, что при больших углах конусности на длине h_1 давление растет и могут образовываться пробки в канале, что приводит к остановке технологического процесса.

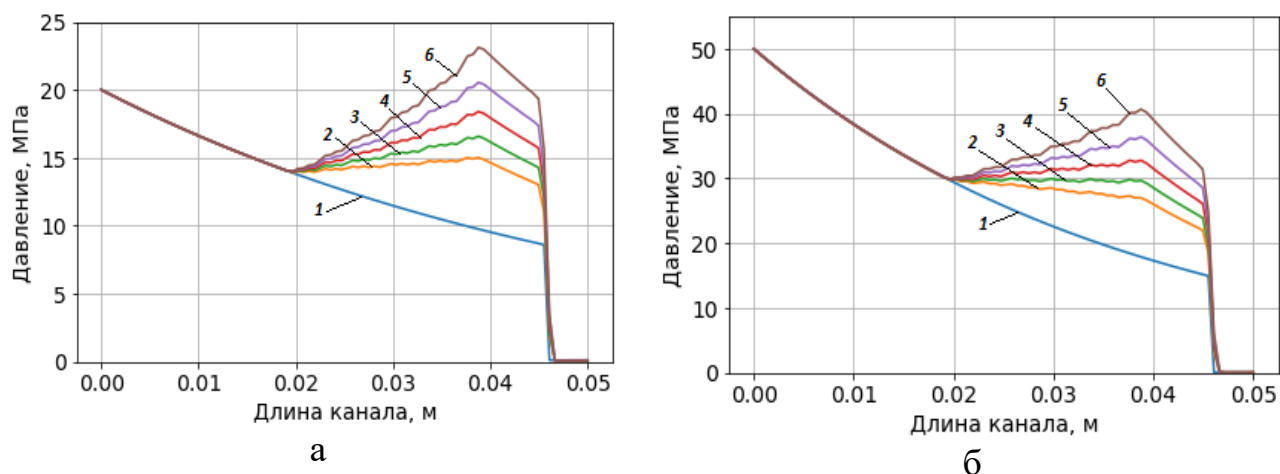


Рисунок 35 – Распределение давлений в канале переменного сечения плоской матрицы роторного гранулятора в зависимости от угла 2α при вершине конуса на втором участке: а – $P = 20$ МПа; б – $P = 50$ МПа; при угле конуса 2α (1 – 0° ; 2 – 5° ; 3 – 6° ; 4 – 7° ; 5 – 8° ; 6 – 9°)

Как видно из графика, при нулевом угле конусности ($2\alpha = 0$) канал становится цилиндрическим, а перепад давления вдоль его длины подчиняется экспоненциальной зависимости. В таких условиях отсутствие конусности приводит к равномерному уменьшению давления по направлению к выходному отверстию [80].

4.4 Результаты определения теплофизических свойств топливных гранул с различной морфологией

В работе были проведены комплексные исследования теплофизических характеристик ТГ (теплотворная способность, зольность) и выявлены особенности процесса горения гранул из МПС.

Анализируемые гранулы представляют собой сложную полидисперсную систему с выраженной неоднородностью состава, структуры и свойств. Основные горючие ингредиенты в таких композициях – пирокарбон, древесные опилки, пивная дробина, лузга подсолнечника и торф.

Однако, как показал проведенный анализ, даже при условии известных точных массовых долей всех компонентов в рецептуре, достоверно рассчитать результирующую теплотворную способность и ожидаемую зольность, используя стандартные методы теплотехнического расчета, на практике оказывается крайне затруднительным. Эта проблема связана, в первую очередь, с тем, что ключевые параметры самих исходных сырьевых отходов растительного происхождения, такие как гранулометрический состав, влажность, плотность, химический состав золы, не являются константами. Они значительно варьируются в широких пределах в зависимости от географического региона заготовки, условий хранения и предварительной обработки. Указанная вариабельность исходного сырья закономерно приводит к существенному статистическому разбросу конечных эксплуатационных свойств готовых топливных гранул, что необходимо учитывать при проектировании котельных установок и режимов их работы.

В таблице 7 приведены составы топливных гранул, их теплотворная способность и зольность.

Таблица 7 – Экспериментальные составы топливных гранул и их энергетические показатели [81].

Компоненты смесей, % масс.	См 1	См 2	См 5	См6 а	См6 б	См6 в	См6 г	См9 а	См9 б	См9 в	См9 г
Древесные и растительные отходы											
Березовые опилки	34	43						36	36	36	36
Лузга подсолнечника	31			15	45	25	65				
Листья березовые			40								
Промышленные и химические отходы											
Пирокарбон		40	40								
Лигносульфонат (50% р-р)	13	17	20	15	15	15	15	8	8	8	8
Пищевые и органические отходы											
Пивная дробина	22							5	15	30	45
Природный органический материал											
Торф верховой				70	40	60	20	51	41	26	11
Теплотворная способность, (кДж/кг)	17780	21356	22135	11077	12086	13097	17489	15300	15435	16249	17920
Зольность гранул Аз, (%масс)	3,5	8,5	9	10	7,5	9	6	9,5	8,5	6,5	4

Зольность определяли стандартным методом путем сжигания навески топлива в муфельной печи с последующим взвешиванием неорганического остатка.

Теплотворную способность (удельную теплоту сгорания) образцов определяли на лабораторном калориметре модели АБК-1В. Принцип действия данного прибора основан на классическом методе сжигания точно отмеренной навески топлива в калориметрической бомбе в среде чистого кислорода с последующим точным замером количества выделившейся теплоты. Весь процесс проведения испытания является полностью автоматизированным и управляется через специализированное программное обеспечение на персональном компьютере. Ключевым фактором, гарантирующим высокую точность и

воспроизводимость измерений, является использование заранее установленного энергетического эквивалента системы. Наивысший энергетический показатель в 22 135 кДж/кг был зафиксирован у композиции на основе технического углерода и березовых листьев.

Таблица 8 – Сравнительный анализ теплотворной способности топливных гранул

Тип гранул	Теплотворная способность, кДж/кг
Гранулы из мономатериалов [112]	
Опилки березовые	17 500 - 19 000
Лузга подсолнечника	19 000 - 20 000
Пивная дробина	12 000 - 14 000
Торф	20 000 - 22 000
Многокомпонентные гранулы (экспериментальные данные)	
Смесь 5	22 135
Смесь 2	21 356
Смесь 9г	17 920
Смесь 6г	17 489
Смесь 1	17 780

Согласно данным таблицы 8, теплотворная способность топливных гранул, полученных из многокомпонентных полидисперсных смесей (МПС), сопоставима с аналогичным показателем для распространённых видов биотоплива. Это свидетельствует о высокой энергетической ценности и эффективности исследуемых многокомпонентных композиций, что подтверждает технико-экономическую перспективность их использования в качестве эффективного и рентабельного альтернативного топлива для современных котлов.

В рамках исследования была изучена зависимость ключевых показателей качества топлива (теплоты сгорания и зольности) от состава многокомпонентных смесей. Теплотворная способность гранул (рисунок 36) возрастает с увеличением доли высококалорийных компонентов – лузги подсолнечника и пивной дробины (кривые 2 и 3). Это объясняется высоким содержанием в них липидов и белков,

обладающих большой удельной теплотой сгорания. И напротив, увеличение доли верхового торфа приводит к закономерному снижению теплоты сгорания из-за его высокой зольности и низкого содержания легкогорючих органических компонентов. Показатель зольности (рисунок 37) демонстрирует обратную зависимость: он существенно снижается при росте доли лузги и пивной дробины, что связано с низким исходным содержанием в них негорючих минеральных примесей [81].

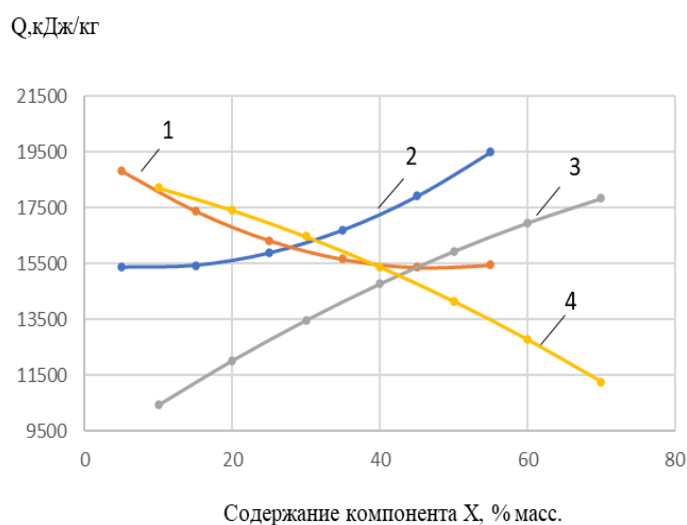


Рисунок 36 – Зависимость теплотворной способности гранул Q , кДж/кг от содержания компонента в смеси X , % масс.: 1 – смесь №1 на основе торфа; 2 – смесь №1 на основе пивной дробины; 3 – смесь №2 на основе лузги

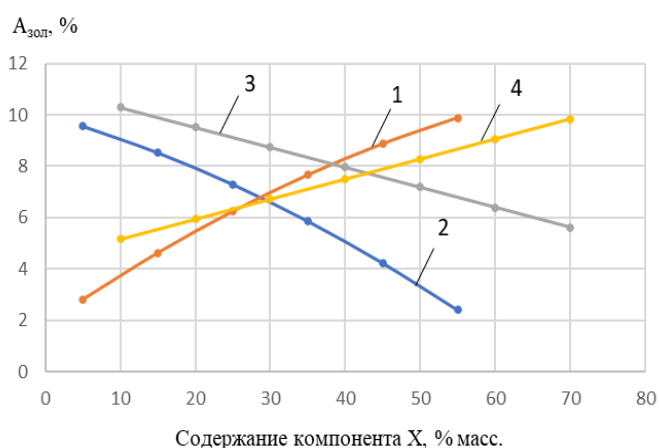


Рисунок 37 – Зависимость зольности гранул $A_{\text{зол}}$, % масс. от содержания компонента в смеси X , % масс.: 1 – смесь №1 на основе торфа; 2 – смесь №1 на основе пивной дробины; 3 – смесь №2 на основе лузги подсолнечника; 4 – смесь №2 на основе торфа

Далее был исследован процесс горения топливных гранул, температура воспламенения (T , °C), время сгорания (τ_1), количество золы приведены в таблице 9. Топливные гранулы (ТГ) представляют собой сложную гетерогенную систему, структурный каркас которой формируют природные полимеры растительного происхождения (лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза). В процессе прессования между компонентами, включая минеральные включения и влагу, возникают физико-химические взаимодействия. В результате формируется прочная внутренняя матрица со специфической морфологией. Из-за этой структуры, состава и повышенной плотности процессы горения подобных гранулированных материалов существенно отличаются от сжигания традиционных древесных видов топлива.

Таблица 9 – Результаты испытаний процесса горения топливных гранул

№	показатели	Номер смеси					
		Смесь №9	Смесь №6	Смесь №1	Смесь №7	Смесь №5	Смесь №2
1	Температура загорания T , °C.	500	500	500	500	500	500
2	Время сгорания τ , сек.	135	141	135	131	136	137
3	Количество золы G , гр.	0,13	0,11	0,02	0,12	0,04	0,09

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 38, показывает, что с ростом давления прессования увеличивается время нагрева до воспламенения гранул. Эта закономерность объясняется уплотнением структуры материала, что затрудняет диффузию кислорода внутрь образца и замедляет процесс достижения температуры, необходимой для воспламенения. Тогда как время полного сгорания практически одинаково для всех рецептов топливных гранул благодаря их стандартной геометрии, которая обеспечивает стабильный доступ кислорода.

Для установления количественных зависимостей между компонентным составом смесей и временем воспламенения был проведен анализ экспериментальных данных. Анализ показал зависимость времени воспламенения

от содержания ключевых компонентов, обладающих свойствами инициатора горения или замедляющими свойствами.

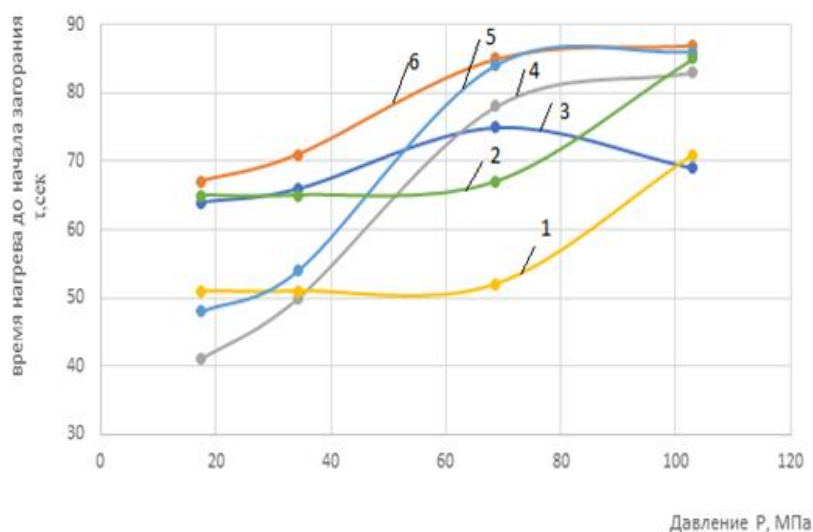


Рисунок 38– Зависимость времени нагрева до начала загорания τ , сек от давления P , МПа: 1 – смесь №6 при $W=15\%$; 2 – смесь №9 при $W=15\%$; 3 – смесь №1 при $W=19\%$; 4 – смесь №5 при $W=18\%$; 5 – смесь №7 при $W=11\%$; 6 – смесь №2 при $W=14\%$.

Для сравнительной оценки степени и характера влияния различных компонентов на процесс воспламенения все полученные данные были обобщены. Результаты этого обобщения приведены в таблице 10.

Проведенный анализ выявил два ключевых компонента с противоположным воздействием на воспламеняемость топливных гранул. Ввод пирокарбона увеличивает время воспламенения до 78-87 секунд, что обусловлено его элементным составом с преобладанием углерода и минимальным количеством летучих веществ [122]. В тоже время, лигносульфонат с высоким содержанием серы оказывает ускоряющий эффект, сокращая время воспламенения до 52 секунд [84]. Лузга подсолнечника, обогащенная летучими веществами, также способствует снижению времени воспламенения, а ее сочетание с лигносульфонатом обеспечивает наиболее быстрое время воспламенения [84,117]. Наличие в рецептуре «верхового» торфа замедляет воспламенение из-за высокой зольности (5–15%), что характеризуется увеличенным временем воспламенения 85 секунд в смеси №7. А в смеси №6 время воспламенения уменьшается за счет наличия в рецептуре лигносульфоната [48]. В то же время наличие в рецептуре таких

компонентов, как пивная дробина, листья и опилки не оказывают сильного влияния на время воспламенения [85].

Таблица 10 – Влияние компонентного состава на время воспламенения топливных гранул

Компонент	Влияние на время воспламенения	Обоснование времени воспламенения	Наблюдение в эксперименте
Пирокарбон	Сильное замедление	Низкое содержание летучих, (<10%) требует прямого гетерогенного окисления.	Смеси №2 и №5 с 40% содержанием имеют макс. время воспламенения (87 и 78 с).
Лигносульфат	Ускорение	Сера (5-10%) действует как инициатор горения	Смесь №6 с 16% содержанием имеет минимальное время воспламенения (52 с).
Лузга подсолнечника	Ускорение	Низкая зольность (2–4%) и легкоразлагаемые компоненты приводят к быстрому воспламенению за счёт ускоренного выделения летучих	Входит в состав самой быстровоспламеняющейся смеси №6.
Торф верховой	Замедление	Высокая зольность (5-15%)	Проявляется в смеси №7 (85 с). В смеси №6 его эффект компенсирован.
Листья / Опилки	Нейтральное	Стандартные источники летучих компонентов (75-85%). Не оказывают решающего влияния на фоне других компонентов.	Не наблюдается четкой корреляции их содержания со временем воспламенения.
Пивная дробина	Нейтральное	Умеренные показатели по летучим компонентам (75-82%).	Не выявлено однозначного влияния.

Полученные зависимости позволяют целенаправленно регулировать рецептуру смесей для достижения требуемых характеристик горения, что критически важно для повышения эффективности топливных систем и котельного оборудования. Проведённые исследования также позволили выявить ключевые закономерности горения топливных гранул (ТГ), обладающих сложной морфологической структурой. Установлено, что данный процесс носит ярко

выраженный многофазный характер и может быть разделён на несколько последовательных стадий» [81].

На начальном этапе происходит удаление влаги из топливной массы и её нагрев до температуры начала термического разложения. Дегидратация биомассы наблюдается уже при сравнительно низких температурах (60 – 100 °С). Важно отметить, что испарение влаги требует значительных энергозатрат, что приводит к снижению температуры в зоне горения и замедлению последующих процессов. Таким образом, начальная фаза характеризуется преобладанием эндотермических реакций, не сопровождающихся выделением тепловой энергии.

Следующий этап – фаза термического разложения и воспламенения летучих компонентов. Отличительной чертой гранул, произведённых из древесных и растительных отходов, является интенсивное выделение летучих соединений на этапе предпламенного нагрева. Эти газообразные и жидкие продукты пиролиза играют ключевую роль в механизме воспламенения, существенно повышая реакционную способность топлива. После их выделения в топливе формируется коксовый остаток, состоящий преимущественно из углерода. Экспериментально установлено, что воспламенение летучих компонентов происходит при 210 °С в присутствии открытого огня или раскалённых поверхностей. При достижении 260 °С наблюдается устойчивое пламенное горение с резким повышением температуры.

Данная стадия сопровождается интенсивным тепловыделением и массовым образованием продуктов разложения [19].

Третий этап – стадия дожигания летучих компонентов. В этот период продолжающееся выделение газообразных продуктов создаёт своеобразный барьер, ограничивающий доступ кислорода к коксовому остатку. Только после снижения интенсивности газовой выделений начинается активное окисление твёрдой углеродной фазы.

Четвёртый этап – фаза коксового горения, в ходе которого выгорает твёрдый углеродный остаток (кокс). Газообразные продукты образуют как гомогенные, так и гетерогенные (диффузионные) пламена. Твёрдый углеродный остаток окисляется

при 650–900 °С с выделением значительного количества тепла. При температурах 400–500 °С наблюдаются: резкая активизация процессов термического разложения и последующее замедление газовой выделению, связанное с деструкцией лигниновых структур, что подтверждено экспериментальными данными для использованных в работе композиций на основе древесных, растительных отходов и технического углерода.

Горение древесных и растительных отходов представляет собой сложный физико-химический гетерогенный процесс, который характеризуется строгой последовательной сменой различных четко выраженных режимов термического разложения топлива. С точки зрения детального механизма протекающего окисления, все описанные выше стадии можно классифицировать на два основных фундаментальных режима горения биомассы. Пламенное горение (с диапазоном температур 400-550°С), которое характеризуется чрезвычайно высокой скоростью протекания экзотермических газофазных реакций, всегда сопровождается мощным интенсивным тепловыделением и полным окислением летучих газообразных продуктов первичного пиролиза. Беспламенное горение (протекающее при температурах выше 550°С), в непосредственном результате которого происходит медленное глубинное окисление твердого пористого углеродного остатка (кокса). Данный заключительный режим термического разложения отличается наибольшей общей продолжительностью протекания, а его рабочий температурный диапазон обычно составляет от 650 до 900°С.

Формула расчета времени горения:

$$\tau = \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{суш}} + \tau_{\text{л}} + \tau_{\text{с}}, \quad (47)$$

где: $\tau_{\text{пр}}$ – прогрев частицы до выхода или воспламенения летучих веществ, сек.;

$\tau_{\text{суш}}$ – сушка топлива, сек.;

$\tau_{\text{л}}$ – горение летучих веществ около частицы, способствующее быстрому подъему температуры частицы, сек.;

$\tau_{\text{с}}$ – горение коксового остатка, состоящего из углерода и золы, сек.

4.5 Результаты исследований процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей с каналами переменного сечения

Для гранулирования использовался гранулятор роторного типа с плоской модернизированной матрицей – оборудование, стандартно применяемое для производства пеллет из опилок, однако в данном случае адаптированное для работы с многокомпонентными полидисперсными смесями. Ключевой задачей являлось достижение таких реологических свойств разрабатываемых смесей (пивная дробина, лузга подсолнечника, торф, пирокарбон), которые были бы сопоставимы с параметрами древесного сырья. Это необходимо для обеспечения бесперебойной работы стандартного гранулятора. Стабильный процесс гранулирования был достигнут благодаря целенаправленному подбору рецептур. Это подтверждает высокий потенциал применения данных видов сырья на стандартных линиях. На данном грануляторе были проведены комплексные технологические испытания с целью оценки качества продукции и эффективности процесса. Качество гранул характеризовали по двум ключевым показателям: плотности и пределу прочности на раскалывание. Эффективность процесса оценивали по фактической производительности оборудования и потребляемой мощности с учётом влияния геометрии каналов матрицы и толщины обрабатываемого слоя смеси.

В процессе подачи сырья в бункер, за счет трения между прессовочным валом и матрицей, температура устройства может повышаться до 60–80°C, что способствует выделению лигнина, необходимого для получения прочных и однородных пеллет. Проведенные исследования в условиях закрытой матрицы показали, что оптимальная прочность гранул достигается при влажности сырья в диапазоне от 12% до 18%. Результаты экспериментов по получению топливных гранул из различных смесей в роторном грануляторе с плоской матрицей обобщены в таблице 11.

Таблица 11 – Характеристики ТГ, получаемых в промышленном роторном грануляторе

Смесь №7 N=42 кВтч/т, Q=108 кг/ч, W=12%									
№	Dгр,	lгр,	Vгр,	mгр,	ρгр,	ρср,	Fр1,	σ p1,	σр ср
	мм	Мм	мм3	гр.	кг/м3	кг/м3	кгс	МПа	МПа
1		21,00	593,76	0,745	1254,71	1199,53	24	0,61	
2		20,10	568,31	0,636	1119,10		21	0,55	
3	6	17,00	480,66	0,569	1183,78		23	0,72	
4		23,80	672,93	0,829	1231,93		26	0,58	0,61
Смесь №1 N=56 кВтч/т, Q=102 кг/ч, W=14%									
№	Dгр,	lгр,	Vгр,	mгр,	ρгр,	ρср,	Fр,	σ p,	σр ср
	мм	Мм	мм3	гр.	кг/м3	кг/м3	кгс	МПа	
1		21,70	613,55	0,756	1232,17	1227,21	32	0,78	
2		21,20	599,42	0,726	1211,18		23	0,58	
3	6	22,00	622,04	0,763	1226,62		30	0,72	
4		21,90	619,21	0,746	1204,76		35	0,85	0,76
Смесь №9 N=80 кВтч/т Q=93 кг/ч, W=16%									
№	Dгр,	lгр,	Vгр,	mгр,	ρгр,	ρср,	Fр1,	σ p1,	σр ср
	мм	Мм	мм3	гр.	кг/м3	кг/м3	кгс	МПа	
1		18,9	534,38	0,64	1197,64	1186,98	20	0,56	
2		20,30	573,97	0,66	1149,89		25	0,65	
3	6	21,80	616,38	0,75	1216,78		28	0,68	
4		19,10	540,04	0,63	1166,58		30	0,83	0,72
Смесь №6, N=84 кВтч/т, Q=92 кг/ч, W=17%									
№	Dгр,	lгр,	Vгр,	mгр,	ρгр,	ρср,	Fр,	σ p,	σр ср
	мм	Мм	мм3	гр.	кг/м3	кг/м3	кгс	МПа	
1		18,40	520,25	0,69	1287,85	1298,61	19	0,43	
2		23,40	661,62	0,81	1269,61		17	0,43	
3	6	21,00	593,76	0,82	1296,82		19	0,47	
4		24,10	681,41	0,87	1291,44		17	0,36	0,43
Смесь №5 N=86 кВтч/т, Q=91 кг/ч, W=17%									
1		19,50	553,34	0,71	1278,90	1280	15	0,41	
2		22,80	644,68	0,82	1279,70		16	0,37	
3	6	20,20	571,14	0,73	1278,20		17	0,45	
4		23,20	655,87	0,84	1280,80		16	0,37	0,40
Смесь №2 N=88 кВтч/т, Q=89 кг/ч, W=18%									
№	Dгр,	lгр,	Vгр,	mгр,	ρгр,	ρср,	Fр,	σ p,	σр ср
	мм	Мм	мм3	гр.	кг/м3	кг/м3	кгс	МПа	
1		18,40	520,25	0,67	1287,85	1283,15	16	0,46	
2		23,40	661,62	0,84	1269,61		18	0,41	
3	6	21,00	593,76	0,77	1296,82		14	0,35	
4		24,10	681,41	0,88	1291,44		17	0,37	0,41

Согласно рисункам 39 и 40, рост влажности и доли опилок увеличивает удельную энергоёмкость из-за затрат на испарение воды.

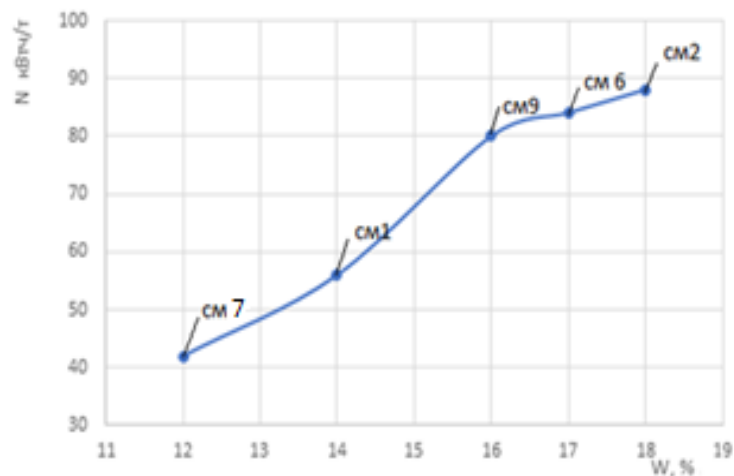


Рисунок 39 – Зависимость удельной энергоёмкости N , кВтч/т гранулятора для пяти смесей от влажности МПС W , %.

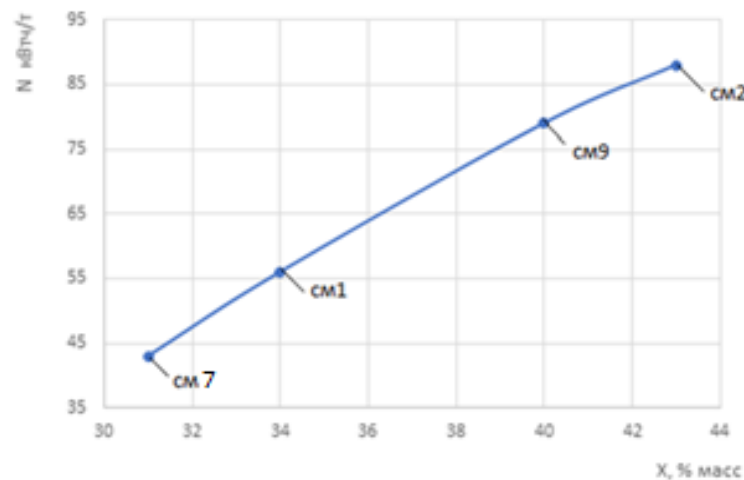


Рисунок 40 – Зависимость удельной энергоёмкости N , кВтч/т гранулятора от содержания целевого компонента смеси (опилки) X , % масс.

При этом, как видно из рисунков 41 и 42, производительность снижается вследствие роста трения и пластификации сырья, повышающих сопротивление продавливанию. Анализ рисунка 43 показывает, что рациональный зазор между матрицей и роликами 0,5–1,5 мм является критическим для стабильной работы, обеспечивая непрерывный процесс без разрушения сырья и перерасхода энергии.

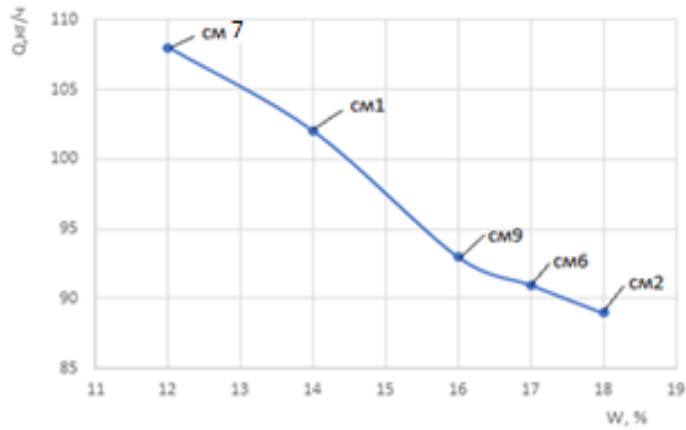


Рисунок 41 – Зависимость производительности гранулятора Q , кг/ч от влажности МПС W , %.

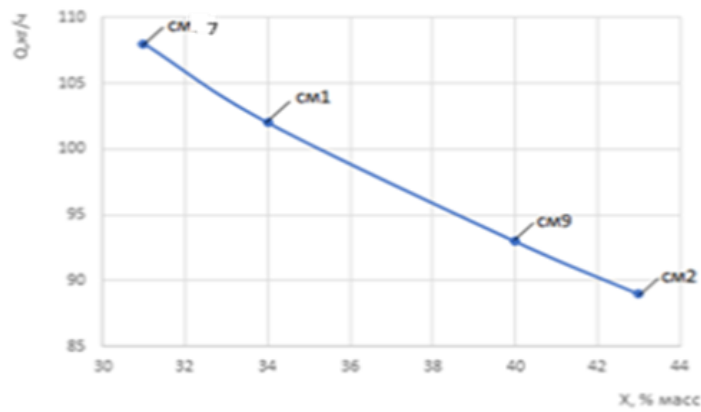


Рисунок 42 – Зависимость производительности гранулятора Q , кг/ч от содержания целевого компонента смеси (опилки) X , % масс.

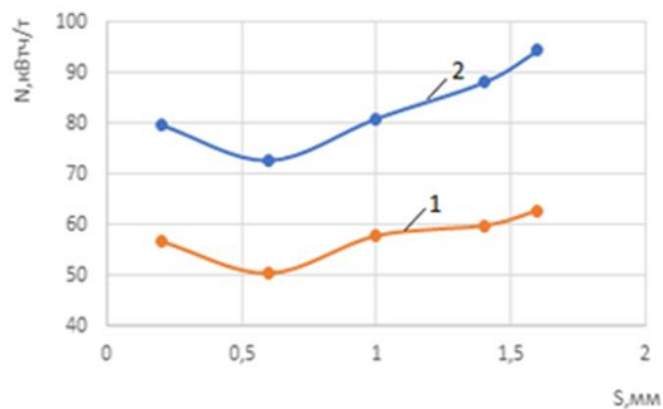


Рисунок 43 – Зависимость энергоемкости процесса прокатки N , кВтч/т от величины зазора S , мм между роликами и матрицей: 1 – смесь №1; 2 – смесь №9.

В работе проведено комплексное исследование технологических и эксплуатационных свойств топливных гранул, включающее определение их предела прочности при раскалывании (σ_r , МПа), плотности (ρ , кг/м³), теплотворной способности (Q , кДж/кг), а также времени нагрева до воспламенения и полного сгорания (τ , с). Параллельно оценивались ключевые параметры самого процесса гранулирования: удельная энергоёмкость ($N_{уд}$, кВт·ч/т), производительность оборудования (G , кг/ч) и влажность смеси (W , %). Обобщенные данные по всем ключевым показателям для пяти отобранных рецептов приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Сводные экспериментальные данные по исследуемым смесям

Смесь	Состав (основные компоненты)	σ_r ср, МПа	Q^* , кДж/кг	N , кВтч/т	G , кг/ч	W , %
1	Березовые опилки (34%), лузга подсолнечника (31%), пивная дробина (22%), лигносульфонат (50% р-р) (13%)	0,76	17780	56	102	14
2	Березовые опилки (43%), пирокарбон (40%), лигносульфонат (50% р-р) (17%)	0,41	21 356	88	89	18
5	Березовые листья (40%), пирокарбон (40%), лигносульфонат (50% р-р) (20%)	0,40	22 135	86	91	17
6	Лузга подсолнечника(65%), торф (20%), лигносульфонат (50% р-р) (15%)	0,43	17 489	84	92	17
9	Березовые опилки (36%), пивная дробина (45%), торф (11%), лигносульфонат (50% р-р) (8%)	0,72	17 920	80	93	16

По результатам экспериментов были отобраны две рецептуры, показавшие наилучшие комплексные характеристики. Смесь №9 – как технически оптимальная по совокупности показателей прочности (0,72 МПа), теплотворной способности (17 920 кДж/кг) и влажности (16%), что обеспечивает высокое качество гранул и стабильность процесса гранулирования. Смесь №1 также продемонстрировала

высокие структурно-механические свойства (прочность 0,76 МПа) и конкурентную теплотворную способность (17 780 кДж/кг) при меньшей влажности (14%), что указывает на её технологическую эффективность и потенциал для промышленного применения.

Высокие показатели прочности, плотности и энергетической ценности гранул из смесей №1 и №9 объясняются целенаправленным подбором компонентов с установленным химическим составом [8].

Отдельного внимания заслуживают смеси №2 и №5, продемонстрировавшие наивысшую теплотворную способность (более 21 000 кДж/кг). Этот результат достигнут за счёт включения пирокарбона (40%), что значительно повышает энергетическую ценность. Однако прочность этих гранул (0,40–0,41 МПа) ниже, чем у смесей №1 и №9. В смеси №5 дополнительным источником лигнина выступают березовые листья (40%). Таким образом, смеси №2 и №5 представляют собой высокоэнергетические композиции, рациональные для применения, когда приоритетом является максимальная теплота сгорания.

Лигнин, содержащийся в березовых опилках (20–25%) и торфе (25–35%), является природным связующим [105]. В процессе гранулирования исходная смесь разогревается, лигнин пластифицируется, что обеспечивает прочное склеивание частиц и высокую механическую прочность гранул.

Целлюлоза и гемицеллюлозы, преобладающие в пивной дробине (15–20% и 30–40% соответственно [104]) и лузге подсолнечника (35–40% и 25–30% [28]), способствуют уплотнению структуры и стабилизации формы гранул.

Пирокарбон представляет собой углеродистый остаток термической переработки, что обуславливает его рекордную теплотворную способность. Однако его частицы обладают низкой способностью к склеиванию, что объясняет более низкую прочность гранул на его основе и требует использования повышенного количества связующего, такого как лигносульфонат [70].

Березовые листья по химическому составу близки к опилкам, но характеризуются повышенным содержанием гемицеллюлоз и зольности. Это делает их эффективным наполнителем с хорошим энергетическим потенциалом,

однако морфология листовых частиц может несколько снижать прочность гранул по сравнению с древесными отходами [88].

Лигносульфонат, введённый в состав в качестве технологической добавки, усиливает связующие свойства смеси за счёт сульфатных групп и полифенольных соединений [11], что особенно важно при использовании компонентов с низким естественным содержанием лигнина (например, пивной дробины).

Таким образом, тщательно подобранное и сбалансированное сочетание лигнинсодержащих, целлюлозных и специальных связующих компонентов в исследуемых смесях №1 и №9 обеспечивает не только высокие прочностные характеристики готовых гранул ($\sigma_{p\text{ ср}} = 0,72\text{--}0,76$ МПа), но и стабильность всего процесса гранулирования, в сочетании с высокой теплотворной способностью конечной продукции.

Для максимальной наглядности и удобства анализа влияния каждого отдельного компонента на формирование ключевых свойств топливных гранул в нижеприведённой таблице 13 детально представлен химический состав основных составляющих исследуемых смесей.

Таблица 13 – Химический состав компонентов смесей [84]

Компонент	Лигнин, %	Целлюлоза, %	Гемицеллюлозы, %	Зольность, %
Березовые опилки	20–25	40–45	25–30	0,5–1,5
Лузга подсолнечника	15–20	35–40	25–30	2–4
Пивная дробина	5–10	15–20	30–40	3–6
Торф верховой	40–60*	< 5	10–20*	5–15
Лигносульфонат	30–40*	–	–	10–15
Пирокарбон	60–75*	–	–	8–15
Березовые листья	15–25	15–25	20–35	5–10

Примечание: содержание указано в пересчёте на сухое вещество.

Для стабильной работы технологической линии с роторным гранулятором необходимо выбрать технологические и режимные параметры оборудования. Поддержание постоянной влажности сырья в диапазоне 12-18% обеспечивает стабильность процесса гранулирования, снижает риск перегрузок оборудования и

исключает дополнительные энергозатраты. Применение матриц с каналами цилиндрикоконического типа обеспечивает получение плотно-прочных гранул.

Внедрение точного дозирования позволило принципиально улучшить гомогенность смеси и эффективность использования связующего. Поддержание постоянного расхода смеси в зону прессования стабилизировало давление прессования, что является основным условием для получения гранул с заданными характеристиками.

Таким образом, в результате исследования решена научно-практическая задача: обоснованный выбор рациональной рецептуры топливных гранул и разработка комплекса технических и технологических решений для стабильной работы производства. Рецептуры смесей №1 и №9 обеспечивали получение гранул с высокими показателями (плотность, прочность, теплотворная способность). Разработанная технологическая схема гранулирования (приложение 6) с использованием роторного гранулятора с плоской матрицей с каналами переменного сечения и точное дозирование при подаче смеси, обеспечивает получение продукта со стабильно высокими эксплуатационными характеристиками. Производство пеллет осуществляется следующим образом. Исходные компоненты (стебли топинамбура и опилки) измельчаются в измельчителе (ИИС) и ножевой дробилке (ДН) до образования однородной сухой смеси. Далее она поступает в смеситель (СП), куда также подаются связующие в виде водных растворов лигносульфоната или лигнопана. После смешения увлажненная масса с заданным соотношением компонентов подается в промежуточный бункер (ПБ). Полученная масса затем поступает в роторный гранулятор с плоской матрицей с каналами переменного сечения (РГ). Готовые пеллеты поступают в накопительный бункер (ПБ2), а далее — на упаковку.

Для представления всех экспериментальных данных в работе использованы средние значения, полученные по результатам пяти независимых экспериментов. Погрешности рассчитаны для 95% доверительного интервала с применением t -распределения Стьюдента, что обеспечивает статистическую достоверность результатов. Такой подход позволяет объективно оценить влияние

технологических параметров на процесс гранулирования. Повторяемость результатов во всех сериях экспериментов подтверждает воспроизводимость технологического процесса и надежность примененной методики исследований.

Выводы по главе 4

1. Для смесей №1, 2, 5, 6, 9 определены диапазоны пластической прочности R_m , получены зависимости изменения пластической прочности МПС от влажности. Экстремум кривых соответствует максимально возможной прочности структурных связей при данных условиях и определяет критическую величину влажности в диапазоне 12-18%. Методом многофакторного планирования эксперимента получены уравнения регрессии и номограммы, описывающие зависимость предела прочности на раскалывание от пластической прочности и давления прессования.

2. Получена зависимость сыпучести МПС (смеси № 1,2,5,6,9) от влажности и величины зазора дозатора. При увеличении влажности в диапазоне от 8-18 % сыпучесть снижается в два-три раза. Для всех рассмотренных смесей сыпучесть возрастает при увеличении величины зазора. При величине зазора меньше 7 мм смесь не просыпается без внешнего воздействия поскольку силы сцепления и трения превосходят силу тяжести.

3. Коэффициент бокового давления ξ , измеренный в канале проходного прессования, возрастает от 0,3 до 0,56 с увеличением давления до 70 МПа, после чего его рост прекращается из-за достижения материалом максимальной плотности. Наибольшие значения ξ характерны для смесей с пониженной пластической прочностью, так как их меньшее внутреннее сцепление способствует передаче большего давления на стенки матрицы.

4. Термонагрев материала в процессе прессования повышает прочность гранул на раскалывание. Максимальная прочность достигается при минимальной конусности матрицы (1–2 градуса), что объясняется оптимальным сочетанием

температуры и геометрии канала, обеспечивающим плавное уплотнение и формирование монолитной структуры гранулы.

5. Установлено, что формирование плотно-прочных прессовок происходит в диапазоне удельных давлений 20 – 70 МПа за счёт интенсивного сцепления и переориентации частиц. Дальнейшее увеличение давления неэффективно, так как материал достигает структурного предела уплотнения.

6. Построены номограммы и получены уравнения, описывающие влияние влажности и давления прессования на плотность и предел прочности гранул на раскалывание.

7. Получены эпюры распределения давления по длине цилиндроконического канала для 5 типов смесей. Итоговый профиль является следствием взаимодействия двух противоположно направленных факторов: экспоненциального спада в цилиндрических участках и конкурирующих процессов в конической зоне (рост давления от сужения сечения и спад от трения). Правильно подобранный угол конусности создает оптимальный пик давления, необходимый для уплотнения и проталкивания материала через канал.

8. Получены графические зависимости изменения теплотворной способности и зольности топливных гранул от соотношения составляющих компонентов. Определена теплотворная способность топливных гранул (11000-22000) Дж/г.

9. Установлено, что время нагрева до воспламенения варьируется в диапазоне от 40 до 87 секунд и напрямую зависит от плотности и влажности гранулы. Тогда как время полного сгорания практически одинаково для всех рецептур топливных гранул благодаря их стандартной геометрии, которая обеспечивает стабильный доступ кислорода. Процесс горения имеет сложную многостадийную природу. Это прогрев частицы, сушка топлива, горение летучих веществ и дожигание коксового остатка.

10. Проведенные исследования на роторном грануляторе выявили ключевые зависимости процесса гранулирования: с ростом влажности сырья от 12% до 18% удельная энергоёмкость возрастает с 42 до 88 кВтч/т, а производительность

снижается со 108 до 89 кг/ч. Наибольшая прочность гранул (0,76 МПа) достигается при влажности 14%. Увеличение доли опилок в смеси повышает энергозатраты и снижает производительность.

11. Из 13 исследованных рецептов отобраны перспективные составы, позволяющие получать топливные гранулы, соответствующие требованиям стандарта ENplus. Их ключевое отличие – сырьевая база: доля древесного сырья снижена до ~30% с частичной заменой на вторичные растительные ресурсы (пивная дробина, лузга подсолнечника, торф). Поскольку для композиций с подобным составом нормативная база отсутствует, результатом работы является не только новая рецептура, но и предложение по адаптации параметров технологического оборудования для ее реализации.

Глава 5. Расчёт технологических параметров и себестоимости гранулирования

Процесс гранулирования является определяющим в производстве гранул из древесных и растительных отходов. Эффективность гранулирования определяется двумя основными аспектами: точностью инженерных расчётов рабочих параметров оборудования и экономической целесообразностью проведения процесса гранулирования.

В разделе приводится инженерная методика комплексного расчета параметров технологического процесса прессования в роторных грануляторах с плоской матрицей. Приведено технико-экономическое обоснование производства топливных гранул из МПС, учитывающее себестоимость гранул, структуры затрат, а также энергопотребление, амортизацию оборудования, трудовые и сырьевые ресурсы.

5.1 Инженерная методика расчета технологических и силовых параметров роторных грануляторов

Гранулирование древесных и растительных отходов представляет собой сложный технологический процесс, требующий тщательного инженерного расчета и экономического обоснования. В рамках данного исследования был проведен комплексный анализ производства топливных гранул. Изучение многокомпонентных составов на основе опилок, пивной дробины, лузги подсолнечника, торфа и пирокарбона позволило выявить общие закономерности и усовершенствовать технологические параметры гранулирования. В качестве практического применения разработанных методик и для подтверждения их эффективности был рассмотрен частный случай – организация производства гранул из измельченных стеблей топинамбура для сельскохозяйственного предприятия ООО «ВИВА» (Костромская область). Выбор именно этого сырья для предприятия обусловлен его локальной доступностью, высокой энергетической

ценностью и перспективностью использования в качестве биотоплива, что впоследствии было подтверждено актом внедрения (приложение 2). Исследование включало разработку усовершенствованной методики расчета, основанной на учете физико-механических свойств сырья, определении параметров процесса гранулирования и анализе специфических характеристик оборудования. На рисунке 44 приведена детализированная блок-схема методики, иллюстрирующая поэтапный алгоритм определения силовых и энергетических параметров с учётом экспериментально определенных реологических характеристик.

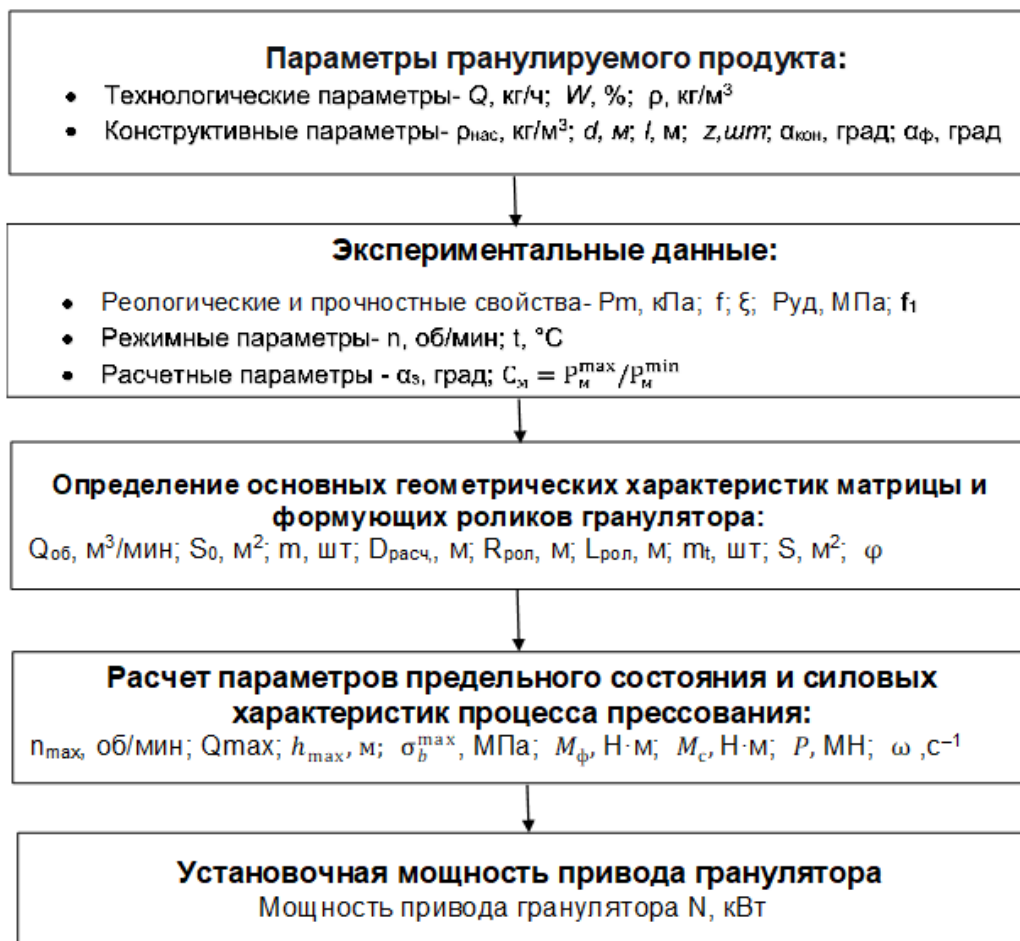


Рисунок 44 – Блок-схема расчета энергосиловых параметров роторного гранулятора с плоской матрицей

Сначала определяется объемная производительность гранулятора, м³/мин:

$$Q_{об} = \frac{Q}{60\rho_{нас}} \quad (48)$$

Площадь сечения одного отверстия, м²:

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (49)$$

Число отверстий в формующей матрице:

$$m = \frac{Q_{об}}{zS_0nl} \quad (50)$$

Расчетный диаметр матрицы, м:

$$D_{рас} = \sqrt{\frac{md^2}{\varphi}} \cdot 100 \quad (51)$$

Радиус формующего ролика, м:

$$R = \frac{Q}{120\pi zn\rho_{нас} \cdot (r_H^2 - r_{вн}^2) \sin^2\left(\frac{\alpha_\Phi}{2}\right) C_M}, \quad (52)$$

где r_H и $r_{вн}$ — радиусы поверхности матрицы, описываемые наружным и внутренним торцами ролика соответственно, м.

Длина ролика, м:

$$L_{рол} = \frac{D_{рас}}{2} \quad (53)$$

Число отверстий с учетом шага t между ними на каждом диаметре их расположения:

$$m_t = \frac{\pi D_n}{t} \quad (54)$$

Площадь рабочей поверхности матрицы, м²:

$$S = S_H - S_{вн} = \pi(r_H^2 - r_{вн}^2) \quad (55)$$

Расчетное живое сечение матрицы:

$$\varphi = \frac{S_0 m_t}{S} \quad (56)$$

б) определение параметров предельного состояния процесса прокатки

Предельная скорость вращения вала, об/мин:

$$n_{\max} \leq 30 \sqrt{\frac{f}{4R}} \quad (57)$$

Максимальная высота (слой) материала, который может быть захвачен роликом

h_{\max} :

$$h_{\max} = R (1 - \cos \alpha_3) \quad (58)$$

в) определение силовых параметров процесса формования.

Среднее нормальное напряжение (МПа) рассчитывают по зависимости

$$\sigma_b^{\max} = P_{\text{уд}} (1 + 2\xi) (1 + \sin \varphi_1) + P_M \sin \varphi_1 \quad (59)$$

Результирующий момент прессования (Н·м) определяется по формуле

$$M_\phi = \frac{LR^2 f}{2} \cdot \sigma_b^{\max} (\alpha_3 - 2\alpha_\phi) \quad (60)$$

Момент сопротивления при сдвиге избытков материала (Н·м):

$$M_c = \frac{42P_M \pi R^3}{\text{ctg} \varphi_1} \quad (61)$$

Результирующую силу давления на ролики (МН) можно определить из выражения

$$P = \frac{L_{\text{рол}} R \alpha_3}{2} \sigma_b^{\max} \quad (62)$$

Угловая скорость вращения роликов (с^{-1}):

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (63)$$

Мощность привода гранулятора (кВт)

$$N = \frac{z(M_\phi + M_c)\omega}{\eta}, \quad (64)$$

где $\eta = 0,95$ – КПД.

В представленном разделе детально рассмотрена инженерная методика комплексного расчета ключевых параметров технологического процесса гранулирования в роторных грануляторах с плоской матрицей. В отличие от существующих подходов, фокусирующихся преимущественно на эмпирических зависимостях или анализе отдельных стадий процесса, предлагаемая методика основана на последовательном определении взаимосвязанных реологических характеристик материала. Ключевыми расчетными параметрами являются коэффициент бокового давления и пластическая прочность уплотняемой среды, которые определяются для конкретного состава сырья.

Таким образом, основным отличием данной работы от работ других авторов является предложение комплексной методики инженерного расчета, позволяющей не просто описать, а прогнозировать рабочие режимы оборудования (усилие на роликах, мощность привода) на основе реологических свойств материала, а не только его влажности и гранулометрического состава [50].

5.2 Экономическая эффективность производства топливных гранул из многокомпонентных смесей

В рамках исследования проведен сравнительный экономический анализ производства топливных гранул из многокомпонентной смеси (березовые опилки – 34%, лузга подсолнечника – 31%, пивная дробина – 22%, лигносульфонат (50% р-р) – 13%) и чистых березовых опилок. Производственный процесс организован в роторном грануляторе MasCorp-230 с производительностью 102 кг/ч (215 тонн/год при работе 8 ч/день, 22 дня/мес., 12 мес./год). Удельное энергопотребление составило 56 кВтч/т для многокомпонентной смеси и 60 кВтч/т для чистых опилок.

Стоимость сырья и ресурсов принята на уровне цен Подмосковья в 2025 году: березовые опилки – 3 руб./кг, электроэнергия – 7 руб./кВтч, аренда цеха – 100 руб./м²/мес., цена реализации гранул – 10 000 руб./т. Лузга подсолнечника, пивная дробина и лигносульфонат учитывались как бесплатные отходы при наличии локальных поставщиков.

Для производства гранул из многокомпонентной смеси переменные затраты составили 141 900 руб./год на опилки и 84 280 руб./год на электроэнергию. А для гранул из чистых опилок переменные затраты на опилки составили 645 000 руб./год, затраты на электроэнергию составили 90 300 руб./год.

Постоянные затраты включали аренду 60 000 руб./год, фонд оплаты труда (1 200 000 руб./год), транспортные расходы (192 000 руб./год), обслуживание оборудования (120 000 руб./год), коммунальные платежи (36 000 руб./год) и амортизация оборудования (62 700 руб./год для МПС и 57 000 руб./год для опилок). Постоянные затраты составили 1 670 700 руб./год для МПС и 1 665 000 руб./год для ЧО. Общие затраты производства гранул из МПС достигли 1 896 880 руб./год, а из чистых опилок- 2 400 300 руб./год.

Полный детализированный расчет постоянных и переменных затрат с разбивкой по статьям приведен в таблице 14. В таблице 15 представлены ключевые финансовые результаты деятельности, включая выручку, налоговые отчисления, чистую прибыль и рентабельность. Расчеты выполнены на основе исходных данных с учетом упрощенной системы налогообложения (6% от выручки). Показатели позволяют оценить эффективность бизнеса и могут быть использованы для дальнейшего анализа, планирования и улучшения финансовых процессов.

На основании таблицы 15 при производстве гранул из МПС выручка от реализации 215 тонн гранул составила 2 150 000 руб./год, при цене реализации гранул – 10 000 руб./т., чистая прибыль – 124 120 руб., рентабельность – 5,8%, при производстве гранул из чистых опилок выручка от реализации 215 тонн гранул составила 2 150 000 руб./год, при цене реализации гранул – 10 000 руб./т., убыток – 379 300 руб., рентабельность отрицательная 17,6%. Простой срок окупаемости производства топливных гранул из МПС составил 2-3 года.

Таблица 14 – Расчет постоянных и переменных затрат предприятия за год для гранул из многокомпонентной смеси и гранул из чистых опилок

Категория затрат	Статья расходов	Формула расчета	Сумма в год, руб.-Смесь	Сумма в год, руб.-Чистые опилки
Постоянные затраты			1 670 700	1 665 000
1. Аренда помещения	Производственный цех	$50 \text{ м}^2 \times 100 \text{ руб./м}^2 \times 12 \text{ мес.}$	60 000	60 000
2. ФОТ	Аппаратчик	$45\,000 \text{ руб.} \times 12 \text{ мес.}$	540 000	540 000
	Подсобный рабочий	$35\,000 \text{ руб.} \times 12 \text{ мес.}$	420 000	420 000
	Бухгалтер (0,5 ставки)	$20\,000 \text{ руб.} \times 12 \text{ мес.}$	240 000	240 000
3. Транспорт	Доставка сырья	$8\,000 \text{ руб.} \times 2 \text{ рейса} \times 12 \text{ мес.}$	192 000	192 000
4.Обслуживание	Запасные части	-	70 000	70 000
	ТО оборудования	-	30 000	30 000
	Смазочные мат-лы	-	20 000	20 000
5.Амортизация	Гранулятор Mascorp-230	$400\,000 \text{ руб./7лет} \times 1,10\text{-для МПС}$ $400\,000 \text{ руб./7лет}$ -для ЧО	62 700	57 000
6.Коммунальные платежи	Вода, отопление	$3\,000 \text{ руб.} \times 12 \text{ мес.}$	36 000	36 000
Переменные затраты			226 180	735 300
1. Сырьё	Опилки	$215 \text{ т} \times 0,22 \times 3\,000 \text{ руб./т-для МПС}$ $215 \text{ т} \times 3\,000 \text{ руб./т}$	141 900- 22% от общей массы	645 000
2. Энергия	Электроэнергия	$215 \text{ т} \times 56 \text{ кВтч} \times 7 \text{ руб.-для МПС}$ $215 \text{ т} \times 60 \text{ кВтч} \times 7 \text{ руб.-для ЧО}$	84 280	90 300
Всего затрат			1 896 880	2 400 300

Таблица 15 – Финансовые результаты деятельности организации

Финансовый показатель	Значение (руб.) МПС	Значение (руб.) Чистые опилки	Расчет
Выручка	2 150 000	2 150 000	$215 \times 10\,000 = 2\,150\,000$ руб.
Прибыль до налогов	253 120	-250 300	1.-2 150 000-1 896 880=253 120-Для МПС 2.-2 150 000-2 400 300= -250 300-Для ЧО
Налог (6%)	129 000	129 000	6% от выручки ($2\,150\,000 \times 0,06$)
Чистая прибыль	124 120	-379 300	1.253 120-129 000=124 120-Для МПС 2. - 250 300-129 000= - 379 300 -Для ЧО-убыток
Рентабельность (%)	5,8%	-17,6%	(Чистая прибыль / Выручка) $\times 100\%$
Простой срок окупаемости	2,35 г	не окупается	Простой срок окупаемости = Первоначальные инвестиции / Годовой чистый денежный поток (Чистая прибыль - Амортизация)

Итак, производство гранул из предложенной смеси экономически целесообразно и показывает приемлемую рентабельность в 5,8%, тогда как использование чистых опилок приводит к убыткам. При производстве гранул из чистых опилок сырьевые затраты возросли до 645 000 руб./год, а общие затраты – до 2 400 300 руб./год при той же выручке. Это привело к убытку в размере 379 300 руб./год и отрицательной рентабельности (-17,6%).

Результаты расчетов демонстрируют, что использование многокомпонентной смеси снижает себестоимость на 21 % по сравнению с чистыми опилками за счет замены 78% платного сырья бесплатными отходами. Ключевым фактором экономической эффективности технологии является доступ к вторичным ресурсам агропромышленного комплекса, что обеспечивает приемлемую рентабельность производства на уровне 6%. В то же время вариант с чистыми опилками оказался нерентабельным из-за высокой доли сырьевых затрат в структуре себестоимости.

Таким образом, реализация технологии гранулирования многокомпонентных смесей на основе отходов демонстрирует значительную экономическую целесообразность при условии наличия устойчивых каналов получения бесплатного или низкзатратного сырья. Полученные результаты подтверждают перспективность развития производств топливных гранул с использованием отходов перерабатывающих отраслей.

Выводы по главе 5

1. В ходе исследования создана комплексная инженерная методика, позволяющая с высокой точностью рассчитывать: энергосиловые параметры процесса гранулирования, производительность и мощность оборудования, геометрические параметры оборудования.

2. Разработанные решения успешно апробированы на примере производства гранул из топинамбура для предприятия ООО «ВИВА» (Костромская область). Параллельно методика применяется в исследовательской деятельности ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха, демонстрируя свою эффективность для решения прикладных задач в области переработки растительного сырья.

3. Приведенная блок-схема, изображенная на рисунке 44 наглядно демонстрирует алгоритм расчета основных параметров, взаимосвязь технологических и конструктивных характеристик, последовательность проектных расчетов.

4. Производство гранул из многокомпонентной смеси экономически выгоднее, чем из чистых опилок: себестоимость снижена на 21 % за счёт использования бесплатных отходов, рентабельность производства составила 5,8 %, тогда как вариант с чистыми опилками убыточен (-17,6%).

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Определена связь между реологическими свойствами МПС, структурно-деформационными характеристиками гранул и силовыми параметрами процесса гранулирования.

2. Выявлены особенности реологического поведения МПС на стадиях подготовки и активного нагружения. Экспериментально определены реологические и структурно-деформационные характеристики исходного сырья и получаемых гранул по результатам компрессионных исследований. Получена рецептура топливных гранул на основе пивной дробины, лузги подсолнечника, технического углерода.

3. Проанализировано напряженное состояние в очаге деформации роторного гранулятора с плоской матрицей и предложено математическое описание при движении материала по поверхности матрицы и в цилиндроконическом канале.

4. Методами многофакторного планирования эксперимента для разных рецептур топливных гранул были получены математические зависимости и графические номограммы, позволяющие оценивать плотность и прочность готовой продукции.

5. На установке для моделирования процесса гранулирования МПС в канале проходного прессования с термонагревом получены зависимости изменения предела прочности на раскалывание $\sigma_{\text{раск}}$ ТГ от температуры нагрева $t_{\text{нагр}}$ матрицы.

6. Проведены комплексные исследования в роторном грануляторе с плоской матрицей и получены зависимости производительности и удельной энергоемкости от состава смесей и их влажности.

7. Описан механизм горения ТГ, состоящий из четырех стадий. В ходе экспериментальных исследований установлены зависимости между процентным

составом компонентов и ключевыми энергетическими показателями, включая удельную теплоту сгорания и показатель зольности.

8. Разработана методика инженерного расчета процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей, учитывающая реологические свойства материалов и механизм движения сырья через цилиндрикоконические каналы, а также алгоритм расчета энергосиловых параметров в виде блок-схемы.

9. Технология получения топливных гранул в роторном грануляторе передана в ООО «ВИВА», Костромская область, для гранулирования отходов клубнеплодных культур.

10. Установлено, что производство гранул из МПС экономически выгоднее, чем из древесных отходов, поскольку себестоимость снижена на 21 %, а рентабельность производства достигает 5,8%.

11. Методика расчета параметров процесса получения топливных гранул передана в Московский политехнический университет и используется в учебном процессе магистров на кафедрах «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств им. проф. М.Б. Генералова» и «Процессы и аппараты химических технологий», а также в «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». Результаты работы также внедрены и рекомендованы к использованию Комитетом по устойчивому развитию (ESG) МКППР ТиНАО и получили положительную оценку перспективности от Союза органического земледелия.

12. Рекомендации и перспективы для дальнейшей разработки темы заключаются в следующем: полученные результаты процесса уплотнения МПС могут быть использованы в технологии получения топливных гранул в виде пеллет в котельных агрегатах малых предприятий. Для выбора режимных параметров процесса получения топливных пеллет могут быть использованы номограммы и расчётные методики.

Список сокращений и условных обозначений

- ТГ– топливные гранулы;
- МПС– многокомпонентная полидисперсная смесь;
- d и l – диаметр и длина формующего канала матрицы, м;
- $D_{вх}$ – диаметр канала на первом участке;
- $D_{расч}$ –расчетный диаметр матрицы, м;
- $L_{рол}$ –длина ролика, м;
- R – радиус формующего ролика, м;
- r_n и $r_{вн}$ – радиусы поверхности матрицы, описываемые наружным и внутренним торцами ролика соответственно, м;
- z – количество формующих роликов, шт.;
- m – число отверстий в формующей матрице, шт.;
- S_0 –площадь сечения одного отверстия, м²;
- $\varphi_{ж}$; –«живое» сечение матрицы, %;
- α –угол конической части, град;
- α_3 –угол захвата материала, град;
- $\alpha_{ф}$ –угол формования, град;
- 2α –угол при вершине конуса на втором коническом участке, град;
- 2β –угол при вершине конуса на четвертом участке, град;
- $\rho_{нас}$ – насыпная плотность материала, кг/м³;
- W – исходная влажность отходов, %;
- R_m –пластическая прочность, кПа;
- σ – предел прочности прессовок на раскалывание, МПа;
- f – коэффициент внешнего трения;
- ξ –коэффициент бокового давления;
- $\sigma_{в}(\alpha)$ –контактное напряжение на поверхности вала, Па;
- φ – угол внутреннего трения, рад;
- $\sigma_{ср}$ –среднее нормальное напряжение, Па;

K – константа, учитывающая реологическое состояние МПС;

C – сцепление материала, Па;

$P_{уд}$ – удельное давление прессования, МПа;

P – давление на слой материала, МПа;

$P_б$ – давление на боковую поверхность материала, МПа;

T – сила трения, Н;

$M_ф$ – результирующий момент прессования, Н·м;

M_c – момент сопротивления при сдвиге избытков материала, Н·м;

N – потребляемая мощность, кВт;

n – частота вращения вала привода, об/мин;

n_{max} – предельная скорость вращения вала, об/мин;

ω – угловая скорость вращения роликов (c^{-1});

t – температура нагрева пресс-формы, °С;

Q_{max} – максимальная часовая производительность роторного гранулятора, кг/ч;

C – энергетический эквивалент бомбовых калориметров, кДж/К;

m_1 – масса навески бензойной кислоты, г;

m_2 – масса навески топлива, г;

$Q_{б.к.}$ – удельная теплота сгорания эталонного образца бензойной кислоты, кДж/г;

$Q_{топлива}$ – удельная теплота сгорания исследуемого топлива, кДж/г;

ΔT_1 – подъем температуры в опыте с бензойной кислотой, К;

ΔT_2 – подъем температуры в опыте с топливом, К

Список литературы

1. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1998. – № 26. – Ст. 3009.
2. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 2. – Ст. 133.
3. ГОСТ 33103.1–2017. Биотопливо твёрдое. Технические характеристики и классы топлива. – М.: Стандартинформ, 2017.– 51 с.
4. ГОСТ Р 52808-2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008.– 9 с.
5. ГОСТ 21560-82. Материалы полимерные. Метод определения статической прочности на разрыв при растяжении формовых образцов типа «гантель». – М.: Издательство стандартов, 1983. –7 с.
6. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.–М.: Стандартинформ, 2020.– 60 с.
7. ГОСТ Р 54186-2010. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания методом сжигания в калориметрической бомбе и вычисление низшей теплоты сгорания. – М.: Стандартинформ, 2011.– 25 с.
8. Азаров, В. И. Химия древесины и синтетических полимеров : учебник / В. И. Азаров, А. В. Буров, А. В. Оболенская. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 620 с.
9. Аким, Э. Л. Релаксационное состояние полимерных компонентов бумаги и его влияние на механические свойства / Э. Л. Аким // I Международная научно-техническая конференция «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». – Архангельск, 13–17 сентября 2011 г. – 24 – 33 с.
10. Аллахвердов, Г.Р. Реологическое уравнение состояния дисперсных систем / Г.Р. Аллахвердов, Ю.Ю. Столяров, Г.А. Григорьев, Т.А. Матковская // Журнал Физической химии. – 2001. – Т. 75. № 6. – С.1138–1139

11. Афанасьев Н. И. Структура и физико-химические свойства лигносульфонатов / Н. И. Афанасьев, С. Е. Тельтевская, Н. А. Макаревич, Л. Н. Парфенова; отв. ред. О. С. Бровко; Ин-т экол. проблем Севера УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 160 с.
12. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / В.Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г.А. Носов. – М.: Химия, 2000.– 1760 с.
13. Безруких, П.П. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива: справочник / П.П. Безруких. М.: ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
14. Баринский, Е.А. Исследование и разработка процесса утилизации промышленных и коммунальных отходов методом гранулирования при получении эмалей и удобрений: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Баринский Евгений Анатольевич. – М.,2006.–280с.
15. Болдырев В. С. Технология лесопильно-деревообрабатывающих производств: учеб. пособие / В. С. Болдырев. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, 2016. – 313 с.
16. Брусенков А.В. Обоснование конструктивных параметров кольцевой матрицы пресс-гранулятора // Брусенков А.В., Коновалов Д.Н. – 2024. – Т. 103. – № 8. – С. 619 – 623.
17. Булатов, И.А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08, 05.02.13 / Булатов Илья Анатольевич. – М.,2012.–193с.
18. Вакал, С. В. Гранулирование азотных удобрений в высокотемпературном режиме с использованием тарельчатого гранулятора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08/ Вакал Сергей Васильевич. – Харьков, 1993. – 19 с.
19. Венцюлис, Л.С. Полидисперсные и смешанные топлива; экологический и экономический аспекты использования: монография / Л.С.Венцюлис, В.К. Донченко, Ю. И. Скорик.– СПб.: Агусбук, 2010. – 196 с.

20. Ветюгов, А. В. Совершенствование процесса гранулирования тонкодисперсных керамических порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08/ Ветюгов Александр Викторович. – Иваново, 2013. –16 с.
21. Виллу Варес. Справочник потребителя биотоплива/Виллу Варес, ЮлоКасък, Пеэтер Муйсте, Тину Пиху, СулевСоосаар. – Таллинн: Таллиннский технический университет, 2005. – 183 с.
22. Виноградов, Г. А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г. А. Виноградов, В. П. Каташинский. – М.: Metallurgia, 1979. –223 с.
23. Волков, Д.С. Технология и пресс для производства топливных гранул из стеблей подсолнечника: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Волков Дмитрий Сергеевич. – Зерноград, 2012.–150 с.
24. Генералов, М. Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учеб. пособие для ВУЗов/М.Б. Генералов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой,2002. – 592 с.
25. Генералов М. Б. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений: учеб. пособие / М. Б. Генералов, П. В. Классен, А. Р. Степанова, И. П. Шомин. – М.: Машиностроение, 1983.–192 с.
26. Голубев, И. Г. Рециклинг отходов в АПК: справочник / И. Г. Голубев, И. А. Шванская, Л. Ю. Коноваленко, М. В. Лопатников. – М.: ФГБН Росинформагротех, 2011.–296 с.
27. Гомонай, М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография/ М.В Гомонай. –М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006.–68 с.
28. Гордеев, А.В. Использование лузги подсолнечника в производстве топливных гранул / А.В. Гордеев, В.А. Левченко // Альтернативная энергетика и экология. — 2018. – № 5. – С. 34–42.
29. Горр, Д.А. Создание технологии приготовления топливных гранул и разработка технологических основ их использования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Горр Дмитрий Александрович. – М.,2014. – 133 с.

30. Горфин О.С. Технология переработки торфа: учебное пособие для вузов / О.С. Горфин, В.С. Зайцев. – М.: Недра, 1986. – 248 с.
31. Гришаев И. Г. Оборудование для механических процессов химической технологии: учебное пособие / И. Г. Гришаев, В. И. Назаров. – М.: МИХМ, 1989.– 88 с.
32. Дарманьян П. М. Физико-химические основы технологии гранулирования комбикормов и их компонентов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук /Дарманьян Павел Меликович. – Одесса, 1992. – 32 с.
33. Дерягин Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. –М.: Наука,1973.–279 с.
34. Евстигнеев Э.И. Химия древесины: учеб. пособие. / Э.И. Евстигнеев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 148 с.
35. Егоров Г. А Технология муки, крупы, комбикормов: учеб. пособие для вузов / Г. А. Егоров, Е. М. Мельников, Б. М. Максимчук. – М.: Колос, 1984.– 377 с.
36. Исагулов, А.З. Управление свойствами дисперсных материалов/ А.З Исагулов, В.Ю. Куликов, В.А. Юдакова // Ползуновский альманах. – 2007.– №1-2. – С.72-76.
37. Калошина Е.Н. Ресурсосберегающие технологии кормопродуктов на базе вторичного сырья спиртового и пивоваренного производств: дисс...докт. техн. наук: 05.18.01/ Калошина Елена Николаевна. – М., 2006. – 443 с.
38. Калыгин В.Г. Разработка и совершенствование ресурсосберегающей техники подготовки и переработки стекольных шихт: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08,05.17.11/ Калыгин Виталий Геннадьевич. – М., 1991. – 484с.
39. Картавый, А. Н. Вибрационные агрегаты для переработки минерального и техногенного сырья. Моделирование и элементы расчета по критериям энерго- и ресурсоэффективности: учеб. пособие / А. Н. Картавый. – М.: МГГУ, 2013.– 328 с.
40. Классен П. В.Гранулирование: учеб. пособие / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М.: Химия,1991. – 240с.
41. Классен П.В.Типовые методики расчета процессов гранулирования. учеб. пособие / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М.: НИУИФ, 1977. – 90 с.

42. Колпакчи, А. П. Вторичные материальные ресурсы пивоварения / А. П. Колпакчи, Н. В. Голикова, О. П. Андреева. – М.: Агропромиздат, 1986. – 160 с.
43. Кормилицын В.И. Технология приготовления топливных гранул из смеси торфа и вторичного сырья / В.И. Кормилицын, Г.С. Догадин, С.И. Хренов, Д.А. Горр // Вестник МЭИ. – 2011. - №5. – С.9 –14.
44. Курицын, В.Н. Экспериментальное уточнение реологической модели древесины / В.Н. Курицын, Е.М. Тюленева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2009. – № 5.– С.104 – 110.
45. Лаптев, А.Г. Технология термической переработки твердого топлива: учеб. пособие по курсу «Технология топлива и энергетических масел» / А.Г. Лаптев, Зверева Э.Р.–Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – 144с.
46. Липилин А.Б. Разработана энергоэффективная технология получения тонкодисперсных порошков из древесных отходов/А. Б. Липилин, М.В. Векслер, Н.В. Коренюгина// Международная биоэнергетика. – 2010.– №2.– С.13 –18.
47. Листопад И. А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства: учеб. пособие / И. А. Листопад. – М.: Агрехимиздат, 1988. – 88 с.
48. Лиштван, И. И. Физика и химия торфа : учебник / И. И. Лиштван, Е. Т. Базин, Н. И. Гамаюнов, А. А. Терентьев. – Москва: Недра, 1989.– 304 с.
49. Макаренков Д.А. Комплексные теплофизические исследования топливных гранул на основе растительных и древесных отходов / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, Я.А. Мавлюдова // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тезисы докладов в 5 томах, Екатеринбург, 26 – 30 сентября 2016 года / Уральское отделение Российской академии наук. Том 3. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. – С. 462.
50. Макаренков, Д.А. Исследование процесса компактирования и окатывания дисперсных сред с регулируемыми реологическими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Макаренков Дмитрий Анатольевич. - М., МГУИЭ, 2000. – 260 с.

51. Макаренков, Д.А. Энергосберегающие процессы гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с регулируемыми характеристиками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Макаренков Дмитрий Анатольевич. – Москва, 2015. – 32 с.
52. Макаренков Д.А. Классификация дисперсных сред на основе вторичных материальных ресурсов по реологическим свойствам / Д.А. Макаренков // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». – 2012.–№3.–С.66 –73.
53. Макаренков Д.А. Роль связующих, технологических добавок и процесса механоактивации при получении целевых продуктов на основе отходов / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров//Вестник МГОУ Серия «Естественные науки». – 2012. – №5.– С.49 –58.
54. Макаренков Д.А. Особенности выбора гранулирующего оборудования многокомпонентных полидисперсных шихт со вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, А.М. Гонопольский, Я.А. Мавлюдова // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. – 2013. – №1. – С. 49 – 64.
55. Макаренков Д.А. Особенности процесса гранулирования топливных композиций методом прокатки на роторных грануляторах / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, Я.А. Мавлюдова // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. – 2015. – №1. – С. 42 – 49.
56. Макаренков, Д.А. Вопросы применения прикладной реологии в процессах гранулирования многокомпонентных полидисперсных шихт /Д.А. Макаренков, В.И. Назаров//Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – №3(72). – С.185 – 191.
57. Макаренков Д.А. Прессовой гранулятор с плоской матрицей : пат. 2527998 Рос. Федерация : МПК В01J 2/20 (2006.01) / Макаренков Д.А., Назаров В.И., Булатов И.А., Баринский Е.А., Бичев М.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических

веществ». — № 2013106371/05 ; заявл. 14.02.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.— 12 с.: ил.

58. Макаренков Д.А. Особенности гранулирования кормовых смесей и отходов пищевых производств с учетом их реологических свойств / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, Я.А. Трефилова // Третья научно-практическая конференция с международным участием «Управление реологическими свойствами пищевых продуктов», научная конференция молодых ученых и специалистов. Сборник материалов / Отв. ред. д.т.н., проф. Мачихин С.А. – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. – 360 с. – С. 231 – 234.

59. Макаренков Д. А. Разработка энергоэффективных технологий гранулирования многокомпонентных отходов на основе реологических моделей / Д. А. Макаренков, В. И. Назаров, Я. А. Мавлюдова // Современные проблемы экологии: материалы XXXIV Всерос. науч.- практ. конф. (Тула, 10 нояб. 2025 г.). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 47 – 50.

60. Макаренков Д.А. Разработка энергоэффективной технологии гранулирования многокомпонентных отходов методом прокатки в роторном грануляторе / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, Я.А. Мавлюдова // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXIX, № 13 (304). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2025. – С. 52 – 56.

61. Малкин А. Я. Реология: концепция, методы, приложения: учеб. пособие / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. – СПб. Профессия. – 2007.–506 с.

62. Марков В.И. Возможности использования мощностей торфяной промышленности и создания на их базе малой местной энергетики в районах / В.И. Марков// Торф и Бизнес. – 2008. - №3. – С.13.

63. Матвиенко И.В. Основы реологии формовочной смеси: учеб. пособие/ И. В. Матвиенко. – М.: МГИУ.– 2003. – 80 с.

64. Мачихин Ю.А. Реологическая модель комбикорма при объемном прессовании/ Ю. А. Мачихин, Ю.Ф. Белокрылов// Известия вузов. Пищевая технология. –2005. - № 1. – С.78 – 80.

65. Модин Н.А., Ерошкин А.Н. Брикетирование измельченной древесины и древесной коры. – М: Лесная промышленность, 1971. – 112 с.
66. Мусаелянц Г.Г. Кольцевые прессы для брикетирования и гранулирования растительных материалов: учеб. пособие / Г.Г. Мусаелянц. – Пятигорск: Пятигорский технологический университет, 2002. – 171с.
67. Мюллер, О.Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Мюллер Оскар Давыдович. – Архангельск, 2015. – 272 с.
68. Мясоедова В.В. Композиции для пеллет и брикетов / В.В. Мясоедова //The Bioenergy International. Россия. – 2007. – №3. – С. 6–7.
69. Назаров В.И. Технологии гранулирования целевых продуктов на основе вторичных материальных ресурсов / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Мавлюдова, С.Н. Краморова // Экология и промышленность России. – 2017. – Т.21. – №2. – С. 10 – 14.
70. Назаров В.И. Особенности процесса горения твердотопливных композиций на основе растительных отходов и пирокарбона / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Трефилова // Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии (НЭРПО – 2013): материалы III Международной научно-технической конференции (тезисы докладов и аннотаций), Москва, 23 – 26 сентября 2013 года / под общей редакцией Г.И. Ефремова. – Москва: Московский государственный открытый университет, 2013. – С. 301 – 304.
71. Назаров, В. И. Утилизация отходов пивоваренной промышленности методами гранулирования и сушки / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, М.А. Бичёв // Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии. Третья Международная научно-техническая конференция (НЭРПО-2013), посвященная 80-летию кафедры «Процессы и аппараты химической и нефтехимической промышленности», Москва, 2013 г.– М.: МГОУ, 2013. – 141–144с.

72. Назаров, В.И. Гранулирование комплексных удобрений и реологические и физико-химические свойства компонентов / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков // Электронный журнал вестник МГОУ. Серия Химия. – 2011. – №4. – С.143 – 148.
73. Назаров, В.И. Исследование процесса гранулирования дисперсных отходов на роторных прессах с плоской матрицей / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, И.А. Булатов // Вестник МИТХТ. – 2010.– т.5. – №6. – С.13 – 16.
74. Назаров, В.И. Особенности конструкции экструдеров / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, И.А. Булатов // Комбикорма. – 2009. – №7. – С.7.
75. Назаров, В.И. Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов / В.И. Назаров, И.А. Булатов, Д.А. Макаренков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – №2. – С. 35 – 40.
76. Назаров В.И. Технология утилизации растительных и пищевых отходов методом гранулирования / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Трефилова, М.А. Бичев // Экология и промышленность России. – 2014. – С. 26 – 31.
77. Назаров В.И. Исследование процесса получения гранулированных топливных композиций и адсорбентов на основе пиролизного технического углерода и пористого шунгита / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Мавлюдова [и др.] // Кокс и химия. – 2022. – №9. – С. 36 – 44.
78. Назаров, В.И. Разработка энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов получения строительных композиций и топливных гранул / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, М.А. Бичев, Я.А. Трефилова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. №9.– С.14 – 17.
79. Назаров, В.И. Разработка технологии получения топливных гранул на основе растительных отходов и вторичных минеральных ресурсов / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Трефилова // Актуальные проблемы лесного комплекса / Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 34. – Брянск: БГИТА, 2012. – 107 с. – С. 63 – 66.

80. Назаров В.И. Экологические аспекты комплексной технологии переработки литий-кобальтовых аккумуляторов и органических отходов с получением целевых продуктов в виде гранул цилиндрической формы / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Г.Р. Афлятунова, Мавлюдова Я.А., Пинигин И. В, Попов А. П // *Металлург.* – 2023.– №9.– с.113 – 120.
81. Назаров В.И. Комплексные теплофизические исследования топливных гранул на основе растительных и древесных отходов и техногенного сырья / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Мавлюдова // *Кокс и химия.* – 2018. – №6. – С. 43 – 48.
82. Назаров В.И. Разработка технологии получения топливных гранул повышенной тепловой мощности на основе отходов методом проходного прессования / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Я.А. Трефилова // *Рациональное природопользование: традиции и инновации. Материалы Международной научно-практической конференции, Москва, МГУ, 23 – 24 ноября 2012 г. / Под общ. ред. проф. М.В. Слипенчука.* – М.: Издательство Московского университета, 2013. – 328 с. – С. 83 – 85.
83. Нечипоренко, Р. П. Исследование процесса прессования (брикетирования) измельчённых растительных материалов под высоким давлением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01 / Нечипоренко Ростислав Петрович. – Москва, 1967. – 38 с.
84. Никитин, В.М. Химия древесины и целлюлозы: учебник для вузов / В.М. Никитин, А.В. Оболенская, В.П. Щеголев. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 368 с.
85. Орлов А. И., Резниченко И. Ю. Применение отходов пивоварения в ресурсосберегающих технологиях // *Ползуновский вестник.* – 2021. – № 2. – С. 146–152.
86. Особов В. И. Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов / В.И. Особов, Г.К. Васильев, А.В. Голяновский. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

87. Пащенко, В.Н. Разработка комплексных процессов гранулирования порошковых материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08, 05.17.01 / Пащенко Виктор Назарович. – Одесса, 1992. – 32 с.
88. Плотников, Д.А. Обоснование и разработка автономной установки для производства пеллет с энергообеспечением от перерабатываемого сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Плотников Дмитрий Анатольевич. – Ижевск, 2008. – 24с.
89. Пройдак, Н.И. Технология и оборудование для комплексной переработки листостебельной биомассы в корма и белковые добавки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Пройдак Николай Иванович. – Ростов-н/Д., 1999. – 430 с.
90. Полянков, В.Т. Разработка способа получения гранулированных удобрений на основе торфяной сушенки: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.05 / Полянков Виктор Тихонович. – Минск.,1986. – 153 с.
91. Пошкус, Г. К. Брикетирование углей и торфа: учебное пособие для вузов / Г. К. Пошкус. – Москва: Недра, 1974. – 215 с.
92. Продан В.Д. Уточненная методика определения коэффициентов бокового давления и внешнего трения при прессовании сыпучих материалов/ В.Д. Продан, В.И. Назаров, Д.А. Макаренков //Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999.– №7.– С.13 – 14.
93. Пузырев, Е. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 01.04.14 / Пузырев Евгений Михайлович. – Барнаул.,2003.– 40с.
94. Ракитова О.С. Древесная топливная гранула в России и СНГ: справочник/ О. С. Ракитова, А.Д Овсянко, С. Е. Александрова. – СПб.: НП Конфедерация ЛПК Северо-Запада. – 2005. – 124 с.
95. Ракитова, О.С. Немцы выбиваются в лидеры рынка гранулирования / О.С. Ракитова // The Bioenergy international, Россия. – 2007.– №2.– С.12 – 13.
96. Рассев А.И. Некоторые проблемы использования отходов деревообработки в производстве топливных гранул / А.И. Рассев // Биоэнергетика. – 2007.– № 2(7) – С. 40 – 41.

97. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
98. Ринкевич В.П. Анализ способов получения и рецептур гранулированных композитов различного назначения на основе торфа / В. П. Ринкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – №4. – С.172 – 178.
99. Рудометкин, А.С. Исследование реологических свойств смеси зерна гречихи и сои как объекта экструзии / А.С. Рудометкин, А.Н. Остриков, О.В. Абрамов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 12. – С. 32 – 34.
100. Рындин Н.И. Краткий курс теории упругости и пластичности. – Л.: ЛГУ, 1974. – 134 с.
101. Севостьянов М.В. Исследование условий формования материалов в пресс-валковом экструдере / М.В. Севостьянов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – Вып. IV. – 115 – 120с.
102. Скорикова, Л. А. Обоснование состава топливных гранул и технологии подготовки древесных опилок для их производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Скорикова Любовь Александровна. – Йошкар-Ола, 2012. – 236 с.
103. Смирнов, А.Н. Повышение эффективности биокомпостов путем их гранулирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Смирнов Алексей Николаевич. – Чебоксары, 2015. – 17 с.
104. Смирнова, М.А. Пивная дробина как компонент композиционных топливных материалов / М.А. Смирнова, А.Н. Козлов // Химия растительного сырья. – 2020. – № 2. – С. 123 – 130.
105. Судакова, И. Г. Получение твердых биоэнергонаосителей из растительных отходов: обзор / И. Г. Судакова, Н. Б. Руденко // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. – 2015. – Vol. 8, № 4. – P. 499 – 513.

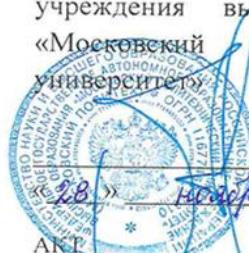
106. Табакаев, Р.Б. Теплотехнология получения твердого композитного топлива из низкосортного органического сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Табакаев Роман Борисович. – Томск, 2015. – 144 с.
107. Таран, А. Л. Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков: дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08 / Таран Александр Леонидович. – М., 2001. – 524 с.
108. Таран, Ю. А. Теоретические основы и технологические принципы ресурсо-энергосберегающих процессов получения гранулированных продуктов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 2.6.13. / Таран Юлия Александровна. – М., 2024. – 47 с.
109. Тюленева Е.М. Остаточные деформации в древесине / Е.М. Тюленева // Лесной вестник. – 2014. – №2. – С. 70 – 74.
110. Федоренчик, А.С. Определение параметров оборудования для производства пеллет /А.С. Федоренчик, Д.М. Гайдукевич // VIII Международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург. – 2013. – 24 – 27 с.
111. Хренов С.И. Разработка технологии приготовления топливных гранул из торфа и вторичного сырья, полученного в результате переработки бывших в употреблении (б/у) автопокрышек: отчет о выполнении 1 этапа Государственного контракта №П1076 от 31 мая 2010 г. и Дополнению от 17 февраля 2011 г. №11 НИР/ Хренов С.И. и др. – М.: НИУ МЭИ, 2010 г.
112. Шаяхметова А. Х. Сравнительные характеристики пеллет из лузги подсолнечника и древесных пеллет / А. Х Шаяхметова, А. Л. Тимербаева, Р. В. Борисова // Биоэнергетика. – 2015.– № 7. – С. 243 – 247
113. Шилько В.К. Бизнес-план деревообрабатывающего производства: учеб. пособие / В.К. Шилько. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2007. – 235 с.
114. Шишин, А.Н. Снижение энергоемкости гранулирования кормов шестеренным прессом с горизонтальной кольцевой матрицей и внутренним прессующим вальцом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Шишин Анатолий Николаевич. – зерноград, 2008. – 19 с.

115. Щербина, В. И. Ресурсосберегающие процессы гранулирования и брикетирования кормов шестеренными прессами: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.20.01 / Щербина Виталий Иванович. – Москва, 2006. – 43 с.
116. Щербина В.И. Анализ результатов экспериментальной проверки производительности гранулятора и энергоемкости процесса / В.И. Щербина, С.В. Щербина, С.А. Белоконов // Совершенствование процессов и технических средств в АПК. – Зерноград, 2002.– Вып. 4. – С. 133 – 137.
117. Шумовский А. В. Особенности подготовки смесей биомассы и нефтяных остатков к газификации для получения синтез-газа / А. В. Шумовский, Е. Г. Горлов // Химия твердого топлива. – 2021.– № 4. – С. 59 – 65.
118. Arshadi M. The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality // Fuel Processing & Technology. – 2008. – V. 89. – P.1442 – 1447.
119. Dunnett A. J., Shah N. Prospects for bioenergy// Journal of Biobased Materials and Bioenergy. – 2007. – V.1. – P. 1-18.
120. Vassilev, S.V. An overview of the chemical composition of biomass / S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva // Fuel. – 2010. – Vol. 89, Is. 5. – P. 913 – 933.
121. Filbakk T., Skjevraak G., Hoibo O., Dibdiakova J., Jirjis R. The influence of storage and drying methods for Scot's pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters // Fuel Processing & Technology. – 2011. – V. 92. – P. 871 – 878.
122. Jiang L. et al. Mechanical strength and combustion properties of biomass pellets prepared with coal tar residue as a binder // Fuel Processing Technology. – 2018. – Vol. 179. – P. 229 – 237.
123. Nazarov V.I., Makarenkov D.A., Aflyatunova G.R., Mavlyudova Y.A., I.V. Pinigin., A.P. Popov Ecological aspects of integrated technology for processing lithium-cobalt batteries with the production of pelletized target products// Metallurg. – 2024.–V. 67.– P. 1396 – 1406.
124. Nazarov V.I., Makarenkov D.A., Mavlyudova Y.A Fuel Granules Based on Organic and Industrial Waste//Coke and Chemistry. – 2018.–V.61.– P.230 – 233.
125. Python: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 05.05.2023).

Приложение 1. Акт об использовании результатов научно-практического исследования, полученных в рамках выполнения диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский политехнический
университет»



Наливайко А.Ю.

2023 г

О использовании результатов научно-практического исследования полученных в рамках выполнения диссертационной работы Мавлюдовой Яны Александровны «Совершенствование процесса получения гранулированного биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов»

Комиссия в составе:

Председатель: И.о. декана факультета химической технологии и биотехнологии (ФХТиБ), к.т.н., Соколов А.С.

Члены комиссии:

Заместитель декана факультета химической технологии и биотехнологии (ФХТиБ) к.т.н. Некрасов Д.А.
проф. кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М.Б. Генералова»
к.х.н. лауреат Премии Правительства РФ Беренгартен М.Г.

Составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Мавлюдовой Я.А. «Совершенствование процесса получения гранулированного биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет». Результаты исследований по процессам гранулирования топливных гранул могут быть использованы в обучении магистров по направлению: 20.04.01 «Техносферная безопасность» и, в частности, в рамках дисциплин «Рециклинг промышленных отходов» и «Оценка воздействия на биологические ресурсы».

Материалы, изложенные в диссертации, используются при чтении лекционных курсов на кафедрах «Аппаратурное оформление и автоматизация

технологических производств имени профессора М.Б. Генералова», «Процессы и аппараты химических технологий», а также в курсовом и дипломном проектировании и при проведении лабораторных работ в виде:

1. Методов инженерных расчетов роторного гранулятора с плоской матрицей при получении пеллет диаметром 6-8 мм;
2. Рекомендаций по усовершенствованию конструкции роторных грануляторов в части использования каналов переменного сечения в фильерах и вспомогательного оборудования на стадии подготовки мелкодисперсных материалов;
3. Методических указаний к лабораторным работам по изучению реологических свойств дисперсных материалов и по проведению компрессионных испытаниях в закрытой матрице.

Использование результатов диссертационной работы Мавлюдовой Я.А. в учебном процессе позволяет бакалаврам и магистрам приобретать необходимые навыки и компетенции как при проведении экспериментальных работ, так и при расчетах процесса гранулирования материалов на основе техногенного сырья.

Председатель Комиссии _____ А.С. Соколов

Члены Комиссии _____ Д.А. Некрасов

_____ М.Г. Беренгартен

Приложение 2. Акт опытно-промышленных испытаний по разработке технологии гранулирования растительных отходов на основе столовых корнеплодных и клубнеплодных культур

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Вива»


 Баранов В.В.
 « 19 »  2023 г.



Акт

опытно-промышленных испытаний по разработке технологии гранулирования растительных отходов на основе столовых корнеплодных и клубнеплодных культур

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

- от ООО «Вива» - директор Баранов В.В.;
- от ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» - советник по инновационной деятельности – заведующий отделом технологии и инновационных проектов В.И. Старовойтов
- от отдела инжиниринга химико-технологических процессов Курчатовского комплекса химических исследований НИЦ «Курчатовский институт» - заместитель начальника ОИХТП к.т.н, доц. Назаров, научный сотрудник ОИХТП Попов А.П., лаборант-исследователь ОИХТП Афлятунова Г.Р.;
- от Московского Политехнического Университета - аспирант Мавлюдова Я.А.

Проведены опытно-промышленные испытания по переработке растительных отходов на основе столовых корнеплодных и клубнеплодных культур методом прессования и прокаткой в роторном грануляторе с плоской матрицей при непосредственном участии Я.А. Мавлюдовой. Для повышения эффективности проведена модификация перфораций матрицы, в которой выполнены каналы переменного сечения. Роторный гранулятор с плоской матрицей состоит из рамы, корпуса, камеры прессования, загрузочной воронки, выгрузочного лотка, электродвигателя, приводного вала, пресс-матрицы, прессующих валков в сборе, прижимного винта. Технические характеристики роторного гранулятора с плоской матрицей приведены в таблице 1

Таблица 1

Диаметр прессующей матрицы	118 мм
Толщина прессующей матрицы (длина фильеры)	50 мм
Наружный диаметр фильеры	8 мм
Диаметр выходного канала	6 мм
Количество фильер	184 шт
Живое сечение входных отверстий фильеры	0,31
Количество прессующих роликов	2 шт
Диаметр прессующих роликов	78 мм
Ширина прессующих роликов	65 мм
Частота вращения пресс-матрицы	278 мин ⁻¹
Частота вращения вала электродвигателя	1430 мин ⁻¹
Мощность электродвигателя	11 кВт

Предварительно измельченный материал порционно подавался в зону активного прессования, при этом для разных типов отходов использовано универсальное связующее на основе лигносульфонатов в диапазоне концентраций от 3% до 15%. Модернизированный роторный гранулятор использовался для получения плотно-прочных прессовок (пеллет) диаметром 6 мм и длиной 10 мм на основе отходов растительной массы семенного и продовольственного топинамбура. Плотность пеллет составляла от 1200 кг/м³ до 1300 кг/м³. В процессе прокатки определялась энергоемкость процесса прессования в зависимости от величины зазора между роликами и матрицей. При этом величина зазора между прессующими роликами и матрицей изменялась в зависимости от состава перерабатываемой смеси и в среднем составляла 1-5 мм. Взаимодействие матрицы и роликов проходило через слой материала, что оказывало существенное влияние на величину давлений, прочность пеллет и производительность установки.

Результаты исследований процесса прокатки на опытно-промышленном роторном грануляторе с плоской матрицей позволили определить производительность гранулятора в диапазоне от 90 до 110 кг/ч. Установлена возможность получения топливных пеллет из отходов растительной массы

семенного и продовольственного топиамбура. Данная конструкция с модернизированной матрицей может быть использована для переработки различных типов растительных отходов в топливные пеллеты для производственных условий Заказчика - ООО «Вива» (Костромская обл.).

Директор ООО «Вива»

Советник по инновационной деятельности –
заведующий отделом технологии и
инновационных проектов

ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха»

Заместитель начальника ОИХТП ККХИ

НИЦ «Курчатовский институт»

Научный сотрудник ОИХТП ККХИ

НИЦ «Курчатовский институт»

Лаборант-исследователь ОИХТП ККХИ

НИЦ «Курчатовский институт»

Аспирант федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Московский политехнический университет»



В.В. Баранов

В.И. Старовойтов

В.И. Назаров

А.П. Попов

Г.Р. Афлятунова

Я.А. Мавлюдова

Приложение 3. Справка об использовании результатов научно-прикладных исследований по переработке сырья методами гранулирования

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха»

140051, Московская область, г. Люберцы, ул. Некрасова, д. 11

16 ноября 2023г.

г. Люберцы

СПРАВКА

об использовании результатов научно-прикладных исследований по переработке сырья методами гранулирования

Настоящим удостоверяем, что основные положения, изложенные в диссертационной работе Мавлюдовой Яны Александровны «Совершенствование процесса получения гранулированного биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов», результаты по переработке сырья (пивная дробина, лузга, растительные отходы), характеризующегося различными реологическими характеристиками и структурой поверхности, а также приведённые рекомендации по аппаратурному оформлению, реализованные в проекте промышленного роторного гранулятора с плоской матрицей, приняты к рассмотрению и могут быть использованы в профильных работах. Необходимо отметить, что постадийный контроль параметров (дисперсность, влажность, прочность) продукции позволяет обеспечить решение технологических задач производства и повышение качества готовой продукции.

Директор ВНИИК – филиала
Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
картофеля имени А.Г. Лорха»,
кандидат сельскохозяйственных наук



В.А.Бызов

«16» 11 2023 г.

Приложение 4. Справка о перспективности использования биотоплива в виде пеллет на основе органических отходов



От Председателя Правления
Союза органического земледелия, к.п.н.
С.А. Коршунова

ОГРН 1137799017399
123112, г. Москва, Пресненская
набережная, д.12, Тел./факс: +7
(495)136-99-71
электронная почта: info@soz.bio
№1 /06.10.2025
От «б» октября 2025 г.

СПРАВКА

о использовании результатов кандидатской диссертационной работы

Мавлюдовой Яны Александровны

о перспективности использования биотоплива в виде пеллет на основе органических отходов

Настоящая справка подготовлена по вопросу оценки перспективности использования биотопливных пеллет из древесных и сельскохозяйственных отходов, представленных в диссертационной работе.

В диссертационной работе Я.А. Мавлюдовой «Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов» разработан инновационный процесс переработки разнообразных органических отходов в биотопливо.

Проведенные исследования подтверждают, что полученные топливные пеллеты по ключевым свойствам (теплотворная способность, плотность, зольность) полностью соответствуют, а по некоторым параметрам превосходят стандартные древесные гранулы.

Технологический процесс основан на специальном температурном воздействии в каналах матрицы грануляционного оборудования, что обеспечивает формирование высококачественного, высококалорийного продукта в виде плотно-прочных пеллет.

В рамках исследования определена экономическая целесообразность и доказана возможность масштабирования производства. Данное биотопливо эффективно для энергообеспечения малых фермерских хозяйств, а также бытовых котлов и каминов.

Разработка признается Союзом органического Земледелия высокоперспективной, экономически целесообразной и соответствующей принципам циклической экономики. Ее внедрение способствует утилизации и рециклингу отходов, снижению углеродного следа и повышению энергетической самостоятельности сельскохозяйственных предприятий.



«6» октября 2025 г.

**С.А. Коршунов, Председатель правления
Союза органического земледелия, к.п.н**

Контактное лицо: Любеведская Анна, Директор по внешним связям Союза органического земледелия, м.т. +7-909-990-52-09, info@soz.bio

Приложение 5. Справка Комитета ESG МКПП(р) ТиНАО о практическом внедрении результатов научного исследования

Комитет по устойчивому развитию, КСО и социальному предпринимательству Территориального объединения работодателей "МОСКОВСКОЙ КОНФЕДЕРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННИКОВ И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЕЙ (РАБОТОДАТЕЛЕЙ) В ТРОИЦКОМ И НОВОМОСКОВСКОМ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ОКРУГАХ ГОРОДА МОСКВЫ"
108811, город Москва, поселение Московский, город Московский, 1-й мкр,
д. 52 Тел.: 8(926)2300702, www.mkppr-tinao.ru, e-mail: mkppr-tinao@mail.ru
ОГРН 1147799009632, ИНН/КПП 7751500514/775101001

20.10.2025 №МКПП(р)ТиНАО – ИП/2

Комитет ESG МКПП (р) ТиНАО

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы

г. Москва

«16» октября 2025 г.

Комитет по устойчивому развитию, корпоративной социальной ответственности бизнеса и социальному предпринимательству (ESG) Московской конфедерации промышленников и предпринимателей (работодателей) ТиНАО (МКППР ТиНАО), ознакомившись с диссертационной работой Мавлюдовой Яны Александровны на тему: **«Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов»** на соискание ученой степени кандидата технических наук считаем, что научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе, имеют высокую актуальность в контексте целей устойчивого развития (ESG) и соответствуют приоритетным направлениям деятельности Комитета, а именно:

1.Экология (Environmental): Разработанная технология направлена на решение проблемы утилизации крупнотоннажных отходов (растительных, древесных, техногенных), что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и соответствует требованиям федерального законодательства (ФЗ-89 «Об отходах производства и потребления»).

2.Социальное развитие (Social): Создание новых «зеленых» технологий способствует развитию малого бизнеса и фермерских хозяйств, обеспечивая их доступным и эффективным местным топливом.

3.Корпоративное управление (Governance): Работа демонстрирует пример успешного взаимодействия науки (Московский политехнический университет) и бизнеса (ООО «ВИВА»), что является образцом для внедрения инноваций в реальный сектор экономики.

Результаты диссертационного исследования, включая разработанную инженерную методику расчета параметров гранулирования, рецептуры многокомпонентных топливных гранул с улучшенными теплофизическими характеристиками и экономическое обоснование рентабельности производства (до 8,69%), могут быть использованы Комитетом МКППР ТиНАО для практического внедрения. Полученные разработки применимы для консультирования региональных предприятий по внедрению ресурсосберегающих технологий, создания методических рекомендаций по

переработке отходов для перехода на экологические стандарты ведения бизнеса.

На основании изложенного, Комитет по устойчивому развитию (ESG) МКППР ТиНАО считает целесообразным рекомендовать результаты диссертационной работы Мавлюдовой Я.А. к внедрению на предприятиях и подтверждает их практическую значимость для развития устойчивого бизнеса в ТиНАО г. Москвы.

**Руководитель
комитета
по устойчивому
развитию (ESG)
МКПП(р) ТиНАО**



Л.С.Экзарова

Контакты:
тел: + 7 999 822 12-77;
E-mail: info@esgtech.pro
exarkhos@gmail.com

**Приложение 6. Технологическая схема производства пеллет из смеси опилок и стеблей топинамбура
производительностью 250 кг/ч**

