

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева»**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Макаренков Дмитрий Анатольевич, заместитель руководителя Курчатовского комплекса физико-химических технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по технологическим процессам и аппаратам

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Севостьянов Максим Владимирович

профессор кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Капранова Анна Борисовна

начальник Управления организации научно-исследовательской и инновационной деятельности,  
заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Защита состоится «21» мая 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.09 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9, ауд. 443, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте:

[https://www.muotr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse\\_announcement](https://www.muotr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcement)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета РХТУ.2.6.09

Кандидат технических наук, доцент



В. А. Василенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Разработка технологий гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей на основе вторичных материальных 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»

В отличие от существующих производств однокомпонентных пеллет (например, из древесных отходов), данное исследование посвящено разработке 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 (МПС). Существующие технологии не учитывают реологические, структурно-деформационные и прочностные характеристики такого сырья, а также отсутствуют данные по теплофизическим свойствам готовых топливных гранул.

Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена комплексным подходом, сочетающим теоретическое и экспериментальное изучение процесса, практическую реализацию технологии гранулирования МПС и разработку уточненной инженерной методики расчета параметров гранулирующего оборудования, что позволит целенаправленно получать гранулы с заданными свойствами.

**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, включая исследование их свойств. Однако недостаточно изучены процессы гранулирования многокомпонентных смесей из различных типов отходов и при этом не учитываются их реологические свойства. Кроме того, отсутствует описание процесса уплотнения гранулируемых смесей в канале переменного сечения роторного гранулятора. В данной работе при изучении процесса гранулирования в канале учитывались пластическая прочность, коэффициент бокового давления и сыпучесть смесей. Исследованы также теплофизические и технологические свойства гранул, такие как теплотворная способность, время сгорания, зольность. Впервые для описания процесса горения многокомпонентных гранул предложена четырёхстадийная модель горения (прогрев, сушка, горение летучих, горение кокса).

**Целью данной работы** является 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.

**Задачи работы.** Для достижения поставленной цели решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. Анализ и обобщение современных методов гранулирования МПС 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 пеллет для прогнозирования качества продукции и совершенствования технологических режимов.

3. Исследование напряженно-деформационного состояния слоя частиц МПС на поверхности матрицы и разработка математического описания процесса движения материала при гранулировании в цилиндроконическом канале плоской матрицы за счёт воздействия на формуемую массу прессующих роликов.

4. Исследование процесса гранулирования топливных композиций 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 твердотопливных композиций различных составов и исследование процесса горения.

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 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 напряжённо-деформационного 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.

**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», 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, выводы, перечень литературы из 125 источников и шесть приложений. Общий

объем составляет 148 страниц печатного текста, в которых содержатся 15 таблиц и 44 иллюстрации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выполненной работы по процессам получения гранулированного биотоплива на основе древесных, растительных и техногенных отходов, обоснованы и сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен аналитический обзор литературы по использованию композиций из растительных и древесных отходов для получения топливных гранул (ТГ). Приведены составы топливных гранул и методы оценки их качества. Проанализированы отходы многотоннажных производств, являющиеся вторичными ресурсами, которые можно использовать в производстве ТГ.

Рассмотрена технология производства гранулированного биотоплива методами прессования. Проанализированы процессы гранулирования древесных и растительных отходов в роторных грануляторах с кольцевой и плоской матрицей. Показано, что при гранулировании МПС качество гранул обеспечивается за счет дополнительного ввода высококалорийных компонентов, пластифицирующих добавок и связующих. Установлено, что процесс прессования дисперсных материалов описывается уравнениями равновесия и состояния компонентов с учетом их реологических свойств, а качество гранул зависит от исходных характеристик перерабатываемого материала. Проанализировано движение материала в канале матрицы с переменным сечением и рассмотрено распределение давления по длине канала. Показано, что существующее математическое описание силовых характеристик в канале переменного сечения плоской матрицы не учитывает влияние коэффициентов бокового давления и пластической прочности.

**Во второй главе** Приведены методики проведения экспериментов и выявлена последовательность определения основных параметров. На стадии подготовки МПС важны такие параметры, как пластическая прочность и сыпучесть, обеспечивающие равномерную подачу смеси в канал. На стадии уплотнения в очаге деформации – коэффициент бокового давления, определяющий эффективность прессования.

Показана значимость целевых свойств гранул (плотность, прочность) и их теплофизических характеристик.

Пластическую прочность определяли пенетрационным методом на коническом пенетрометре модели S166 KIT по ГОСТ 30416-2020.

Сыпучесть многокомпонентных полидисперсных систем определяли на стандартном приборе по ГОСТ 25139-93. При этом выходной патрубок выполнен в виде щели прямоугольного сечения.

Компрессионные испытания проводились в закрытой матрице. Прочностные характеристики определяли на измерителях прочности таблеток и гранул YD-2 и ИПГ-1М по ГОСТ 21560.2-82.

Установка с матрицей проходного прессования с нагревательным устройством и тензодатчиками, позволяющая определять коэффициенты бокового давления и изменение температуры в процессе прессования, изображена на рисунке 1.



Рисунок 1 – 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

Исследование процесса гранулирования МПС проводили на опытно-промышленном роторном грануляторе с определением производительности, удельной энергоёмкости и деформационных характеристик полученных гранул.

Теплофизические свойства гранул (теплотворная способность, зольность) определяли на калориметре модели АБК-1В по ГОСТ 143-2013.

**В третьей** главе проанализировано напряжённо-деформационное состояние материала и динамика изменения давления при перемещении смеси по каналу матрицы. Выявлен механизм гранулообразования в зоне контакта ролика с матрицей

и в цилиндрикоконическом канале. Разработано математическое описание процессов уплотнения МПС, протекающих в канале матрицы с учётом воздействия прокатывающих роликов на формуемую массу.

В ходе движения ролика формуемая масса подвергается постепенному уплотнению, что приводит к возникновению в прессовке внутреннего напряжения.

Динамика уплотнения МПС зависит от режимов приложения деформирующего усилия, физико-химических свойств и сопровождается образованием новых структурных связей. Формирование гранул происходит поэтапно через ряд взаимосвязанных стадий.

Как показано на рисунке 2, распределение давлений в очаге деформации определяется угловыми параметрами: углом захвата  $\alpha_3$  и углом формования  $\alpha_\phi$ .

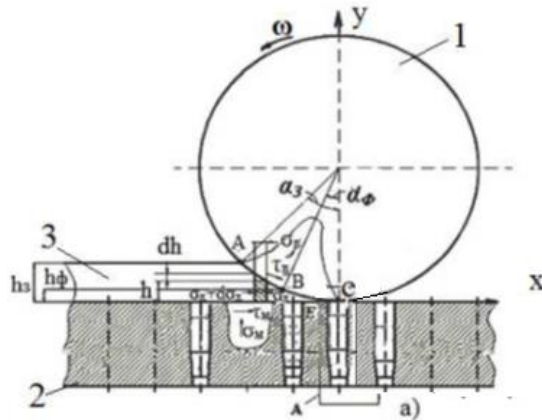


Рисунок 2 – Кинематическая схема силового взаимодействия при гранулировании: 1 – формообразующий ролик; 2 – перфорированная матрица; 3 – слой перерабатываемого материала

Уравнение распределения контактных напряжений для зоны уплотнения:

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

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

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

$\alpha$  – текущий угол, соответствующий длине дуги зоны прессования, рад;

$\alpha_\phi$  – угол формования, рад;

$\varphi$  – угол внутреннего трения, рад;

$\sigma_{\text{ср}}$  – среднее нормальное напряжение, Па;

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

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

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

$C$  – сцепление материала, Па;

$\xi$  – коэффициент бокового давления;

$f$  – коэффициент внешнего трения материала о стенку канала матрицы.

Уравнение распределения контактных напряжений для зоны формирования:

$$\sigma_B(\alpha) = B \cdot \exp B \left[ \left( \frac{1}{\alpha_\phi} - \frac{1}{\alpha} \right) \right], \quad (2)$$

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

Разработанные аналитические зависимости (1) и (2) дают возможность рассчитать усилие деформирования при известных реологических характеристиках исходного сырья.

Далее было проанализировано взаимодействие сил, действующих на материал в канале проходного прессования в соответствии со схемой на рисунке 3.

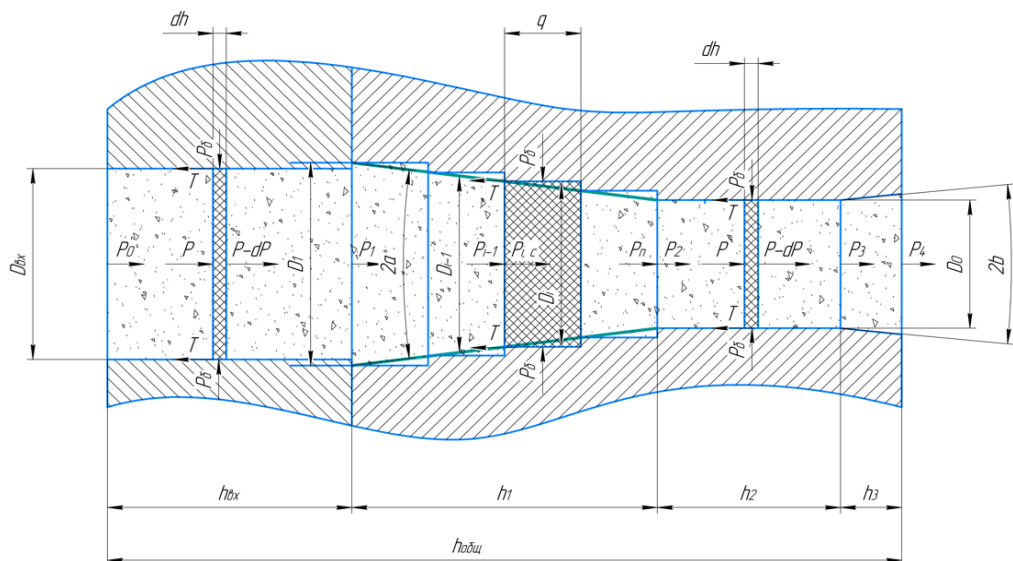


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на материал в канале проходного прессования с заменой конической поверхности на цилиндры с делением на n-ое количество ступеней

Уравнения силы трения и давления на боковую поверхность имеют вид:

$$dT = -\pi \cdot d \cdot P \cdot f \cdot \xi \cdot dl, \quad (3)$$

$$P_6 = P \cdot \xi, \quad (4)$$

где  $dT$  – сила трения материала о стенку канала на длине  $dl$ , Н;

$d$  – диаметр элемента в конической части канала, м;

$P$  – давление в канале на данном участке, Па;

$dl$  – длина элемента в конической части канала, м

При этом были приняты ряд допущений: 1) в цилиндрической части канала фильеры из-за влияния коэффициента бокового давления и коэффициента внешнего трения  $f$ , давление в конце цилиндрической части падает; 2) конический канал разбиваем на  $n$  равных участков; 3) для решения уравнений равновесия применяется кусочно-аналитический метод, основанный на разбиении расчётной области на конечные элементы.

После ряда принятых допущений и формы записи сил, действующих на материал в цилиндрическом канале, было получено значение давления  $P_1$  и  $P_3$  в виде:

$$P_1 = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_{\text{вх}}} \cdot f \cdot \xi \cdot h_{\text{вх}}\right) \quad (5)$$

$$P_3 = P_2 \cdot \exp\left(-\frac{4}{D_0} \cdot f \cdot \xi \cdot h_2\right) \quad (6)$$

Таким образом на 1 и 3 участке рабочее давление снижается по экспоненциальному закону.

Решение задачи о изменении давления по длине формирующего канала конического сечения сводится к решению дифференциального уравнения второго порядка. Для упрощения расчета приняли коническую поверхность в виде конического цилиндра с делением на ступени. После ряда преобразований получили уравнение для определения давления на коническом участке:

$$P_2 = P_n \cdot \frac{D_n^2}{D_0^2} \quad (7)$$

Рабочее давление  $P_2$  в конической части канала длиной  $h_1$  увеличивается, с одной стороны, за счет сужения канала и в тоже время уменьшается из-за трения материала о стенки канала. Рост или падение давления в канале переменного сечения будет зависеть от свойств гранулируемой смеси, геометрических размеров канала и качества его поверхности.

На коническом участке длиной  $h_3$  в результате увеличения сечения канала запрессованный материал под действием остаточных внутренних напряжений изменяет свои размеры за счет упругого последействия и давление  $P$  на материал уменьшается до нуля.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований основных характеристик МПС и топливных гранул.

На рисунке 4 приведены зависимости изменения пластической прочности  $R_m$  от влажности смесей различных составов.

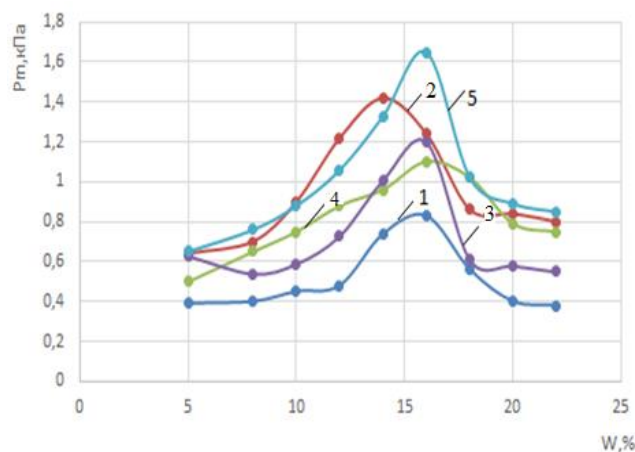


Рисунок 4 – Зависимость изменения пластической прочности  $R_m$ , кПа от влажности  $W$ , %: 1 – смесь №1; 2 – смесь №6; 3 – смесь №5; 4 – смесь №2; 5 – смесь №9

Из графиков видно, что экстремум кривых соответствует максимально возможной прочности структурных связей. При данных условиях он определяет критическую величину влажности в диапазоне 12-18%.

На рисунках 5 и 6 приведены графические зависимости изменения сыпучести от величины зазора дозатора и влажности смеси.

На рисунке 5 видно, что зависимость от величины зазора для смесей № 1, 2 и 5 носит линейный характер, а для смесей № 6 и 9, содержащих торф – экспоненциальный. Согласно рисунку 6, при увеличении влажности от 8 до 18 % сыпучесть уменьшается в среднем в 2–3 раза и определяется типом связующего.

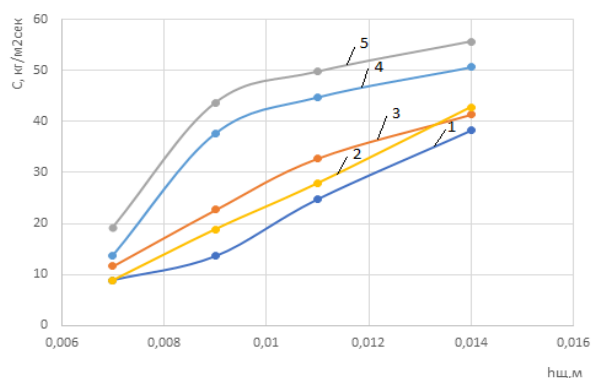


Рисунок 5 – Зависимость сыпучести МПС ( $C$ , кг/(м<sup>2</sup>сек)) от величины зазора  $h$ , м: 1 – смесь №1; 2 – смесь №2; 3 – смесь №5; 4 – смесь №6; 5 – смесь №9

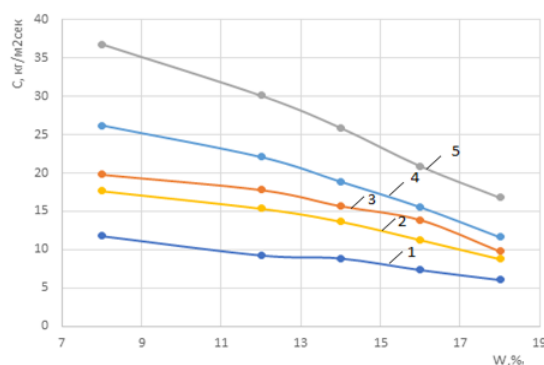


Рисунок 6 – Зависимость сыпучести МПС ( $C$ , кг/(м<sup>2</sup>сек)) от влажности  $W$ , % при величине зазора 9 мм: 1 – смесь №1; 2 – смесь №6; 3 – смесь №2; 4 – смесь №9; 5 – смесь №5

При прессовании в закрытой матрице определяли зависимость плотности и прочности прессовок от удельного давления и влажности. Из рисунка 7 видно, что

при насыпной плотности смесей  $250 \text{ кг/м}^3$  плотность прессовок изменялась от (800-1200)  $\text{кг/м}^3$  с получением плотнопрочных прессовок при  $P_{\text{уд}} = 40 \text{ МПа}$ .

Из данных рисунка 8 следует, что при увеличении удельного давления и изменения влажности прочность прессовок растет в диапазоне от 0,01 до 0,25 МПа для различных составов смесей.

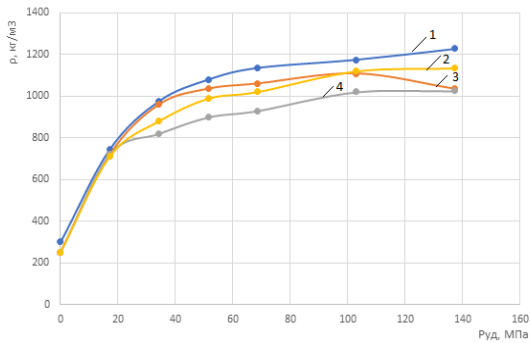


Рисунок 7 – Зависимость плотности прессовок  $\rho$  от удельного давления прессования  $P_{\text{уд}}$  при исходной влажности МПС: 1 – смесь 9 - Висх.=14,9%; 2 – смесь 12- Висх.=12,4%; 3 – смесь 10- Висх.=11,1%; 4 – смесь 11- Висх.=8,7%

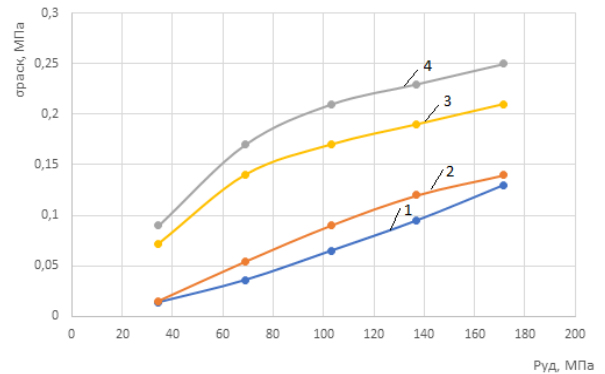
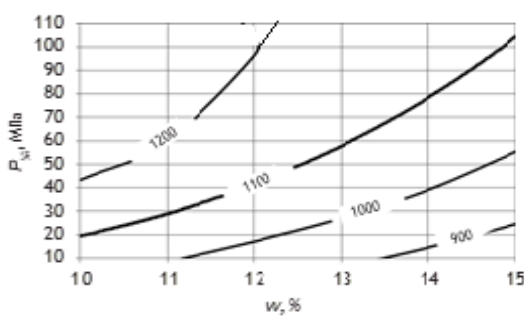


Рисунок 8 – Зависимость изменения прочности прессовок на раскалывание  $\sigma_{\text{раск}}$  от удельного давления прессования  $P_{\text{уд}}$  и пластической прочности  $P_{\text{М}}$  для различных составов смеси № 1: 1 – при  $P_{\text{М}} = 0,4 \text{ кПа}$ ,  $W = 9 \%$ ; 2 – при  $P_{\text{М}} = 0,5 \text{ кПа}$ ,  $W = 11 \%$ ; 3 – при  $P_{\text{М}} = 0,6 \text{ кПа}$ ,  $W = 18 \%$ ; 4 – при  $P_{\text{М}} = 0,8 \text{ кПа}$ ,  $W = 16 \%$

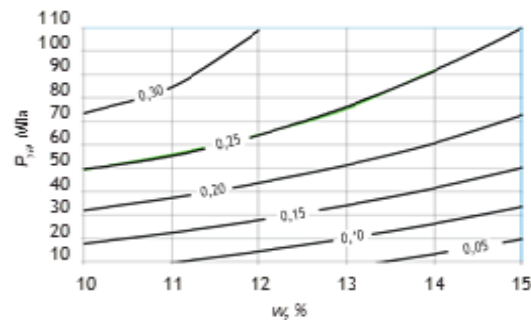
При исследовании гранулирования смеси №2 использовали многофакторное планирование эксперимента. Были получены уравнения регрессии второго порядка и построены номограммы, представленные на рисунке 9:

$$\rho = 1430,5 - 49,34w + 6,82P_{\text{уд}} - 0,084wP_{\text{уд}} + 0,042w^2 - 0,029P_{\text{уд}}^2 \quad (8)$$

$$\sigma = 0,141 + 0,0039w + 0,0042P_{\text{уд}} + 3,2 \cdot 10^{-5}wP_{\text{уд}} - 0,00104w^2 - 2 \cdot 10^{-5}P_{\text{уд}}^2 \quad (9)$$



а



б

Рисунок 9 – Номограммы зависимости плотности  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$  (а) и предела прочности на раскалывание  $\sigma_{\text{раск}}$ , МПа (б) топливных гранул от удельного давления прессования  $P_{\text{уд}}$ , МПа и влажности  $W$ , %

На рисунке 10 представлена зависимость бокового давления  $\zeta$  в канале проходного прессования от удельного давления прессования в интервале 0,3–0,56. Полученные экспериментально коэффициенты бокового давления являются важным входным параметром при описании процесса гранулирования в матрице с каналами переменного сечения.

На рисунке 11 приведена зависимость изменения предела прочности прессовок на раскалывание  $\sigma_{\text{раск}}$  от температуры нагрева  $t_{\text{нагр}}$ . Установлено, что с повышением температуры происходит дополнительное взаимодействие между частицами с протеканием твердофазных реакций. Это упрочняет структуру гранул.

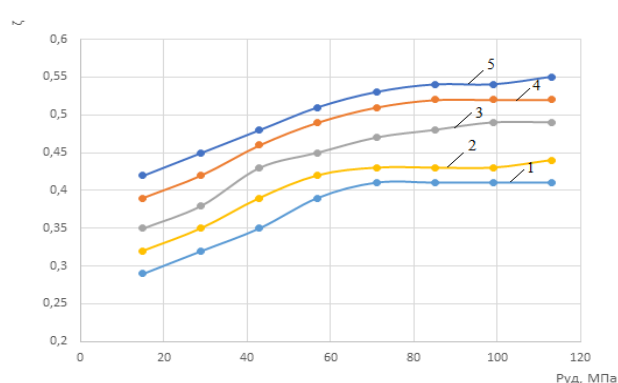


Рисунок 10 – Зависимость изменения коэффициента бокового давления  $\zeta$  от удельного давления прессования Руд, МПа: 1 – смесь №9; 2 – смесь №2; 3 – смесь №5; 4 – смесь №6; 5 – смесь №1

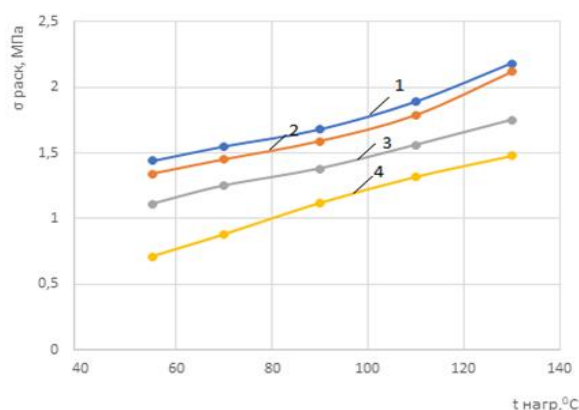


Рисунок 11 – Зависимость изменения предела прочности прессовок на раскалывание  $\sigma_{\text{раск}}$  от температуры нагрева  $t_{\text{нагр}}$  при различной конусности матрицы для смеси №9: 1 –  $\alpha=1$ град, 2 –  $\alpha=2$ град, 3 –  $\alpha=3$ град, 4 –  $\alpha=4$ град

В третьей главе приведены уравнения (5–7), которые позволяют рассчитать процесс гранулирования в каналах матрицы. Используя полученные экспериментальные значения  $\xi$  при  $P_0 \approx 20$  МПа ( $\xi = 0,42; 0,40; 0,37; 0,33; 0,3$ ) и  $P_0 \approx 50$  МПа ( $\xi = 0,5; 0,47; 0,45; 0,42; 0,38$ ) и задав фиксированные геометрические параметры канала матрицы:  $D_{\text{вх}} = 8$  мм;  $D_0 = 6$  мм;  $h_{\text{вх}} = 19$  мм;  $h_1 = 19,5$  мм;  $h_2 = 7,5$  мм;  $h_3 = 4$  мм;  $f = 0,2$  в среде разработки PyCharm на языке Python были построены эпюры распределения давления для пяти типов топливных смесей, содержащих опилки, лузгу, пивную дробину, торф, пирокарбон, листья и связующее. Эпюры распределения давления по длине канала для пяти типов смесей представлены на рисунке 12. Установлено, что увеличение давления на входе в канал приводит к росту бокового давления.

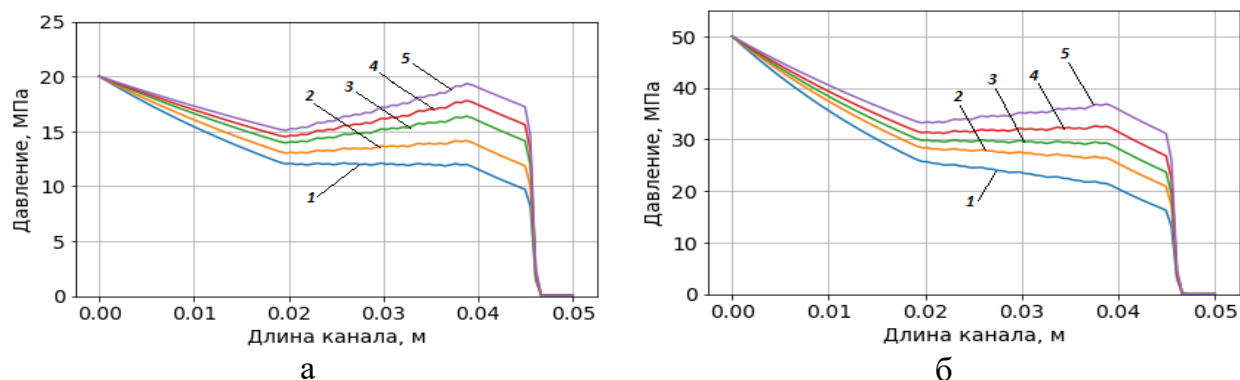


Рисунок 12 – Распределение давлений в канале переменного сечения плоской матрицы роторного гранулятора в зависимости от состава смеси при начальном давлении валка: а –  $P = 20$  МПа; б –  $P = 50$  МПа; (1 – смесь №9; 2 – смесь № 6; 3 – смесь № 5; 4 – смесь № 2; 5 – смесь № 1)

Для смеси № 2 была получена эпюра давлений в канале в зависимости от угла  $2\alpha$ , она показана на рисунке 13.

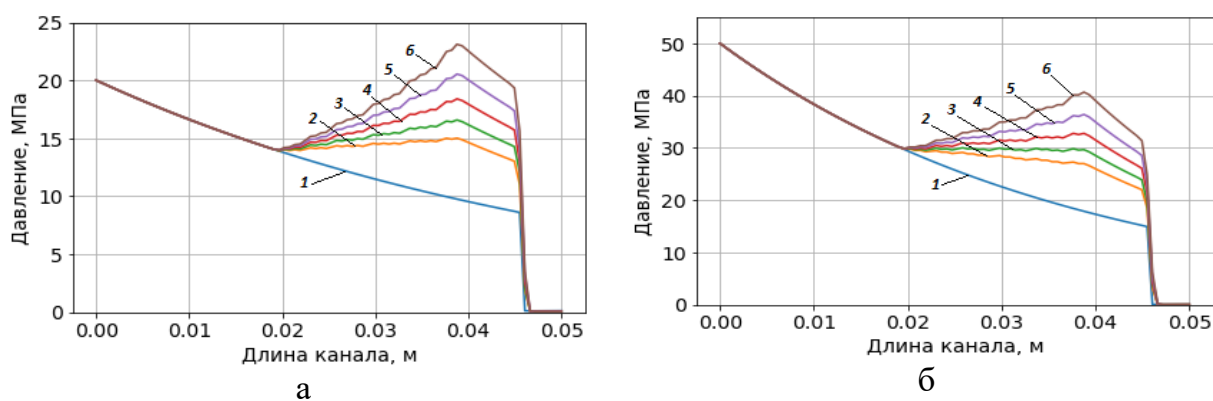


Рисунок 13 – Распределение давлений в канале переменного сечения плоской матрицы роторного гранулятора в зависимости от угла  $2\alpha$  при вершине конуса на втором участке: а –  $P = 20$  МПа; б –  $P = 50$  МПа; при угле конуса  $2\alpha$  (1 – 0; 2 – 5°; 3 – 6°; 4 – 7°; 5 – 8°; 6 – 9°)

Графические зависимости позволяют подобрать угол при вершине конуса. Однако при большой конусности могут образовываться пробки в канале, что приводит к остановке технологического процесса.

В работе приведены результаты исследования теплофизических характеристик ТГ (теплотворная способность, зольность) и особенности процесса горения гранул. На рисунках 14 и 15 представлены зависимости изменения теплотворной способности и зольности гранул от содержания основного компонента для различных типов МПС.

При исследовании процесса горения гранул определяли температуру загорания  $T$ , время сгорания  $\tau_1$ , зольность и время нагрева до начала загорания  $\tau_2$ .

Графические зависимости изменения времени нагрева до начала загорания различных смесей от плотности прессовок представлены на рисунке 16.

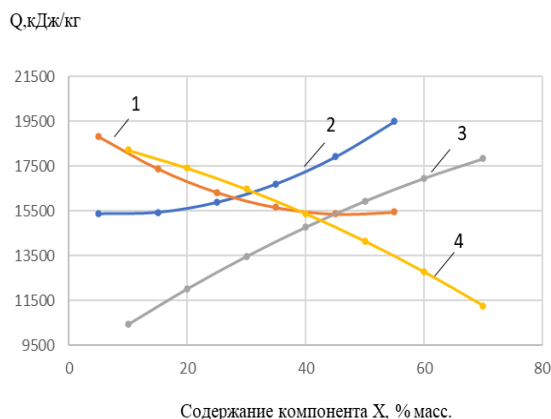


Рисунок 14 – Зависимость теплотворной способности гранул  $Q$ , кДж/кг от содержания компонента в смеси  $X$ , % масс.: 1 – смесь №1 на основе торфа; 2 – смесь №1 на основе пивной дробины; 3 – смесь №2 на основе лузги подсолнечника; 4 – смесь №2 на основе торфа

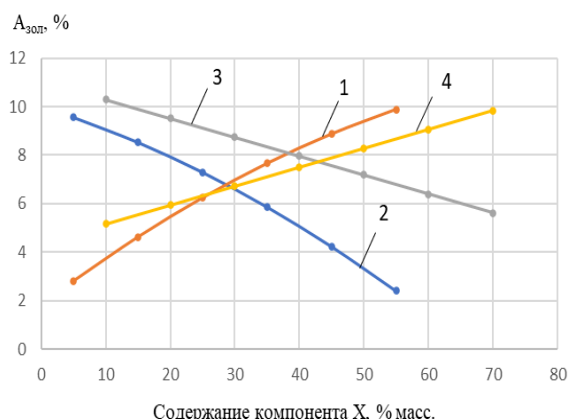


Рисунок 15 – Зависимость зольности гранул  $A_{\text{зол}}$ , % масс. от содержания компонента в смеси  $X$ , % масс.: 1 – смесь №1 на основе торфа; 2 – смесь №1 на основе пивной дробины; 3 – смесь №2 на основе лузги подсолнечника; 4 – смесь №2 на основе торфа

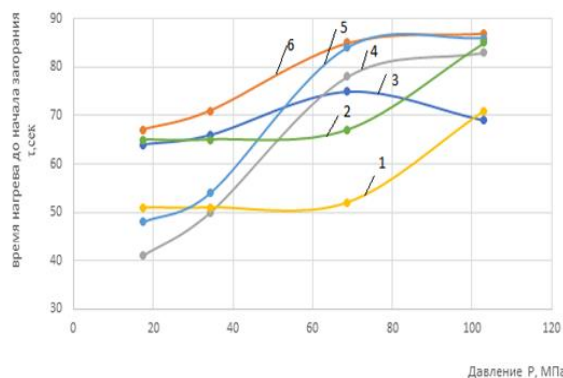


Рисунок 16 – Зависимость времени нагрева до начала загорания  $\tau$ , сек от давления  $P$ , МПа: 1 – смесь №6 при  $W=15\%$ ; 2 – смесь №9 при  $W=15\%$ ; 3 – смесь №1 при  $W=19\%$ ; 4 – смесь №5 при  $W=18\%$ ; 5 – смесь №7 при  $W=11\%$ ; 6 – смесь №2 при  $W=14\%$

Была установлена многостадийность процесса горения, протекающего в четыре стадии. Общее время горения  $TГ$  определяется по формуле:

$$\tau = \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{суш}} + \tau_{\text{л}} + \tau_{\text{с}} \quad (10)$$

где:  $\tau_{\text{пр}}$  – прогрев частицы до выхода или воспламенения летучих веществ;  $\tau_{\text{суш}}$  – сушка топлива;  $\tau_{\text{л}}$  – горение летучих веществ;  $\tau_{\text{с}}$  – горение коксового остатка, состоящего из углерода.

К важным результатам работы относятся исследования энергосиловых параметров процесса прокатки на опытно-промышленном роторном грануляторе с плоской матрицей. На рисунках 17, 18, 19 представлены зависимости изменения удельной энергоемкости и производительности гранулятора от различных параметров.

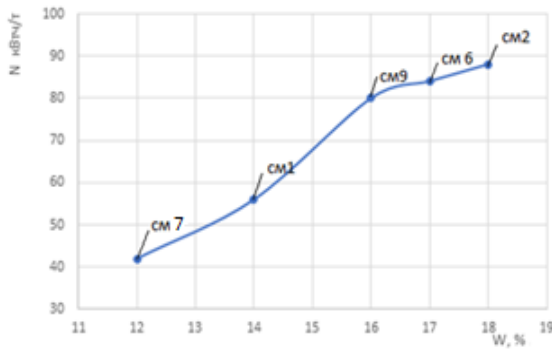


Рисунок 17 – Зависимость удельной энергоёмкости  $N$ , кВтч/т процесса прокатки для пяти смесей от влажности МПС  $W$ , %

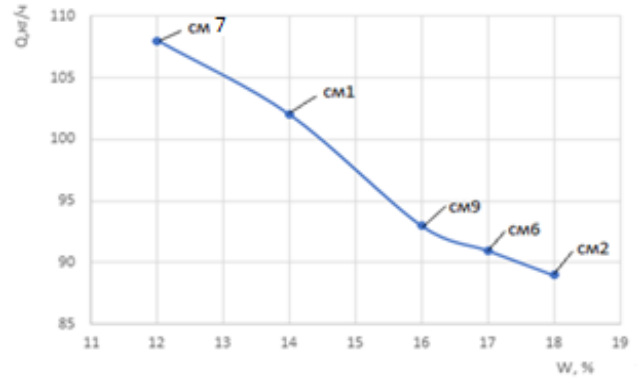


Рисунок 18 – Зависимость производительности гранулятора  $Q$  кг/ч от влажности МПС  $W$ , %

Выявлено, что при прокатке необходимо минимизировать зазор между матрицей и роликом за счет изменения толщины прокатываемого слоя. Согласно рисунку 20, рабочий диапазон зазора составляет 0,5–1,5 мм.

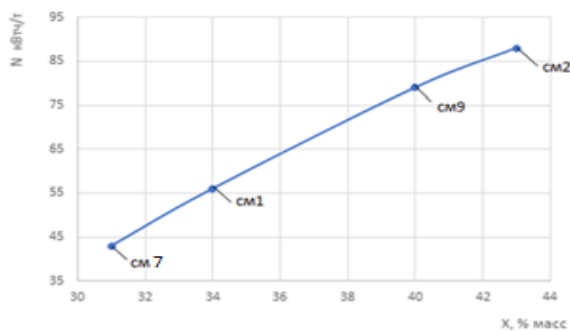


Рисунок 19 – Зависимость удельной энергоёмкости  $N$ , кВтч/т процесса прокатки от содержания целевого компонента  $X$ , % масс. (опилки) в смеси МПС

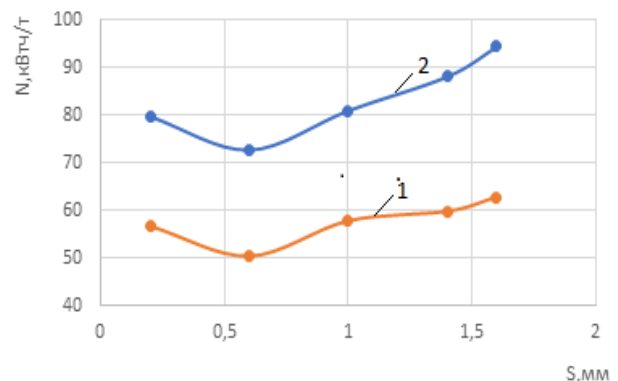


Рисунок 20 – Зависимость энергоёмкости процесса прокатки  $N$ , кВтч/т от величины зазора  $S$ , мм между роликами и матрицей: 1 – смесь №1; 2 – смесь №9

На основании проведенных исследований разработана технологическая схема производства топливных гранул из растительных и древесных отходов производительностью 250 кг/ч (рисунок 21). Производство пеллет осуществляется следующим образом. Исходные компоненты (стебли топинамбура и опилки) измельчаются в измельчителе (ИИС) и ножевой дробилке (ДН), затем смешиваются со связующим (водные растворы лигносульфоната или лигнопана) в смесителе (СП). Полученная смесь поступает в промежуточный бункер (ПБ), а затем – в роторный

гранулятор с плоской матрицей с каналами переменного сечения (РГ). Готовые гранулы направляются в накопительный бункер (ПБ2) и на упаковку.

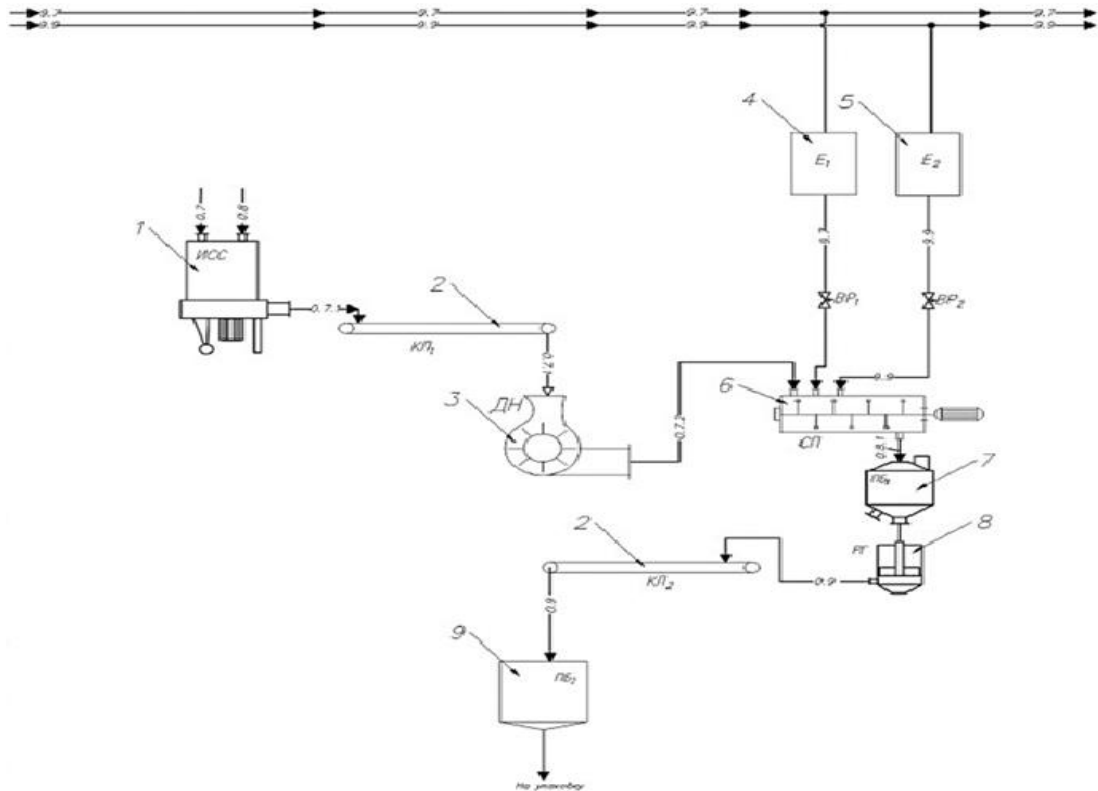


Рисунок 21 – Технологическая схема производства топливных гранул из растительных и древесных отходов производительностью 250 кг/ч

**В пятой главе** приведена инженерная методика расчета процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей. Разработан алгоритм расчёта энергосиловых параметров роторного гранулятора в виде блок-схемы. Проведен экономический анализ производства топливных гранул из МПС. Показано, что использование многокомпонентных отходов по сравнению с чистыми опилками позволило добиться рентабельности производства в 6 %. Комплексная технология гранулирования апробирована на примере производства гранул из топинамбура для условий предприятий ООО «ВИВА» (Костромская область).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, пирокарбона.

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 на роторном грануляторе с плоской матрицей и получены зависимости производительности и удельной энергоемкости от состава смесей и их влажности.

7. Выявлен 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 цилиндроконические каналы. Приведена блок-схема алгоритма расчета энергосиловых параметров.

9. Разработана технологическая схема производства топливных гранул из растительных и древесных отходов производительностью 250 кг/ч. Технология получения топливных гранул в роторном грануляторе передана в ООО «ВИВА», Костромская область, для гранулирования отходов клубнеплодных культур.

10. Установлено, что использование многокомпонентных отходов по сравнению с чистыми опилками при снижении себестоимости на 21 % позволило добиться рентабельности производства в 6 %.

11. Методика расчета параметров процесса получения топливных гранул передана в Московский политехнический университет и используется в учебном процессе магистратуры 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ**

1. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Мавлюдова Я.А., Краморова С.Н. 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. (**GeoRef, Scopus**)

2. 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. (**Scopus**)

3. 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. (**Scopus**)

4. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Афлятунова Г.Р., Мавлюдова Я.А., Пинигин И.В., Попов А.П. Экологические аспекты комплексной технологии переработки литий-кобальтовых аккумуляторов и органических отходов с получением целевых продуктов в виде гранул // Metallurg. – 2023. – №9. – С.113-120. (**Scopus**)

5. 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. **(GeoRef)**

6. 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. **(GeoRef, Scopus)**

7. 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. Трефилова** // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2013. – №1. – С. 49-64. **(ВАК)**

8. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Мавлюдова Я.А. Особенности процесса гранулирования топливных композиций методом прокатки на роторных грануляторах / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, **Я.А. Мавлюдова** // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – №1. – С. 42-49. **(ВАК)**

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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 ноября 2025 г. / Под общ. ред. В.П. Мешалкина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С.47–50

15. 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.