

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Мавлюдовой Яны Александровны  
«Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных  
древесных ресурсов и растительных отходов»,  
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий

### Актуальность темы исследования

Работа посвящена разработке процессов гранулирования низкосортных вторичных материальных ресурсов (ВМР), образующихся в агропромышленном и лесоперерабатывающем комплексах. Получаемые при этом цилиндрические гранулы (пеллеты), с одной стороны, позволяют снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду и, в то же время, обеспечивают получение биотоплива, используемого в фермерских хозяйствах и энергетических котлах небольшой мощности. Используемые при этом роторные грануляторы с кольцевой матрицей являются достаточно сложными в эксплуатации, приводят к образованию просыпи (несгранулированных частиц) и имеют повышенное энергопотребление.

Разрабатываемый в диссертационной работе процесс гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей (МПС) при использовании роторного гранулятора с плоской матрицей учитывает их реологические и структурно-деформационные характеристики. Разработанные по результатам экспериментальных исследований инженерные методики комплексного расчёта процесса гранулирования в роторном грануляторе с плоской матрицей позволяют использовать их и в других отраслях. Таким образом, диссертационное исследование Я.А. Мавлюдовой, направленное на разработку научных основ и инженерной методики гранулирования МПС, является своевременным и актуальным. Это также подтверждается ее соответствием направлениям, заложенным в федеральных законах № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 г. и № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г.

Автором решались следующие задачи:

1. Изучение особенностей переработки МПС при реализации процессов подготовки и гранулирования в роторном грануляторе с исследованием реологических и структурно-деформационных характеристик перерабатываемых смесей.
2. Исследование процесса гранулирования смесей в закрытой матрице и модельном цилиндроконическом канале проходного прессования с нагревом.
3. Исследование поведения слоя МПС на поверхности матрицы, механизма движения материала через ее канал переменного сечения и получение математического описания процесса прессования при движении материала в цилиндроконическом канале.
4. Определение теплофизических характеристик и исследование процесса горения твердотопливных композиций.

#### **Основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 125 источников и шести приложений. Работа изложена на 148 страницах, содержит 15 таблиц и 44 рисунка.

*Во введении* представлены актуальность темы исследования процессов получения гранулированного биотоплива на основе растительных, древесных и техногенных отходов, степень разработанности темы и цель диссертационной работы. Рассмотрена теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведена информация об апробации и публикации основных результатов диссертационной работы.

*В первой главе* соискателем представлен аналитический обзор современной научно-технической литературы по проблематике гранулирования биотоплива. Приведены составы топливных гранул (ТГ) и методы оценки их качества. Проанализированы виды и характеристики отходов многотоннажного производства, которые можно использовать в производстве ТГ.

Проведён анализ составов, методов оценки качества и обоснован выбор компонентов топливных гранул. Рассмотрены существующие технологии компактирования смесей способами прессования и прокатки в роторных грануляторах, а также конструкции применяемого оборудования. Рассмотрены реологические свойства и особенности деформирования гранулируемых смесей.

В качестве объектов исследования выбраны процессы получения прессовок из МПС методом прессования в закрытой матрице, процесс получения пеллет на роторном грануляторе с плоской матрицей в каналах переменного сечения, а также процесс горения ТГ со сложной морфологической структурой, протекающий в четыре стадии.

Показано, что существующие методики расчёта энергосиловых характеристик процесса прокатки в роторных грануляторах с плоской матрицей не учитывают структурно-деформационные и реологические характеристики МПС, а также их поведение при силовом воздействии в каналах переменного сечения матрицы. На основе проведённого анализа сформулированы цель и задачи исследования.

*Во второй главе* диссертации описана методика проведения экспериментов, сформированная для решения поставленных задач. Представлены экспериментальные установки, предназначенные для исследования процессов прессования и прокатки МПС, оборудование для определения реологических характеристик смесей, структурно-деформационных характеристик прессовок и пеллет. Рассмотрена конструкция пилотного роторного гранулятора с плоской матрицей и каналами переменного сечения. Также представлена конструкция калориметра для изучения сгорания бомбового АБК-1В и методика исследования теплофизических свойств получаемых пеллет.

*В третьей главе* представлены результаты расчётно-аналитического исследования динамики изменения давления при перемещении гранулируемой смеси по поверхности матрицы и в канале переменного сечения роторного гранулятора с плоской матрицей.

Были получены основные уравнения для расчёта контактных напряжений в технологических зонах уплотнения и формования. Эти уравнения учитывают особенности внутреннего трения и пластической прочности материала, описывают граничные условия процессов, протекающих внутри канала. Характерным является математическое описание процесса гранулирования в канале переменного сечения.

На основе анализа баланса сил, действующих на элементарный объём материала, получена система уравнений, описывающая распределение давления по длине цилиндроконического канала. Предложенная математическая модель учитывает условия процесса прокатки. Это реологические свойства сырья, а также значения коэффициента бокового распора и силы внешнего трения. Приведённая схема силового воздействия на материал при его гранулировании позволяет прогнозировать процесс движения частиц от начального контакта материала с роликом на поверхности матрицы до выхода готовых гранул после прессования в фильерах.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования зависимости реологических характеристик исследуемых смесей от их влажности и состава. С использованием многофакторного планирования эксперимента получены регрессионные уравнения и номограммы, позволяющие рассчитать плотность и прочность гранул в зависимости от влажности и удельного давления прессования. Также были получены зависимости для определения коэффициентов бокового распора ( $\xi$ ) для смесей различного состава как при проходном прессовании, так и при прессовании в закрытой матрице.

Полученные экспериментальные данные были использованы при математическом описании процесса движения материала через цилиндроконический канал матрицы. Программная реализация расчётной модели осуществлялась с использованием языка программирования Python. В результате были построены эпюры распределения давления по длине канала для пяти типов смесей. Полученные графические зависимости показывают комплексное влияние

реологических свойств сырья и геометрии канала матрицы на силовые параметры процесса прокатки.

Необходимо отметить выполненный в работе комплекс теплофизических исследований, посвященных горению пеллет из многокомпонентных полидисперсных смесей (МПС). Были определены теплотворная способность и зольность гранул, а также предложена четырехстадийная модель их горения.

Результаты исследований теплофизических характеристик пеллет, имеющие определенную новизну, позволяют также эффективно использовать данный вид топлива при эксплуатации котельного оборудования фермерских хозяйств.

Исследования процесса гранулирования смесей в пилотном роторном грануляторе с плоской матрицей позволили получить зависимости производительности и удельных энергозатрат от влажности и состава смесей. Это позволяет оценить этапы проведения технологического цикла от состава исходных смесей до получения пеллет с заданными структурно-деформационными и теплофизическими свойствами.

В пятой главе на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана инженерная методика и алгоритм расчёта технологических параметров роторного гранулятора с плоской матрицей. Разработанную методику можно использовать при проектировании и наладке технологического оборудования.

В работе приведён сравнительный экономический анализ разработанной технологии производства топливных гранул из многокомпонентных смесей с существующими локальными технологиями местного производства (древесных опилок).

Разработанная технология передана для внедрения на предприятие ООО «ВИВА» и показана ее рентабельность при производстве гранул из композиционных смесей.

*Заключение* содержит основные результаты диссертационной работы.

#### **Научная новизна диссертации**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан механизм гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей (МПС) в роторном грануляторе с плоской матрицей, позволяющий учитывать реологические свойства материалов. Получено математическое описание, отражающее изменение напряжённо-деформационного состояния смеси, а также эпюры распределения давления по длине цилиндроконического канала.

2. С использованием анализа полученных уравнений регрессии многофакторного планирования эксперимента и построенной номограммы разработана методика определения плотности и прочности прессовок при различных технологических режимах работы роторного гранулятора.

3. Разработаны стадии и определены закономерности горения полученных топливных гранул. Установлено, что время воспламенения гранул составляет 40–87 с и зависит от их состава и плотности, а продолжительность полного сгорания определяется геометрическими размерами пеллет, влияющими на механизм окисления при сжигании гранул различной рецептуры.

4. Для технологических режимов проходного прессования в закрытой матрице определены физико-механические параметры силового воздействия: коэффициенты бокового давления, пластическая прочность и сыпучесть полученной продукции. Установлены закономерности процесса формирования гранулята от технологических параметров (влажности смесей, давления прессования и др.).

#### **Теоретическая и практическая значимость диссертации:**

1. Разработаны рекомендации по усовершенствованию конструкции роторных грануляторов с плоской матрицей и каналами переменного сечения, которые включают в себя применение фильер с каналами переменного сечения. Усовершенствованы методики определения реологических свойств сырьевых смесей и методы инженерных расчетов процесса гранулирования.

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. Разработанная технология получения пеллет в роторном грануляторе с плоской матрицей передана для внедрения на предприятие ООО «ВИВА», (Костромская область), используется в учебном процессе Московского политехнического университета, а также для проведения исследовательских работ в ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха.

4. Предложено комплексное математическое процесса гранулирования многокомпонентных полидисперсных смесей (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.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования обусловлены** большим объёмом экспериментальных данных, корректным использованием теоретических основ, расчётными зависимостями на их основе, а также метрологически аттестованными средствами измерений.

#### Публикации

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

#### Замечания по диссертационной работе

1. В главе 3 автором представлены результаты теоретических исследований процессов предуплотнения и формования материала в фильерах роторного гранулятора (с.61-72). Было бы целесообразно указать научную новизну представленных расчетов, учитывающих специфические особенности используемых смесей, а также соответствие размерностей силовых нагрузок:  $\xi = \frac{q}{P}; 1/q, P/\text{Н/м}^2; F_{\text{тр}} = P \cdot f/\text{Н/м}^2 = \text{Н}$  (с.68).

2. При получении топливных гранул в роторном грануляторе с плоской матрицей используются давления 10–50 МПа (с.88-90, рис. 34-35). В то же время,

в оборудовании экструдированного типа используется давление для вязкопластичных материалов (3-5) МПа. Необходимо пояснить теоретическое и экспериментальное обоснование необходимости применения таких режимов при низком значении коэффициента трения ( $f=0,2$ ).

3. Пирокарбон введён в состав как инициатор горения (с.16,74,105). В работе исследованы теплотворная способность и зольность (с.92-94, рис. 36-37). Вопросы эмиссионных характеристик дымовых газов не рассматривались, что не снижает ценности полученных результатов, но может быть рекомендовано для дальнейших исследований.

4. Результаты диссертационной работы имеют практическое значение для различных технологий переработки органических и неорганических материалов. В связи с этим, в главе, посвященной промышленным испытаниям (с.100-107), целесообразно было бы указать области использования научно-технических разработок, оформленных в виде протоколов технических советов ИТР предприятий.

5. Промышленная апробация проведена для отходов одной культуры – топинамбур (Приложение 2, с.140-142). Необходимо пояснить возможность масштабируемости и универсальности разработанной методики расчета для гранулирования МПС принципиально иного морфологического состава (например, с высоким содержанием травянистых компонентов или жировых отходов).

6. Отсутствие в работе патентозащищенных технических решений снижает доказательную базу новизны и практической значимости разработок, хотя в диссертации разработаны отдельные способы и устройства для их последующего патентования.

Однако указанные замечания не снижают ценности научной и технической значимости диссертационной работы и не влияют на общую положительную оценку полученных результатов.

### **Соответствие диссертации предъявляемым требованиям**

Диссертационная работа Мавлюдовой Я. А. на тему: «Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов» соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий в части: п. 6. Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратного оформления; п.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.

### **Заключение**

Диссертационная работа Мавлюдовой Яны Александровны «Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решается важная научно-техническая задача.

Результаты работы внедрены на промышленном предприятии и в учебном процессе, что подтверждается актами внедрения. Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений, поскольку предложенные технические решения направлены на переработку доступного вторичного сырья и снижение нагрузки на окружающую среду.

По результатам исследования опубликовано необходимое количество печатных работ в рецензируемых изданиях. Оформление диссертации и автореферата выполнено в соответствии с требованиями, изложение выстроено логично. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Структура диссертации соответствует логике исследования, каждый раздел содержит аргументированные выводы, что позволяет проследить ход решения

поставленных задач. Автор демонстрирует владение современными методами экспериментальных исследований и математической обработки данных.

Диссертационная работа Мавлюдовой Яны Александровны на тему: «Совершенствование процесса гранулирования биотоплива на основе вторичных древесных ресурсов и растительных отходов»,

соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, а ее автор, Мавлюдова Яна Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий.

27.04.2026

Официальный оппонент  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технологические  
комплексы, машины и механизмы»  
БГТУ им. В.Г. Шухова

  
Севостьянов Максим Владимирович  
удостоверяю  
общего отдела

Подпись Севостьянова Максима Владимировича заверяю:  
Проректор по научной и инновационной деятельности  
БГТУ им. В.Г. Шухова  
д-р пед. наук, профессор

Давыденко Татьяна Михайловна

Адрес федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова): 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46; тел.+7(70, e-mail: p