

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»



На правах рукописи

ШАМГУЛОВ РОМАН ЮРЬЕВИЧ

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
БАРАБАННО-ВИНТОВОГО АГРЕГАТА ДЛЯ АГЛОМЕРИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ТЕРМОЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р. техн. наук, проф.

Севостьянов В.С.

Белгород – 2025

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛУЧЕНИЯ АГЛОМЕРИРОВАННОЙ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	12
1.1. Экологические проблемы защиты окружающей среды от загрязнения техногенными материалами, технологии и технические средства комплексной переработки органических твердых коммунальных отходов...	12
1.2. Анализ существующих технологий термомеханической переработки органических твердых коммунальных отходов и получения из них высококалорийной товарной продукции	15
1.3. Специфические особенности технического углерода в полидисперсном и агломерированном состоянии.....	19
1.4. Теоретические исследования процессов агломерирования полидиспер- сных материалов	24
1.5. Анализ патентозащищенных способов и устройств для получения технического углерода и его агломерирования	30
1.6. Перспективные направления развития ресурсо-энергосберегающих технологий и специального оборудования для получения технического углерода и сфер его использования в промышленности.....	37
1.7. Цели и задачи исследования	39
1.8. Выводы	40
2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЕГО АГЛОМЕРИРОВАНИЯ В БАРАБАННО-ВИНТОВОМ АГРЕГАТЕ	41
2.1. Основные технологические принципы реализации термолизных технологий переработки органических материалов.....	41

2.2. Разработка и анализ механо-реологической модели процесса агломерирования технического углерода	45
2.3. Аналитические исследования постадийного процесса агломерирования	51
2.4. Моделирование механо-технологических способов реализации процесса агломерирования технического углерода	60
2.5. Исследование условий микрогранулирования частиц на стадии агломерирования в спиралевидном устройстве	64
2.5.1. Условия окатывания частиц в спиралевидном устройстве микрогранулирования.....	64
2.5.1.1. Условия движения частиц по круговой траектории без скольжения..	64
2.5.1.2. Уравнение движения частиц вдоль цилиндрической поверхности....	67
2.5.1.3. Анализ условий движения частиц по спиралевидной траектории.....	70
2.6. Изучение рециркуляционного воздействия двухзаходных винтовых устройств на слой микрогранулята	73
2.7. Исследование условий процесса гранулообразования однозаходными винтовыми лопастями в камере агломерирования	78
2.8. Изучение процесса классификации полифракционного гранулята технического углерода	86
2.9. Расчет энергосиловых параметров барабанно-винтового агрегата	90
2.9.1. Расчет мощности привода агломерирующих устройств агрегата.....	90
2.9.2. Расчет мощности привода барабанно-винтового агрегата	95
2.10. Выводы	99
3. РАЗРАБОТКА СТЕНДОВЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК, МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	101
3.1. Разработка стендовой установки барабанно-винтового агрегата для моделирования процесса агломерирования полидисперсных материалов.....	101
3.2. Кинематика взаимодействия лопастных устройств с агломерируемой средой	107

3.3. Разработка патентозащищенной конструкции барабанно-винтового агрегата комбинированного действия и его конструктивно-технологические параметры	109
3.4. Методики экспериментальных исследований и обработки полученных результатов	112
3.5. Многофакторное планирование эксперимента при изучении рациональных режимов работы агрегата	115
3.6. Выводы	117
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ПРИ АГЛОМЕРИРОВАНИИ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА	119
4.1. Исследования морфологического состава, физико-механических характеристик и физико-химических свойств технического углерода низкотемпературной термолизной технологии	119
4.2. Изучение адсорбционных свойств технического углерода низкотемпературной термолизной технологии	126
4.3. Изучение и определение вещественного состава связующего для агломерирования технического углерода	129
4.4. Моделирование технологических процессов подготовки и агломерирования технического углерода	132
4.5. Экспериментальные исследования процесса агломерирования при варьировании конструктивно-технологических параметров	136
4.5.1. Поисковые экспериментальные исследования	136
4.5.2. Многофакторное планирование эксперимента при исследовании функциональной зависимости $\sigma_{\text{сж.сл}}, \rho_{\text{сл}}, Q_{\text{тг}}, \varepsilon_{\text{ист}}, = f(\varphi_{\text{зап}}, n_{\text{в.овл}}, C_{\text{св}})$	137
4.5.3. Регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований	140
4.6. Экспериментальные исследования технологических режимов работы барабанно-винтового агрегата	148
4.7. Сравнительный анализ результатов исследований	154

4.8. Выводы	154
5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ЕГО АГЛОМЕРИРОВАНИЯ	156
5.1. Разработка и испытания низкотемпературной термолитической технологии переработки органических отходов и технических средств для получения высококалорийной продукции	156
5.2. Конструктивно-технологическое совершенствование терморектора и процессов для получения технического углерода	158
5.3. Опытные-промшленные испытания барабанно-винтового агрегата для получения агломерированного технического углерода.....	161
5.4. Инженерная методика расчета теплотехнических параметров обработки агломерированного технического углерода в барабанно-винтовом агрегате	164
5.5. Технологический регламент получения агломерированного техниче- ского углерода в барабанно-винтовом агрегате непрерывного действия.....	169
5.6. Технико-экономическая эффективность получения технического углерода способом низкотемпературного термолитиза и использования агломерированной продукции	171
5.7. Выводы	176
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	178
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	181
ПРИЛОЖЕНИЯ	201

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в мире насчитывается 7,7 млрд человек [1]. По прогнозам к 2030 году численность возрастет до 8,5 млрд человек. Прирост населения планеты напрямую связан с улучшением качества жизни, что является следствием технологического прогресса. В свою очередь, увеличение мирового населения и развитие человеческого общества сопряжено с ростом отходов производства (техногенных) и потребления (коммунальных) [2]. Согласно проведенным международными экспертами расчетов, ежедневно в мире образуется 0,74 кг отходов в день на человека [3].

Стратегия экологической безопасности РФ (Указ Президента РФ В.В. Путина от 19.04.2017 г. № 176) и ФЗ «Об отходах производства и потребления» № 458-ФЗ от 29.12.2014 г. определяют основные положения реализуемой в настоящее время в России, в рамках Национального проекта «Экология», реформы в сфере обращения с отходами.

На современном этапе развития индустриального потенциала России, обеспечения экологической безопасности страны, важное значение имеет получение различных видов конкурентоспособной продукции при комплексной переработке техногенных материалов, а также разработка и практическая реализация инновационных технологий, направленных на развитие ресурсо-энергосбережения и рационального использования невозобновляемых ресурсов.

Согласно исследованиям ученых: проф. Э.А. Петровского, проф. С.М. Золотарева, канд. техн. наук А.Г. Копачева и других одним из перспективных направлений развития ресурсо-энергосберегающих технологий является комплексная переработка техногенных материалов (ТМ), в том числе механо-термическая переработка органических отходов по низкотемпературной ($T \leq 400-500^{\circ}\text{C}$) термолизной технологии (НТТ), с получением жидкого углеводородного топлива (ЖУТ), синтетического газа (СГ) и технического углерода (ТУ). Специфические особенности последнего, такие как: высокая дисперсность; низкая насыпная плотность; пористая структура; пыление и другие, ограничивают его

широкое применение в различных отраслях промышленности: лакокрасочной; резинотехнической; электротехнической и др.

Для использования технического углерода (при производстве адсорбентов, теплоизоляционных заполнителей, сухих строительных смесей и др.), а также расширения его технологических возможностей, ТУ целесообразно агломерировать.

Проведенный анализ способов и технических средств для агломерирования пылевидных материалов с низкой насыпной плотностью показал, что существующие аппараты не могут применяться для исследуемого нами материала. Так, для барабанных и тарельчатых грануляторов характерны большие габаритные размеры, несопоставимые с малой производительностью. Полифракционность состава вызывает сложности поддержания кипящего слоя и не позволяет применять аппараты данного типа. Низкая насыпная плотность исключает возможность использования роторно-центробежных агрегатов. Высокая абразивность ТУ ставит под сомнение целесообразность применения аппаратов, использующих способ экструдирования. Отсутствие герметичности для многих аппаратов свидетельствует о невозможности их использования для сильно пылящих материалов. Вышеизложенный комплекс проблемных задач свидетельствует о необходимости поиска алгоритмов их решения, а также создании специального оборудования для реализации процессов агломерирования ТУ. В этой связи настоящая диссертационная работа является весьма актуальной.

Диссертация выполнена в рамках: Федерального проекта НОЦ (2020 – 2023гг) № 10089447, а также государственных заданий: FZWN-2021-0014 «Разработка, исследование и опытно-промышленное освоение ресурсоэнергосберегающих инновационных технологий для производства товарной продукции и снижением экологической нагрузки на окружающую среду» и FZWN-2024-0002 «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов».

Цель данной работы: Повышение эффективности процесса агломерирования технического углерода в барабанно-винтовом агрегате за счет совершенствования его конструктивно-технологических параметров.

Задачи исследования

1. На основе анализа современных технологий и технических средств определить перспективные направления получения агломерированного технического углерода из органических техногенных материалов – ТКО.
2. Разработать механо-реологическую модель процесса агломерирования ТУ с учетом его специфических особенностей.
3. Провести аналитические исследования процессов постадийного агломерирования ТУ и физическое моделирование условий их конструктивно-технологической реализации.
4. Разработать патентозащищенные способы и устройства для термолизной переработки ОТМ и агломерирования полученного ТУ.
5. Разработать методы расчета кинематических, конструктивно-технологических, энергосиловых и теплотехнических параметров БВА.
6. Провести регрессионный анализ результатов многофакторного планирования экспериментов и установить рациональные условия процесса агломерирования ТУ.
7. Для производственных условий ООО «ТК «Экотранс» разработать: технологический модуль с БВА для агломерирования ТУ ресурсосберегающей термолизной технологии и технологический регламент получения продукции; провести опытно-промышленные испытания специального оборудования и установить технико-экономическую эффективность научно-технических разработок.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 по областям исследования:

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов.

9. Разработка научных и методологических основ проектирования и практической реализации технологических процессов и способов получения и обработки материалов, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, формирующих комплекс свойств, качество и расширяющих номенклатуру изготавливаемой продукции.

Научная новизна:

1. Разработана механо-реологическая модель постадийного процесса агломерирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью.
2. Получены аналитические выражения, описывающие процессы постадийного агломерирования полидисперсных частиц, согласно механо-реологической модели.
3. Исследованы условия образования микрогранулята при его объемно-пространственном перемещении в спиралевидном устройстве и его последующем упрочнении в режиме рециклинга двухзаходными винтовыми лопастями (ДВЛ).
4. Проведены теоретические исследования процесса агломерирования микрогранулята однозаходными винтовыми лопастями (ОВЛ). Получены уравнения для расчета винтовых траекторий движения гранул в камере агломерирования и зоны воздействия на них со стороны ОВЛ.
5. Исследован процесс интенсивной классификации полифракционного гранулята разнонаправленными ОВЛ. Получено уравнение, описывающее движение классифицируемого гранулята.
6. Исследована кинематика взаимодействия ОВЛ с гранулятом и определен рациональный геометрический профиль устройств.
7. Разработаны методы расчета основных кинематических, конструктивно-технологических, энергосиловых и теплотехнических параметров патентозащищенной конструкции БВА.

Теоретическая и практическая значимость работы

- Установлены и разработаны основополагающие теоретические положения постадийных процессов гранулообразования полидисперсных техногенных материалов с низкой насыпной плотностью и малой сыпучестью, представленной в виде механо-реологической модели агломерирования технического углерода;

- Получены математические выражения, описывающие процессы постадийного гранулообразования полидисперсного ТУ в разработанной модели;
- Разработаны конструктивно-технологические исполнения рабочих органов постадийного агломерирования ТУ, методы расчета их кинематических и энерго-силовых параметров;
- Разработана патентозащищенная конструкция БВА для переработки полидисперсных материалов термолизной технологии (пат. РФ №2748629, Евразийский пат. №040258); способ и устройства механо-термической переработки органических ТКО (пат. РФ №2744225, 2773396, Евразийский пат. №043232, 043162);
- Разработаны инженерные методы расчета основных конструктивно-технологических, энерго-силовых и теплотехнических параметров БВА;
- Реализованы в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» малотоннажный технологический модуль для комплексной переработки ТМ и получения агломерированного ТУ с регламентированными характеристиками;
- Использовании выполненных научно-технических разработок при подготовке специалистов-выпускников различных кафедр БГТУ им. В.Г. Шухова (ТКММ, промышленной экологии, СМИК и др.).

Внедрение результатов работы С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований был изготовлен и испытан опытно-промышленный барабанно-винтовой агрегат для агломерирования ТУ термолизной переработки ОТМ, проведена его опытно-промышленная апробация в условиях производства ООО «ТК «Экотранс» г. Белгород. Получен экономический эффект в размере 1 380, 50 тыс. рублей.

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях, в частности: «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология» Алушта-Белгород, 2021г; «Digital technologies in construction engineering», Белгород, 2021г; Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых «Современные

технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности», Казань, 21–22 марта 2023 года., и др.

Публикации По результатам исследований опубликовано 28 научных работ, в том числе 6 в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 3 патента РФ на изобретение, 3 Евразийских патента на изобретение. Зарегистрировано 2 ноу-хау.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, общих выводов по работе, списка литературы и приложений. Общий объем работы 200 страниц, в том числе: 80 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 163 наименований. Приложения на 25 страницах.

Автор защищает:

1. Механо-реологическую модель процесса агломерирования ТУ – продукта термолизной переработки органических ТКО, учитывающую физико-механические и реологические характеристики поризованных полидисперсных материалов.
2. Патентозащищенные научно-технические разработки способа и устройств низкотемпературной термолизной переработки ТКО и агломерирования ТУ в БВА.
3. Аналитические выражения, описывающие конструктивно-технологические и кинематические параметры рабочих органов БВА и рациональных постадийных процессов агломерирования ТУ.
4. Уравнения для расчета энергосиловых параметров рабочих органов БВА различного геометрического профиля и конструктивно-технологического исполнения.
5. Методы расчета конструктивно-технологических, энергосиловых и теплотехнических параметров БВА.
6. Результаты экспериментальных исследований и закономерностей процесса агломерирования полидисперсных техногенных материалов термолизной переработки ТКО.
7. Результаты опытно-промышленных испытаний ресурсосберегающей НТТ переработки органических ТКО и БВА для агломерирования получаемого продукта – технического углерода.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛУЧЕНИЯ АГЛОМЕРИРОВАННОЙ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

1.1. Экологические проблемы защиты окружающей среды от загрязнения техногенными материалами, технологии и технические средства комплексной переработки органических твердых коммунальных отходов

Рост населения планеты, а по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в мире насчитывается 7,7 млрд человек [1], неизбежно связан с увеличением количества образуемых промышленных и твердых коммунальных отходов (ТКО) [2]. Ежедневно в мире на одного человека в день образуется 0,74 кг [3]. В отчетах аудиторской компании FinExpertiza говорится, что в России этот показатель составляет 1,24 кг [4]. По данным публично-правовой компании Российский экологический оператор (РЭО), в РФ ежегодно образуется около 70 млн тонн ТКО [5].

При организации рационального природопользования необходимо создать комплексную систему мер по переработке и утилизации различных накопленных и вновь образуемых техногенных отходов [6-10]. Создать систему вторичной переработки отходов и вовлечение в хозяйственный оборот получаемого сырья для изготовления новой продукции. Немаловажной задачей в условиях индустриализации государства является переработка отходов, не только вновь образуемых, но и решение вопросов экологически безопасной переработки накопленных. Обращение с отходами производства и потребления регулируются на законодательном уровне во всех без исключения развитых государствах [11, 12].

Так, в США деятельность по обращению с отходами базируется на законе о сохранении и восстановлении ресурсов (Resource Conservation and Recovery Act, 1976). Контроль за обращением с отходами ведется Агентством по охране окружающей среды - the Environmental Protection Agency (EPA). Данное агентство

следит за исполнением законов, принятых Конгрессом США в области защиты окружающей среды и здоровья людей [13,14].

В Европейском союзе основой для принятия различных директив в области утилизации отходов является утвержденный Европейской комиссией план действий по переходу к циркулярной экономике (Circular Economy Action Plan) [15], одним из ключевых показателей которого является переработка 65% ТКО и 75 % упаковки. В то же время каждая страна, член ЕС, может самостоятельно принимать иные законы в области экологии.

В Китае, занимающем первое место в мире по численности населения, обращение с отходами регулирует «Закон Китайской Народной Республики о контроле загрязнения окружающей среды с твердыми отходами» [16]. Соблюдение природоохранного законодательства контролирует Министерство охраны окружающей среды КНР.

В России базовыми являются: Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.1998 г. [17] и Федеральный закон № 451 от 04.08.2023 г. 451-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления"», а также ряд дополняющих законов и постановлений: Федеральный закон № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30 марта 1999 г.; Базельская конвенция о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением от 22 марта 1989 г.; Постановление Правительства РФ от 29.12.2023 г. № 2394 "Об утверждении перечня видов отходов от использования товаров, видов полученного из таких отходов вторичного сырья, при утилизации которых может быть исполнена обязанность по обеспечению самостоятельной утилизации отходов от использования товаров, упаковки, включенных в перечень, предусмотренный пунктом 5 статьи 24.2 Федерального закона"; иные нормативно-правовые акты РФ, субъектов РФ, муниципалитетов.

Стратегия экологической безопасности РФ [18], Указ Президента РФ от 19.04.2017 г. № 176, а также стратегия национальной безопасности РФ [19], Указ Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400 определяют необходимость переработки

органических техногенных и твердых коммунальных отходов с получением конечных продуктов.

Минприроды РФ своим приказом утвердило основные положения «Комплекс-ной стратегии обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами» [20], затрагивающей не только сферу ЖКХ, но и индустриальные производства.

Национальный проект «Экология», утвержденный правительством РФ в 2018 г., послужил активатором развития, проходящей в стране реформы обращения с отходами. Увеличение до 60% доли органических техногенных отходов, направленных на переработку, включающей предварительную подготовку; сортировку; разборку; очистку и другое, является одной из ключевых задач [21].

Защита человека и окружающей среды от негативного воздействия органических техногенных отходов является приоритетом при реализации принимаемых в стране законов, постановлений и нормативно-правовых актов. Необходимость вовлечения в хозяйственный оборот вторичных ресурсов подтверждается постановлением Правительства РФ № 1578 от 21 сентября 2021 г. [22], а также стратегией РФ развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления до 2030 года [23]. Реализация комплексного подхода ресурсоэнергосбережения при обращении с отходами производства и потребления выделяет ряд приоритетных мероприятий:

- утилизация отходов с получением продукции, в том числе вторичного сырья;
- утилизация отходов с получением энергии;
- создание и модернизация комплексных объектов по обращению с отходами;
- ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде.

Вышеизложенное свидетельствует о высокой востребованности технологий и технических средств, позволяющих перерабатывать органические техногенные отходы с получением качественных и реализуемых конечных продуктов.

1.2. Анализ существующих технологий термомеханической переработки органических твердых коммунальных отходов и получения из них высококалорийной товарной продукции

На рисунке 1.1 представлена классификационная схема существующих способов переработки ТКО.

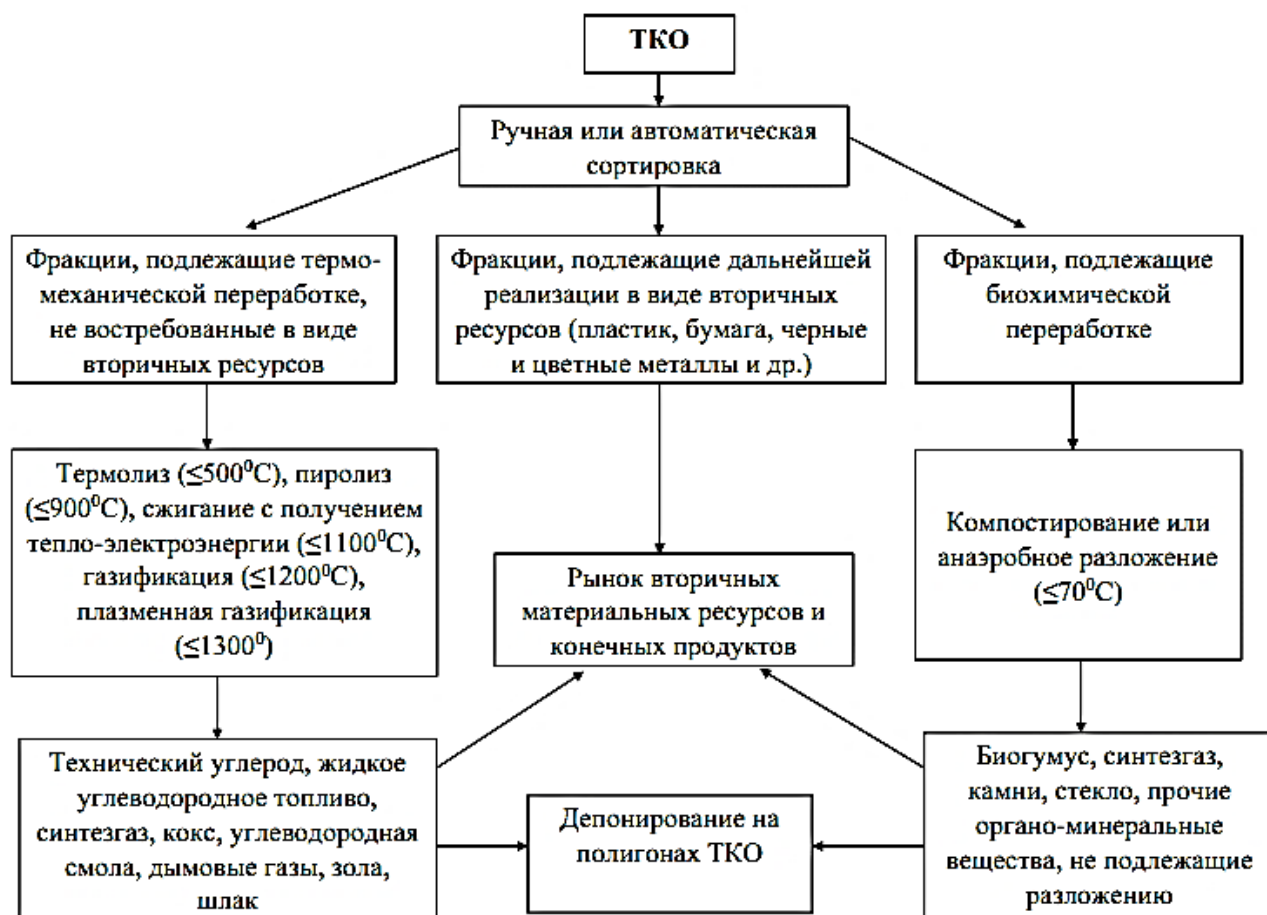


Рисунок 1.1. Схема классификации способов переработки ТКО

Технологии, основанные на получении вторичного сырья и готовой продукции, а также экологически безопасной и ресурсосберегающей механо-термической переработки отходов с получением изделий, материалов и иных ценных компонентов, в настоящее время являются наиболее перспективными при переработке органических техногенных отходов. [24; 25]. Термолиз предварительно подготовленного (классифицированного и измельченного) сырья также является наиболее перспективным способом переработки ТКО [26-28].

В настоящее время широкое распространение получил пиролиз [29]. Основное различие между термолизом и пиролизом сводится к температуре переработки, а также наличию или отсутствию катализатора реакции. Различаются процессы и по количественному выходу конечных продуктов, имеющих отличие в физико-механических и физико-химических характеристиках.

Существует несколько видов пиролиза, различающихся температурой проведения процесса: низкотемпературный ($\leq 600^{\circ}\text{C}$), среднетемпературный ($600-800^{\circ}\text{C}$) и высокотемпературный ($\geq 800^{\circ}\text{C}$), а также методом проведения: сухой или окислительный. По сухому способу процесс ведут без доступа кислорода с целью предотвращения горения. Окислительный способ заключается в подаче в реактор дымовых газов, которые нагревая сырье, частично его сжигают.

Пиролиз/термолиз являются эндотермическими процессами, поэтому классифицировать оборудование для его проведения можно по способу подвода тепла в реактор: прямой или непрямой, а также по виду используемой для процесса энергии: пиролизный газ, электроэнергия, прочая тепловая энергия.

Аппаратурное оформление классического варианта процесса пиролиза представляет из себя реактор, работающий в циклическом режиме: загрузка, нагрев, реакция, остывание, выгрузка, а также систему конденсации парогазовой смеси и сбора жидкого конечного продукта. Оборудование для пиролиза отходов отличается простотой и минимальным набором автоматизации процесса. Примером внедрения оборудования в переработку отходов может служить компания ООО ПТК «Пиролиз-Экопром» г. Нижний Новгород [30]. Данная компания осуществляет производство и продажу установок «Т-ПУ 1» (рисунок 1.2), предназначенных для переработки отходов способом низкотемпературного $\leq 600^{\circ}\text{C}$ пиролиза. Конечными продуктами при такой переработке отходов являются пиролизное топливо, обуглероженный остаток, синтез-газ. Последний поступает на обогрев самой установки.

Распространен также вариант аппаратурного оформления процесса пиролиза во вращающейся барабанной печи (рисунок 1.3). Данная установка представлена на Российском рынке китайской компанией Beston Group [31]. Процесс на данной

установке также ведется в периодическом режиме с получением вышеупомянутых конечных продуктов: углеродсодержащий остаток, пиролизное масло и синтез-газ.

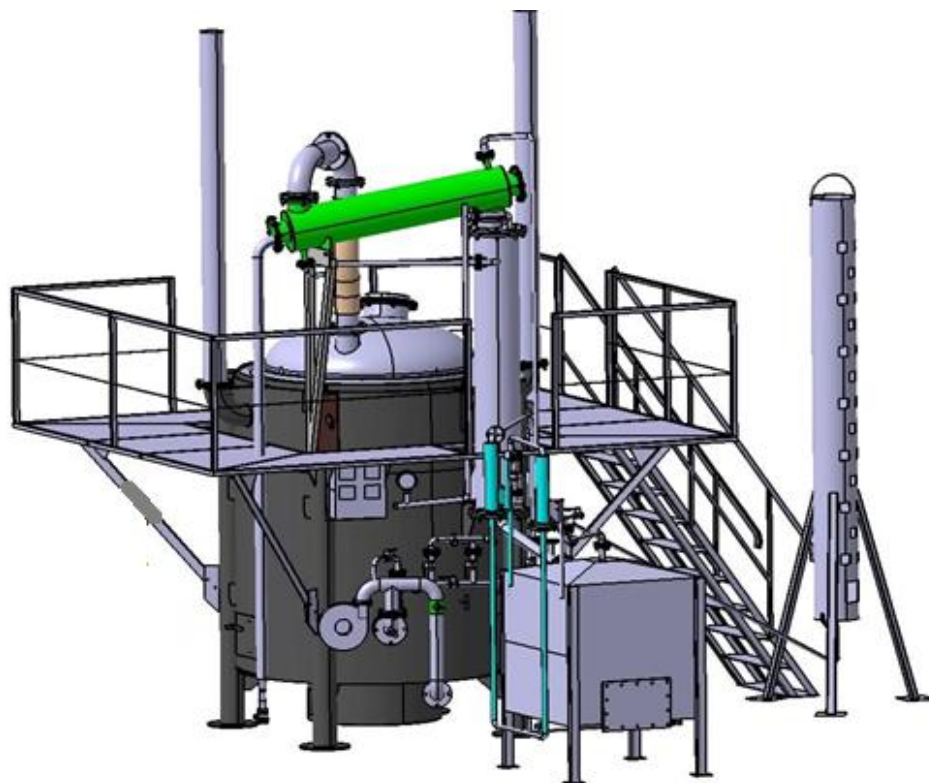


Рисунок 1.2. Установка низкотемпературного пиролиза ООО ПТК «Пиролиз-Экопром» г. Нижний Новгород

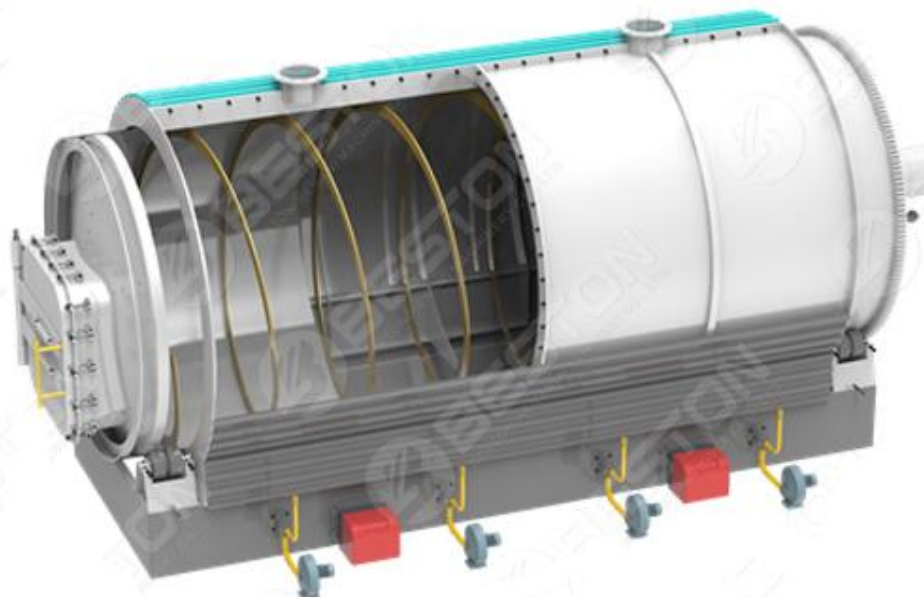


Рисунок 1.3. Вращающаяся барабанная печь для пиролиза отходов Beston Group Co., Ltd., Китай

Активное продвижение классического пиролиза для переработки ТКО ведет проф. Г.М. Золотарев, запатентовавший в 2015 г. «Пиролизный Реактор

Золотарева» [32]. Верхняя камера сушки и нижняя камера пиролиза, имеющие форму овала, а также вращающийся лопастный активатор, предназначенный для предотвращения возможного зависания отходов, являются отличительными особенностями данного оборудования [33].

В 2010 г. в ООО «НПП Термолиз» г. Москва были разработаны процесс и оборудование для низкотемпературного термолиза резиновой крошки [34,35]. Отличительными особенностями аппаратного оформления технологического процесса является реактор в виде спиралевидного транспортера, а также высокотемпературный рукавный фильтр с короткоимпульсной обратной продувкой [36-37]. В 2018 г. процесс низкотемпературного термолиза был предложен для переработки прочих органических отходов [25,38]. В 2020-2023 гг. авторским коллективом БГТУ им. В.Г. Шухова, совместно с индустриальным партнером ООО «ТК «Экотранс» г. Белгород, в рамках государственного задания Федерального проекта НОЦ (2020 – 2023гг.) № 10089447 «Инновационные решения в АПК», научно-производственной платформы «Рациональное природопользование» процесс низкотемпературного термолиза, а также установка для его реализации были предложены для переработки органических ТКО и техногенных отходов [39- 52].

Основными конечными продуктами представленных выше процессов являются: синтезированный углеводородный газ, углеродсодержащий остаток, жидкая углеводородная фракция. Процентный выход продуктов, а также их качественные характеристики зависят от морфологического состава перерабатываемых отходов и технологических условий проведения процесса. Так, для пиролиза характерным является повышенный выход газообразных продуктов реакции в отличие от термолиза, где газообразование минимально, а увеличенным является выход твердых углеродсодержащих и жидких углеводородных конечных продуктов.

Получаемый в процессе термолиза технический углерод по своим физико-химическим свойствам и физико-механическим характеристикам близок к техническому углероду, производимому в промышленных масштабах [53,54], но в силу своих специфических свойств, не может быть использован по прямому назначению без дополнительной обработки. Иная ситуация при пиролизе

органических техногенных отходов в ретортах или вращающихся барабанных печах. Получаемый конечный углеродистый остаток (пироуглерод) представляет из себя большие агломераты иногда с содержанием металлов. Это является следствием того, что исходное сырье, поступающее в реактор, имеет большие геометрические размеры, ограниченные в основном размерами загрузочных люков. Такой продукт необходимо подвергнуть дальнейшей обработке: предварительному измельчению, механоактивации и классификации.

При переработке отходов способом низкотемпературного термолиза в горизонтальных реакторах со спиралевидным транспортирующим органом, получаемый конечный твердый продукт (технический углерод) имеет пылевидную структуру и является полидисперсным за счет того, что исходное сырье подвергается предварительной обработке – измельчению до размеров 6-10 мм.

Классифицировать дисперсные материалы можно по их технологическим свойствам: сыпучести, влажности, гранулометрическому составу, насыпной плотности, слеживаемости и др.

Применение таких дисперсных порошков распространено в качестве дешевых наполнителей в гетерогенных композиционных смесях [55, 56]. При производстве полимерных материалов применяют такие наполнители, как технический углерод, диоксид кремния, мел, каолин и др. [57,58] При выборе наполнителя руководствуются размером и формой его частиц, влияющих на свойства композиции наполнитель – связующее.

1.3. Специфические особенности технического углерода в полидисперсном и агломерированном состоянии

Технический углерод – порошкообразный полидисперсный материал, получаемый промышленным способом в контролируемых условиях конверсии углеводородов.

В настоящее время в мире насчитывается более 120 марок ТУ. Основным потребителем ($\geq 70\%$) технического углерода является шинная промышленность,

около 20% потребляет резинотехническая и менее 10% - остальные виды производств. В таблице 1.1 представлена классификация ТУ.

Таблица 1.1 – Классификация промышленного технического углерода

Наименование	Вид
Процесс	Печной, диффузионный, термический
Сырье	Жидкое, газообразное
Дисперсность	Высоко, средне, низкодисперсный
Активность	Высоко, средне, полу и малоактивный
Структурность	Высоко, средне, низкоструктурный

Аллотропная структура технического углерода похожа на графит, но имеет отличия в виде искажения слоев и их чередования. Также в структуре присутствуют неупорядоченные атомы ТУ – аморфный углерод.

Полидисперсность ТУ характеризуется следующими размерами: графеновый слой – 2-3 нм; глобула (частица) – 10-500 нм; агрегат – 100-500 нм; агломерат – до 0,1мм; гранула – более 0,5 мм. В процессе производства ТУ происходит сближение глобул, в результате чего образуются агрегаты, являющиеся наименьшей неделимой частицей.

Размеры частиц технического углерода можно отнести к одному из его фундаментальных и специфических свойств. Такие характерные для резин параметры, как износостойкость, предел прочности при растяжении, степень черноты и др., зависят от размеров частиц ТУ. Чем они меньше, тем выше степень защиты, эксплуатируемых пластмасс от ультрафиолетового излучения, а также укрывистость и сила окрашивания лакокрасочных материалов. В то же время, меньший размер частиц увеличивает вязкость композиционной смеси, а это приводит к повышению энергозатрат при диспергировании.

Не менее значимой специфической характеристикой технического углерода является его структурность (рисунок 1.4).

Под структурностью понимают способность техуглерода группироваться в первичные агрегаты – цепочки связанных частиц, имеющих линейно-разветвленную форму.



Рисунок 1.4. Структура технического углерода

Для оценки структурности используют дибутилфталат – $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$. Величина адсорбции ДБФ находится в пределах – $30 \div 300$ $см^3/100$ г. ТУ и характеризует объем пор между частицами и объем пустот между первичными агрегатами [59]. С помощью электронной микроскопии можно определить форму и размер агрегатов. В процессе производства ТУ происходит совместный рост частиц, имеющих общую площадь соприкосновения. Возникающие в местах контакта валентные связи обеспечивают прочность первичной структуры. Механическое воздействие на ТУ, в частности, его гранулирование разрушают первичную структуру с образованием менее прочной вторичной. Существует три вида структурности – низкая, средняя и высокая (рисунок 1.5).

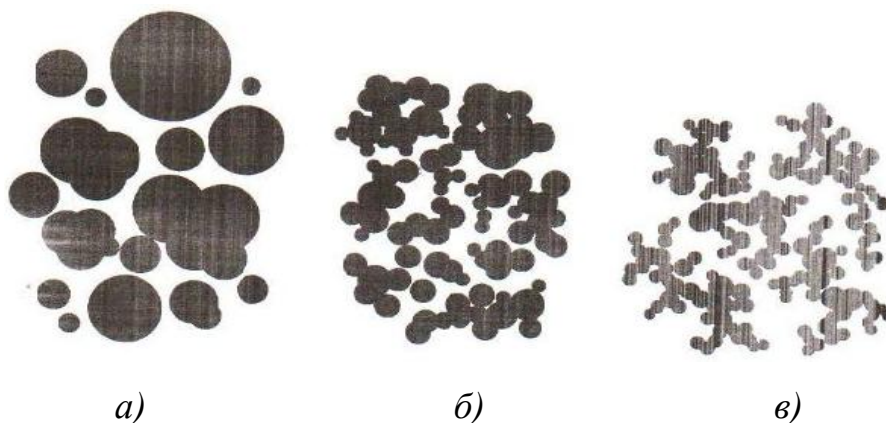


Рисунок 1.5. Структурность ТУ: а – низкая; б – средняя; в – высокая

Высокоструктурный ТУ в эластомерах повышает модуль упругости и вязкость по Муни, улучшает диспергируемость.

Еще одной специфической особенностью техуглерода является его поверхность (рисунок 1.6), так как на ней происходит взаимодействие частиц между собой и с другими компонентами.

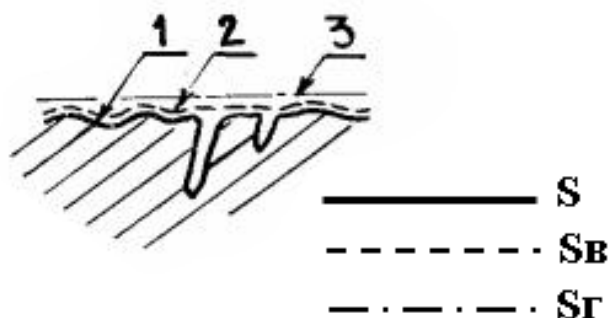


Рисунок 1.6. Структура поверхности ТУ: 1 – общая поверхность – S ; 2 – внешняя поверхность – S_v ; 3 – геометрическая поверхность – S_g

Такие свойства поверхности, как рельеф, химический состав и энергия играют немаловажную роль при образовании композиционных смесей и их последующих физико-механических характеристиках. Так, шероховатый рельеф увеличивает поверхностную адсорбцию, а это, в свою очередь, повышает электропроводность, но ухудшает распределение ТУ в каучуке, т.к. его молекулы имеют большие размеры по сравнению с размерами углублений [60]. Шероховатость поверхности можно оценить по разности значений йодного числа и внешней удельной поверхности, методом низкотемпературной адсорбции азота и электронной микроскопии [61].

Химический состав поверхностного слоя ТУ представлен функциональными группами, содержащими водород и кислород. Так же в составе поверхности ТУ содержится до 1% серы. Наличие таких групп, например, повышает гидрофильность резин.

В России выпускаемый промышленностью технический углерод должен соответствовать ГОСТ 7885-86. Следует отметить, что данный ГОСТ был разработан для применения техуглерода в резинотехнической промышленности. Однако данным стандартом пользуются и другие отрасли, применяющие техуглерод в качестве сырья. В дополнение к указанному стандарту исследуются и другие, необходимые для конкретного применения свойства, которые, в конечном

счете, определяют востребованность ТУ для своего производства. В частности, в лакокрасочной и полимерной промышленности – это устойчивость к ультрафиолету и химическим реагентам. Основные показатели техуглерода представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Объединенные показатели ТУ, согласно ГОСТ 7885-86

Показатель	Значение
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	50÷100
Удельная условная поверхность, м ² /г	12÷40
Удельная внешняя поверхность, м ² /г	98÷109
Удельная адсорбционная поверхность, м ² /г	84÷150
Адсорбция дибутилфталата, см ³ /100 г	65÷115
Йодное число, г/кг	40÷128
рН водной суспензии	6÷11
Массовая доля потерь при 105 ⁰ С, %, не более	0,4÷1,5
Массовая доля общей серы, %, не более	1,1
Светопропускание толуольного экстракта, %, не менее	85÷90
Сопротивление гранул истиранию, %	87÷95
Массовая доля пыли в гранулированном ТУ, %, не более	5÷6
Прочность отдельных гранул, Н	0,2÷0,7
Сопротивление гранул разрушению на аппарате ГИТ-1, %	69÷89
Массовая прочность гранул ТУ, Н	5÷25
Насыпная плотность ТУ, кг/м ³ , в пределах	320÷420

ТУ, полученный промышленным способом, перед гранулированием предуплотняют в циклоне-уплотнителе или вакуумной мешалке для удаления воздуха. Последний, находится между агрегатами и газом, адсорбированным на поверхности ТУ. Процесс гранулирования можно вести сухим способом для получения гранул мене 0,5 мм и мокрым, если необходимы гранулы 0,5÷2 мм. В качестве связующего может быть использована подготовленная вода или водный раствор мелассы или лигносульфатов. При гранулировании высокоструктурный техуглерод требует больше воды чем низкоструктурный. В среднем соотношение связующего к ТУ составляет 1 кг/1 кг. В качестве аппаратов для гранулирования применяют пальцевые смесители. Частота вращения вала составляет 300÷350 об/мин. Возможно и гранулирование окатыванием в барабанных грануляторах. Качество гранул зависит от соотношения жидкой и твердой фаз.

1.4. Теоретические исследования процессов агломерирования полидисперсных материалов

Агломерирование полидисперсных материалов получило широкое распространение практически во всех отраслях промышленности: строительной, химической, металлургической, сельскохозяйственной, пищевой, фармацевтической и др. Это обусловлено склонностью полидисперсных материалов к слеживанию и устранению агрегации компонентов смесей при их транспортировке. Кроме того, некоторые композиционные смеси, содержащие гетерогенные компоненты, склонны к самопроизвольной сегрегации (расслоению) при их перемещении по технологической цепочке. Использование же полидисперсных материалов в агломерированном состоянии улучшает условия их хранения и дозирования, повышает сыпучесть продукта при одновременном устранении запыленности производственных помещений, увеличивает производительность агрегатов при более высокой плотности гранул и др. Наряду с этим, агломерирование порошкообразных и высокодисперсных материалов обеспечивает возможность получения гомогенизированных композиционных смесей с гетерогенными компонентами и добавками при их концентрации в сферообразных телах, обладающих высокой подвижностью и способностью к равномерному распределению в макро и микрообъемах.

Физико-механические характеристики и реологические свойства обрабатываемых материалов такие, как вязкость, упругость, прочность, пластичность, эластичность и другие, определяют выбор технологического оборудования для их формования. При этом такие характеристики конечной продукции, как плотность, прочность, истираемость, термостойкость и другие, необходимо учитывать в предъявляемых, к получаемому агломерату требованиях, учитывающих его дальнейшее технологическое применение.

Весомый вклад в направлении научного развития процессов и оборудования для агломерирования полидисперсных материалов внесли такие ученые, как: П.А. Ребиндер, П.В. Классен, И.Г. Гришаев, М.Б. Генералов, В.С.

Севостьянов, В.Ф. Першин, М.В. Севостьянов, Л.М. Сулименко, А.Б. Капранова, Т.Н. Ильина, В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, И.П. Шомин, В.Н. Кочетков, В.И. Коротич., Н. Rumpf, M. Wada, D.M. Newitt, A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville и др. [62-82].

Так, в работе Т.Н. Ильиной [62; 63] проведены исследования полидисперсных материалов с различными физико-химическими свойствами (железорудного, цементного, химического и других производств) и разработаны физико-химические основы процессов агломерирования. Определены общие закономерности процесса с учетом адгезионно-когезионного взаимодействия компонентов. Научно обоснована предложенная патентозащищенная конструкция вибрационно-центробежного гранулятора, а также реологическая модель постадийного гранулообразования различных шихт и целесообразность постадийного ведения процесса гранулообразования полидисперсных материалов с различной насыпной плотностью.

Учитывая различные физико-механические характеристики полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью, М.В. Севостьянов разработал реологические модели упруго-пластического деформирования техногенных шихт. При разработке патентозащищенных конструкций автор применял полученные аналитические зависимости для расчета кинематических, конструктивно-технологических и энергосиловых параметров. Также автором были разработаны методологии расчета, используемые в проектировании ресурсосберегающих машин и технологических комплексов для производства компактированных материалов [64,65]. Для расчета давления экструдирования в пресс-валковом экструдере, получено уравнение:

$$\bar{P}\sigma = \sigma_{\text{ср}} \text{EXP} \frac{4f_0\xi h_k}{d_{\text{цф}} + 2h_k \tan \beta'} \quad (1.1)$$

где $\bar{P}\sigma$ – максимальное давление, необходимое для преодоления сопротивлений, возникающих при перемещении гранулы в фильере, Н/м²;

$\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение, действующее на элементарный деформируемый слой, Н/м²;

f_0 – коэффициент внешнего трения материала о поверхность фильеры;

ξ – коэффициент бокового давления;

h_k – высота конической части фильеры, м;

$d_{цф}$ – диаметр цилиндрической части фильеры, м;

β – угол наклона конической части фильеры, м.

К сожалению, разработанные М.В. Севостьяновым методики относятся к процессам экструдирования гранул в виде цилиндрических пеллет. Исследуемый нами ТУ, в силу его специфических особенностей, целесообразно формировать способом окатывания в энергоэффективных машинах.

Согласно работе [66; 67], материалы с насыпной плотностью $\rho_{нас} = 300 \div 400 \text{ кг/м}^3$ имеют низкую сыпучесть, а это усложняет процесс их транспортировки и загрузки в рабочую зону прессования. Такие специфические особенности ТУ, как низкая насыпная плотность, высокая дисперсность, абразивность, а также требования к геометрической форме конечной продукции, позволяют сделать заключение о нецелесообразности использования аппаратов экструзионного и прессового типов для данного вида материалов.

Агломерирование порошкообразных материалов в псевдоожиженном слое получило распространение в таких отраслях промышленности, как химическая, фармацевтическая, сельскохозяйственная и др. [68; 69]. Однако требования по гранулометрии, температурных условий обработки и других факторов ограничивают применение данного способа для получения агломерированной товарной продукции из ТУ термолизной технологии.

В настоящее время одним из распространенных и востребованных способов агломерирования пылевидных материалов является окатывание, а оборудованием для его осуществления – аппараты барабанного типа. Возможна также реализация процесса окатывания в лопастных аппаратах. При окатывании используются все основные способы гранулообразования: сухое, увлажненное-полусухое, влажное и др. Важное значение при этом имеет кинетика процесса гранулообразования, описанная в работе Першина В.Ф. [70]. Одним из аспектов,

рассматриваемых автором, является критическая скорость вращения барабана $\omega_{кр}$, при которой материал перестает скатываться.

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{Rf_{тр}(1-\varphi)^{0,5}}}, \quad (1.2)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент внутреннего трения материала;

φ – коэффициент заполнения барабана;

R – расстояние от оси вращения барабана до центра тяжести частицы диаметром d , м;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Для описания кинетических зависимостей процесса гранулообразования авторами Вилесовым Н.Г., Скрипко В.Я, Ломазовым В.Л. [71] предложено аналитическое выражение для определения скорости роста гранул:

$$X_t = X_0 e^{m(W-W_0)}, \quad (1.3)$$

где X_t – конечный размер гранул, мм;

X_0 – размер исходных гранул, содержащих W_0 , мм.;

W_0 – исходное содержание влаги, %;

W – конечное содержание влажности гранул, %;

m – чувствительность гранулируемых материалов к изменению содержания влаги.

Параметры m, X_0, W_0 – определяются экспериментально и характеризуют гранулируемость материала.

Некоторые аспекты кинетики процесса гранулирования освещены в работе Джима Листера и Брайена Энниса [72].

В работе А.Л. Майтакова [73] при разработке математической модели процесса гранулообразования дисперсных смесей экспериментальные исследования проводились с использованием гранулятора тарельчатого типа. В результате исследований было установлено, что процесс гранулообразования зависит от коэффициента комкуемости материала K . Он же, в свою очередь, зависит от гидрофильности полидисперсной системы.

$$K = \frac{W_{\text{НКВ}}}{(W_{\text{МКВ}} - W_{\text{НКВ}})}, \quad (1.4)$$

где $W_{\text{НКВ}}, W_{\text{МКВ}}$ – соответственно, наименьшая и максимальная капиллярная влагоемкость, %.

Оптимальным значением K для стабильной работы гранулятора в режиме переката является значение $0,6 \div 0,8$. Для исследуемого нами технического углерода, являющегося гидрофобным материалом, гранулирование в крупногабаритных аппаратах тарельчатого типа является не целесообразным.

Гранулирование сыпучих материалов можно проводить и в вибрационно-центробежном грануляторе. Движение сыпучего материала в аппарате такого типа изучал Шкарпеткин Е.А. [74]. Автор, в частности, исследовал условия движения гранулята в торообразной камере и установил, что скорость сдвиговых деформаций слоя гранул по ширине камеры гранулирования изменяется по параболическому закону.

С учетом кинетики процесса гранулообразования, для расчета основных конструктивно-технологических параметров грануляторов, учеными получены соответствующие аналитические выражения. Например, расчет основных размеров аппаратов барабанного типа можно проводить по методике, предложенной проф. М.Б. Генераловым [75]. Так, объемный расход, м³/ч, рассчитывают учитывая насыпную плотность конечного гранулята и заданную производительность технологической линии.

$$Q_{\text{об}} = \frac{G_{\text{сух}}(1 + u)}{\rho_{\text{н}}(1 - r)}, \quad (1.5)$$

где $G_{\text{сух}}$ – производительность по конечному продукту, т/ч;

$\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность конечного продукта, т/м³;

u – влагосодержание шихты, кг/кг;

r – количество ретура в продукте, т.

Зная объемный расход и коэффициент заполнения, рассчитывают диаметр барабана.

$$D = \left(\frac{4Q_{об}\tau}{\pi\varphi B} \right), \quad (1.6)$$

где B – соотношение длины барабана (L) к его диаметру (D);

τ – время пребывания материала в барабане, ч;

$Q_{об}$ – объемный расход материала, м³/ч;

φ – коэффициент заполнения барабана.

Немаловажным параметром является угловая скорость, с⁻¹, вращения барабана, определяемая из выражения

$$\omega = \frac{2v_{под}}{D}, \quad (1.7)$$

где $v_{под}$ – скорость подъема частиц, м/ч;

D – диаметр барабана, м.

Скорость подъема частиц является линейной скоростью стенки барабана, которая связана со скоростью скатывания соотношением

$$v_{под} = \frac{v_{ск}(1 - \psi)\delta}{\psi \sin \delta}, \quad (1.8)$$

где $v_{ск}$ – скорость скатывания частиц, м/ч;

ψ – коэффициент соотношения площади в поперечном сечении материала к общей площади засыпки, $\psi = 0,55 \div 0,60$.

Изучением процессных явлений при агломерировании полидисперсных материалов занимались и другие ученые [76-82].

Представленные методики расчета применимы в основном к материалам, производимым в промышленных масштабах, и не всегда могут учитывать специфические особенности отдельных видов материалов, таких как технический углерод, получаемый в результате низкотемпературного термолиза органических техногенных отходов. Для таких случаев требуется разработка дополнительных (специальных) методик расчета основных силовых и конструктивно-технологических параметров исследуемого материала и агрегата.

1.5. Анализ патентозащищенных способов и устройств для получения технического углерода и его агломерирования

Получение технического углерода возможно не только промышленным способом, из углеводородного сырья (газа или жидкости), но и при механо-термической переработке органических техногенных отходов. В мире существует множество различных способов и оборудования. Наиболее распространенным является термолиз или пиролиз сырья [83-87]. Процесс может быть периодическим или непрерывным. Его осуществляют в реакторах различной конструкции. Однако в последнее время наибольшее распространение получили конструкции с внутренними транспортирующими органами различной конфигурации.

Согласно патенту [88], термолиз резиновой крошки проводят при $T=350\div 400^{\circ}\text{C}$, используя циркулирующие перегретые пары бензина в установке со спиральным движителем. Установка для переработки отходов [89] содержит реактор низкотемпературной деструкции со спиральным транспортером (рисунок 1.7).

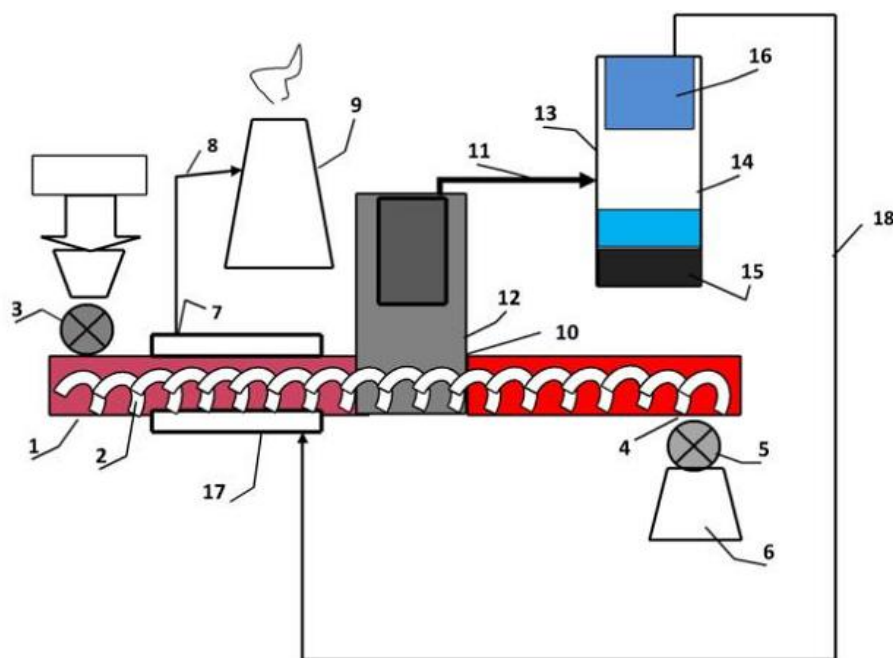


Рисунок 1.7. Установка низкотемпературной деструкции отходов в реакторе со спиральным транспортером:

- 1 – реактор низкотемпературной деструкции; 2 – спиральный транспортер; 3 – питатель; 4 – первый выход; 5 – средство выгрузки твердого продукта; 6 – приемный узел спирального транспортера; 7 – второй выход; 8 – трубопровод дымового газа; 9 – дымовая труба; 10 – третий выход; 11 – трубопровод парогазовой смеси; 12 – фильтр; 13 – ректификационная колонна; 14 – секция отбора технической воды; 15 – секция отбора жидких углеводородов; 16 – секция отбора углеводородного газа; 17 – рубашка обогрева; 18 – трубопровод углеводородного газа.

Основными недостатками предложенного изобретения являются: сложность герметизации узла загрузки из-за использования в его конструкции спирального транспортера вместо шнека; отсутствие надлежащего технического решения для герметизации узла выгрузки; неэффективность конструкции внутреннего транспортирующего органа и др.

В патенте [90] представлена установка для пиролиза углеводородного сырья, содержащая туннельный реактор со шнековым транспортирующим устройством (рисунок 1.8). Температура процесса $400 \div 500^{\circ}\text{C}$, конечные продукты – пиролизный газ и технический углерод.

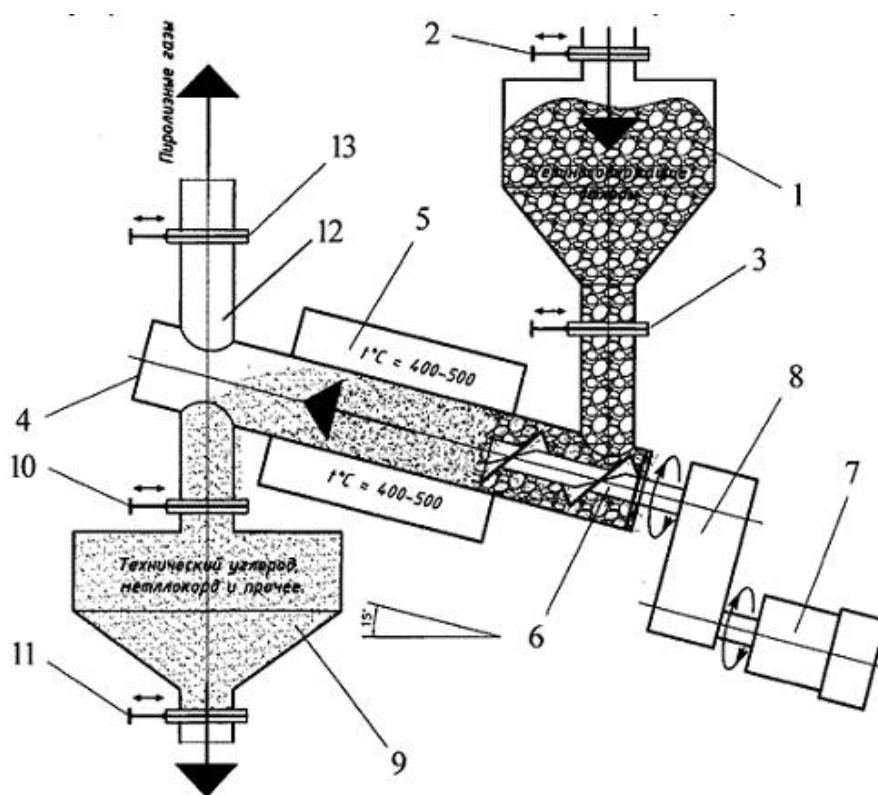


Рисунок 1.8. Установка для пиролиза углеводородного сырья:

1 – бункер; 2,3 – задвижки; 4 – пиролитический реактор; 5 – устройство обогрева; 6 – укороченный шнек; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор; 9 – бункер; 10,11 – соответственно, верхняя и нижняя задвижки; 12 – трубопровод для отвода пиролизного газа; 13 – задвижка трубопровода.

Недостатками данного изобретения являются: периодический режим работы; возможность доступа в реактор кислорода воздуха в момент загрузки и выгрузки сырья; отсутствие газопылевого фильтра; отсутствие возможности регулировки технологических режимов.

Проводимая в настоящее время в России реформа обращения с отходами также способствует разработке технологий и технических средств, позволяющих получать в процессе переработки отходов целевые конечные продукты. Так, в патенте РФ [91] предложен способ и устройство для переработки твердых коммунальных и промышленных отходов с получением жидких, газообразных и твердых (углеродное вещество) продуктов. В патенте РФ [92] предложен способ и устройство для получения аморфных диоксида кремния и углерода.

Физико-механические характеристики и физико-механические свойства технического углерода, получаемого различными способами термомеханической переработки органических техногенных отходов, в значительной степени зависят как от исходного сырья, так и от технологического режима переработки. Отсутствие единых нормативных требований к ТУ, получаемому в процессе переработки отходов, не позволяет вывести его на рынок как товарный продукт или исходное сырье. Одной из проблемных задач является разработка технологии и технических средств, способных менять технологические режимы переработки в зависимости от вида и свойств поступающего сырья, решение которой будет способствовать получению ТУ со стабильными характеристиками. Специфические характеристики ТУ, такие как полидисперсность, слеживаемость, низкая насыпная плотность, пыление и другие, не позволяют использовать материал по целевому назначению без дополнительной обработки. Одним из приемов решения вышеуказанной проблемы является его агломерирование (гранулирование, брикетирование, компактирование).

Агломерирование тонкодисперсных материалов можно осуществить различными способами с применением специального оборудования. Так, например, известны способ и устройство для гранулирования в псевдоожиженном слое [93; 94]. Этот способ востребован в различных областях промышленности, но наибольшее распространение он получил в фармацевтической. Недостатком данного способа является высокая себестоимость гранул, сложность длительного поддержания псевдоожиженного слоя. Особенно это важно для полифракционных материалов, в частности, исследуемого нами ТУ.

Одним из распространенных способов, востребованных в современной промышленности, является гранулирование (окатывание) порошкообразных материалов с использованием тарельчатого гранулятора. В частности, известны способ гранулирования мелкодисперсных материалов [95], а также способ и устройство для гранулирования различных порошков [96], представленные на рисунке 1.9.

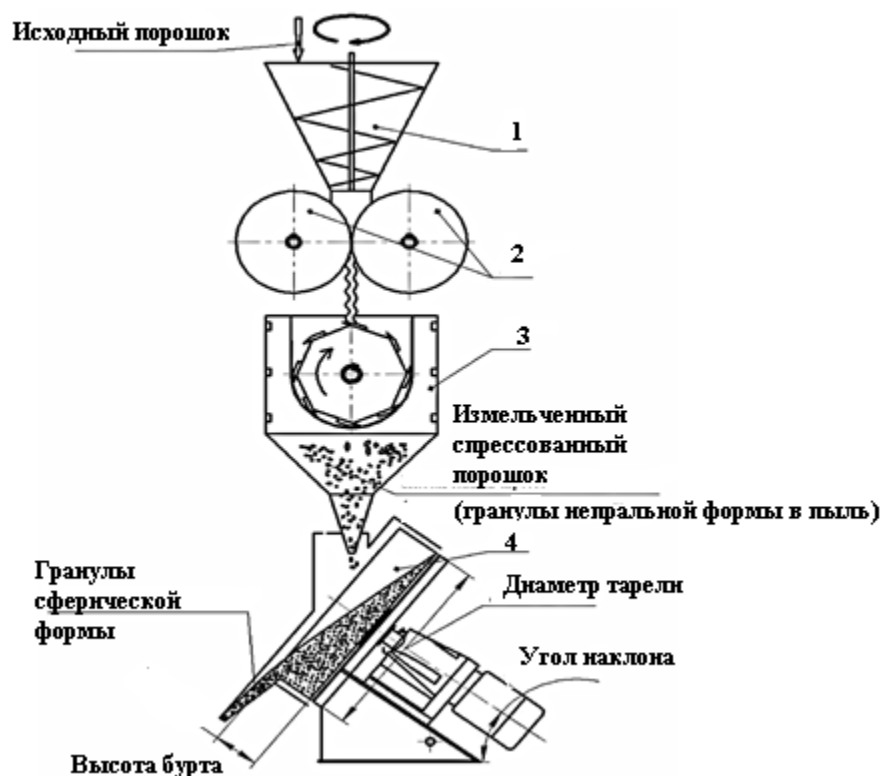


Рисунок 1.9. Конструктивная схема устройства для гранулирования порошкообразных материалов:

1 – питатель; 2 – прессвалки; 3 – классификатор; 4 – гранулятор тарельчатого типа.

Устройство может быть использовано в различных областях промышленности, в том числе химической, например, для гранулирования оксида цинка. Технические решения направлены на устранение пыления и увеличения прочности гранул. Отличительной особенностью данного способа является предуплотнение материала, дальнейшее его прессование с усилием $10 \div 60$ Кн, а также продавливание спрессованного порошка через сито. Недостатком данного изобретения является повышенная металлоемкость и низкая энергоэффективность процесса.

Данный тип оборудования также востребован в сельскохозяйственной промышленности для гранулирования порошкообразных удобрений. Преимуществом тарельчатых грануляторов является простота конструкций.

Однако большие габаритные размеры (диаметр тарели, $D_t \leq 6\text{ м}$, высота борта, $H \leq 0,6\text{ м}$), чувствительность к содержанию жидкой фазы, узкие пределы рабочих режимов и другие, являются недостатками.

Представленные конструкции не целесообразно применять для гранулирования материалов, производимых в условиях малотоннажных производств.

Одним из типов оборудования, применяемым для гранулирования порошкообразных материалов, являются высокоскоростные пальцевые смесители-грануляторы (рисунок 1.10).

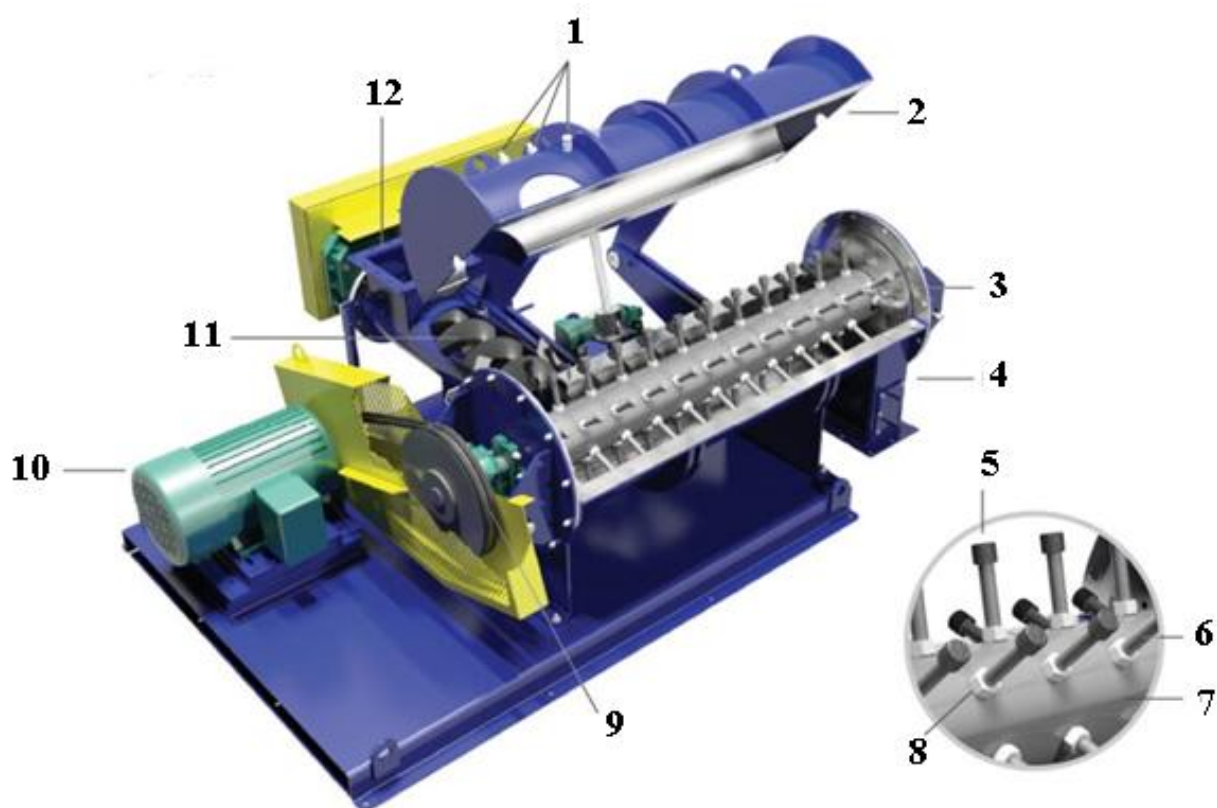


Рисунок 1.10. Пальцевый смеситель-гранулятор FEECO International corp.:

1 – распылители; 2 – откидная крышка; 3 – вал с пальцевыми рабочими органами; 4 – узел выгрузки; 5 – износостойкое покрытие; 6 – пальцы; 7 – вал смесителя; 8 – стопорная гайка; 9 – ременной привод; 10 – мотор; 11 – шнековый питатель; 12 – приемный бункер.

Данный тип грануляторов предназначен для гранулирования ТУ, выпускаемого промышленным способом для резинотехнической промышленности, получения гранул с размерами $\leq (1 \div 1,2)$ мм и дальнейшего их применения в производстве шин.

Широко распространены грануляторы барабанного типа. К их преимуществам можно отнести простоту конструкции, большую единичную мощность, возможность совмещения процесса гранулообразования и сушки.

Однако вышеперечисленные достоинства промышленных агрегатов барабанного типа не являются таковыми при гранулировании ТУ низкой насыпной плотности, полученного по термолизной технологии. Конструктивно-технологическое совершенствование барабанных грануляторов осуществляется по пути совмещения в одном аппарате нескольких технологических процессов. Данный тип грануляторов с различными конструктивными дополнениями представлен в патенте [97], (рисунок 1.11).

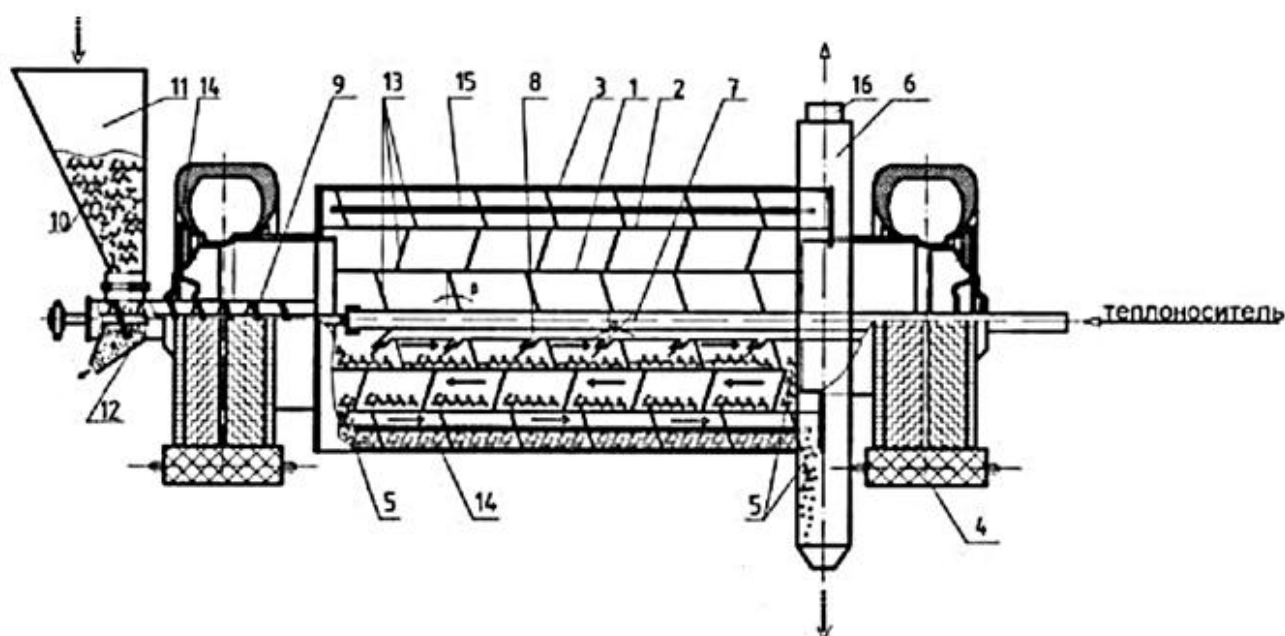


Рисунок 1.11. Конструктивно-технологическая схема барабанно-винтового агрегата для сушки гранулированных и сыпучих материалов:

1-3 – соответственно внутренний, средний и внешний барабаны; 4 – опорные ролики; 5 – выгрузочные окна; 6 – камера выгрузки; 7 – патрубок теплоносителя; 8 – направляющие растрески; 9 – питатель шнекового типа; 10 – обрабатываемый материал; 11 – приемный бункер; 12 – перфорированная часть поверхности шнекового питателя; 13 – нормальные геликоидальные параллелепипеды-геликоиды; 14 – электронагреватели; 15 – теплоизоляция; 16 – патрубок.

Технической задачей данного изобретения является снижение энергозатрат и теплотер, возможность непрерывного режима работы, равномерность загрузки материала. Недостатки данного изобретения – отсутствие возможности микрогранулирования материалов, рециркуляции теплоносителя и классификации сгранулированного материала. Кроме того, агрегат имеет

недостаточно эффективный тепломассообмен, т.к. отсутствует возможность дополнительной интенсификации процесса, например, шнековым транспортирующим устройством с отдельным приводом.

Следует отметить, что дальнейшее конструктивно-технологическое совершенствование данного технического решения (патента) для переработки полидисперсных материалов с различными физико-механическими характеристиками, может обеспечить существенное расширение технологических возможностей. Так, например, использование рабочих органов специального геометрического профиля обеспечивает заданную траекторию движения частиц и способствует реализации постадийных кинетических процессов.

Также разработаны и запатентованы устройства, различающиеся своей конструкцией и решаемыми технологическими задачами. Например, для обработки порошкообразного материала, известно устройство с кольцевыми направляющими пластинами [98]. Также известен вертикальный гранулятор для агломерирования предварительно увлажненных порошкообразных материалов с жидким связующим [99; 100]. Известны и зарубежные разработки способов и устройств для агломерирования полидисперсных материалов [101; 102].

Проведенные нами исследования в области патентования способов и технических средств для безотходной термомеханической переработки техногенных и органических отходов позволяют установить основные направления дальнейшего конструктивно-технологического совершенствования ресурсо-энергосберегающего оборудования и технологий.

Кроме того, анализ конструктивно-технологических особенностей патенто-защищенных разработок свидетельствует о необходимости устранения следующих недостатков: снижения металлоемкости конструкций; реализации в них различных технологических процессов, операций (комбинаторики); обеспечения рекуперации механической или тепловой энергии в замкнутом рециркуляционном контуре и др.

1.6. Перспективные направления развития ресурсо-энергосберегающих технологий и специального оборудования для получения технического углерода и сфер его использования в промышленности

В основе принимаемых в стране законов в сфере экологической безопасности РФ положен принцип экономики замкнутого цикла переработки материалов, когда отходы производства и потребления, после их обработки или переработки, являются конечным продуктом, подлежащим реализации или исходным сырьем при дальнейших технологических переделах. В настоящее время мировой рынок товаров, произведенных с использованием вторичных ресурсов, оценивается в 100 миллиардов евро [103].

Наиболее перспективные направления научно-технологического развития страны определяются стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления до 2030 г., утвержденной правительством РФ в 2018 г. Проведение научных исследований и опытно-конструкторских разработок остается наиболее важным направлением при создании высокотехнологичного оборудования для утилизации органических техногенных отходов, прошедших предварительную обработку. При этом не менее значимым является создание ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий переработки отходов, с получением конечной продукции в виде изделий, материалов, вторичного сырья, ценных компонентов и др. [23].

Проведенный нами анализ в области механо-термической переработки органических техногенных отходов, отечественных и зарубежных технологий позволяет сделать заключение о востребованности эффективных рациональных решений и необходимости проведения дальнейших научно-технических и опытно-конструкторских работ.

Внедряемые в настоящее время перспективные разработки не могут быть объединены одним типом физико-химических воздействий. Необходимо использовать комбинированные процессы, являющиеся сочетанием двух и более типов, один из которых может быть преобладающим.

Разрабатываемое направление комплексной переработки ОТМ с различными физико-механическими характеристиками, частично реализовано в рамках выполненного Государственного задания Минобрнауки России в следующих проектах: проект № 10089447, реализованный 2020 – 2022 гг., в рамках Научно-образовательного центра «Инновационные решения в АПК», на платформе «Рациональное природопользование», проект «Разработка, исследование и опытно-промышленное освоение ресурсо-энергосберегающих инновационных технологий для производства товарной продукции и снижением экологической нагрузки на окружающую среду» (FZWN-2021-0014) 2021-2023 гг.; [104,105] и др. Это имеет большое перспективное значение в виду огромного потенциала неиспользуемых ресурсов, вторичных сырьевых материалов.

Технический углерод, получаемый способом низкотемпературного термоллиза, является материалом, имеющим специфические характеристики – полидисперсность, пористость, низкую насыпную плотностью, пыление и др. Для дальнейшей реализации ТУ в виде конечного продукта требуется улучшение его потребительских свойств. В первую очередь необходимо снизить пылеобразование и слеживаемость при хранении и транспортировке, а также повысить сыпучесть и плотность, это позволит улучшить эффективность процессов автоматизированного и механизированного смешивания, дозирования и др. Для этих целей ТУ необходимо подвергнуть агломерированию. В агломерированном виде он может быть использован в различных областях промышленности: строительной, лакокрасочной, резинотехнической, полимерной, химической и др. Для определения наиболее перспективной области использования ТУ низкотемпературной термоллизной технологии необходимо провести исследования его физико-механических характеристик и физико-химических свойств, а также исследовать полученные гранулы и определить их прочность, истираемость, водопоглощение и др.

1.7. Цели и задачи исследования

Цель данной работы. Повышение эффективности процесса агломерирования технического углерода в барабанно-винтовом агрегате за счет совершенствования его конструктивно-технологических параметров:

1. На основе анализа современных технологий и технических средств определить перспективные направления получения агломерированного технического углерода из органических техногенных материалов – ТКО.

2. Разработать механо-реологическую модель процесса агломерирования ТУ с учетом его специфических особенностей.

3. Провести аналитические исследования процессов постадийного агломерирования ТУ и физическое моделирование условий их конструктивно-технологической реализации.

4. Разработать патентозащищенные способы и устройства для термолизной переработки органических техногенных материалов и агломерирования полученного ТУ.

5. Разработать методы расчета конструктивно-технологических, энерго-силовых, кинематических и теплотехнических параметров БВА.

6. Провести регрессионный анализ результатов многофакторного планирования экспериментов и установить рациональные условия процесса агломерирования ТУ.

7. Для производственных условий ООО «ТК «Экотранс» разработать: технологический модуль с БВА для агломерирования ТУ ресурсосберегающей термолизной технологии и технологический регламент получения продукции; провести опытно-промышленные испытания специального оборудования и установить технико-экономическую эффективность научно-технических разработок.

1.8. Выводы

1. Изучены основные проблемные задачи в области защиты окружающей среды при загрязнении техногенными материалами, а также технологии и технические средства комплексной переработки органических ТКО.
2. Проведен анализ существующих технологий термомеханической переработки органических ТКО с получением высококалорийной товарной продукции.
3. Проведен анализ технологий и технических средств для агломерирования полидисперсных материалов. Определены направления их конструктивно-технологического совершенствования.
4. Изучены методики расчетов основных конструктивно-технологических параметров агломерационного оборудования различного типа, определены основные закономерности процесса гранулирования.
5. Определены перспективные направления развития ресурсо-энергосберегающих технологий и оборудования для получения технического углерода.
6. Поставлена цель и определены задачи исследований диссертационной работы.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЕГО АГЛОМЕРИРОВАНИЯ В БАРАБАННО-ВИНТОВОМ АГРЕГАТЕ.

2.1. Основные технологические принципы реализации термолитических технологий переработки органических материалов и агломерирования технического углерода.

Переработка отходов, согласно ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения» - деятельность, связанная с выполнением технологических процессов по обращению с отходами для обеспечения повторного использования в народном хозяйстве полученных сырья, энергии, изделий и материалов. Согласно приведенной выше терминологии, а также руководствуясь принципами ресурсо-энергосбережения и рационального природопользования, коллективом авторов, включающим ИТР индустриального партнера ООО «ТК «Экотранс» и ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, на уровне патентов на изобретения была разработана технологическая линия низкотемпературной термолитической переработки органических ТКО [40-44].

Ключевым элементом линии является установка для термомеханической переработки преимущественно измельченных органических отходов различных отраслей: ЖКХ, химической, строительной, сельскохозяйственной, пищевой, топливной и др., (рисунок 2.1) [45-50].

Основными технологическими блоками установки низкотемпературной термолитической переработки органических твердых коммунальных и промышленных отходов являются: вертикальный герметизирующий питатель, выполненный в виде последовательно установленных по ходу движения материала блоков транспортировки и герметизации материала. Трубчатый реактор, составленный из двух параллельно установленных в вертикальной плоскости цилиндрических корпусов с консольно установленными внутри спиралевидными транспортирующими

органами и индивидуальными приводами. Цилиндрические корпуса соединены пересыпной колонной.

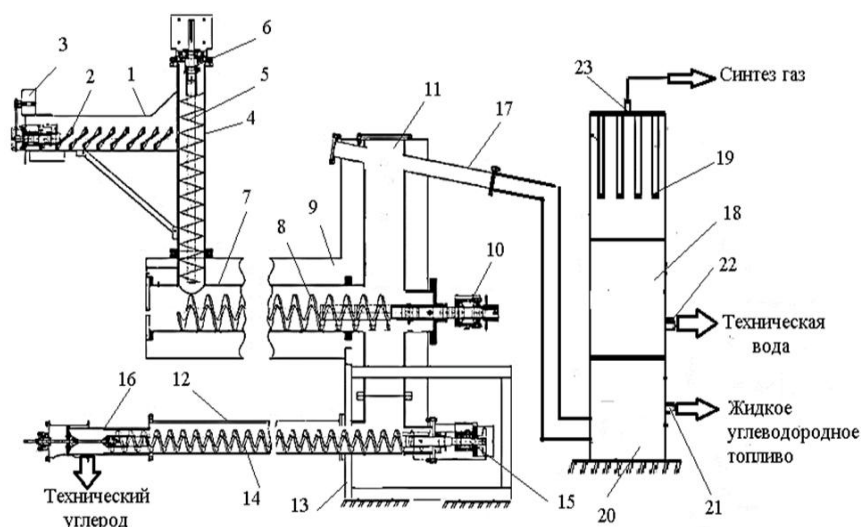


Рисунок 2.1. Установка низкотемпературного термолиза ТКО:

1 – горизонтальный питатель; 2,5 – транспортирующие шнеки; 3,6,10,15 – индивидуальные приводы; 4 – вертикальный герметизирующий питатель; 7 – реактор низкотемпературного термолиза; 8,14 – спиралевидный транспортирующий орган; 9 – теплоизоляция; 11 – пересыпная колонна; 12 – реактор стабилизации технического углерода; 13 – опорная рама; 16 – выгрузочный герметизирующий узел; 17 – трубопровод дымовых газов; 18 – ректификационная колонна; 19 – конденсатор; 20 – куб ректификационной колонны; 21 – штуцер отбора жидкого углеводородного топлива; 22 – штуцер отбора технической воды; 23 – штуцер отбора синтетического газа

Представленная на рисунке 2.1 установка низкотемпературного термолиза работает следующим образом:

Предварительно измельченные органические ТКО загружаются в приемный лоток горизонтального питателя 1, откуда транспортирующим шнеком 2, приводимого во вращение индивидуальным приводом 3, подаются в вертикальный герметизирующий питатель 4. Данный питатель с помощью транспортирующего шнека 5, приводимого во вращение индивидуальным приводом 6, обеспечивает создание «пробки» из уплотненного материала, обеспечивающей герметизацию реактора низкотемпературного термолиза 7, а также равномерную подачу уплотненного материала. Перерабатываемый материал, продвигаясь вдоль реактора, под воздействием температуры разлагается на твердую составляющую и парогазовую смесь. Твердая фракция через пересыпную колонну 11, закрепленную на опорной металлоконструкции 13, попадает в реактор стабилизации технического углерода 12.

Продвигаясь в реакторе стабилизации, с помощью спиралевидного транспортирующего органа 14, приводимого во вращение индивидуальным приводом 15, технический углерод охлаждается до $T \leq 80^{\circ}\text{C}$, чтобы исключить самовоспламенение при выгрузке, через выгрузочный герметизирующий узел 16.

Через трубопровод дымовых газов 17, парогазовая смесь поступает в ректификационную колонну 18. Конденсация парогазовой смеси происходит в конденсаторе 19. В кубе ректификационной колонны 20 поддерживается температура кипения сконденсированной жидкости в пределах $120\text{--}130^{\circ}\text{C}$, в результате чего происходит выпаривание технической воды. Жидкое углеводородное топливо отбирается из куба колонны через штуцер 21. Отбор технической воды производится через штуцер 22. Синтез газ отбирается через штуцер отбора 23.

Все это в совокупности позволяет перерабатывать органические ТКО с нестабильным морфологическим составом способом низкотемпературного термолиза, получая при этом высококалорийные конечные продукты: технический углерод, жидкое углеводородное топливо и синтез газ.

Получаемые по термолизной технологии ТУ обладает специфическими особенностями: высокой дисперсностью, полифракционным составом, низкой насыпной плотностью и сыпучестью, повышенным пылеобразованием и другими характеристиками, что свидетельствует о целесообразности его агломерирования.

Выполненный нами анализ существующих технологий агломерирования полидисперсных материалов и соответствующего оборудования для их реализации позволили разработать патентозащищенную конструкцию барабанно-винтового агрегата (БВА) для агломерирования ТУ с учетом указанных выше его свойств.

Барабанно-винтовой агрегат патент РФ №2748629, Евразийский патент №040258 предназначен для гранулирования технического углерода низкотемпературной термолизной технологии переработки органических техногенных отходов, а также иных высокодисперсных, пылевидных материалов с низкой насыпной плотностью. На рисунке 2.2 представлена конструктивно-технологическая схема разработанного БВА.

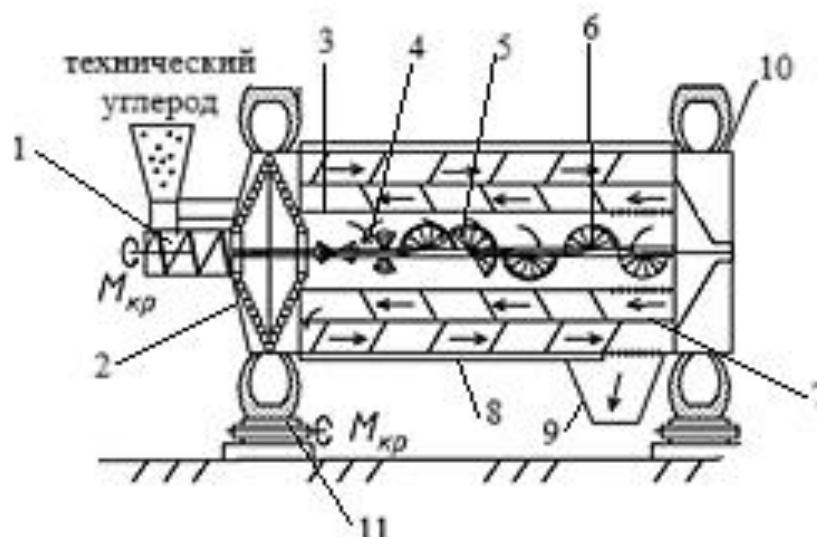


Рисунок 2.2. Конструктивно-технологическая схема БВА:

1 – транспортирующий шнек, 2 – спиралевидный блок микрогрануляции, 3 – центральный барабан, 4 – разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти, 5 – однонаправленные однозаходные винтовые лопасти, 6 – разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти, 7 – средний барабан, 8 – внешний теплоизолированный барабан, 9 – устройство выгрузки, 10 – бандажи, 11 – опорные ролики.

Барабанно-винтовой агрегат, работает следующим образом:

Технический углерод транспортирующим шнеком 1 перемещается в спиралевидный блок микрогрануляции 2. Далее шихта поступает в центральный барабан 3, где с помощью попарно установленных на центральном валу разнонаправленных двухзаходных винтовых лопастей 4 происходит упрочнение микрогранулята. Далее, с помощью последовательно установленных, однонаправленных, в сторону выгрузки однозаходных винтовых лопастей 5, происходит окончательное формирование гранул. Затем, однозаходными разнонаправленными винтовыми лопастями 6 полифракционный гранулят классифицируется через перфорированный корпус, попадает в средний барабан 7 и далее во внешний теплоизолированный барабан 8, откуда через устройство выгрузки 9 выводится на затаривание. Внешний теплоизолированный барабан 8 через бандажи 10 опирается на опорные ролики 11.

Главной технологической особенностью агрегата являются процессы, вызываемые воздействием на гранулируемый материал внутренними винтовыми устройствами, вращающимися совместно с барабанами.

2.2. Разработка и анализ механо-реологической модели процесса агломерирования технического углерода

Как было указано ранее, при переработке органических техногенных материалов способом низкотемпературного термолiza, одним из конечных продуктов, является технический углерод. Последний, ввиду указанных специфических особенностей и физико-механических характеристик (см. п. 1.3), обеспечивающих новые технологические свойства выпускаемой продукции, весьма востребован в различных инновационных технологиях. Однако для расширения технологических возможностей и областей использования ТУ, его необходимо агломерировать, учитывая его специфические особенности.

В связи с вышеизложенным необходимо не только более детально исследовать физико-химические свойства ТУ на современном уровне, но и разработать алгоритм постадийных технологических операций – процессов агломерирования, а также конструктивно-технологические решения для их реализации.

Механо-реологическая модель является научным обоснованием процесса агломерирования ТУ, исходя из его реологических характеристик. Разработка механо-реологической модели структурно-деформационного взаимодействия частиц ТУ возможна при установлении общих принципов формования, учитывающего специфические особенности материала. Последний представляет собой полифракционную неводонасыщенную систему с большим содержанием пор. Базируясь на основополагающих принципах механики грунтов, общих закономерностях процесса гранулообразования, а также результатах научных трудов в области изучения реологических процессов ученых: акад. П.А. Ребиндера, проф. С.С. Вялова, проф. Нечипоренко, проф. В.С. Фадеевой, проф. Е.А. Исаева, проф. Л.М. Сулименко, проф. Т.Н. Ильиной, проф. Н.П. Блещина, С.А. Евтюкова и других [62, 63, 106-115] сформированы основополагающие принципы физико-химической механики структурно-деформационного взаимодействия частиц при внешнем силовом воздействии.

Процесс уплотнения частиц со связующим можно рассматривать как зависимость степени уплотнения шихты E , %, при ее деформации от усилия деформирования материала P_i , Н (рисунок 2.3).

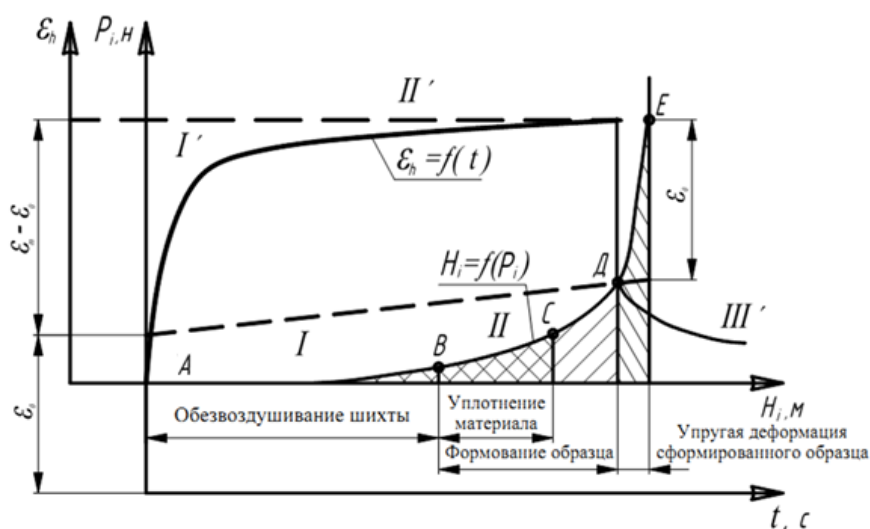


Рисунок 2.3. Реологические кривые упруго-вязко-пластического деформирования шихты

$$E = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} 100\%, \quad (2.1)$$

где γ_i – плотность шихты в заданный период ее уплотнения, кг/м³;
 γ_w – истинная плотность уплотняемой шихты с учетом связующего, кг/м³.

Значение предельной плотности γ_i формируемой шихты определяется по формуле Р.Я. Попильского [117].

$$\gamma_i = \frac{(100 \cdot \gamma_w \cdot \gamma_{св})}{[(100 - C_{св}) \cdot \gamma_{св}] + \gamma_w}, \quad (2.2)$$

где γ_w – истинная плотность частиц, кг/м³;
 $\gamma_{св}$ – плотность связующего, кг/м³;
 $C_{св}$ – содержание связующего в шихте, %.

Анализируя классические кривую упруго-вязко-пластического формирования шихты (рисунок 2.3.), можно сделать вывод о том, что в начальный период времени (кривая АВ) требуется минимальное силовое воздействие на материал для удаления газо-воздушной составляющей из порового пространства и при уплотнении частиц. Следовательно, продолжительность первой стадии

агломерирования в большей степени зависит от порозности обрабатываемого материала и его гранулометрического состава.

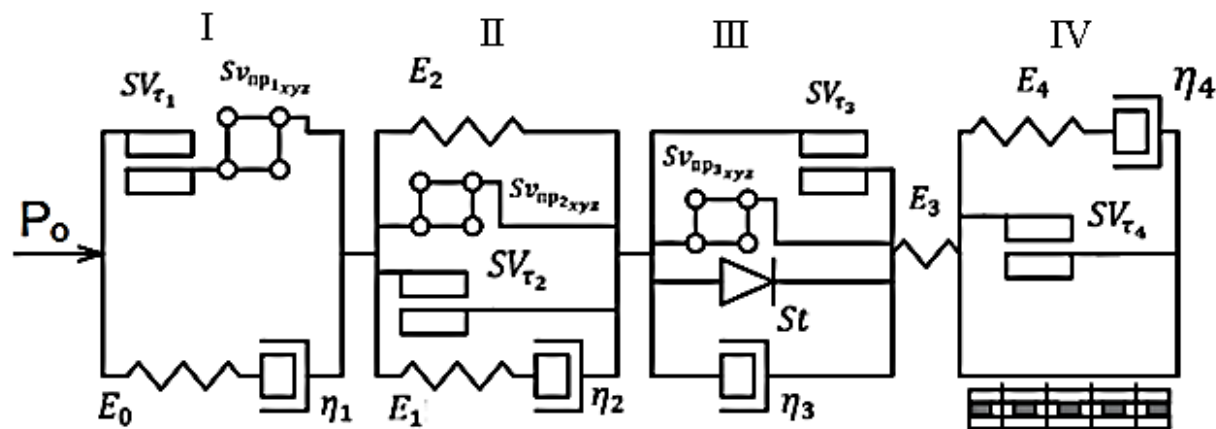
На второй стадии агломерирования (кривая ВС) основная работа затрачивается на упруго-вязко-пластическую деформацию предуплотненных частиц; упрочнение поверхностного слоя микрогранулы и дальнейший процесс гранулообразования. На третьей стадии (кривая СД) требуется наибольшее приложение к формуемым гранулам внешних усилий, затрачиваемых на преодоление возникающих упругих деформаций. Процесс уплотнения шихты сопровождается наибольшими энергозатратами и не рационален.

Также целесообразно рассматривать зависимость относительной деформации агломерируемого материала ε_h от времени его деформирования t , $\varepsilon_h = f(t)$, (рисунок 2.3.) кривая II. При внешнем силовом воздействии на вязко-пластичный материал с большим количеством воздушных пор наступает почти мгновенная деформация шихты (участок ε_0). Т.е. наступает стадия упругого последствия, где происходит релаксация напряжений в сформованной грануле.

Используя вышеуказанные закономерности процесса уплотнения полидисперсной шихты, а также вариативность используемых элементов и их взаимодействия при упруго-вязко-пластическом деформировании материала, совместно со структурно-деформационным взаимодействием его частиц, целесообразно построение механо-реологической модели процесса гранулообразования. Это позволяет более детально рассмотреть процесс постадийного гранулообразования технического углерода с учетом его специфических особенностей. Кроме того, изучение процесса уплотнения шихты с построением механо-реологической модели позволяет расширить технологические возможности создаваемого агрегата для агломерирования ТУ.

Получаемый при термолизной переработке технический углерод обладает низкой насыпной плотностью ρ_0 и сыпучестью, большим пылением и низким водопоглощением, полидисперсным составом и высокой адсорбционной

способностью и др. Эти особенности были нами учтены при разработке механо-реологической модели (рисунок 2.4).



Стадии процесса агломерирования			
I	II	III	IV
Упруго-вязко-пластическое микрогранулирование шихты с объемно-пространственным ориентированием частиц	Упруго-вязко-пластическое уплотнение и упрочнение микрогранул при их объемно-пространственном ориентировании и внутреннем рециклинге	Вязко-пластическое гранулообразование микрогранулята при его однонаправленном ориентировании	Упруго-вязко-пластическое деформирование гранулята при его внутреннем рециклинге и релаксации

Рисунок 2.4. Механо-реологическая модель процесса агломерирования полидисперсного материала на различных ее стадиях

При агломерировании полидисперсного материала с низкой насыпной плотностью способом окатывания, на **первой стадии I** (рисунок 2.4) характерно сближение частиц, сопровождающееся удалением газообразной фазы и перемещением поровой жидкости из зон с повышенным напряжением. На данной стадии механо-реологическая модель представлена элементами Гука E_0 и Ньютона η_1 . Кроме того, учитывая указанные особенности ТУ, для интенсификации процесса агломерирования, придания конгломератам частиц сферообразной формы необходимо обеспечить образование зародышей – центров гранулообразования.

Для обеспечения наиболее благоприятных условий процесса образования микрозародышей, естественно, необходимо создание большей степени свободы отдельных частиц ТУ при их перемещении, т.е. в пространственных плоскостях с координатами X, Y, Z, что характеризуется элементом SV_{np1xyz} пространственной ориентацией частиц.

Естественно, при образовании микророзародышей и их перемещении необходимо преодоление сил трения, что характеризуется нелинейно-деформируемым элементом Сен-Венана SV_{τ_1} . Для реализации данного процесса возможны: центробежное воздействие, вибрация, направленное движение материальных потоков и другие, способствующие пространственной переориентации частиц. Это, в свою очередь, ускоряет образование микророзародышей. Приложение внешних динамических нагрузок возможно также с помощью использования внутренних специальных устройств: полок, лопаток, лопастей, полых спиралевидных патрубков и др., осуществляющих направленное объемно-пространственное воздействие.

Первая стадия упруго-вязко-пластического деформирования частиц (элементы E_0, η_1, SV_{τ_1} , с их объемно-пространственной ориентацией (элемент $SV_{\text{пр}_{xyz}}$)) завершается образованием микророзародышей, в которых контактное взаимодействие частиц сопровождается внутренней миграцией адсорбированной и связанной жидкости (связующего), что, в конечном итоге, приводит к улучшению процесса образования микроконгломератов.

На **второй стадии** агломерирования необходимо осуществить упрочнение поверхностных слоев полученных микрогранул. В этот период происходит механический контакт поверхностей отдельных частиц с образованными ранее микророзародышами. Наличие пленок адсорбированной жидкости благоприятно сказывается на процессе гранулообразования, но при наличии необходимого времени взаимодействия. Последнее может быть обеспечено при реализации интенсивного внутреннего рециклинга микрогранул, характеризующегося достаточно протяженной траекторией их движения вдоль корпуса барабана. Пространственное перемещение последних с усиленным динамическим взаимодействием, характеризуемое упруго-вязко-пластическим уплотнением слоя микрогранул (элемент Гука – E_1 , Ньютона – η_2 , Сен-Венана – SV_{τ_2}). Упрочнение поверхностной оболочки микрогранул элементом Гука, E_2 – модулем упругости от внешнего силового воздействия.

Указанный процесс может быть реализован с помощью специальных устройств, например, двухзаходных винтовых лопастей. Последние обеспечивают, при объемно-пространственной переориентации (элемент - $Sv_{\text{пр}2xyz}$) микрогранул и частиц материала, их механический контакт и взаимодействие. Это приводит к дальнейшему микрообразованию. Указанный процесс усиливается при интенсивном внутреннем рециклинге (четыреждыкратном силовом воздействии за один оборот) микрогранулята. При этом происходит также упрочнение поверхностного слоя (оболочки) отдельных микрогранул.

На **третьей** стадии реализуется окончательное формирование гранул. Воздействие на них сводится к объемно-пространственному перемещению микрогранулята и максимально возможному его контактированию с поверхностью гранулообразования. На этой стадии также происходит объемно-пространственная переориентация частиц, отражаемая структурным элементом $Sv_{\text{пр}3xyz}$. Однако в результате происходящих между гранулами ударно-касательных взаимодействий ($\sigma - \tau$) происходит их частичное разрушение. Данный процесс сопровождается массообменом между гранулами, что приводит к дополнительному росту и уплотнению более прочных из них. В механо-реологической модели окончательного гранулообразования данный процесс представлен в виде элемента St – стопор. Интенсификация процесса гранулообразования может быть достигнута при обеспечении дополнительной возможности пространственно-ориентированного перекачивания гранул заданного направления и увеличенной протяженности зоны их контакта с рабочей поверхностью за один цикл работы гранулирующего устройства. Например, за один оборот вращения камеры или вала с лопастными устройствами, обеспечивающими процесс гранулирования. Данный процесс может быть представлен в модели (рисунок 2.4) в виде элемента объемно-пространственной переориентации однонаправленной цикличности $Sv_{\text{пр}3xyz}$, а реализован – с помощью однозаходных винтовых устройств. Кроме того, процесс

гранулообразования сопровождается процессами вязко-пластического окатывания (деформации), представленной элементами Ньютона η_3 и Сен-Венана SV_{τ_3} .

Для **четвертой стадии**, завершающей обработку технического углерода, необходимо провести классификацию полученного на предыдущих стадиях гранулята. Данный процесс сопровождается преодолением сил трения при классификации полифракционного гранулята и может быть представлен в виде элемента SV_{τ_4} . Интенсификация процесса классификации, как известно, может быть достигнута при многократном рециркуляционном воздействии устройств на полифракционный материал. В качестве таких устройств могут быть использованы разнонаправленные винтовые поверхности рециркуляционного действия, представленного в виде элементов Гука E_4 и Ньютона η_4 перемещаемого слоя гранул. Механическое трение между поверхностью классифицирующего устройства и слоем гранулята характеризуется элементом Сен-Венана SV_{τ_4} .

Разработанная нами механо-реологическая модель процесса агломерирования полифракционных поризованных материалов (технического углерода, перлита и др.) позволяет определить направления теоретических и экспериментальных исследований, в т.ч. с использованием постадийного физического моделирования технологических процессов, а также расширить возможности дальнейшего конструктивно-технологического совершенствования создаваемого агрегата. Необходимость разработки специального оборудования для агломерирования ТУ обусловлена ранее указанными специфическими особенностями материала, не позволяющими использовать существующие агрегаты.

2.3. Аналитические исследования постадийного процесса агломерирования

Учитывая стадийность процесса упруго-вязко-пластического деформирования шихты рассмотренный ранее (рисунок 2.4) параметры относительной деформации формуемого гранулята можно представить в виде

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} + \varepsilon_{IV}, \quad (2.3)$$

где ε_I , ε_{II} , ε_{III} , ε_{IV} – соответственно, относительная деформация уплотненных частиц агломерируемого материала на I-IV стадиях его механо-реологической обработки.

На **первой стадии** упруго-вязко-пластического деформирования частиц девиатор сдвиговой деформации для тела Гука первой стадии деформации частиц.

$$e_{E_1}^D = \frac{\bar{\sigma}_r^{D_{rI}}}{2G_1}, \quad (2.4)$$

где $\bar{\sigma}_r^{D_{rI}}$ – нормальное напряжение частиц тела Гука, Н/м²;

G_1 – модуль сдвига, Н/м².

Тензор скорости деформации тела Гука.

$$\dot{e}_{E_1}^D = \bar{\sigma}_r^{D_{rI}} (2G_1)^{-1} \quad (2.5)$$

Девиатор сдвиговой деформации для тела Ньютона, соответственно, равен.

$$e_{\eta_1}^D = \frac{\bar{\sigma}_n^{D_{nI}}}{2\eta_{n1}} \quad (2.6)$$

Тензор скорости деформации тела Ньютона

$$\dot{e}_{\eta_1}^D = \bar{\sigma}_n^{D_{nI}} (\eta_{n1})^{-1}, \quad (2.7)$$

где $\bar{\sigma}_n^{D_{nI}}$ – нормальное напряжение частиц тела Ньютона, Н/м²;

η_{n1} – вязкость связующего (свободного) в капиллярах тела Ньютона, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$.

При этом тензор скорости суммарной деформации тела Гука и Ньютона на **первой стадии** будет равен.

$$\dot{e}_{E_1\eta_{n1}}^D = \bar{\sigma}_r^{D_{rI}} (2G_1)^{-1} + \bar{\sigma}_n^{D_{nI}} (\eta_{n1})^{-1}. \quad (2.8)$$

Величину относительной деформации частиц на **первой стадии** для тела Гука и Ньютона получим при интегрировании выражения (2.7) по времени t_1 ,

$$\varepsilon_{E_1\eta_{n1}}^D = \bar{\sigma}_r^{D_{rI}} (E_0)^{-1} t_1 + \bar{\sigma}_n^{D_{nI}} (\eta_{n1})^{-1} t_1, \quad (2.9)$$

где E_0 – модуль Гука, Н/м²

Как известно, сочетание тел Гука и Ньютона представляет тело Максвелла. Тогда выражение (2.9) можно представить в виде.

$$\varepsilon_{E_1\eta_1}^I = \left(\frac{\bar{\sigma}_\Gamma^I}{E_0} + \frac{\bar{\sigma}_H^I}{\eta_1} \right) t_1. \quad (2.10)$$

Как было указано ранее, процесс формирования микрогранул (зародышей) на **первой стадии** агломерирования реализуется не только при упруго-вязком проявлении частиц (тела Гука и Ньютона), но и с последующим пластическим течением (трение – тело Сен-Венана $SV_{\text{тр}_1}$), а также обязательной объемно-пространственной переориентацией (окапывающим воздействием) микрогранулята в системе координат XYZ (тело $SV_{\text{пр}_1xyz}$). Эти процессные явления необходимо также учитывать при определении относительной деформации частиц ε_I на **первой стадии**.

Процесс преодоления сил механического трения между частицами в ходе их окапывания (тело Сен-Венана, $SV_{\text{тр}_1}$, рисунок 2.4.) можно представить в виде выражения, $\sigma_{cv\tau_1} = 2\tau_1 \dot{\varepsilon}_{SV_1}$ или для относительной деформации $\varepsilon_{SV_1}^I = \frac{\sigma_{cv\tau_1}}{\tau_1}$, а процесс объемно-пространственного перемещения (переориентация) частиц – в виде тела $SV_{\text{пр}_1xyz}$, характеризующего перемещение образующихся микрогранул в координатах XYZ.

При этом известно, что интенсивность прироста плотности формируемых частиц при их уплотнении зависит не только от создаваемых напряжений (σ_{xyz} , τ_{xyz}), скорости уплотнения ($\frac{ds}{dt}$, считаем $e_{\sigma_1}^D$, $\tau = \text{const}$) и угловых перемещений.

Из механики сплошной среды и механики грунтов [106,107] известно, что напряженно-деформированное состояние среды в данной точке определяется компонентами напряжений и деформаций на трех взаимно-перпендикулярных плоскостях: три нормальных напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и три пары взаимно-равных касательных напряжений: $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$.

В объемном пространстве учитываются также три относительных деформации: $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и ε_z , а также три пары взаимно-равных угловых деформаций (относительных сдвигов) $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$.

Для исследуемых нами процессов, реализуемых в механо-реологической модели, согласно указанным положениям механики сплошной среды, для объемно-пространственной переориентации частиц (элементы $Sv_{\text{пр}}, \sigma_{xyz}, \tau_{xyz}, \gamma_{xyz}$) полагаем:

для нормальных напряжений – $\sigma_{xy}; \sigma_{yz}; \sigma_{zx}$;

касательных напряжений – $\tau_{xy}; \tau_{yz}; \tau_{zx}$;

относительной деформации – $\varepsilon_{xy}; \varepsilon_{yz}; \varepsilon_{zx}$;

угловых деформаций – $\gamma_{xy}; \gamma_{yz}; \gamma_{zx}$.

Тогда относительную деформацию элемента $Sv_{\text{пр}_i}$ при объемно-пространственной переориентации частиц, микрогранул, сформованных гранул, согласно (2.10), можно представить в виде

$$\varepsilon_{Sv_{\text{пр}_1xyz}}^I = \frac{\bar{\sigma}_{\Gamma xyz}^I}{E_{0xyz}} + \frac{\bar{\sigma}_{\text{H}xyz}^I}{\tau_{xyz}^I}, \quad (2.11)$$

Данное обоснование относительной деформации элемента $Sv_{\text{пр}_{xyz}}$ можно использовать так же для **второй и третьей стадии** механо-реологической модели, где оно используется.

Процесс преодоления сил механического трения между частицами входе их окатывания на первой стадии (тело Сен-Венана SV , рисунок 2.4) можно представить в виде

$$\varepsilon_{SV_1} = \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I \cdot (\tau_1)^{-1}. \quad (2.12)$$

После интегрирования выражения Сен-Венана и элемента объемно-пространственной переориентации частиц $Sv_{\text{пр}_1xyz}$ по времени t_I и используя их в общем значении процесса деформирования на первой стадии получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_I &= \varepsilon_{E_I} + \varepsilon_{\eta_I} + \varepsilon_{CV_I} + \varepsilon_{Sv_{\text{пр}_1xyz}} = \\ &= \bar{\sigma}_{\Gamma}^I (E_0)^{-1} + [\bar{\sigma}_{\text{H}}^I (\eta_I)^{-1}] t_I + \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I (\tau_I)^{-1} + \bar{\sigma}_{Sv_{\text{пр}_1xyz}}^I \cdot (\sigma_{xyz})^{-1}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Или с учетом (2.10)

$$\varepsilon_I = \bar{\sigma}_r^I (E_0)^{-1} + [\sigma_n^I (\eta_L)^{-1}] t_I + \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I (\tau_I)^{-1} + [\bar{\sigma}_{\Gamma_{xyz}}^I (E_{0_{xyz}})^{-1} + \bar{\sigma}_{\Gamma_{xyz}}^I (\tau_{xyz}^I)^{-1}]. \quad (2.14)$$

Исходя из аналогичных рассуждений рассмотрим механизм деформационного воздействия на сформованный микрогранулят на **второй стадии** агломерирования.

На **второй стадии** агломерирования, согласно указанной кинетической кривой уплотнения (рисунок 2.3), необходимо осуществлять дальнейшее увеличение размеров полученного микрогранулята и упрочнение поверхностного слоя гранул.

Процесс деформирования микрогранулята также сопровождается упруго-вязко-пластичным упрочнением при их объемно-пространственном ориентировании в координатах XYZ. Процесс представлен моделью Максвелла (элементы, Гука E_I и Ньютона η_2), реализующей упруго-вязкое и пластическое (элементы Сен-Венана, SV_{τ_2}) воздействие (рисунок 2.3). Кроме того, при усилении динамического воздействия на слой микрогранулята и упрочнении их поверхностного слоя необходимо учитывать упругую деформацию, представленную элементами Гука (E_2) и объемно-пространственного перемещения частиц, в виде нелинейно-деформированного структурного элемента $SV_{np2_{xyz}}$.

Объединение элементов Сен-Венана и Ньютона представляет модель Бингмана, а модель Максвелла с элементом Гука – модель Кельвина.

По аналогии с первой стадией микрогранулирования частиц, величина полной деформации микрогранулята, выраженной через тензор скорости, на **второй стадии** представлена в виде.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{II}^D = \dot{\varepsilon}_{E_{1,2}}^D + \dot{\varepsilon}_{\eta_2}^D + \dot{\varepsilon}_{SV_{\tau_2}}^D + \dot{\varepsilon}_{SV_{np2_{xyz}}}^D = \bar{\sigma}_{\Gamma_{1,2}}^D (2G_{II})^{-1} + \\ + [\bar{\sigma}_{\eta_2}^D (2\eta_2)^{-1}] t_{II} + \bar{\sigma}_{CV_{\tau_2}}^D (2\tau_2)^{-1} + \bar{\sigma}_{SV_{np2_{xyz}}}^D (\sigma_{xyz})^{-1}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $\dot{\epsilon}_{E_{1,2}}^D, \dot{\epsilon}_{\eta_2}^D, \dot{\epsilon}_{SV_{\tau_2}}^D, \dot{\epsilon}_{SV_{\text{пр}_2xyz}}^D$, соответственно, девиаторы скорости упругой (тело Гука), вязкой (тело Ньютона), пластической (тело Сен-Венана) и объемной (элемента $SV_{\text{пр}_2xyz}$) при деформациях слоя микрогранулята, Н/м²;

G_{II} – модуль сдвига слоя микрогранулята, Н/м²; $G_{II} = E_{II}$;

η_2 – вязкость деформируемого гранулята, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$;

τ_2 – касательные напряжения сдвиговых деформаций слоя микрогранулята, Н/м²;

σ_{xyz} – нормальные напряжения на слой микрогранулята при его объемно-пространственном перемещении, Н/м².

Представленное аналитическое выражение (2.13) справедливо для установившихся, т.е. стабильных силовых нагрузок, $\bar{P}_{II} = \text{const}$, $S_{ij} = S_0$, а его решения могут быть представлены в виде $S = S_0(2E_2)^{-1} \cdot [1 - \exp(-t \cdot \theta^{-1})]$.

Учитывая, что период ретардации (продления времени t_{II} упругой деформации слоя микрогранулята) равен $\theta_{II} = \frac{\eta_2}{E_2}$, то относительную деформацию микрогранулята на **второй стадии** можно представить в виде [110].

$$\epsilon_{II} = \frac{\bar{P}_{II}}{E_{II}} \left(1 - \exp E_1 \frac{t_2}{\eta_2} \right) + \frac{\bar{P}_{II_{\text{упр.сл}}} - \bar{P}_{II_{\text{мкр.гр}}}}{2\tau_I} + \sigma_{SV_{\text{пр}}} (\sigma_{xyz}^{-1} + \tau_{xyz}^{-1}), \quad (2.16)$$

где $\bar{P}_{II_{\text{мкр.гр}}}, \bar{P}_{II_{\text{упр.сл}}}$ – соответственно, давление от силового воздействия при микрогранулировании и упрочнении поверхностного слоя микрогранул на второй стадии, Н/м²;

E_1, E_2 – соответственно, модули Гука при силовом воздействии на жидкую фазу при ее перемещении в порах и упрочнении микрогранулята, Н/м²;

t_2 – время упрочнения микрогранулята на второй стадии, с;

η_2 – вязкость жидкой фазы в порах микрогранул, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с}$;

τ – предельное напряжение при сдвиговом деформировании (текучести) микрогранул, Н/м²;

$\sigma_{Sv_{\text{пр}}}$ – напряжение, воздействующее на слой микрогранул, при их объемно-пространственном перемещении, Н/м²;

σ_{xyz} , τ_{xyz} – соответственно, нормальные и касательные напряжения, возникающие при объемно-пространственном перемещении микрогранулята, Н/м².

На **третьей стадии**, как было указано в п.2.2, реализуется окончательный процесс гранулообразования, характеризующийся совокупностью элементов: объемно-пространственного перемещения гранулята (элемент $Sv_{\text{пр}_{xyz}}$), пластического деформирования гранул (элемент Сен-Венана, SV_{τ_3}), вязкого деформирования (элемент Ньютона, η_3) и элемента стопор (St), определяющего процесс массообмена – параллельного разрушения менее прочных гранул и образования из их частиц микрогранулята, для образования новых гранул (рисунок 2.4).

Важное значение для эффективного процесса гранулообразования на третьей стадии имеет рациональное сочетание водопадно-каскадного режимов работы агрегата, обеспечивающего наибольший период соприкосновения гранулята с рабочей поверхностью, осуществляющей окатывающее воздействие на материал. При этом определяющее значение имеет организация направленного (по винтовой линии соприкосновения гранул с рабочей поверхностью) движения гранулята, характеризуемого элементом $Sv_{\text{пр}_{xyz}}$.

Согласно проведенным исследованиям [107,110], относительная деформация гранулята (процесс гранулообразования) может быть описана выражением

$$\varepsilon_{III} = \frac{e_{xyz} \cdot tg \cdot (\bar{P}_{III_{max_{St}}} - \bar{P}_{III_{max_{уп}}}) \cdot t_3}{\eta_{3_{св}} \cdot Sin \gamma_{max_{Sv_{\text{пр}_{xyz}}}}}, \quad (2.17)$$

где e_{xyz} – сдвиговая деформация при полной переориентации гранулята от действия элемента $Sv_{\text{пр}_{xyz}}$;

$\bar{P}_{III_{max_{St}}}$; $\bar{P}_{III_{max_{уп}}}$ – соответственно, максимальные значения давлений при разрушении гранул (элемент St) и их упрочнении, Н/м²;

t_3 – время гранулообразования на третьей стадии, с;

$\eta_{з_{св}}$ – вязкость связующего в порах гранул, $\frac{Н}{м^2} \cdot с$;

$\gamma_{max_{sv_{пр3_{xyz}}}}$ – предельная величина угла поперечно-продольной переориентации элемента $sv_{пр3_{xyz}}$, град.

На **четвертой стадии**, как было указано ранее, реализуется классификация полифракционного агломерата с выделением готового продукта – гранулята заданного фракционного состава.

При этом процесс классификации характеризуется упруго-вязко-пластическим деформированием слоя гранул (элементы: Гука, E_3, E_4 ; Ньютона, η_4 и Сен-Венана, SV_{τ_4}), с последующей релаксацией гранулята [113]. Данное сочетание элементов представляет модель Шведова.

Для интенсификации процесса классификации гранулята нами предлагается использовать его внутренний рециклинг вдоль классифицирующей поверхности (рисунок 2.4, схема IV), что обеспечивается принудительным силовым воздействием (представляющим элемент Гука, E_3) со стороны разнонаправленных рабочих органов.

Согласно используемой ранее методики определения величины относительной деформации для **четвертой стадии** имеем.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{IV} &= \varepsilon_{E_{3IV}} + (\varepsilon_{E_{4IV}} + \varepsilon_{\tau_4}) + \varepsilon_{SV_{\tau_4}} = \\ &= P_{IV} \cdot E_3^{-1} + (P_{IV} \cdot E_4^{-1} + P_{IV} \cdot \eta_4 \cdot t_4) + (P_{IV} - P_{max})E_4^{-1}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где $\varepsilon_{E_{3IV}}, \varepsilon_{E_{4IV}}, \varepsilon_{\tau_4}, \varepsilon_{SV_{\tau_4}}$ – соответственно, относительные деформации элементов Гука E_3, E_4 , Ньютона η_4 и Сен-Венана SV_{τ_4} ;

P_{IV} – напряжение, создаваемое устройством классифицирующего действия, $Н/м^2$;

P_{max} – предел текучести деформируемого элемента Сен-Венана, наступающий при предельных состояниях на слой гранул, $Н/м^2$;

t_4 – период классификации сгранулированного материала, с.

Выражение (2.18) в тензорной форме будет иметь вид

$$e_{i_{IV}}^D = e_{E_{3,4}}^{D_r} + e_{\eta_4}^{D_\eta} + e_{CV_3}^{D_{CV}} = D_\sigma \cdot (2E_3)^{-1} + [D_\sigma \cdot (2E_4) + D_\sigma(2\eta_4)^{-1} \cdot t_{IV}] + (P_{IV} - P_{max}) \cdot (2E_\eta)^{-1}, \quad (2.19)$$

где D_σ – полный девиатор тензора напряжений;

$e_{E_{\sigma IV}}^{D_r}$, $e_{\eta_4}^{D_\eta}$, $e_{CV_3}^{D_{CV}}$ – соответственно, девиаторы тензоров напряжений для элементов Гука, Ньютона, Сен-Венана;

$e_{i_V}^D$ – девиатор сдвиговых деформаций:

P_{IV} – прикладываемые напряжения к слою гранул, Н/м²;

P_k – предел текучести гранулируемого слоя, Н/м².

Релаксация системы будет соблюдаться если $P_{IV} < P_k$.

Девиатор тензора напряжений $D_\sigma(S_{ij})$ характеризуется матрицей.

$$D_\sigma = \begin{vmatrix} S_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & S_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_z \end{vmatrix}. \quad (2.20)$$

Величина напряжений S_x, S_y и S_z определяется как разница между нормальными напряжениями ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) и их средними напряжениями (σ_m).

$$S_x = \sigma_x - \sigma_m; \sigma_y = \sigma_y - \sigma_m; S_z = \sigma_z - \sigma_m. \quad (2.21)$$

Проведенные нами теоретические исследования механо-реологической модели постадийной агломерации полидисперсных материалов позволили установить основополагающие принципы организации технологических процессов гранулообразования на каждой из четырех стадий агломерирования и классификации гранулята. Обоснована необходимость использования различных элементов (Гука, Ньютона, Сен-Венана, элемента объемно-пространственной ориентации частиц и гранулята Sv_{np} , элемента стопор St), а также их сочетаний (модель Максвелла, Бингмана, Шведова и др.) на каждой из стадий.

Каждое из сочетаний указанных элементов обосновано предопределяет различные механизмы упруго-вязко-пластического деформирования формуемых частиц и сформованных тел согласно кинетической закономерности уплотняемых шихт.

Все это позволяет, совместно с физическим моделированием технологических параметров, аргументировано принимать решения по выбору конструктивно-технологических параметров рабочих органов БВА, схем сочетаний устройств и их установки в рабочей камере агломерирования.

Полученные расчетные зависимости и общая математическая зависимость модели процесса агломерации таких специфических техногенных материалов, как технический углерод, с учетом основополагающих принципов механики, подтверждают обоснованность теоретико-экспериментального подхода (моделирования) при разработке специального агломерирующего оборудования.

2.4. Моделирование механо-технологических способов реализации процесса агломерирования технического углерода

Основываясь на физико-механических характеристиках и физико-химических свойствах исследуемого материала, анализе разработанной механо-реологической модели поэтапного агломерирования частиц и ее аналитического исследования, представляется целесообразным обеспечить необходимые условия в разрабатываемом агрегате для образования микрогранул. Такими условиями являются: обеспечение направленного движения гранулируемых частиц со связующим с возможностью их переориентации в пространстве для образования зародышей и последующим упрочнением их поверхностного слоя; увеличение траектории перемещения микрогранул по соприкасаемой рабочей поверхности камеры агломерирования; возможность реализации объемного-пространственного движения слоя материала на всех стадиях его переработки (увеличения степени свободы гранулируемых частиц по осям X , Y , Z); создание наиболее рациональных технологических условий для выделения регламентированного (по размерам) конечного продукта на последней стадии его обработки и др.

Из анализа классических принципов гранулообразования порошкообразных материалов со связующим известно, что образование микрозародышей происходит при обязательной объемно-пространственной

переориентации (ОПП) с окатывающим воздействием частиц материала в системе координат XYZ. Исходя из вышеуказанного можно утверждать, что для достижения таких условий необходимо обеспечить движение частиц в спиралевидном цилиндрическом корпусе, реализующим ОПП (рисунок 2.4, а).

Вышеуказанные технологические условия образования микрогранулята из ТУ со связующим, были подтверждены при моделировании процесса формирования микророзродышей и использованием разработанных нами стендовых установок (рисунок 2.5, б).

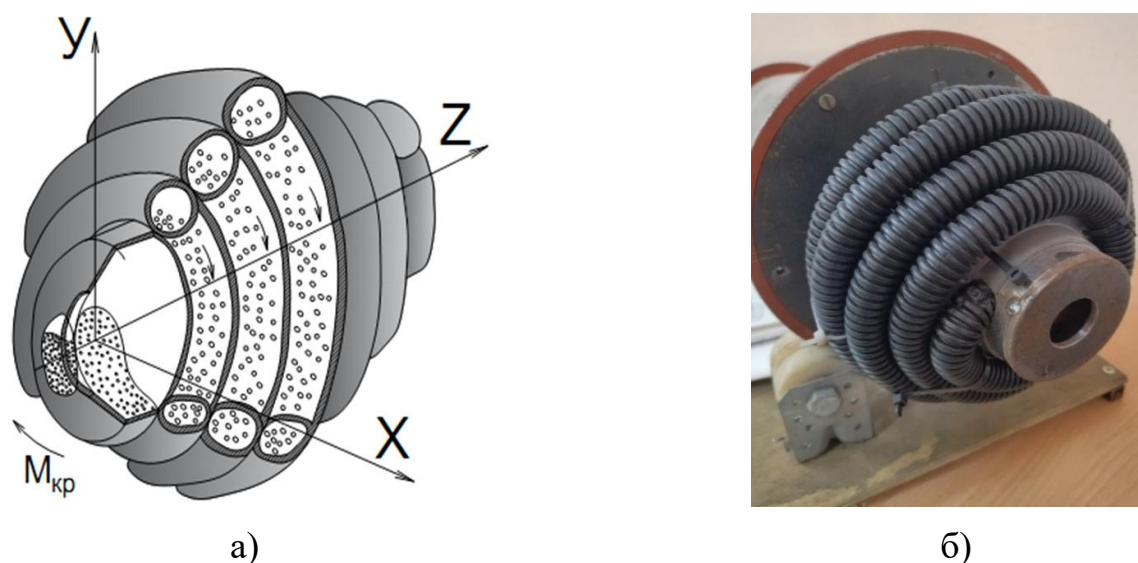


Рисунок 2.5. Процессы образования микророзродышей в спиралевидном канале (а); в спиралевидном блоке микрогранулирования (б) модельной установки

На второй стадии процесса агломерирования, для полученных микрогранул – зародышей гранулообразования необходимо упрочнение поверхностных слоев. Для реализации этих процессных явлений необходимо соблюдение следующих условий: длительный механический контакт микрогранул, а значит – достаточно протяженная траектория их движения в условиях ограниченного пространства, возможность усиленного динамического воздействия в режиме интенсивного рециклинга. Перечисленные условия могут быть реализованы во вращающемся барабане с внутренними рабочими органами специальной геометрической формы, например двухзаходными винтовыми лопастями (рисунок 2.6).

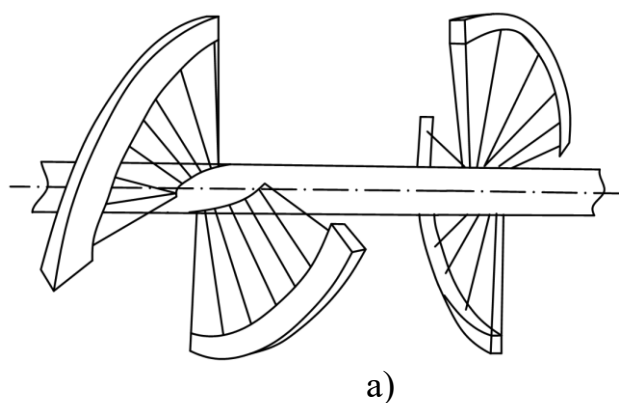
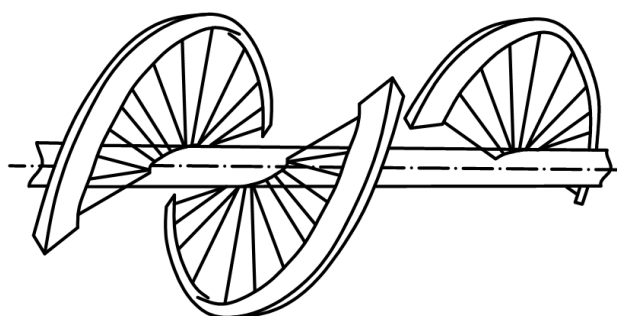


Рисунок 2.6. Схема установки двухзаходных винтовых лопастей (а) и процесс упрочнения микрогранулята в модельной установке (б)

Преимуществом винтовых лопастей, является возможность изменения схемы их расположения на валу, направления силового воздействия на агломерируемый материал, а также возможность варьирования траектории перемещения частиц. Кроме того, повышается энергоэффективность оборудования, в котором они применяются [117-120].

Использование в конструкции аппарата для интенсификации процесса окончательного гранулообразования ОВЛ на третьей стадии является наиболее целесообразным, т.к. обеспечивается возможность увеличения протяженности зоны контакта гранулята с рабочей поверхностью лопасти и пространственно-ориентированное их перекачивание в заданном направлении (рисунок 2.7).

Интенсификация процесса окончательного гранулообразования с помощью ОВЛ, позволяет получить товарные гранулы шарообразной формы ($2\div 5\text{мм}$) с однородным гранулометрическим составом. Силовое воздействие ОВЛ на агломерируемый материал, также способствует увеличению статической прочности гранул. Сферообразная геометрическая форма гранулята в виде шара с повышенной статической прочностью способствует увеличению выхода товарной продукции и предотвращает разрушение гранул при их транспортировке.



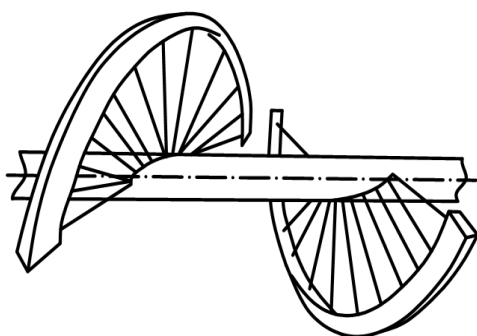
а)



б)

Рисунок. 2.7. Схема установки однозаходных винтовых лопастей (а) и процесс формирования гранул в модельной установке (б).

На последней, четвертой стадии агломерирования, как было указано при исследовании механо-реологической модели, необходимо обеспечить классификацию полученного полифракционного гранулята. В отличие от предыдущих стадий, на данном этапе нет необходимости увеличивать протяженность зоны контакта гранулята с рабочей поверхностью лопасти, протяженность траектории их движения и высоту подъема, длительность механического контакта и силу динамического воздействия. Интенсифицировать процесс классификации можно способом многократного рециркуляционного силового воздействия вдоль классификационной поверхности, например, разнонаправленными однозаходными винтовыми лопастями (рисунок 2.8).



а)



б)

Рисунок 2.8. Схема установки однозаходных разнонаправленных винтовых лопастей (а) и процесс классификации полифракционного гранулята (б).

Используя представленную на (рисунке 2.8) схему установки однозаходных винтовых лопастей, возможно реализовать эффект возвратно-поступательного движения слоя гранулята для его классификации. Такой способ перемещения гранулята в перфорированном барабане, в сочетании с его вращением, позволяет не только сократить габаритные размеры БВА, но провести отсев некондиционных гранул и реализацию дальнейшего внешнего рециклинга просыпи с целью повышения выхода товарной продукции.

На основании предшествующих теоретических исследований разработанной механо-реологической модели постадийной реализации процессов агломерирования полидисперсного ТУ, нами обосновано подтверждена целесообразность научно-технических разработок. Кроме того, подтверждены технологические условия и конструктивное исполнение рабочих органов агрегата на каждой стадии процесса агломерирования полидисперсного ТУ. Все это позволяет использовать разработанные нами при моделировании исследуемых процессов винтообразные рабочие органы с целью дальнейшей их реализации и создания агрегата комбинированного действия для агломерирования технического углерода со связующим.

2.5. Исследование условий микрогранулирования частиц на стадии агломерирования в спиралевидном устройстве

2.5.1. Условия окатывания частиц в спиралевидном устройстве микрогранулирования

2.5.1.1. Условия движения частиц по круговой траектории без скольжения

Рассмотрим условия перемещения частицы гранулируемого на начальной стадии материала вдоль канала цилиндрической формы при условиях исключающих ее скольжение. Принимаем следующие обозначения и исходные данные для расчета:

R, r_{cp} – соответственно, радиус цилиндрического канала, и микрогранулы, м; α_0 – исходный угол, рад; α – угол, определяющий положение микрогранулы относительно вертикальной оси, рад; $P_{м.гр}$ – сила тяжести, действующая на микрогранулу, Н; N – реакция силы тяжести, Н; F – сила трения частицы о рабочую поверхность камеры агломерирования, Н; O_0, O – соответственно, центры частиц в исходном и перемещенном состоянии; M – точка контакта микрогранулы с рабочей поверхностью; $f_{ск}, f_k$ – соответственно, коэффициент трения скольжения и качения сферической частицы о рабочую поверхность; $O\tau$ – касательная к траектории центра O .

На рисунке 2.9 представлена схема к расчету условий перемещения частицы по цилиндрической поверхности. Микрогранула поднимается из точки O в точку O_0 на угол α под действием силы трения F , возникающей от действия нормали N , результирующей силы тяжести $P_{м.гр}$, действующей при вращении цилиндрического канала.

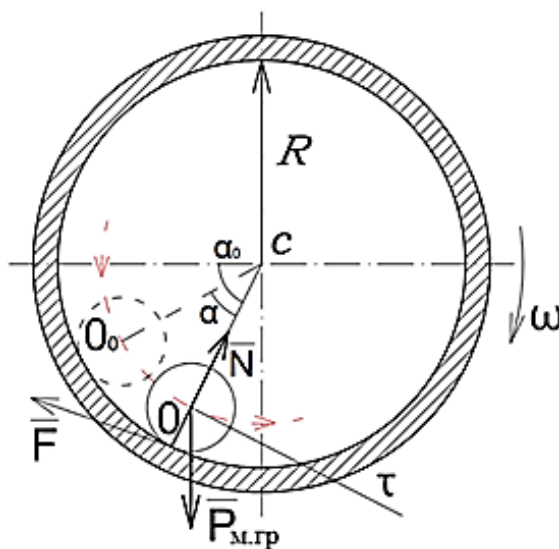


Рисунок 2.9. Схема движения микрогранулы по цилиндрическому каналу

Используя теорему Гюйгенса-Штейнера, момент инерции J_A цилиндрического тела относительно его оси вращения, совпадающей с осью тела, равен.

$$J_A = \frac{mr_{гр}^2}{2} \quad (2.22)$$

Полагая $P_{м.гр} = mg$, получим уравнение движения геометрического момента инерции (точка O) цилиндрического тела относительно оси по дуге

$$m \frac{dv_A}{dt} = mg \sin \alpha - F; \quad (2.23)$$

$$\frac{mr_{\text{rp}}^2}{2} - \frac{d\omega}{dt} = F_r, \quad (2.24)$$

где ω – угловая скорость движения микрогранулы, рад/с; m – масса микрогранулы, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Для упорядочения дальнейшего расчета последующие выражения с использованием параметра $\dot{\alpha}$ необходимо выразить окружную v_A и угловую ω скорости через $\dot{\alpha}$. Так как при движении микрогранулы вниз по цилиндрической поверхности угол $\alpha < 0$, то уравнения, определяющие скорость движения микрогранулы, будут иметь вид.

$$v_A = -(R - r)\dot{\alpha}; \quad (2.25)$$

$$\omega = \frac{v_A}{r} = -(R - r)\frac{\dot{\alpha}}{r}. \quad (2.26)$$

Подставляя полученные значения v_A и ω в уравнения (2.23) и (2.24), получим.

$$m(R - r)\ddot{\alpha} = -mg \sin \alpha + \bar{F}; \quad (2.27)$$

$$m(R - r)\ddot{\alpha} = -2\bar{F}. \quad (2.28)$$

Решая совместно уравнения (2.27) и (2.28), получим уравнение движения микрогранулы через ее центр – О.

$$\ddot{\alpha} + f_k^2 \sin \alpha = 0; \quad (2.29)$$

$$f^2 = \frac{2g}{3}(R - r). \quad (2.30)$$

Учитывая незначительную величину угла α , ($\sin \alpha = \alpha$) и полагая $\alpha \leq \alpha_0$ получим, дифференциальное уравнение, представляющее собой гармонические колебания материального тела

$$\ddot{\alpha} + k^2 \alpha = 0. \quad (2.31)$$

Учитывая, что движущая сила $F \leq fN$, найдем условия, при которых микрогранула движется без скольжения, т.е. катится по цилиндрической поверхности. Используя полученные ранее выражения (2.28 – 2.30), соответственно, получим.

$$\bar{F} = -m(R - r) \frac{\ddot{\alpha}}{2}; \quad (2.32)$$

$$\ddot{\alpha} = -k^2 \alpha; \quad (2.33)$$

$$R_1^2 = \frac{2g}{3} (R - r); \quad (2.34)$$

$$\bar{F} = \left(\frac{mg}{3} \right) \alpha. \quad (2.35)$$

Учитывая, что перемещение микрогранулы осуществляется на незначительном участке, то для упрощения расчета можно принять, что микрогранула перемещается по линии с минимальной кривизной, т.е. по горизонтальной плоскости. При условии $\alpha - \min$ имеем $\bar{F} = \bar{P}_{\text{м.гр}} = mg$; тогда $\bar{F} \leq f\bar{N}$, а угол α равен $\alpha \leq 3f$.

Таким образом, исходя из полученных выражений, а также полагая $\alpha = \alpha_0$, движение микрогранулы по окружности радиуса R без скольжения будет происходить, если выполняется условие $\alpha_0 \leq 3f$.

2.5.1.2. Уравнение движения частиц вдоль цилиндрической поверхности

При движении частицы материала в спиралевидном блоке возможен вариант, при котором траектория ее движения будет проходить вдоль цилиндрического канала радиуса R_1 (рисунок 2.10).

Представим цилиндрический канал на малом его отрезке в виде плоскости, наклоненной под углом α . Используя теорему движения центра масс

$$M\bar{a}_c = \Sigma \bar{F}_k^e, \quad (2.36)$$

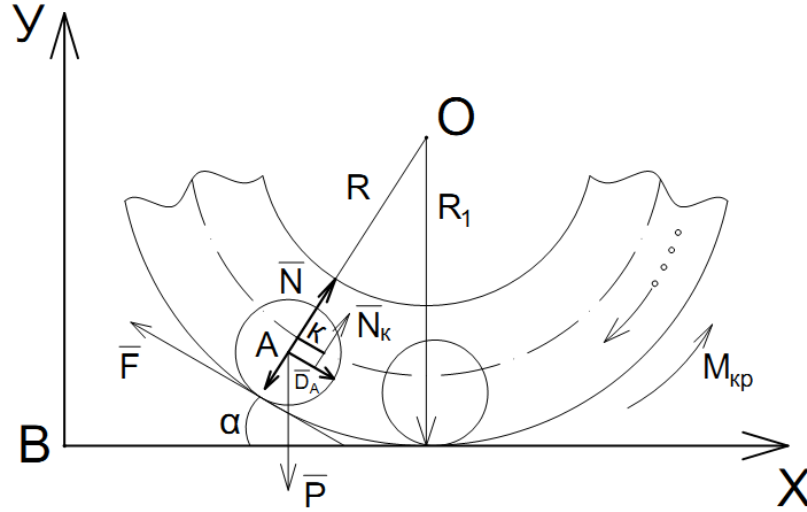


Рисунок 2.10. Схема движения частицы вдоль цилиндрического канала по наклонной поверхности.

составим уравнение движения точки A относительно координатных осей

$$M\bar{a}_{Ax} = \Sigma \bar{F}_{kx}^e; \quad (2.37)$$

$$M\bar{a}_{Ay} = \Sigma \bar{F}_{ky}^e; \quad (2.38)$$

$$J_A \varepsilon = \Sigma m_c (\bar{F}_k^e). \quad (2.39)$$

Так как перемещение вдоль оси Oy отсутствует, то $a_{Ay}=0$ уравнение (2.38)

примет вид

$$\bar{N} - \bar{P}_{м.гр} \cos \alpha = 0; \quad (2.40)$$

$$\bar{N} = \bar{P}_{м.гр} \cos \alpha. \quad (2.41)$$

Учитывая, что $a_{Ax}=a_A$ и момент инерции положителен, получим

$$ma_A = \bar{P}_{м.гр} \sin \alpha - \bar{F}; \quad (2.42)$$

$$J_A \varepsilon = \bar{F}R. \quad (2.43)$$

В данном случае частица катится по плоскости, силы трения скольжения отсутствуют, следовательно $\bar{F} \leq f\bar{N}$

При чистом качении скорость частицы будет определяться уравнением

$$v_A = \omega R, \quad (2.44)$$

дифференцируя которое получим

$$a_A = \varepsilon R. \quad (2.45)$$

Учитывая момент инерции уравнение (2.42) примет вид

$$\frac{ma_A}{2} = \bar{F}. \quad (2.46)$$

Подставляя полученное значение в (2.45), где $\bar{P}_{\text{м.гр}} = mg$, получим

$$a_A = \frac{2}{3} g \sin \alpha. \quad (2.47)$$

Следовательно,

$$\bar{F} = \frac{\bar{P}_{\text{м.гр}}}{3} \sin \alpha. \quad (2.48)$$

Полученное выражение для силы трения справедливо при качении частицы без скольжения. Чистое качение при $\bar{F} \leq f\bar{N}$ будет происходить, если выполняются следующие условия:

$$\frac{\bar{P}_{\text{м.гр}}}{3} \sin \alpha \leq f\bar{P}_{\text{м.гр}} \cos \alpha; \quad (2.49)$$

$$f \geq \frac{tg\alpha}{3}. \quad (2.50)$$

В случае, когда коэффициент трения принимает значение

$$f \leq \frac{tg\alpha}{3}, \quad (2.51)$$

движение частицы по наклонной плоскости будет происходить с проскальзыванием, а сила трения будет равна

$$\bar{F} = f\bar{N} = f\bar{P}_{\text{м.гр}} \cos \alpha. \quad (2.52)$$

Следовательно, уравнения (2.41) и (2.42) будут иметь вид

$$\left(\frac{\bar{P}_{\text{м.гр}}}{g}\right) a_A = \bar{P}_{\text{м.гр}} (\sin \alpha - f \cos \alpha); \quad (2.53)$$

$$\frac{\bar{P}_{\text{м.гр}} R^2 \varepsilon}{2g} = f\bar{P}_{\text{м.гр}} R \cos \alpha. \quad (2.54)$$

Выразим из уравнения (2.53) ускорение центра частицы a_A и из (2.54) угловое ускорение ε самой частицы.

$$a_A = g(\sin \alpha - f \cos \alpha); \quad (2.55)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2gf}{R}\right) \cos \alpha. \quad (2.56)$$

Представленные выше вычисления не учитывают сопротивление качению. Если принять во внимание сопротивление качению, то реакция $\bar{N}$ будет смещена в сторону движения частицы на величину « k » (рисунок 2.10).

Принимая $a_A = \varepsilon R$, получим

$$a_A = \frac{2}{3} g \left(\sin \alpha - \frac{k}{R} \cos \alpha \right); \quad (2.58)$$

$$\bar{F} = \frac{\bar{P}_{\text{м.гр}}}{3} \left(\sin \alpha + 2 \frac{k}{R} \cos \alpha \right). \quad (2.59)$$

Значение коэффициента трения, при котором движение вдоль цилиндрического канала будет происходить без скольжения.

$$f \leq \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{3} + \frac{2k}{3R} \right). \quad (2.60)$$

2.5.1.3. Анализ условий движения частиц по спиралевидной траектории

Математическое описание движения частицы материала вдоль поверхности блока микрогрануляции возможно представить в виде дифференциального уравнения. Для этого представим блок микрогрануляции в виде отрезка круглого цилиндра (рисунок 2.11) $x^2 + y^2 - R^2 = 0$.

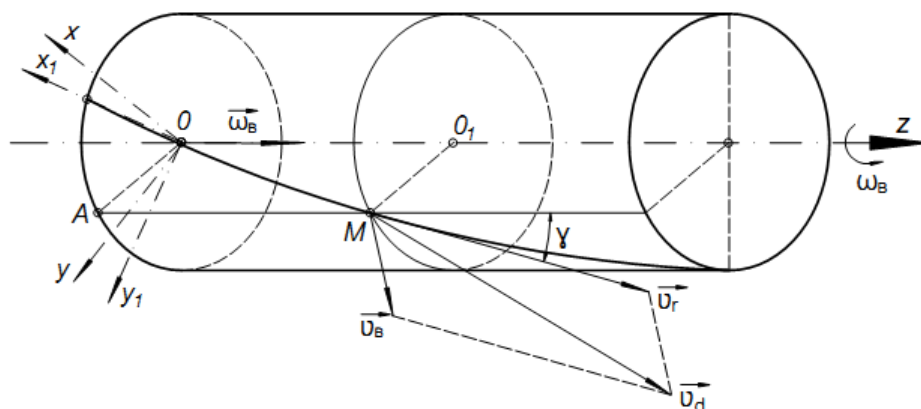


Рисунок 2.11. Схема движения частицы по цилиндрической поверхности

Пусть частица находится на оси $0x$, получает скорость $\bar{v}_0$, перпендикулярную к оси $0x$ и составляющую с плоскостью $x0y$ угол β . В нашем случае частица $M(x, y, z)$ движется под действием следующих сил: направленной вертикально силы тяжести $\bar{P}_{\text{м.гр}}$, нормальной реакции цилиндра $\bar{N}$, направленной

по внутренней нормали к его поверхности, а также силы трения $\bar{F}$, направленной противоположно вектору скорости $\bar{v}$.

Для решения данной задачи необходимо найти проекции этих сил на координатные оси

$$\bar{P}_x = \bar{P}_y = 0; \quad \bar{P}_z = -mg; \quad \bar{N}_z = 0; \quad \bar{N}_x = -\bar{N} \cos \alpha; \quad \bar{N}_y = -\bar{N} \sin \alpha,$$

где α – угол, образуемый с осью Ox проекцией радиус-вектора точки M на плоскость xOy . Так как $\cos \alpha = \frac{x}{R}$, а $\sin \alpha = \frac{y}{R}$, то $\bar{N}_x = -\bar{N} \frac{x}{R}$, $\bar{N}_y = -\bar{N} \frac{y}{R}$, следовательно,

$$\bar{F} = -k\bar{N} \frac{\bar{v}}{v}, \quad (2.61)$$

где $\frac{\bar{v}}{v}$ – единичный вектор скорости

$$\bar{F}_x = -k\bar{N} \frac{v_x}{v} = -k\bar{N} \frac{\dot{x}}{v}; \quad \bar{F}_y = -k\bar{N} \frac{v_y}{v} = -k\bar{N} \frac{\dot{y}}{v}; \quad \bar{F}_z = -k\bar{N} \frac{\dot{z}}{v}.$$

Дифференциальные уравнения движения точки с учетом уравнений связи будут иметь вид.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -\bar{N} \frac{x}{R} - k\bar{N} \frac{\dot{x}}{v} \\ m\ddot{y} = -\bar{N} \frac{y}{R} - k\bar{N} \frac{\dot{y}}{v} \\ m\ddot{z} = -k\bar{N} \frac{\dot{z}}{v} - mg \end{cases} \quad (2.62)$$

Дифференцируя дважды уравнение связи и выполнив дальнейшие преобразования, получим

$$m(x\ddot{x} + y\ddot{y}) = -\bar{N}R - \frac{k}{v}\bar{N}(x\dot{x} + y\dot{y}); \quad (2.63)$$

$$\bar{N} = -\frac{m}{R}(x\ddot{x} + y\ddot{y}); \quad (2.64)$$

$$\bar{N} = \frac{m}{R}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2). \quad (2.65)$$

Рассмотрим случай, когда поверхность, по которой движется частица гладкая, тогда система уравнений (2.62) примет вид.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -\bar{N}\frac{x}{R} \\ m\ddot{y} = -\bar{N}\frac{y}{R} \\ m\ddot{z} = -mg \end{cases} \quad (2.66)$$

Исключив из уравнения $\bar{N}$, получим: $\frac{\ddot{x}}{\ddot{y}} = \frac{x}{y}$, откуда

$$\ddot{x}y - \ddot{y}x = 0; \ddot{x}y - x\ddot{y} = \frac{d}{dt}(\dot{x}y - \dot{y}x) = 0. \quad (2.67)$$

Следовательно,

$$\dot{x}y - \dot{y}x = \text{const}. \quad (2.68)$$

Учитывая

$$x = R \cos \alpha, y = R \sin \alpha, \quad (2.69)$$

получим

$$\dot{x}y \rightarrow jx = -R^2\dot{\alpha} = \text{const}; \quad (2.70)$$

$$\dot{\alpha} = \text{const} = C_1. \quad (2.71)$$

Найдем C_1 , исходя из начальных условий движения частицы и координат:

$$t_0 = 0; x_0 = R; y_0 = z_0 = 0; \dot{x}_0 = 0; \dot{y}_0 = v_0 \cos \beta; \dot{z}_0 = v_0 \sin \beta.$$

$$C_1 = \alpha_0 = \frac{v_0 \cos \beta}{R}; \quad (2.72)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{v_0 \cos \beta}{R}; \quad (2.73)$$

$$\int_{\alpha_0=0}^{\alpha} d\alpha = \frac{v_0 \cos \beta}{R} \int_0^t dt; \quad (2.74)$$

$$\alpha = \frac{v_0 \cos \beta}{R} t, \quad (2.75)$$

таким образом,

$$x = R \cos \left(\frac{v_0 \cos \beta}{R} t \right); \quad (2.76)$$

$$y = R \sin \left(\frac{v_0 \cos \beta}{R} t \right). \quad (2.77)$$

Интегрируя третье уравнение (2.62), получим

$$Z = -\frac{gt^2}{2} + v_0 t \sin \beta. \quad (2.78)$$

Подставляя найденные значения $\dot{x}$ и $\dot{y}$ в уравнение (2.65), получим

$$\bar{N} = \frac{m}{R}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = mR\alpha^2 = \frac{mv_0^2 \cos^2 \beta}{R}. \quad (2.79)$$

2.6. Изучение рециркуляционного воздействия двухзаходных винтовых устройств на слой микрогранулята

Анализ исследований и патентозащищенных научно-технических разработок в области различных технологических процессов: классификации, тонкого диспергирования различных материалов, гомогенизации композиционных смесей и других процессов показывает эффективность использования объемно-пространственного перемещения перерабатываемых материалов и соответствующего взаимодействия рабочих органов (разнонаправленных ДВЛ, однонаправленных ДВЛ, разнонаправленных ОВЛ). Особое значение указанный технологический прием оказывает на процесс агломерирования полидисперсных материалов, что обусловлено достижением следующих преимуществ:

- увеличением внутренней площади рабочих камер гранулообразования и соответственно, увеличения полезной работы при получении гранулята;
- повышением степени свободы окатываемого гранулята при перемещении, что обуславливает равномерную плотность гранул по их объему и их повышенную прочность;
- снижением ударного воздействия (водопадный режим движения гранулята) и повышением окатывающего движения материальных тел по винтообразной траектории вдоль внутренней поверхности рабочих камер;
- при использовании винтообразных рабочих органов достигается плавное и равномерное их вхождение в слой микрогранулята и выход из него, что исключает динамическое разрушение формируемых тел и обеспечивает стабильный режим агломерирования;

- при дополнительном скоростном воздействии со стороны вращающейся камеры агломерирования расширяются технологические возможности реализуемого процесса с учетом специфических особенностей и физико-механических характеристик ТУ (с повышенной гидрофобностью, требующей специальных связующих или повышенного их расхода для гранулообразования; имеющего незначительную насыпную плотность и низкую сыпучесть; при учете использования ТУ в композиционных смесях, склонных при транспортировании к сегрегации и др.);

- при использовании последовательно установленных в зоне гранулообразования агрегата винтообразных лопастных устройств, обеспечивающих объемно-пространственное перемещение сформованного ранее микрогранулята, вдоль внутреннего корпуса рабочей камеры реализуется объемно-пространственное перемещение гранулята по винтовым линиям.

При вращении каждая из лопастей преодолевает сопротивление слоя микрогранулята по дуге. Дуга соответствует проекции лопасти на горизонтальную плоскость. При повороте ДВЛ относительно вертикальной плоскости на угол $\varphi_{\text{овл}}$, зависящий от коэффициента заполнения центрального барабана, площадь проекции будет равна

$$F_{\text{пр.двл}} = F_{\text{двл}} \cdot \sin \varphi_{\text{двл}}. \quad (2.80)$$

При погружении лопасти в слой материала его сопротивление возрастает до момента, пока ДВЛ не начнет его разрезать, перемещая в сторону, противоположно направленной парной лопасти.

Физико-механические характеристики агломерируемого материала влияют на удельное сопротивление слоя микрогранулята Δp . Значение данной величины является эмпирическим. Для нашего случая $\Delta p \leq 0,2 - 0,3$ МПа.

Наибольшее усилие, затрачиваемое на преодоление сопротивления слоя микрогранулята ДВЛ, составляет, Н

$$P_{\text{двл}} = F_{\text{пр.двл}} \cdot \Delta p_{\text{двл}}. \quad (2.81)$$

Общая работа, совершаемая за один оборот вала, Н · м

$$A_{\text{ову}} = P_{\Sigma \text{двл}} \cdot S_{\varphi_{\text{двл}}}, \quad (2.82)$$

где $P_{\Sigma \text{ДВЛ}}$ – суммарное усилие, преодолеваемое всеми ДВЛ, за один оборот вала, Н;

$S_{\varphi_{\text{овл}}}$ – путь перемещения ДВЛ за один оборот вала, м.

Рассмотрим условия силового воздействия на слой микрогранулята ДВЛ за один оборот вала (рисунок 2.12.).

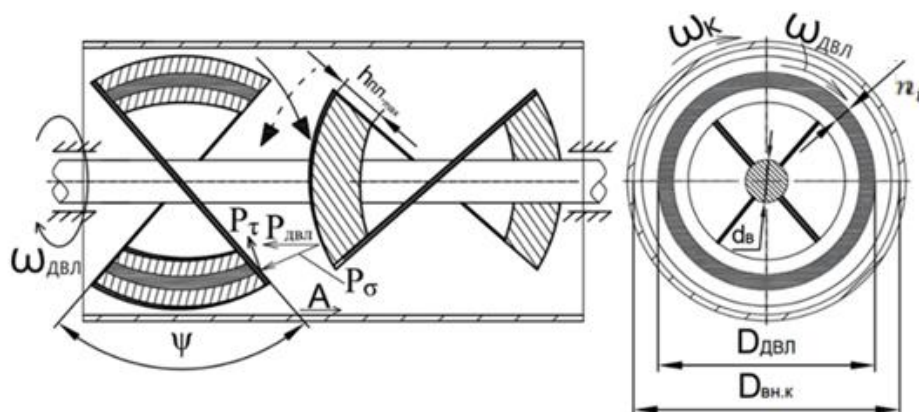


Рисунок 2.12. Схема к расчету мощности, затрачиваемой ДВЛ при ее прохождении через слой микрогранулята

Выделим на лопасти площадку шириной dn_i и средней шириной, соответствующей проекции рабочей площади ДВЛ_{*i*} $S_{\text{пр.ДВЛ}i}$ на горизонтальную плоскость, на расстоянии r_i от центра вращения.

Допустим, что проекция рабочей поверхности ДВЛ на плоскость по радиусу постоянна, $S_{\text{пр.ДВЛ}i} = \text{const}$. Тогда

$$dS_{\text{ДВЛ}i} = S_{\text{ДВЛ}i} \cdot \sin \varphi_{\text{овл}} \cdot dn_i. \quad (2.83)$$

Путь, пройденный ДВЛ за один оборот вала

$$S_{\text{ДВЛ}i} = \pi \cdot r_i. \quad (2.84)$$

Усилие, преодолевающее сопротивление слоя материала, Н.

$$dP_{\text{ДВЛ}} = p_i \cdot dS_{\text{ДВЛ}}. \quad (2.85)$$

Выполняемая при этом работа, Н · м.

$$dA_{\text{ДВЛ}i} = dP_{\Sigma \text{ДВЛ}i} \cdot L_{\text{ДВЛ}i} = \pi \Delta p_i r_i dS_{\text{ДВЛ}i}. \quad (2.86)$$

Интегрируя выражение (2.86) в пределах от r_v – радиуса вала до $R_{\text{ДВЛ}}$ – радиуса ДВЛ по оси вращения О, получим.

$$A_{\text{ДВЛ}i} = \pi \Delta p_i S_{\text{ДВЛ}i} \int_{r_i}^R r_i dn_i. \quad (2.88)$$

После преобразований получим

$$A_{\text{ДВЛ}i} = \pi \Delta p_i S_{\text{ДВЛ}i} \frac{R^2 - r_i^2}{2}. \quad (2.89)$$

Окончательно, получим выражения для расчета потребляемой мощности, затрачиваемой на преодоление сопротивления слоя микрогранулята при прохождении через него ДВЛ, $N_{\text{рецсл}}$, Вт.

$$P_{\text{рецсл}} = \pi S_{\text{ДВЛ}i} \Delta p_i z \sin \alpha \propto \frac{(R^2 - r^2)}{2} n_v. \quad (2.90)$$

Определим мощность, затрачиваемую при парном воздействии на слой микрогранулята разнонаправленными ДВЛ, $P_{\text{рецвозд}}$, Вт, (рисунок 2.12).

Парная лопасть ДВЛ₂, имеющая противоположное направление винтовой поверхности, перемещает слой микрогранулята, создавая встречный поток, оказывающий среднее давление $P_{\text{ср,ДВЛ}2}$ на рабочую поверхность ДВЛ. Среднее давление $\bar{P}_{\text{ср,ДВЛ}2}$ раскладывается на нормальную составляющую $\bar{P}_\sigma$ и касательную $\bar{P}_\tau$, Н/м².

$$\bar{P}_\sigma = \bar{P}_{\text{ДВЛ}2} \cos \gamma_{\text{ДВЛ}}; \bar{P}_\tau = \bar{P}_{\text{ДВЛ}2} \sin \gamma_{\text{ДВЛ}}, \quad (2.91)$$

где $\gamma_{\text{ДВЛ}}$ – средний угол подъема винтовой поверхности, град.

Общее усилие воздействия на ДВЛ, Н

$$P_{\text{общ}} = \bar{P}_\sigma F_{\text{ДВЛ,накл}}, \quad (2.92)$$

где $F_{\text{ДВЛ,накл}}$ – общая площадь, м² наклонной поверхности по длине части ее шага, ограниченная углом раскрытия $\varphi_{\text{ДВЛ}} = \frac{\pi}{2}$.

Усилие со стороны ДВЛ при нормальном удельном давлении $\bar{P}_\sigma$.

$$P_{\sigma_{\text{ДВЛ}}} = \frac{P_{\text{ДВЛ,накл}}}{\cos \varphi_{\text{ДВЛ}}}. \quad (2.93)$$

Определим момент сопротивления, создаваемый силами трения между наклонной поверхностью $P_{\text{ДВЛ,накл}}$ и слоем материала, подаваемого противоположной лопастью ДВЛ₂.

На поверхности ДВЛ₁ выделим кольцо радиусом r_i и шириной dr_i , тогда усилие, действующее на кольцо, составит, Н.

$$dP_{\text{ДВЛ}} = P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} \cdot 2\pi r_i dn_i, \quad (2.94)$$

а сила трения

$$dF_{\text{ДВЛ}} = dP_{\text{ДВЛ}} f_0 = P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} f_0 \cdot 2\pi r_i dn_i, \quad (2.95)$$

где f_0 – коэффициент внешнего трения микрогранулята о поверхность ДВЛ.

Элементарный момент трения, Н · м.

$$dM_{\text{ТР.ДВЛ}} = dF_{\text{ДВЛ}} r_i = 2P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} \pi f_0 r_i^2 dn_i. \quad (2.96)$$

Проинтегрировав выражение (2.96) в пределах от r_i до R_i , получим

$$dM_{\text{ТР.ДВЛ}} = 2\pi P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} f_0 \int_{r_i}^{R_i} r_i^2 dr_i = 2\pi P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} f_0 \frac{R_i^3 - r_i^3}{3}. \quad (2.97)$$

Тогда можно определить мощность, затрачиваемую при парном воздействии на слой микрогранулята разнонаправленными ДВЛ, $P_{\text{рецивозд}}$, при $\omega_v = 2\pi n$, рад/с.

$$P_{\text{рецивозд}} = M_{\text{ТР.ДВЛ}} \omega_6 = 4\pi P_{\tau_{\text{ДВЛ}}} f_0 \frac{R_i^3 - r_i^3}{3} \omega_v. \quad (2.98)$$

В выполненных нами теоретических исследованиях представлен расчет по определению мощности, затрачиваемой на преодоление сопротивления слоя микрогранулята при прохождении через него ДВЛ, а также мощности, затрачиваемой при парном воздействии на слой микрогранулята разнонаправленными ДВЛ. Данные устройства интенсивно воздействуют на рециркулируемый слой микро-гранулята путем многократного перемещения микрогранул в рабочем пространстве ДВЛ₁ и ДВЛ₂. Это, в конечном итоге, значительно упрочняет поверхностный слой микрогранулята, что необходимо для их дальнейшего агломерирования на последующей стадии воздействия ОВЛ.

2.7. Исследование условий процесса гранулообразования однозаходными винтовыми лопастями в камере агломерирования

Рассмотрим процесс гранулообразования в зоне агломерирования микрогранулята ТУ (рисунок 2.13).

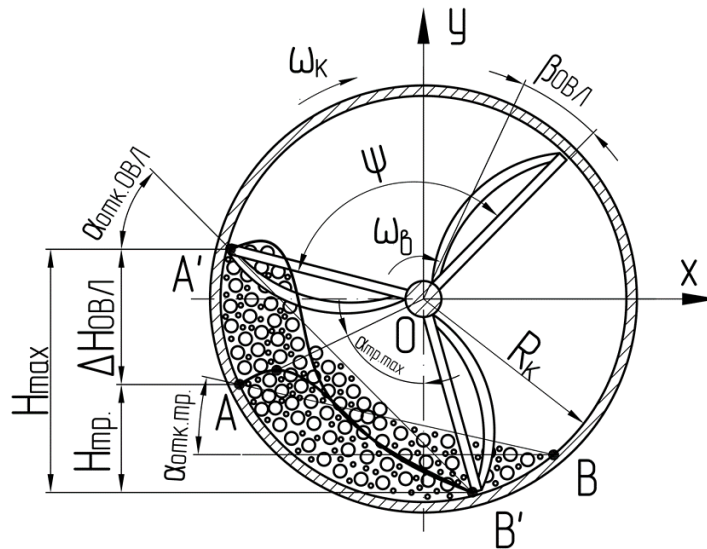


Рисунок 2.13. Схема к расчету процесса агломерирования гранулята

Процесс агломерирования ТУ осуществляется за счет силового воздействия ОВЛ на гранулят, а также за счет сил трения о внутреннюю поверхность камеры агломерирования. Последние возникают от действия инерционных сил $F_{ин\Sigma}$ как со стороны ОВЛ ($F_{ин.овл}$), так и за счет вращения самой камеры ($F_{ин.овл}$)

$$F_{ин\Sigma} = F_{ин.овл} + F_{ин.кагл} = m_{сл.овл} \omega_{овл}^2 R_{ср.овл} + m_{к} \omega_{к}^2 R_{к} = \quad (2.99)$$

$$= m_{сл.овл} \omega_{овл}^2 R_{ср.овл} + m_{сл.к} \omega_{к}^2 R,$$

где $m_{сл.овл}$, $m_{к}$ – соответственно, масса слоя гранулята, поднимаемая ОВЛ и под действием сил трения о поверхность камеры, кг;

$\omega_{в}$, $\omega_{к}$ – соответственно, угловые скорости вала ОВЛ и камеры, рад/с;

$R_{ср.овл}$, $R_{к}$ – соответственно, средний радиус ОВЛ и радиус камеры, м.

Суммарные силы трения, обеспечивающие подъем гранулята на максимальную высоту H_{max} , равны.

$$F_{\Sigma тр} = (m_{овл} \omega_{овл}^2 R_{ср.овл} + m_{к} \omega_{к}^2 R_{к}) f_{тр}, \quad (2.100)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения гранулята о рабочую поверхность лопастей и камеры, $f_{тр} = 0,7 \div 0,8$.

Процесс агломерирования ТУ обеспечивается как за счет внутрислоевого движения микрогранул, так и за счет сил трения их о боковую поверхность камеры при перемещении по винтовой линии к последующей (по ходу движения материала) однозаходной винтовой лопасти.

Проведенные нами исследования по моделированию процесса агломерирования микрогранул (рисунок 2.13, 2.14) показали, что каждая из трех ОВЛ за один оборот вала поднимает $\sim (15 \div 20)\%$ гранулята (слоя) на высоту H_{max} . Основная масса материала перемещается по винтовой линии вдоль корпуса камеры в сторону второй ОВЛ.



а)



б)

Рисунок 2.14. Процессы подъема гранулята при воздействии ОВЛ (а), также за счет сил трения о корпус камеры (б)

Сила тяжести гранулята, преодолеваемая ОВЛ при подъеме его на высоту H_{max} , составляет $G_{овл} = (0,15 \div 0,2)G_{агл}$, а сила тяжести, преодолеваемая за счет сил трения при подъеме гранулята на высоту $H_{тр}$, составляет $G_{тр} = (0,8 \div 0,85)G_{\Sigma агл}$. При этом сила тяжести всего гранулята, находящегося в зоне агломерирования (камере агломерирования), $G_{\Sigma агл} = V_{к.агл}\varphi_{к.агл}\rho_{гр}g$,

где $V_{к.агл}$ – объем камеры в зоне агломерирования, m^3 ;

$\varphi_{к.агл}$ – коэффициент заполнения камеры агломерирования; $\varphi_{к.агл} = 0,18 \div 0,22$;

$\rho_{гр}$ – плотность слоя гранулята, kg/m^3 ;

g – ускорение силы тяжести, m/s^2 .

Число циклов силового воздействия ОВЛ, расположенных относительно друг друга по окружности через 120° , равно трем.

При этом суммарное расстояние между ОВЛ определяется зоной воздействия $L_{овл_i}$ на гранулят со стороны лопасти и зоной подъема гранулята под

действием сил его трения о боковую поверхность камеры $L_{тр}$ и подпора материала при его перемещении в сторону выгрузки.

$$L_{\Sigma_{OBL\ tr}} = L_{OBL_i} + L_{тр}. \quad (2.101)$$

Расход энергии, затрачиваемой данной ОВЛ, при преодолении силы тяжести $G_{OBL} = m_{сл.OBL}g$ – подъеме гранулята на высоту H_{max} , м, составляет

$$E_{OBL} = G_{OBL}H_{max}n_{OBL}t_{OBL}, \quad (2.102)$$

где n_{OBL} – частота вращения вала ОВЛ, об/с;

t_{OBL} – время подъема гранулята ОВЛ, с;

Величина H_{max} определяется из выражения

$$H_{max} = R_k(1 + \sin \beta_{OBL}). \quad (2.103)$$

При условии, что угол β_{OBL} не превышает значения $\beta_{OBL} = 30 \div 45^\circ$, время подъема гранулята ОВЛ, составляет

$$t_{OBL} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{OBL}\right)}{2\pi n_{OBL}} = \frac{0,25(\pi + 2\beta_{OBL})}{\pi n_{OBL}}, \quad (2.104)$$

С учетом значений H_{max} (2.103), t_{OBL} (2.104), получаем

$$E_{OBL} = 0,25G_{OBL}R_k(1 + \sin \beta_{OBL})\frac{(\pi + 2\beta_{OBL})}{\pi}. \quad (2.105)$$

Величина $H_{тр}$ определяется из условия, что угол $\varphi_{тр.max}$ не превышает 90° , т.е. $H_{тр.max} = R_k$

Интенсивность процесса агломерирования микрогранулята определяется не только объемно-пространственным перемещением микрогранулята в координатах X,Y,Z, обеспечиваемым геометрическим профилем ОВЛ, но и более протяженной зоной гранулообразования материала по винтовой траектории вдоль боковой поверхности камеры.

Рассмотрим кинематические условия взаимодействия микрогранулята с рабочей поверхностью однозаходных винтовых лопастей и боковой поверхностью камеры агломерирования (рисунок 2.15).

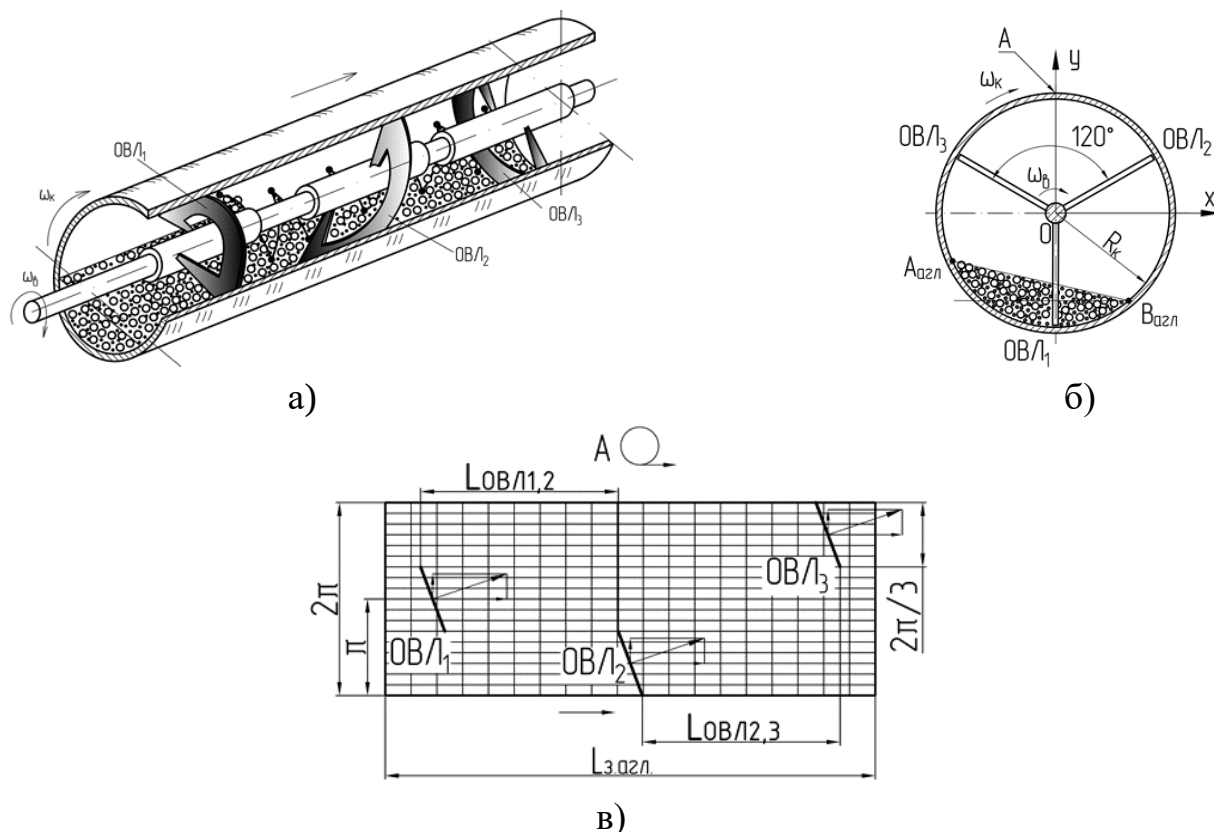


Рисунок 2.15. Схема расположения ОВЛ и их взаимодействия с гранулятом в зоне агломерирования БВА: а) – аксонометрическое изображение; б) – поперечный разрез; в) – развертка корпуса (I-I) камеры в зоне агломерирования.

Как было указано ранее, после воздействия на микрогранулят первой и последующих двух ОВЛ, его дальнейшее агломерирование осуществляется также за счет сил трения о внутреннюю поверхность камеры. Рассмотрим условия движения гранулы в зоне ее агломерирования (рисунок 2.16).

На гранулу, взаимодействующую с внутренней боковой поверхностью вращающейся камеры агломерирования, действует сила тяжести $G_{гр} = m_{гр}g$, Н, ее составляющие: по радиусу OA – $F_{OA} = G_{гр} \cos \alpha_{OA}$, где α_{OA} – угол между направлением воздействия на гранулу центробежной силы $F_{ц}$ и осью Y ; по касательной к окружности – $G_{гр} \sin \alpha_{OA}$.

$$\text{Центробежная сила} - F_{ц} = m_{гр} \omega_k^2 R_k,$$

где $m_{гр}$ – масса гранулы, кг;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

ω_k – угловая скорость вращения камеры агломерирования, рад/с;

R_k – радиус камеры, м.

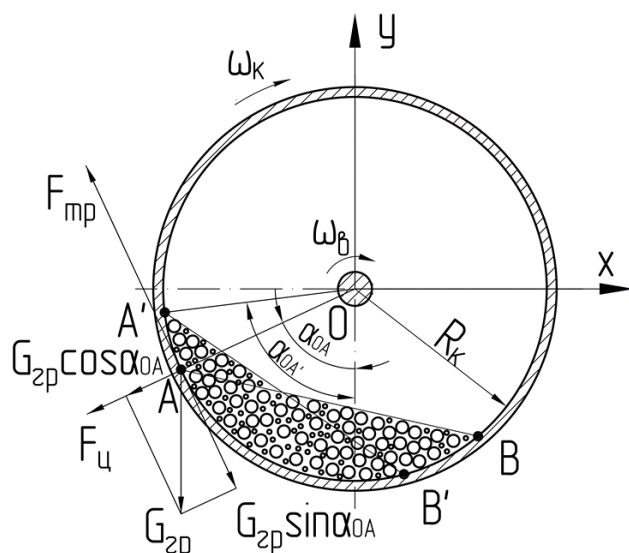


Рисунок 2.16. Схема к расчету условий движения гранулы от сил внешнего трения

Суммарное воздействие сил вдоль радиуса камеры OA , $F_{OA} = G_{гр} \cos \alpha_{OA}$ и $F_{ц} = m_{гр} \omega_k^2 R_k$, вызывает действие силы трения.

$$F_{тр} = (G_{гр} \cos \alpha_{OA} + m \omega_k^2 R_k) f_{трк}, \quad (2.106)$$

где $f_{трк}$ – коэффициент трения гранулы о боковую поверхность камеры.

Сила трения $F_{тр}$ – обеспечивает подъем гранулы на более высокий уровень, в точку A'' , находящуюся к вертикальной оси Y под углом $\alpha_{OA''}$. Угол $\alpha_{OA''}$ является углом подъема, величина которого не превышает значение $\beta^I < \frac{\pi}{2}$

Необходимым условием подъема гранулы, является соблюдение выражения:

$$F_{тр} \geq G_{гр} \sin \alpha_{OA} \quad \text{или}$$

$$(G_{гр} \cos \alpha_{OA} + m \omega_k^2 R_k) f_{тр} \geq G_{гр} \sin \alpha_{OA}. \quad (2.107)$$

Полагая $\cos \alpha_{OA} = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{OA}}$ и решая выражение относительно $\sin \alpha_{OA}$, после возведения его обеих частей в квадрат, получим.

$$\sin \alpha_{OA} = \frac{\omega_k^2 R_k + \sqrt{(1 + f_{трк}^2) g^2 - \omega_k^4 R_k^2 f_{трк}^2}}{(1 + f_{трк}^2) g} f_{трк}. \quad (2.108)$$

В случае, если в БВА работает только привод камеры агломерирования, т.е. $\omega_k = 0$, выражение принимает вид $\sin \alpha_{OA} = \frac{f_{тр}}{\sqrt{1 + f_{тр}^2}}$ или, при $f_{тр} = \tan \varphi_{тр}$,

где $\varphi_{тр}$ – угол трения

$$\sin \alpha_{OA} = \frac{tg \varphi_{тр}}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi_{тр}}} . \quad (2.109)$$

Полученное выражение (2.109) характерно для условия, при котором гранула в момент подъема до точки А под действием силы трения $F_{тр}$ поднимается с угловой скоростью, равноценной угловой скорости камеры, ω_k . Однако, достигнув точки A'' указанное условие нарушается, т.к. коэффициент в относительно статическом состоянии больше, чем в динамическом, т.е. $f_{дин} \leq f_{стат}$

Вследствие данного условия гранулы (при $\alpha_{OA''} > \alpha_{OA}$) начинают перемещаться в нижнюю часть камеры по линии A'' , B'' до достижения статического коэффициента $f_{стат}$. Процесс подъема гранулы сохраняется по винтовым траекториям и сложным движениям – подъем за счет сил трения до максимально возможной точки, соответствующей значению ω_k , и скольжению вниз со смещением вдоль горизонтальной оси камеры.

Рассмотрим процесс движения гранулы вниз и вдоль оси камеры более подробно. Обозначим через $\omega_{дин.гр}$ – угловую скорость гранулы вдоль боковой поверхности камеры, вращающейся с угловой скоростью ω_k . При этом соответствующий угол подъема гранулы $\alpha_{под} < \alpha_{OA}$. При скольжении гранулы вниз и в сторону выгрузки действует относительное ускорение, включающее две составляющих: центробежную (вдоль линии ОА) – $R_k \omega_{F_{ц}}^2$ и касательную – $R_k \frac{d\omega_{дин}}{dt}$. При этом угловая скорость перемещения (скольжения) гранулы равна

$$\omega_{f \text{ дин.гр}} = \frac{d \alpha_{дин}}{dt} . \quad (2.110)$$

Относительное ускорение гранулы, перемещающейся вдоль боковой поверхности камеры и в сторону выгрузки гранулята, можно представить в виде

$$R_k \frac{d\omega_{f \text{ дин.гр}}}{dt} = R_k \frac{d\omega_{f \text{ дин.гр}}}{d \alpha_{под}} \cdot \frac{d \alpha_{под}}{dt} = R_k \omega_{f \text{ дин.гр}} \cdot \frac{d\omega_{f \text{ дин.гр}}}{dt} . \quad (2.111)$$

В связи с указанным сложным движением гранулы, рассмотрим ее переносное ускорение. При совместном движении с вращающейся камерой переносное ускорение может быть представлено центробежным ускорением.

$a = \omega_k^2 R_k = 4\pi^2 n_k^2 R_k$, м/с², где угловая скорость $\omega_k = 2\pi n_k$, рад/с при $n_k = const$.

Учитывая, что относительная скорость перемещения гранулы направлена по касательной к окружности и равна $v_{гр} = \omega_k R_k$, а вектор угловой скорости $\vec{\omega}_{гр}$ направлен вдоль горизонтальной оси камеры (при этом $\vec{v} \perp \vec{\omega}$), то величина Кориолисова ускорения равна $m \frac{dv}{dt} = 2R_k \omega_k \omega_{f \text{ дин.гр}}$. При этом вектор Кориолисова ускорения направлен вдоль радиуса камеры R_k [121].

В результате общего взаимодействия указанных радиальных ускорений суммарную радиально направленную центробежную силу $F_{ц\Sigma}$ можно представить в виде.

$$F_{ц\Sigma} = m_{гр}(\omega_k + \omega_{f \text{ дин.гр}})^2 R_k = m_{гр}\omega_k^2 R_k + m_{гр}2\omega_k \omega_{f \text{ дин.гр}} R_k + m_{гр}\omega_{f \text{ дин.гр}}^2 R_k. \quad (2.112)$$

Естественно, что суммарная центробежная сила $F_{ц\Sigma}$ вызывает силу трения $F_{тр\Sigma}$, которая обеспечивает подъем гранулята на определенную высоту H_i . При движении гранулы по касательной к ее траектории действуют составляющая силы тяжести $m_{гр} \cdot \sin \alpha_{OA}$, а также сила.

$$-m_{гр} R_k \omega_{гр} \frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} = -m_{гр} R_k \frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} = m_{гр} R_k \frac{d\omega_{гр}}{dt} = -m_{гр} R_k \frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} \cdot \frac{d\alpha_{OA}}{dt}. \quad (2.113)$$

Для получения уравнения, описывающего траекторию движения гранулы по боковой поверхности камеры агломерирования, необходимо рассмотреть условие равновесия сил.

$$\begin{aligned} -m_{гр} R_k \omega_{гр} \frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} \\ = m_{гр} g \sin \alpha_{OA} \\ - m_{гр} [\omega_k^2 + 2\omega_k \omega_{f \text{ дин.гр}} + \omega_{f \text{ дин.гр}}^2] R_k f_{\text{дин.гр}}. \end{aligned} \quad (2.114)$$

После соответствующих преобразований получим

$$\frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} = \frac{(f_{дин.гр} \cos \alpha_{OA} - \sin \alpha_{OA})g + \omega_k^2 R_k f_{дин.гр}}{\omega_{f_{дин.гр}} R_k} + 2(\omega_{f_{дин.гр}} + \omega_k) f_{дин.гр}. \quad (2.115)$$

Таким образом, данное уравнение (2.115) описывает колебательное движение формуемых гранул («подъем – опускание») вдоль камеры между двумя ОВЛ до последующего силового воздействия на них.

По полученному аналитическому выражению (2.115) проведем численный расчет при следующих исходных значениях параметров: $R_k = 0,15\text{м}$; $f_{гр} = 0,48$; $f_{дин.гр} = 0,35$; $\alpha_{OA} = 3 \div 55^\circ$; $\omega_{f_{дин.гр}} = 4,18 \text{ рад/с}$; $\omega_k = 1,57 \text{ рад/с}$ (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты решения уравнения (2.115) – $\frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}} = f(\alpha_{OA})$

$\alpha_{OA}, \text{град.}$	$\frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}}$	$\alpha_{OA}, \text{град.}$	$\frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{OA}}$
3	8,85	35	-0,32
5	8,37	37	-0,99
10	6,92	40	-1,78
15	5,47	43	-2,57
20	3,52	45	-3,06
25	2,11	47	-3,68
30	0,67	50	-4,28
33	0,65	53	-4,94
34	0,46	55	-5,59

Как видно из таблицы, максимальный угол подъема гранулята, при котором он прекратит свое движение, составляет – $\alpha_{OA \max} = 34^\circ$. Достигнув этого уровня, барабан начинает скользить в сторону своего вращения, относительно слоя гранул. При этом равновесие нарушится и микрогранулят начинает скользить вниз, в направлении противоположном вращению камеры. Минимальный угол, до которого он скатится вниз – $\alpha_{OA \min} = 3^\circ$. Как только микрогранулят остановится, за счет возникающих при вращении барабана сил трения, начнется повторный его подъем. Таким образом, совершается колебательное движение гранул при их перемещении в сторону выгрузки. При использовании последовательно установленных в зоне гранулообразования БВА вращающихся винтообразных

лопастных устройств, в сочетании с параллельным вращением камеры агломерирования, обеспечивается не только объемно-пространственное перемещение сформованного ранее микрогранулята, но и увеличивается путь, преодолеваемый материалом вдоль внутреннего корпуса камеры. Подъем с помощью ОВЛ микрогранулята на большую высоту H_{max} повышает потенциальную энергию ($E_{пот} = m_{гр} g H_{max}$) агломерируемого слоя гранулята, а также совместно с воздействием сил трения от вращающейся камеры, обеспечиваются более протяженные винтообразные траектории перемещения микрогранул вдоль внутренней агломерирующей поверхности агрегата. Все это, в совокупности, увеличивает полезную работу, затрачиваемую на процесс агломерирования и повышает его эффективность.

2.8. Изучение процесса классификации полифракционного гранулята технического углерода

При установке однозаходных винтовых лопастей (ОВЛ), угол винтовой линии которых направлен навстречу друг другу, обеспечивается рециркуляционное перемещение сформованных гранул внутри барабана по классификационной решетке (рисунок 2.17).

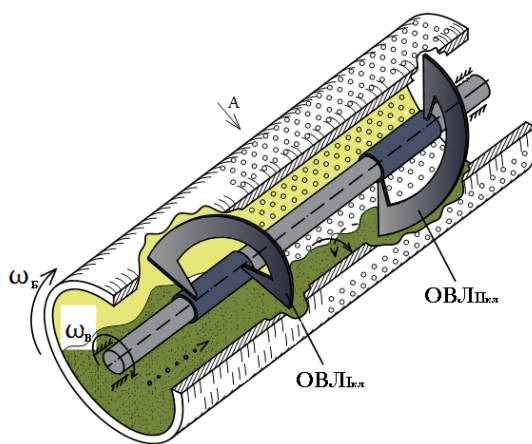


Рисунок 2.17. Аксонометрическое изображение расположения ОВЛ_{кл. I, II} рециркуляционного действия в зоне классификации полифракционного гранулята

Расстояние между ОВЛ_{кл.}, а также угол раскрытия винтовой поверхности β , влияет на время нахождения материала на классификационной решетке и на качество получаемых гранул (рисунок 2.18).

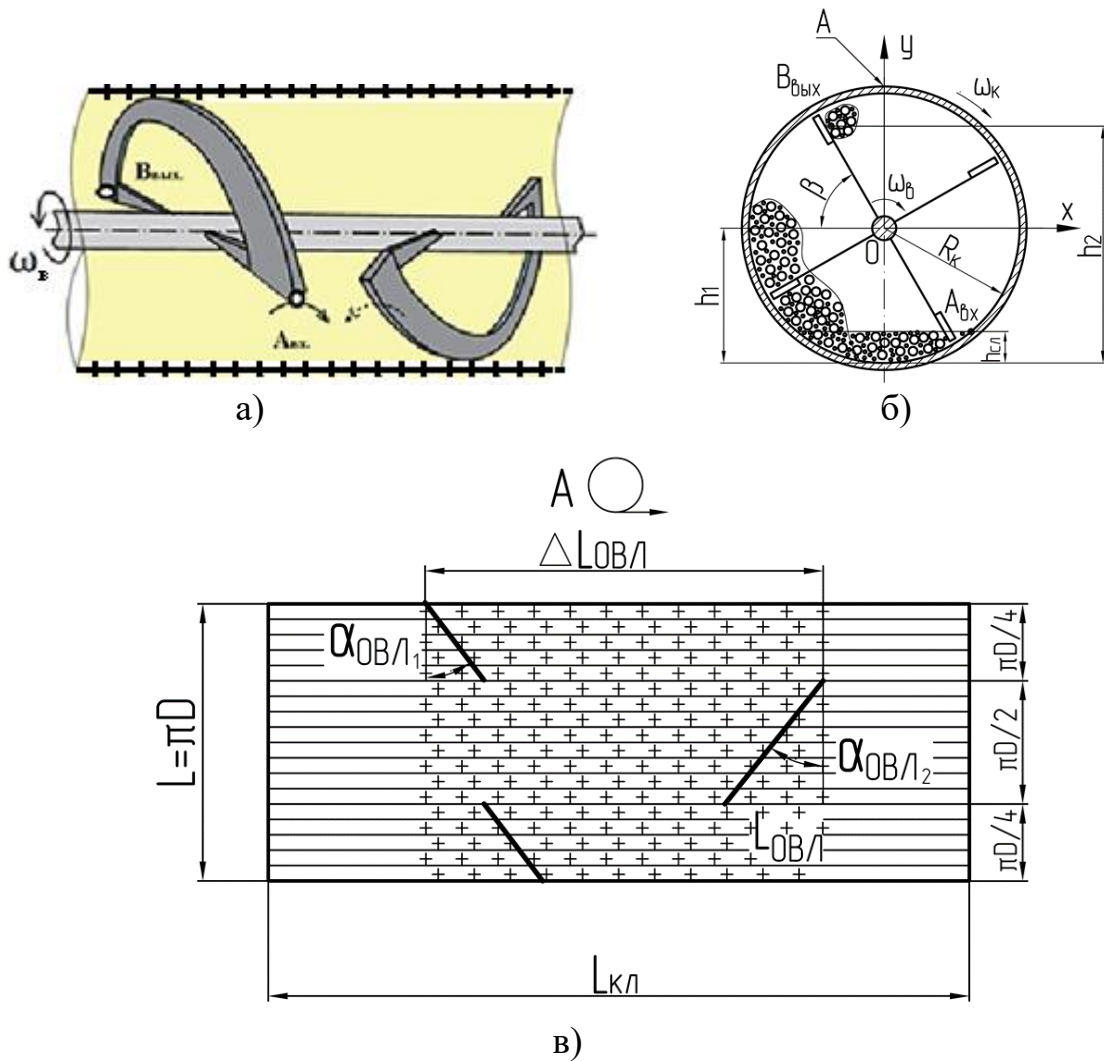


Рисунок 2.18. Схема к расчету процесса классификации полифракционного гранулята: а) расположение ОВЛ в зоне классификации, б) поперечное сечение камеры с расположением ОВЛ, в) развертка камеры классификации с расположением ОВЛ

Для изучения процесса движения сформованной гранулы и воздействия на нее разнонаправленных ОВЛ, представим БВА в виде горизонтально расположенного в плоскостях X, Y, Z полого цилиндра радиусом (R), а гранулу технического углерода – в виде материальной точки массой (m), лежащую на внутренней поверхности перфорированного цилиндра (классификационной решетки).

Движение гранулята в барабане имеет сложную траекторию (рисунок 2.17, 2.18). Одна часть гранулята поднимается под действием сил трения на высоту $H_{тр}$, другая часть – лопастями на высоту H_{max} .

Согласно схеме, представленной на рисунке 2.18

$$H_{max} = R_k + R_k \cdot \sin \beta = R_k \cdot (1 + \sin \beta), \quad (2.116)$$

$\beta_{\text{кл}}$ – угол максимального подъема гранулы при ее движении по круговой траектории.

Подъем гранулы прекратится в тот момент, когда сила тяжести превысит силу трения $F_{\text{т}} \geq F_{\text{тр}}$, или $mg \sin \beta_{\text{кл}} \geq \mu(m_{\text{гр}} \omega_{\text{к}}^2 R_{\text{к}} + m_{\text{гр}} g \cos \beta_{\text{кл}})$,

где
$$\cos \beta_{\text{кл}} = \sqrt{1 - \sin^2 \beta_{\text{кл}}}, \quad (2.118)$$

подставляя выражение (2.118) в выражение (2.117) и решая их совместно, получим

$$\sin \beta_{\text{кл}} = \frac{f_{\text{тр}} \frac{\omega_{\text{гр}}^2}{R_{\text{к}}} + \sqrt{g^2 (1 + f_{\text{тр}}^2) - f^2 \frac{\omega_{\text{гр}}^4}{R_{\text{к}}^2}}}{g(1 + f_{\text{тр}}^2)}. \quad (2.119)$$

Дальнейшее вращение барабана приводит к повторному подъему гранулы до уровня A_0 (рисунок 2.19), достигнув которого последняя остановится и начнет скатываться вниз. Одновременно с подъемом гранулы вверх происходит ее горизонтальное перемещение вдоль оси барабана вследствие воздействия на нее ОВЛ. Таким образом, гранула описывает на внутренней поверхности классификационной решетки барабана винтовую линию, но в нижней части камеры, для усиления процесса рециклинга – классификации. Для этого угол наклона ОВЛ I_{кл}, ОВЛ II_{кл}, составляет $15 \div 20^\circ$, что меньше, чем угол ОВЛ I_{агл}, ОВЛ II_{агл}, ОВЛ III_{агл}, в зоне агломерирования.

Согласно полученным при моделировании значений, примем шаг винтовой лопасти $S_{\text{овл}} = 0,5 D_{\text{овл}}$; $D_{\text{овл}} = 0,145\text{м}$, следовательно, $S_{\text{овл}} = 0,0725\text{м}$;

$v_{\text{г}}$ – скорость движения гранулы вдоль оси барабана, определяется шагом винтовой лопасти и скоростью вращения вала, на котором она закреплена.

$$v_{\text{г}} = S_{\text{овл}} \cdot n_{\text{в}}. \quad (2.120)$$

Таким образом происходит классификация полифракционного гранулята однозаходными винтовыми лопастями в режиме рециклинга.

2.9. Расчет энерго-силовых параметров барабанно-винтового агрегата

Обоснованность и целесообразность реализации вышеуказанных постадийных процессов агломерирования ТУ, с учетом указанных его специфических особенностей, была последовательно доказана, начиная с гипотезного предположения; разработанной механо-реологической модели и математического описания её отдельных стадий; последующего подтверждения и уточнения конструктивно-технологических параметров винтообразных лопастных устройств, их геометрического профиля при физическом моделировании процессов гранулообразования на разработанных стендовых установках, а также разработанной патенто-защищенной конструкции БВА с дальнейшими его экспериментальными исследованиями.

2.9.1. Расчет мощности привода агломерирующих устройств

В данном расчете нами учтены максимально возможные и наиболее рациональные технологические процессы: дезагломерация возникающих при смешивании ТУ со связующим конгломератов, препятствующих микрогранулированию частиц на начальной стадии агломерирования, способом растирания материала о решетку; возможность увеличения рабочей зоны центрального барабана БВА за счет изменения геометрического профиля и размеров спиралевидного устройства микрогранулирования ТУ; использования рациональных схем взаимного расположения ДВЛ и ОВЛ вдоль горизонтального приводного вала и углов поворота лопастей по окружности, что было подтверждено при моделировании процессов агломерирования ТУ и других конструктивно-технологических решений. На рисунке 2.20 представлена кинематическая и конструктивно-технологическая схема патентозащищенного БВА (Пат. РФ 2748629, Евразийский № 040258).

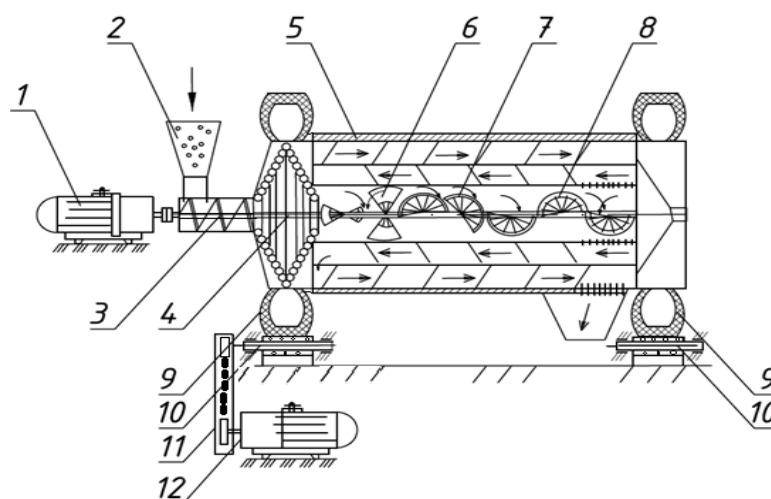


Рисунок 2.20. Кинематическая и конструктивно-технологическая схема к расчету потребляемой мощности привода БВА:

1 – мотор-редуктор, 2 – приемное загрузочное устройство, 3 – транспортирующий шнек, 4 – спиралевидный блок микрогрануляции, 5 – внешний теплоизолированный барабан, 6 – разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти, 7 – однонаправленные однозаходные винтовые лопасти, 8 – разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти, 9 – бандажи, 10 – опорные ролики, 11 – цепная передача, 12 – вариатор-редуктор.

Суммарная мощность, потребляемая приводами БВА, Вт

$$P_{\Sigma} = \frac{P_I}{\eta_I} + \frac{P_{II}}{\eta_{II}}, \quad (2.121)$$

где P_I, P_{II} – соответственно, мощность привода, затрачиваемая на процесс агломерирования ТУ в центральном барабане, и мощность, расходуемая на вращение корпуса БВА, Вт;

η_I, η_{II} – соответственно, КПД привода винтовых устройств БВА и привода корпуса БВА, Вт;

Суммарная мощность привода камеры питания и агломерирования P_I , Вт

$$P_I = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (2.122)$$

где P_1 – мощность, расходуемая шнековым питателем и растирателем конгломератов смеси ТУ, Вт;

P_2 – мощность, затрачиваемая на упрочнение микрогранулята ДВЛ рециркуляционного действия, Вт;

P_3 – мощность, затрачиваемая на процесс агломерирования ОВЛ постадийного действия, Вт;

P_4 – мощность, расходуемая на классификацию гранулята ОВЛ рециркуляционного действия, Вт.

Мощность, расходуемая шнековым питателем и растирателем конгломератов смеси (по М.Я Сапожникову и Р.Л. Зенкову) P_1 , Вт

$$P_1 = Q_{\text{шн}} \cdot L_{\text{шн}} \cdot g \cdot k_1 \cdot k_2 + M_{\text{тр}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (2.123)$$

где $Q_{\text{шн}}$ - массовая производительность шнекового питателя, кг/с;

$L_{\text{шн}}$ - длина шнека, м;

g - ускорение силы тяжести, $9,81 \text{ м/с}^2$;

k_1 - коэффициент запаса мощности, $k_1 = 1,1$;

k_2 - коэффициент сопротивления перемещению шихты и дезагломерации конгломератов, $k_2 = 4,0 \div 5,5$;

$M_{\text{тр}}$ - момент трения, возникающий между торцевой поверхностью выгрузочной винтовой лопасти и решеткой растирателя конгломератов, Н · м;

$n_{\text{в}}$ - частота вращения вала шнека, $n_{\text{в}} = (0,33 \div 1,66) \text{ об/с}$.

Величину мощности $P_{\text{р.конгл}}$, затрачиваемой на преодоление момента трения при растирании образующихся конгломератов смеси ТУ (2.123), можно определить по формуле.

$$P_{\text{р.конгл}} = M_{\text{тр}} \cdot n_{\text{в}} = 2\pi \cdot \bar{p}_{\text{уд.конг}} \cdot f_{\text{тр.конгл}} \cdot (R_{\text{шн}}^3 - r_{\text{в}}^3) \cdot n_{\text{в}}, \quad (2.124)$$

где $\bar{p}_{\text{уд.конг}}$ - удельное сопротивление, возникающее при растирании конгломератов, $\bar{p}_{\text{уд.конг}} = (1,5 \div 2) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$;

$f_{\text{тр.конгл}}$ - коэффициент трения конгломератов о растирающую решетку, $f_{\text{тр.конгл}} = 0,7 \div 0,8$;

$R_{\text{шн}}, r_{\text{в}}$ - соответственно, наружный радиус винтовой лопасти шнека и радиус вала шнека, м.

Массовая производительность шнекового питателя

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{шн}}^2 - d_{\text{в}}^2)}{4} \cdot S_{\text{шн}} \cdot n_{\text{в.шн}} \cdot \rho_{\text{ту}} \cdot \varphi_{\text{шп}}, \quad (2.125)$$

где $D_{\text{шн}}$ - наружный диаметр шнека, м; $d_{\text{в}}$ - диаметр вала шнека, м;

$\rho_{\text{ту}}$ - плотность перемещаемого ТУ со связующим, кг/м^3 , $\rho_{\text{ту}} = 700 \text{ кг/м}^3$;

$n_{\text{в.шн}}$ - частота вращения вала шнекового питателя, об/с;

S - шаг шнека, м;

$\varphi_{\text{шп}}$ – коэффициент загрузки шнекового питателя, $\varphi_{\text{шп}} = 0,3 \div 0,5$.

Как показали теоретические исследования разработанной механо-реологической модели (рисунок 2.4), подтвержденные физическим моделированием процессов постадийного агломерирования ТУ на стендовых установках, наиболее энергонасыщенными являются стадии упруго-вязко-пластического уплотнения микрогранул (II-стадия), вязко-пластического гранулообразования микрогранулята (III-стадия) и упруго-вязко-пластического деформирования полученного гранулята на стадии его классификации (IV-стадия). Этому способствуют совмещенные процессы силового воздействия на материал как со стороны винтообразных лопастных устройств, так и сил трения, возникающих со стороны одновременно вращающегося с лопастным валом центрального барабана от периферийного привода БВА. Все это способствует повышению удельных сопротивлений $\bar{P}_{\text{уд}}$ при воздействии ДВЛ и ОВЛ на гранулят, на соответствующих стадиях.

Кроме того, термолизная технология переработки органических ТКО, как показала практика, позволяет перерабатывать широкий спектр техногенных материалов, что для каждого вторичного сырья позволяет получать ТУ с различными физико-механическими характеристиками, в т.ч с удельным сопротивлением силовому воздействию при использовании соответствующих связующих.

С учетом вышеуказанного, как показали экспериментальные исследования процесса агломерирования ТУ (из полимерсодержащих ТКО, резинотехнических отходов и др.) на экспериментальных установках, для различных стадий агломерирования ТУ целесообразно принимать максимальные значения удельных сопротивлений $\bar{P}_{\text{уд}}$ при силовом воздействии лопастных устройств.

Указанные технические условия нами учтены при расчете потребляемой мощности на каждой стадии гранулообразования ТУ в БВА.

Мощность, затрачиваемая на процесс окатывания частиц в спиралевидном устройстве незначительна, поэтому её не учитываем. Кроме того, как показал процесс моделирования ТУ в спиралевидном устройстве, возможно сокращение длины спирали, а также увеличение сечения канала для увеличения пропускной способности устройства и увеличения рабочей зоны микрогранулирования.

Мощность, затрачиваемая на упрочнение микрогранулята P_2 , Вт.

$$P_2 = Z_{\text{р.пов.двл}} \cdot F_{\text{двл.гр}} \cdot \bar{p}_{\text{м.гр}} \cdot S_{\text{двл.гр}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (2.126)$$

где $Z_{\text{р.пов.двл}}$ – количество разнонаправленных рабочих поверхностей двухзаходных винтовых лопастей, $Z_{\text{р.пов.двл}}=4$, шт;

$F_{\text{двл.гр}}$ – площадь рабочей поверхности ДВЛ, м^2 ;

$\bar{p}_{\text{м.гр}}$ – удельное сопротивление, преодолеваемое ДВЛ при прохождении через слой агломерируемого материала, $\bar{p}_{\text{м.гр}}=(1,2 \div 1,5) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$;

$S_{\text{двл.гр}}$ – шаг ДВЛ, м;

$n_{\text{в}}$ – частота вращения вала ДВЛ, об/с.

Мощность, затрачиваемая на процесс агломерирования P_3 , Вт.

$$P_3 = Z_{\text{р.пов.овл.агл}} \cdot F_{\text{овл.агл}} \cdot \bar{p}_{\text{агл}} \cdot S_{\text{овл.агл}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (2.127)$$

где $Z_{\text{р.пов.овл.агл}}$ – количество однонаправленных рабочих поверхностей ОВЛ зоны агломерирования смеси ТУ, $Z_{\text{р.пов.овл.агл}}=3$ шт;

$F_{\text{овл.агл}}$ – площадь рабочей поверхности ОВЛ_{агл} зоны агломерации, м^2 ;

$\bar{p}_{\text{агл}}$ – удельное сопротивление, преодолеваемое ОВЛ_{агл} при прохождении через слой агломерируемого материала, $\bar{p}_{\text{агл}}=(1,5 \div 2) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$;

$S_{\text{овл.агл}}$ – шаг ОВЛ_{агл}, м.

Мощность, затрачиваемая на процесс классификации полифракционного гранулята, P_4 , Вт.

$$P_4 = Z_{\text{р.пов.овл.кл}} \cdot F_{\text{овл.кл.}} \cdot \bar{p}_{\text{кл}} \cdot S_{\text{овл.кл}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (2.128)$$

где $Z_{\text{р.пов.овл.кл}}$ – количество разнонаправленных однозаходных винтовых лопастей зоны классификации гранулята, $Z_{\text{р.пов.овл.кл}}=2$ шт;

$F_{\text{овл.кл.}}$ – площадь рабочей поверхности ОВЛ зоны классификации, м^2 ;

$\bar{p}_{\text{кл}}$ – удельное сопротивление, преодолеваемое ОВЛ_{кл} при прохождении через слой агломерируемого материала, $\bar{p}_{\text{кл}}=(1,5 \div 2) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$;

$S_{\text{овл.кл}}$ – шаг ОВЛ_{кл}, м.

КПД привода винтовых устройств БВА η_I

$$\eta_I = \eta_{\text{мр}} \cdot \eta_{\text{под.}}^2, \quad (2.129)$$

где $\eta_{\text{мр}}$ – КПД мотор-редуктора, $\eta_{\text{мр}} = 0,87$; $\eta_{\text{под}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{под}} = 0,99$.

На рисунке 2.21 представлены графические зависимости P_1, P_2, P_3, P_4 , соответственно, мощностей, затрачиваемых на подачу материала шнековым питателем, упрочнение микрогранулята ДВЛ, окончательное формование гранулята ОВЛ и дальнейшую его классификацию, от частоты вращения вала винтовых устройств, при постоянных значениях: $Q_{\text{шн}} - 0,086$ кг/с; $L_{\text{шн}} - 1,0$ м; $k_1 - 1,1$; $k_2 - 4,0$; $\bar{p}_{\text{уд.конг}} - 1,5 \cdot 10^4$ Н/м²; $\bar{p}_{\text{м.гр}} - 1,2 \cdot 10^3$ Н/м²; $\bar{p}_{\text{кл}} - 1,5 \cdot 10^3$ Н/м²; $S_{\text{двл.гр}} - 0,13$ м; $S_{\text{овл.агл}} - 0,18$ м; $S_{\text{овл.кл}} - 0,12$ м.

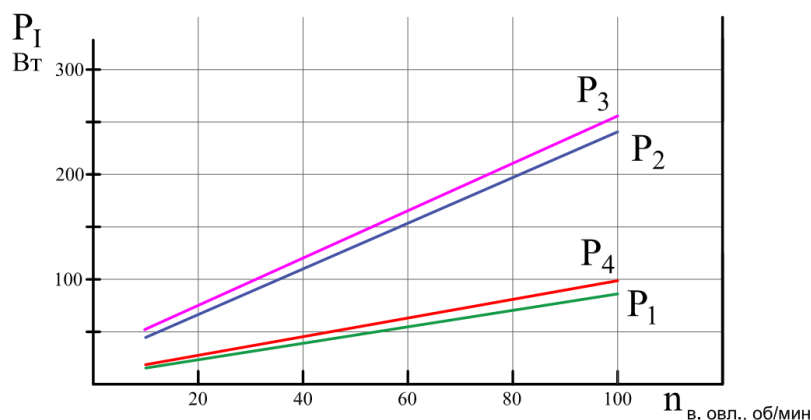


Рисунок 2.21. График зависимости мощностей P_1, P_2, P_3, P_4 , от частоты вращения вала винтовых лопастей

Анализ полученных по формулам (2.123), (2.126-2.128) показывает характерные линейные зависимости $P_i = f(n_i)$, от частоты вращения вала винтовых лопастей.

2.9.2. Расчет мощности привода барабанно-винтового агрегата

Мощность привода, затрачиваемая на вращение корпуса БВА, P_{II} , Вт

$$P_{II} = P_{\text{пм}} + P_{\text{тр.л}} + P_{\text{тр.б}}, \quad (2.130)$$

где $P_{\text{пм}}$, $P_{\text{тр.л}}$, $P_{\text{тр.б}}$ – соответственно, мощности, затрачиваемые на перемещение материала в рабочих камерах БВА; преодоление сил трения в подшипниках опорных роликов; преодоления сил трения бандажей по опорным роликам, Вт.

$$P_{\text{пм}} = Q_{\text{БВА}} \cdot g \cdot L_{\text{Б}\Sigma} \cdot k_3, \quad (2.131)$$

где $Q_{\text{БВА}}$ – массовая производительность БВА, кг/с. $Q_6 = Q_{\text{шн}}$;

$L_{\text{Б}\Sigma}$ – длина рабочей поверхности камер БВА, м.

$$L_{\text{Б}\Sigma} = L_{\text{цб}} + L_{\text{сб}} + L_{\text{вб}}, \quad (2.132)$$

где $L_{\text{цб}}$, $L_{\text{сб}}$, $L_{\text{вб}}$ – соответственно, длина центрального, среднего и внешнего барабанов, м.

k_3 – коэффициент сопротивления перемещению материала, $k_3 = 2,0 \div 2,5$

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в подшипниках опорных роликов

$$P_{\text{тр.п}} = 0,115(G_{\text{Б}} + G_{\text{м}}) r_{\text{р}} \cdot \omega_{\text{Б}}, \quad (2.133)$$

где $G_{\text{Б}}$ – сила тяжести корпуса БВА, Н

$$G_{\text{Б}} = m_{\text{Б}} \cdot g, \quad (2.134)$$

где $m_{\text{Б}}$ – масса БВА, воздействующая на опорные ролики; $m_{\text{Б}} = 120$ кг;

$G_{\text{м}}$ – сила тяжести материала, Н;

$r_{\text{р}}$ – радиус опорных роликов, м;

$\omega_{\text{Б}}$ – угловая скорость вращения цилиндрического корпуса БВА, рад/с

$$\omega_{\text{Б}} = 2\pi n_{\text{Б}}, \quad (2.135)$$

где $n_{\text{Б}}$ – частота вращения барабана, $n_{\text{Б}} = 0,25$ об/с

Сила тяжести материала, перерабатываемого в БВА

$$G_{\text{м}} = m_{\text{м}} \cdot g, \quad (2.136)$$

где $m_{\text{м}}$ – масса перерабатываемого материала, кг.

$$m_{\text{м}} = F_{\text{сеч}} \cdot L_{\text{Б}\Sigma} \cdot \varphi_3 \cdot \rho_{\text{ту}}, \quad (2.137)$$

где $F_{\text{сеч}}$ – средняя площадь поперечного сечения барабана, $F_{\text{сеч}} = 0,47$ м²;

φ_3 – коэффициент заполнения БВА, $\varphi_3 = 0,2$;

Мощность, затрачиваемая на динамическое трение бандажей о ролики, Вт

$$P_{\text{тр.б}} = M_{\text{т}} \cdot \omega_{\text{Б}}, \quad (2.138)$$

где $M_{\text{т}}$ – момент трения качения бандажей по роликам, Н·м;

$\omega_{\text{Б}}$ – угловая скорость вращения барабана, рад/с.

$$M_T = (R_B + r_p) \cdot \frac{f_{\text{дин}}}{r_p} \cdot \frac{G_6 + G_M}{\cos \alpha}, \quad (2.139)$$

где R_B и r_p – соответственно, радиусы бандажей барабана и опорных роликов, $R_B = 0,337$ м, $r_p = 0,035$ м;

$f_{\text{дин}}$ – коэффициент динамического трения, $f_{\text{дин}} = 0,02$, резина по резине;
 α – угол между вертикальной осью сечения барабана и линией, соединяющей его центр с центром опорного ролика, $\alpha = 30^\circ$

КПД привода корпуса БВА рассчитывается по формуле

$$\eta_{II} = \eta_{\text{вар}} \cdot \eta_{\text{цеп.пер}}^2 \cdot \eta_{\text{подш}}^4, \quad (2.140)$$

где $\eta_{\text{вар}}$ – КПД вариатора, $\eta_{\text{вар}} = 0,85$;

$\eta_{\text{цеп.пер}}$ – КПД цепной передачи, $\eta_{\text{цеп.пер}} = 0,9$;

$\eta_{\text{подш}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{подш}} = 0,99$.

На рисунке 2.22 представлены графические зависимости $P_{\text{пм}}$, $P_{\text{тр.п}}$, $P_{\text{тр.б}}$ – соответственно, мощностей, затрачиваемых на перемещение материала в рабочих камерах БВА; преодоление сил трения в подшипниках опорных роликов; преодоления сил трения бандажей по опорным роликам, от частоты вращения барабана, при постоянных значениях: $L_{\text{Б}_\Sigma} = 3,9$ м; $k_3 = 2,0$; $R_B = 0,337$ м; $r_p = 0,035$ м; $\alpha = 30^\circ$; $f_{\text{дин}} = 0,02$; $F_{\text{сеч}} = 0,47$ м²; $\varphi_3 = 0,2$.

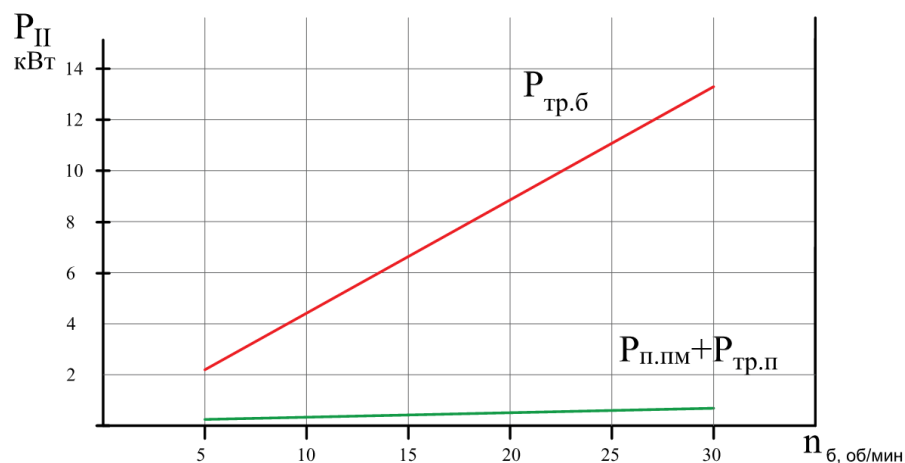


Рисунок 2.22. Графические зависимости $P_{\text{пм}}$, $P_{\text{тр.п}}$, $P_{\text{тр.б}}$, от частоты вращения барабана

Анализ полученных по формулам (2.131), (2.133), (2.138) показывает характерные линейные зависимости $P_i = f(n_i)$, от частоты вращения барабана.

По вышеуказанным аналитическим выражениям, рассчитаем мощность привода, потребляемую БВА (рисунок 2.20).

Проведенные численные расчеты по формулам (2.123), (2.126-2.128) показывают, что значения P_1, P_2, P_3, P_4 , с учетом низкой насыпной плотности ТУ вместе со связующим, $\rho_0 = 600 \div 700 \text{ кг/м}^3$, и малых сопротивлений при его обработке, весьма незначительны $P_I \approx 300 \text{ Вт}$.

Это обусловлено незначительной величиной насыпной плотности ТУ и полученного из него гранулята, соответственно, незначительными сопротивлениями при их обработке, а также небольшими геометрическими размерами рабочих органов БВА. С учетом вышеуказанного, значения мощности, затрачиваемой на перемещение гранулята в рабочей зоне БВА $P_{\text{пм}}$ и преодоление сил трения в подшипниках опорных роликов $P_{\text{тр.п}}$, также невелики $P_{\text{пм}} + P_{\text{тр.п}} \approx 115 \text{ Вт}$.

По формулам (2.139), (2.138) соответственно, рассчитаем момент трения качения бандажей по роликам и мощность, затрачиваемую на динамическое трение бандажей о ролики.

$$M_{\text{тр}} = (R_{\text{Б}} + r_{\text{Б}}) \cdot \frac{f_1}{r_{\text{Б}}} \cdot \frac{G_{\text{Б}} + G_{\text{м}}}{\cos \alpha} = (0,372 + 0,035) \cdot \frac{0,02}{0,035} \cdot \frac{1177,2 + 2517,4}{0,866} =$$

$$= 904,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Соответственно, } P_{\text{тр.б}} = M_{\text{тр}} \cdot \omega_{\text{б}} = 904,6 \cdot 1,57 = 1420,2 \text{ Вт},$$

$$\text{тогда } P_{II} = P_{\text{пм}} + P_{\text{тр.п}} + P_{\text{тр.б}} = 65,8 + 46,69 + 1420,2 = 1532,7 \text{ Вт}.$$

С учетом вышеуказанного, суммарная мощность БВА, с учетом η_I и η_{II} , составляет $\sim 2700 \text{ Вт}$.

Приведенные нами теоретические исследования по изучению постадийных процессов агломерирования ТУ в БВА, разработке и конструктивно-технологическому совершенствованию специальных винтовых лопастных устройств комбинированного действия для каждой из стадий агломерирования, а также представленные аналитические зависимости по расчету суммарной потребляемой мощности привода БВА, подтвержденные численными примерами и результатами процессов моделирования на стендовых установках, свидетельствуют о незначительных энергозатратах при агломерировании ТУ в патентозащищенной конструкции БВА.

Учитывая микропоризованную, способом низкотемпературного термоллиза, структуру частиц ТУ, характеризующуюся низкой насыпной плотностью $\rho_0 = 400 \div 500 \text{ кг/м}^3$, разработанная конструкция БВА обеспечивает получение регламентированной по размерам $d_{\text{ср}} = (2 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\rho_{\text{агл}} = 600 \div 700 \text{ кг/м}^3$ продукции при незначительной потребляемой мощности постадийного процесса агломерирования и компактности агрегата. Суммарный расход потребляемой мощности двух приводов БВА составляет 2700 Вт, при достаточной производительности $Q_{\text{БВА}} \geq 300 \text{ кг/ч}$, для существующей в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» технологии.

Удельный расход электроэнергии при получении гранулированного ТУ (с учетом его специфических особенностей) незначителен, $q = \frac{P_{\text{БВА}}}{Q_{\text{БВА}}} = 9,0 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$.

2.10. Выводы

1. Разработана механо-реологическая модель, учитывающая стадийность процесса агломерирования технического углерода низкотемпературной термоллизной технологии переработки органических техногенных материалов, с учетом его специфических особенностей

2. Получены аналитические выражения постадийного силового воздействия рабочих органов БВА на обрабатываемый материал на каждой стадии и общее уравнение агломерирования ТУ.

3. На разработанных стендовых установках проведено моделирование механо-технологических процессов агломерирования ТУ, подтверждающие целесообразность реализации механо-реологической модели.

4. При моделировании процессов агломерирования ТУ определены геометрические профили и конструктивно-технологические особенности рабочих органов барабанно-винтового агрегата для каждой стадии гранулообразования материала.

5. Проведены теоретические исследования процессов постадийного гранулообразования ТУ, с учетом его физико-механических характеристик на стадиях: образования микрогранулята – в спиралевидном устройстве; упрочнение микрогранулята двухзаходными винтовыми лопастями в режиме рециклинга; дальнейшего гранулообразования материала однозаходными винтовыми лопастями и классификации полученного гранулята ОВЛ рециркуляционного действия.

6. Получены аналитические выражения, описывающие вышеуказанные процессы, проведены расчеты конструктивно-технологических параметров энергоэффективных рабочих органов БВА.

7. Разработана методика расчета основных конструктивно-технологических, энергосиловых параметров и потребляемой мощности патентозащищенного агрегата для агломерирования ТУ. Суммарный расход потребляемой мощности двух приводов БВА составляет $P_{\Sigma}=2700$ Вт, удельный расход электроэнергии $q = 9$ Вт · ч/кг.

3. РАЗРАБОТКА СТЕНДОВЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК, МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Разработка стендовой установки БВА для моделирования процесса агломерирования полидисперсных материалов

Для исследования процессов агломерирования полидисперсных материалов, в частности технического углерода низкотемпературной термолизной технологии, была разработана и создана стендовая установка (рисунок 3.1).

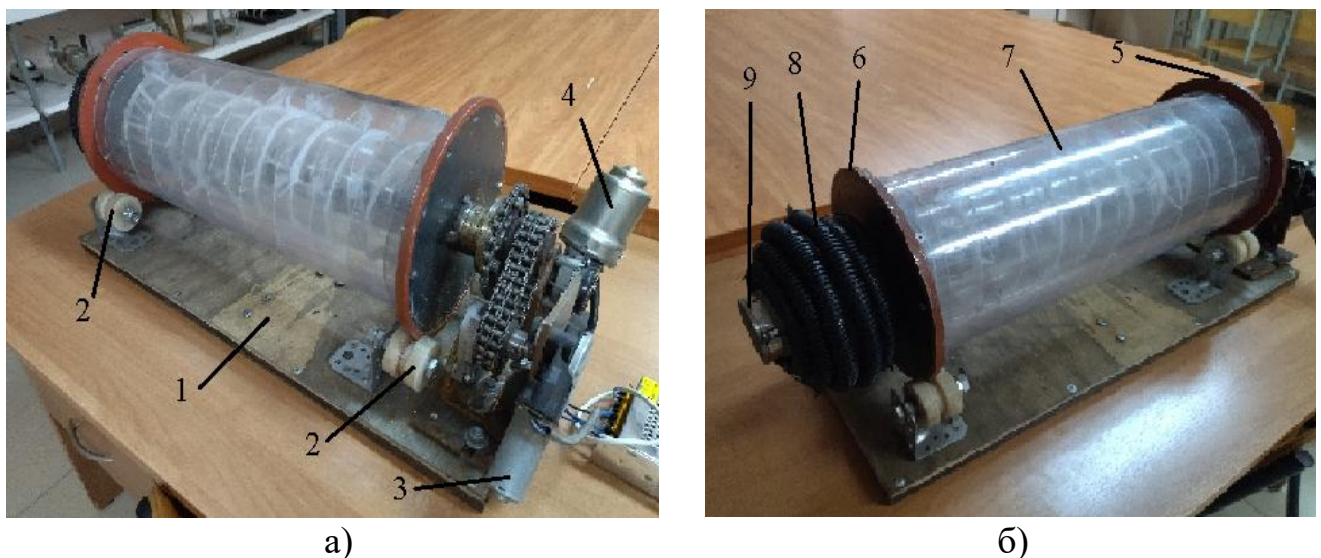


Рисунок 3.1. Общий вид стендовой установки для моделирования процесса агломерирования технического углерода со стороны привода (а) и со стороны спиралевидного блока (б):

1 – основание; 2 – опорные ролики; 3,4 – мотор-редукторы; 5,6 – торцевые крышки; 7 – внешний барабан; 8 – спиралевидный блок микрогранулирования; 9 – узел загрузки.

Стендовая установка состоит из основания 1, на котором закреплены опорные ролики 2, на основании 1, также мотор-редукторы 3,4, соответственно, обеспечивающие вращение внутренних рабочих органов центрального барабана агломерирования и внешнего барабана агрегата. На опорные ролики 2 торцевыми крышками 5,6 (бандажами) опирается внешний барабан 7. Средний и центральный барабаны расположены внутри внешнего барабана коаксиально. Все три барабана жестко скреплены между собой и вращаются с варьируемой частотой $n_6 = 15 \div 20$

об/мин. На торцевой крышке 6 расположен спиралевидный блок микрогранулирования 8 с узлом загрузки 9.

В таблице 3.1. представлены технические характеристики стендовой установки.

Таблица 3.1 – Технические характеристики стендовой установки

Наименование показателя	Значение
Длина спиралевидного канала устройства микрогранулирования	4,5 м
Длина барабанов	0,5 м
Внутренний диаметр центрального барабана	0,067 м
Внутренний диаметр среднего барабана	0,15 м
Внутренний диаметр внешнего барабана	0,25 м
Частота вращения барабанов	15÷30 об/мин
Частота вращения спирали	30÷100 об/мин
Мощность привода внутренней спирали	70 Вт
Количество ДВЛ (упрочнения микрогранулята)	4 шт
Количество ОВЛ (агломерирования)	3 шт
Количество ОВЛ (классификации)	2 шт
Расстояние между ДВЛ и ОВЛ	0,5÷0,6 D лопасти
Угол подъема винтовой линии	40÷50°
Мощность привода барабана	80 Вт

Отличительными особенностями данной стендовой установки являются:

1. Корпуса барабанов, а также ДВЛ и ОВЛ, изготовленные из прозрачного акрилового материала (рисунок 3.2).



а)



б)

Рисунок 3.2. Вид на барабаны стендовой установки: центральный, средний и внешний; (а) – общий вид, (б) – вид без торцевой крышки.

Данное конструктивное решение позволяет визуализировать перемещение материала во всех трех барабанах (центральной, средней и внешней).

2. Спиралевидный блок микрогранулирования (рисунок 3.3 *а*) совмещен с узлом загрузки и закреплен на торцевой крышке внешнего барабана. Блок выполнен в виде трубчатого контура.



а)



б)

Рисунок 3.3. Вид на модельную установку: спиралевидный блок микрогранулирования с узлом загрузки (*а*); опорный ролик с опирающейся на него торцевой крышкой (*б*)

Направление навивки выполнено по часовой стрелке и противоположно направлению вращению данного блока. Загрузочное устройство соединено со спиралевидным блоком микрогранулирования, так же как и центральный барабан. Представленные конструктивные решения позволяют в разработанном технологическом модуле смоделировать процесс загрузки агломерируемой шихты, ее движения в спиралевидном блоке и непрерывном перемещении в центральный барабан.

3. Опорные ролики (рисунок 3.4 *б*) по внешнему диаметру имеют специальный паз, в который устанавливаются торцевые крышки внешнего барабана. Данное техническое решение препятствует продольно-осевому смещению внешнего барабана в период его вращения.

4. Привода внешнего барабана и внутренних рабочих органов, реализующих процесс агломерирования (рисунок 3.4), содержат цепные передачи. Привода имеют возможность бесступенчатой регулировки частоты вращения рабочих

органов. Это позволяет установить наиболее рациональную частоту вращения вала с винтовыми лопастями и с учетом коэффициентов загрузки барабанов.



Рисунок 3.4. Вид на мотор-редукторы приводов и трансмиссию внешнего барабана

Кроме того, разработанная с учетом критерия геометрического подобия стендовая установка позволяет реализовать физическое моделирование исследуемых процессов и их конструктивно-технологическое совершенствование. Смоделировать как однонаправленное, так и разнонаправленное перемещение агломерированного материала внутренними рабочими органами вдоль осей барабанов.

Конструкция стендовой установки позволяет осуществлять быстрый монтаж/демонтаж различных внутренних рабочих органов для реализации процесса агломерирования ТУ (рисунок 3.5). В частности, при использовании различных технических решений для образования центров агломерирования – микрогранулята в спиралевидном устройстве и дальнейшем упрочнении микрогранул с помощью закрепленных на валу двухзаходных винтовых лопастей. Последние работают в режиме «внутреннего рециклинга», в дальнейшем – комплексного агломерирования микрогранул с помощью однонаправленных ОВЛ и сил трения гранулята о боковую поверхность центрального барабана. На завершающей стадии получения агломерированного ТУ, заданного фракционного состава с помощью разнонаправленных ОВЛ, реализуется классификация полифракционного гранулята.

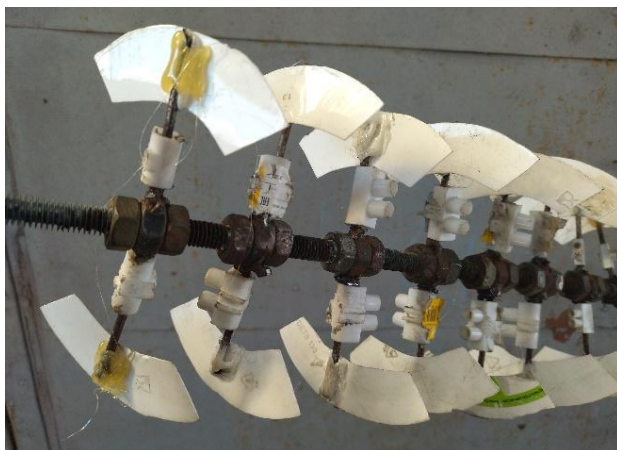


Рисунок 3.5. Варианты установки на валу различных лопастных устройств

5. Разработка технических решений узлов крепления лопастных устройств к валу позволяет исследовать влияние различных углов поворота рабочих органов относительно друг друга, расстояния между ними, а также углов подъема их винтовой линии (рисунок 3.6)



Рисунок 3.6. Варианты расположения на валу устройств с изменяемым углом поворота относительно друг друга и расстояния между ними

6. Разработанное нами многообразие технических решений для реализации основополагающего процесса – постадийного агломерирования ТУ с его специфическими особенностями (установление геометрического профиля устройств, углов наклона их винтовых поверхностей и относительного смещения по окружности, расстояния между ними; частоты вращения и технологических параметров и др.) позволили установить наиболее рациональные режимы получения кондиционной продукции – агломерированного ТУ (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7. Изображение гранулята, полученного на стендовых установках БВА

Физико-механические характеристики агломерированного ТУ представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Физико-механические характеристики агломерированного ТУ

Наименование показателя	Значение
Вид связующего	Водный раствор ПАВ
Содержание связующего	18 – 20 %
Фракционный состав гранулята:	
≥ 5 мм;	8-9%
4-5 мм;	4-5%
3-4 мм;	5-6%
2-3 мм;	65-70%
≤ 2 мм;	18-20%
Насыпная плотность	600-700 кг/м ³
Угол естественного откоса - $f_{гр}$	48°
Угол динамического откоса - $f_{дин.гр}$	35°
Механическая прочность гранул в высушенном состоянии	$\sigma_{сух}=180\div 250$ кПа
Относительное сопротивление истиранию сухих гранул	50-60%

Проводимое физическое моделирование процесса агломерирования ТУ в разработанной конструкции БВА при различном конструктивном исполнении рабочих органов, а также технологических режимах работы агрегата подтверждает его работоспособность, стабильность постадийных процессов агломерирования ТУ и классификации полученного гранулята, а также возможность использования данной конструкции для получения гранулированной продукции из различных техногенных материалов с низкой насыпной плотностью.

3.2. Кинематика взаимодействия лопастных устройств с агломерируемой средой

Для изучения влияния конструктивно-технологического исполнения рабочих органов барабанно-винтового агрегата на процесс агломерирования ТУ нами были проведены экспериментальные исследования с использованием модельной установки, оснащенной различными типами внутренних устройств.

Было установлено, что при реализации процесса должны быть использованы однозаходные винтовые лопасти (ОВЛ) заданного конструктивного исполнения, (рисунок 3.8).

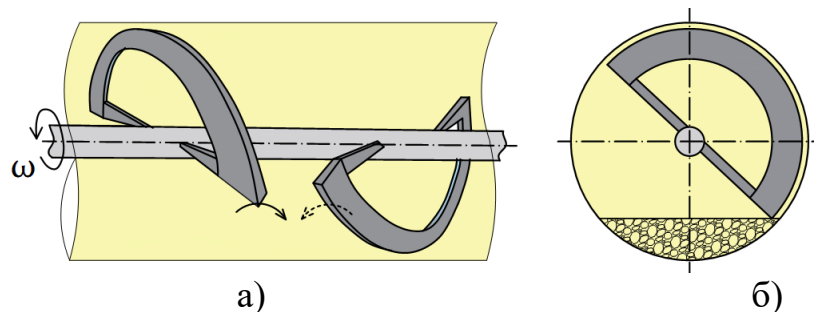


Рисунок 3.8. Схема воздействия однозаходных винтовых лопастей на агломерируемый технический углерод (проекция а, б).

Данные ОВЛ разрезают слой материала и по мере погружения в него смещают шихту вдоль винтовой поверхности и корпуса барабана в заданном направлении. Наличие лентообразных накладок (пластин) на крайней наружной части лопастей позволяет увеличить их транспортирующую способность. За счет изменения ширины накладных пластин можно регулировать количество перемещаемого материала внутри центрального барабана БВА.

Симметричное и разнонаправленное расположение ОВЛ вдоль горизонтальной оси вала позволяет реализовать последовательное (через каждые 180°) внутреннее перемещение (рециклинг) материала (рисунок 3.8). В зависимости от схемы расположения ОВЛ (а, б) определяется направление материального потока. Например, при одинаковом расположении винтовых поверхностей ОВЛ, снижается время нахождения материала в заданной зоне БВА, т.к. движение материала однонаправленное.

Также нами изучался процесс воздействия двухзаходных винтовых лопастей (ДВЛ) на агломерируемый материал. При этом за счет изменения направлений винтовых поверхностей можно регулировать внутренние потоки материала (рисунок 3.9). Пара разнонаправленных двухзаходных винтовых лопастей обеспечивает четырехкратное воздействие на смешиваемый материал за один оборот вала, что увеличивает объемно-пространственное перемещение материала и его гранулообразование. Межлопастное расстояние позволяет регулировать величину зон активного воздействия на материал. Угол раскрытия β определяет величину и траекторию движения материала внутри рабочей зоны барабана.

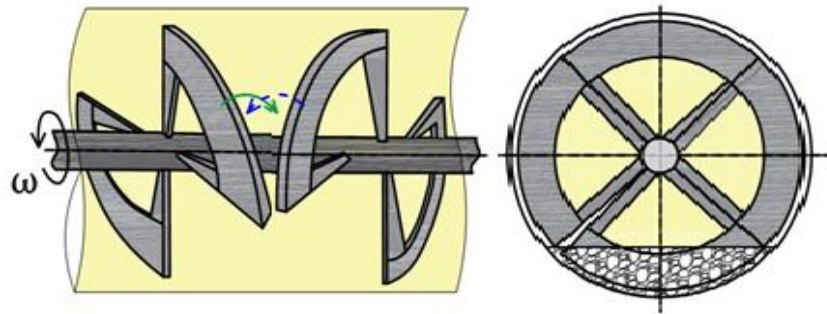


Рисунок 3.9. Схема воздействия двухзаходных винтовых лопастей на агломерируемый технический углерод

При моделировании процесса воздействия ДВЛ на агломерируемый материал было установлено, что при разнонаправленном размещении лопастей происходит интенсивное его перемешивание (рециклинг). Это способствует увеличению силового воздействия на микрогранулы, что обеспечивает, в зоне установки ДВЛ упрочнение поверхностного слоя микрогранул. При использовании двухзаходных винтовых лопастей за один оборот вала осуществляется 4-кратное воздействие рабочих поверхностей (для пары ДВЛ) в режиме «рециклинга». Последнее существенно ускоряет процесс упрочнения и гранулообразования микрогранулята.

Таким образом, использование ОВЛ и ДВЛ обеспечивает существенную интенсификацию процесса агломерирования, а также – возможность варьирования силового воздействия на получаемые гранулы. Это достигается за счет более развитой винтовой поверхности рабочих органов, возможности изменения ее величины, углов их раскрытия и направления наклона винтовых поверхностей. Кроме того, изменение углов поворота лопастей относительно друг друга и расстояния между

ними создает наиболее благоприятные условия для интенсификации процесса агломерирования такого специфичного материала, как технический углерод. Использование иных технических устройств не обеспечивает такого положительного сочетания варьируемых параметров для реализации процесса гранулирования ТУ.

3.3. Разработка патентозащищенной конструкции барабанно-винтового агрегата комбинированного действия и его конструктивно-технологические параметры.

Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования, а также моделирование технологических процессов агломерирования ТУ, позволили разработать патентозащищенную конструкцию барабанно-винтового агрегата для гранулирования полидисперсных пылевидных материалов с низкой насыпной плотностью (патент РФ № 2748629, Евразийский патент № 040258). Данный агрегат представлен на рисунке 3.10.

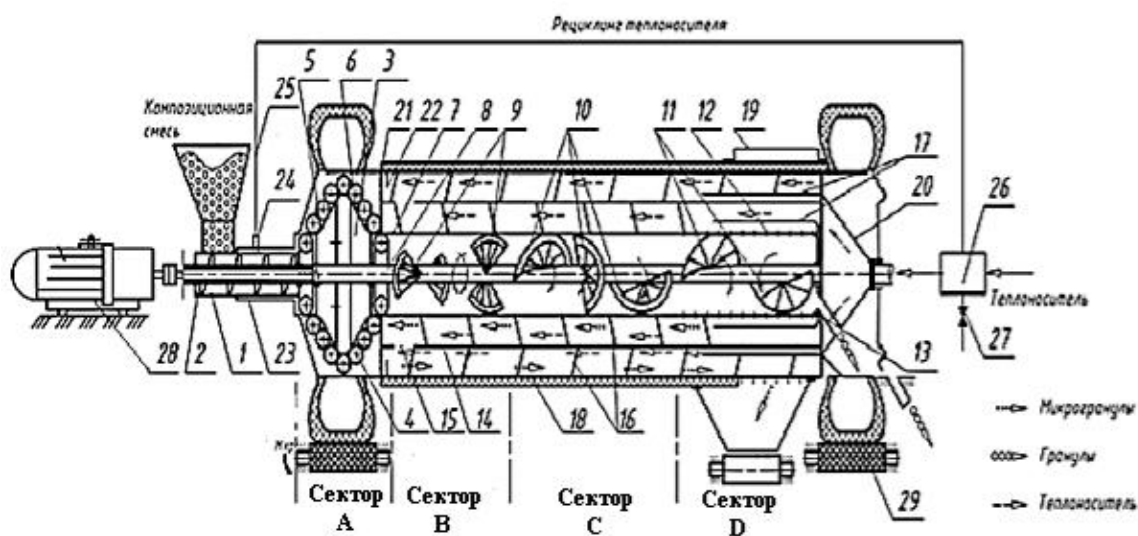


Рисунок 3.10. Барабанно-винтовой агрегат для агломерирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью:

1 – загрузочное устройство; 2 – транспортирующий шнек; 3 – спиревидный блок микрогранулирования; 4 – тручатый контур; 5, 6 – усеченные конуса; 7 – центральный барабан; 8 – центральный вал; 9 – двухзаходные геликоидальные лопасти; 10 – однонаправленные в сторону выгрузки однозаходные винтовые лопасти; 11 – однозаходные разнонаправленные винтовые лопасти; 12 – сетчатая поверхность; 13 – пересыпная полка; 14 – средний барабан; 15 – выгрузочное окно; 16 – нормальные полые геликоидальные параллелепипеды-геликоиды; 17 – направляющая теплоносителя; 18 – внешний теплоизолированный барабан; 19 – защитный кожух; 20 – конусообразный раструб подачи теплоносителя; 21 – перфорированная торцевая перегородка; 22 – стенка; 23 – рубашка загрузочного устройства; 24 – выходной патрубок; 25 – трубопровод циркуляции теплоносителя; 26 – распределительный блок рециркуляции теплоносителя; 27 – конденсатоотводчик; 28 – мотор-редуктор; 29 – опорные ролики.

Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования высокодисперсных техногенных материалов и их обработки [122-124] работает следующим образом.

Композиционная смесь через загрузочное устройство 1 транспортирующим шнеком 2 перемещается в сектор образования микрогранулята «А», где в спиралевидном блоке 3 реализуется процесс микрогранулирования. Спиралевидное устройство выполнено из усеченных патрубков, оформленных в виде усеченных конусов 5 и 6, в котором, за счет интенсивного перемещения материала в трех плоскостях при движении в трубчатом контуре, происходит образование микрозародышей. Пройдя через трубчатый контур 4, шихта попадает в сектор упрочнения микрогранулята «В». В центральном барабане 7, с помощью попарно установленных на центральном валу 8 разнонаправленных двухзаходных геликоидальных лопастей 9 происходит интенсивное перемешивание. Одновременно осуществляется продвижение материала в сектор гранулообразования «С». Из данного сектора с помощью последовательно установленных, однонаправленных, в сторону выгрузки однозаходных винтовых лопастей 10, материал перемещается в сектор классификации гранулята «D». В последнем однозаходными разнонаправленными винтовыми лопастями 11 полифракционный гранулят классифицируется через перфорированный корпус сектора разделения гранулята. Рекомендуемый гранулят $D_{гр}=2\div 5\text{мм}$ направляется на выгрузку, а просыпь, через сетчатую поверхность 12, удерживаемая пересыпной полкой 13 попадает в средний барабан 14. В указанный барабан подается также и теплоноситель из конусообразного раструба теплоносителя 20. В среднем барабане 14, просыпь проходит сушку, и увлекаемая боковыми спиралевидными пластинами геликоида 16, в прямотоке с теплоносителем перемещается к выгрузочной части. Выгрузка осуществляется через окно 15, откуда попадает во внешний теплоизолированный барабан 18. В последнем происходит окончательная сушка и далее, просыпь движется в противотоке с теплоносителем на окончательную выгрузку. Теплоноситель, подаваемый через раструб подачи теплоносителя 20, попадает в средний 14 и внешний теплоизолированный барабан 18. Для создания оптимальных тепловых потоков, средний и внешний барабаны имеют направляющую теплоносителя 17. Кроме того, внешний теплоизо-

лированный барабан 18 имеет защитный кожух 19, препятствующий свободному выходу теплоносителя. Теплоноситель, пройдя через перфорированную торцевую перегородку 21, защищенную стенкой 22, попадает в рубашку загрузочного устройства 23. Откуда, через выходной патрубок 24, пройдя трубопровод циркуляции теплоносителя 25, возвращается в распределительный блок рециркуляции теплоносителя 26. Последний имеет конденсатоотводчик 27. Транспортирующий шнек 2 и центральный вал 8 приводятся во вращение мотор-редуктором 28. Барабанно-винтовой агрегат установлен на опорных роликах 29.

Учитывая стадийность процесса агломерирования, были реализованы основные конструктивные решения БВА для гранулирования техногенных полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью. Так, спиралевидный блок микрогранулирования, способствующий образованию микрочастиц, размещён между загрузочным устройством и центральным барабаном. Внутри центрального барабана установлен центральный вал с расположенными на нем винтовыми рабочими элементами (рисунок 3.10). В секторе упрочнения микрогранулята «В» попарно установлены, разнонаправленные, двухзаходные винтовые лопасти с углом разворота $\alpha = 80-120^\circ$. В секторе гранулообразования «С» последовательно установлены однозаходные винтовые лопасти, однонаправленные в сторону выгрузки, с углами смещения $\beta = 70-130^\circ$. В секторе классификации гранулята «D» - однозаходными, разнонаправленными винтовыми лопастями с углами разворота $\gamma = 160-200^\circ$. При этом центральный барабан соединён со спиралевидным блоком грануляции и имеет в зоне выгрузки сетчатую классифицирующую поверхность.

Барабанно-винтовой агрегат агломерирует различные полидисперсные материалы, полученные при низкотемпературном термолизе органических техногенных материалов: ТКО, полимерных отходов, резинотехнических изделий и др. Кроме того, данный агрегат осуществляет теплотехническую обработку гранулята. Наличие двух барабанов и циркуляция теплоносителя интенсифицирует процесс сушки материала и снижает энергопотребление [125-131].

Разработанный БВА совмещает в себе следующие процессы: микрогрануляцию, постадийную классификацию полифракционного гранулята, сушку.

3.4. Методики экспериментальных исследований и обработки полученных результатов

Для проведения экспериментальных исследований использовались известные методики [132-134] определения физико-механических свойств исследуемых материалов.

Подготовку материалов для проведения лабораторных исследований [135] осуществляли в следующей последовательности: материал просеивали вручную на сите № 023 по ГОСТ 51568-99, чтобы удалить крупные включения. Сушку гранул проводили в сушильном шкафу при температуре 120°C в течение 1,5÷2 ч. Влажность материалов определяли прямым гравиметрическим методом по уменьшению массы проб. Регулировку частоты вращения валов, а также определение мощности, осуществляли с помощью частотного преобразователя.

С помощью растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450, представленного на рисунке 3.11, проводилось измерение размера объекта, выведенного на экран монитора.

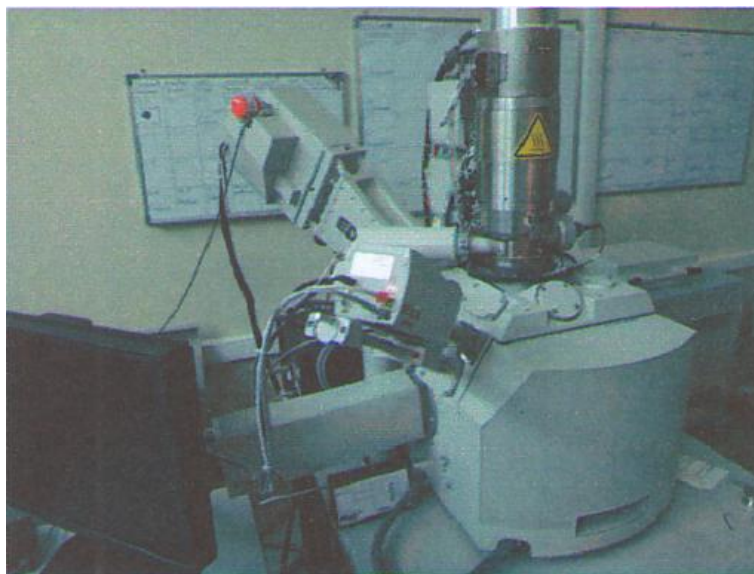


Рисунок 3.11. Внешний вид РЭМ FEI Nova NanoSEM 450

Изображение было получено с использованием детекторов вторичных, обратно рассеянных электронов (цифровая камера Digiview II высокого разрешения с высокочувствительной матрицей) внутреннего детектора и детектора, работающего в режиме вакуума.

С помощью представленного оборудования были проведены исследования морфологии технического углерода.

Также с использованием растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450 и энергодисперсионного спектрометра рентгеновского излучения EDAX, установленного в микроскопе, были проведены исследования элементного состава ТУ. Разрешение по энергии данного метода составляло 120 эВ, а по концентрации – до 0,1% для Ag, более тяжелых элементов, порядка 0,5%. Ускоряющее напряжение при проведении измерений составляло 20 кВ. Расчет содержания элементов проводился с помощью программы EDAX Genesis.

Фракционный состав технического углерода определялся с помощью растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450. Данный прибор позволяет непосредственно определять размер частиц и их процентное содержание. Средневзвешенный диаметр частиц определяли по формуле

$$d_{\text{ср.взв}} = \frac{C_1 \cdot d_{\text{ср1}} + C_2 \cdot d_{\text{ср2}} + C_3 \cdot d_{\text{ср3}} + \dots + C_n \cdot d_{\text{срn}}}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n}, \quad (3.1)$$

где $d_{\text{ср1}}, d_{\text{ср2}}, d_{\text{ср3}}, \dots, d_{\text{срn}}$ – средний диаметр частиц ТУ, м;

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – содержание в ТУ каждой фракции, %.

При помощи газoadсорбционного анализатора TriStar II 3020 определяли удельную поверхность исследуемого материала по однотоочечному и пятиточечному методу Брунера – Эммета - Теллера (Brunauer-Emmett-Teller) или BET (BET).

Использование рентгеновского дифрактометра SmartLab (Rigaku) позволило провести исследование фазового состава. Данный дифрактометр оснащен рентгеновской трубкой с Cu-анодом, которая даёт K α излучение, а также высокоскоростным детектором D/tex Ultra Hi Pix.

При исследовании сорбционной способности ТУ были приготовлены модельные растворы, содержащие ионы Ni²⁺. Растворы готовили способом растворения соли NiSO₄·7H₂O (х.ч.) в дистиллированной воде с pH=7. Концентрация ионов Ni²⁺ определялась на спектрофотометре «KFK-3».

Истинную плотность материала определяли пикнометрическим методом. Данный метод заключается в изменении объема жидкости, вытесненной пробой

материала из сосуда известного объема. В качестве жидкости также применялась дистиллированная вода с pH=7. Объем пробы исследуемого материала определяли по формуле

$$V = \frac{m - (m_3 - m_4)}{\gamma_{\text{ж}}} = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)}{\gamma_{\text{ж}}}. \quad (3.2)$$

Истинную плотность исследуемого материала определяли по формуле

$$\gamma_{\text{ист.}} = \frac{m}{V} = \frac{m \cdot \gamma_{\text{ж}}}{m - (m_3 - m_4)} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \gamma_{\text{ж}}}{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)}, \quad (3.3)$$

где m_1 – масса пикнометра, г;

m_2 – масса пикнометра с пробой ТУ, г;

m_3 – масса пикнометра с дистиллированной водой и пробой ТУ, г;

m_4 – масса пикнометра с дистиллированной водой, г;

$\gamma_{\text{ж}}$ – плотность дистиллированной воды ($\gamma_{\text{ж}} = 0,998$), г/см³.

При определении вида связующего было использовано следующее оборудование: весы CAS mwp предел измерений - 3000 г., точность измерений – 0,05 г.; шкаф сушильный СНОЛ 5.3,5.3,5/3; секундомер Kalenji

На рисунке 3.12 представлены фотографии приборов и оборудования, используемых в эксперименте по подбору связующего.

Экспериментальные исследования по определению прочности слоя гранул технического углерода на сжатие проводились его сдавливанием в металлическом цилиндре (ГОСТ 9758 - 86) [136]: внутренний диаметр – 75мм; высота слоя материала – 100мм; глубина погружения пуансона – 20мм.



Рисунок 3.12. Фотографии приборов и оборудования, используемых при подборе связующего

По формуле (3.4) рассчитывали прочность слоя гранул на сжатие $\sigma_{\text{сл}}$, кг/см²

$$\sigma_{\text{сл}} = \frac{P}{F_{\text{ц}}}, \quad (3.4)$$

где P – нагрузка при сдавливании гранул ТУ, Н;

$F_{\text{ц}}$ – площадь поперечного сечения цилиндра, см².

Относительное сопротивление гранул истиранию определяли по ГОСТ 7885-86 [137]. Вычисления в процентах проводили по формуле

$$X = 100 - \left(\frac{m}{m_1} \cdot 100 \right), \quad (3.5)$$

где X – относительное сопротивление гранул истиранию, %;

m – масса пыли, г;

m_1 – масса навески гранул технического углерода, г.

За результат испытаний принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных определений, допускаемое расхождение между которыми не должно превышать 3%

По общепринятым методикам [138] были определены погрешности экспериментальных исследований, которые не превышали 5%, а при использовании электронных приборов $\leq 0,5\%$.

3.5. Многофакторное планирование эксперимента при изучении рациональных режимов работы БВА

Для более детального изучения процесса постадийного агломерирования технического углерода низкотемпературной термолизной технологии в барабанно-винтовом агрегате необходимо определить влияние варьируемых параметров на выходные показатели исследуемых процессов. При использовании многофакторного планирования эксперимента необходимо определить их взаимодействие и представить установленные закономерности в виде

математической модели, отображающей наиболее существенные и значимые стороны процесса.

Для многофакторного планирования эксперимента был выбран центральный композиционный ортогональный план второго порядка (ЦКОП-2ⁿ) полнофакторного эксперимента (ПФЭ), где n – число независимых переменных [139-141]. Основанием для выбора данного плана являются его свойства, благодаря которым возможно получить одинаковую дисперсию значений функции отклика во всех точках, равностоящих от центра плана эксперимента [142].

Функция отклика, описываемая алгебраическим выражением, для каждого конкретного эксперимента имеет следующий вид

$$\sigma_{\text{сл}}, \rho_{\text{сл}}, \varepsilon_{\text{сл}}, Q_{\text{тг}} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (3.6)$$

где $\sigma_{\text{сл}}$, Па; $\rho_{\text{сл}}$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $Q_{\text{тг}}$, %; $\varepsilon_{\text{ист}}$, % – целевая функция, соответственно, прочность на сжатие слоя сухих гранул в цилиндре, плотность сухих гранул, процентный выход товарных гранул ($d_{\text{ср}} = (2 \div 5 \text{ мм}) \cdot 10^{-3}$), относительное сопротивление гранул истиранию.

b_0 – свободный коэффициент;

b_i – коэффициент при линейной зависимости;

b_{ij} – коэффициент при парных и квадратичных взаимодействиях факторов;

x_i, x_j – исследуемые независимые переменные.

Число факторов и выбор их уровней варьирования был основан на результатах поисковых экспериментов и реальных условий реализации процесса на практике. Составлены матрицы плана эксперимента. В качестве принятых в исследованиях факторов, влияющих на процесс агломерирования, были использованы: частота вращения вала внутренних рабочих органов, $n_{\text{в}}$, об/мин; коэффициент заполнения БВА, φ ; содержание связующего, $C_{\text{св}}$, %. Выбранный план (3.6) позволил сократить число повторных опытов при исследовании влияния варьируемых параметров агрегата на процесс агломерирования до N , равного

$$N = N_0 + 2n + k_0 = 8 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (3.7)$$

где N_0 – число опытов полнофакторного эксперимента 2^n ;

n – число факторов;

k_0 – число повторений опытов в центре плана.

В целях исключения систематической ошибки на функцию отклика из-за неодинаковых внешних условий, опыты проводились в случайной последовательности. На основе поисковых экспериментов, по известной методике [141,143], был проведен расчет количества необходимых опытов. Необходимое количество повторных опытов при агломерировании составляет не менее трех.

Гипотеза о воспроизводимости опытов проверялась с помощью критерия Кохрена.

Проверку значимости коэффициентов в уравнениях регрессии осуществляли при помощи критического значения распределения Стьюдента [140,144].

Адекватность полученных уравнений регрессии экспериментальным данным проверялись с помощью критерия Фишера.

Оценку значимости коэффициентов уравнений регрессий и проверку их адекватности проводили переводом безразмерных (кодированных) величин к физическим значениям по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.8)$$

где x_i, X_i – значение фактора в физических и кодированных переменных соответственно;

x_{i0} – значение фактора на базовом уровне;

Δx_i – интервал варьирования по данному фактору.

3.6. Выводы.

1. Разработаны и изготовлены стендовая установка барабанно винтового агрегата и отдельные его камеры для изучения основных закономерностей постадийного процесса агломерирования полидисперсных материалов.

2. Изучена кинематика взаимодействия лопастных устройств с агломерируемой средой. Определены конструктивно-технологические требования к устройствам и обеспечению заданных технологических режимов их работы

3. Разработана и запатентована конструкция барабанно-винтового агрегата (Патент РФ № 2748629, Евразийский патент № 040258) для агломерирования технического углерода термолизной технологии переработки органических техногенных материалов.

4. Представлена методика определения физико-механических характеристик исследуемых параметров получаемой продукции, а также обработки результатов экспериментальных исследований.

5. Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента ЦКРП – 2^н, определены функции цели, варьируемые параметры и уровни их варьирования.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И РЕЖИМОВ РАБОТ УСТРОЙСТВ ПРИ АГЛОМЕРИРОВАНИИ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

4.1. Исследования морфологического состава, физико-механических характеристик и физико-химических свойств технического углерода низкотемпературной термолизной технологии

Из литературных источников [62; 63; 77; 78; 82] известно, что при гранулировании порошкообразных материалов соединение частиц друг с другом обеспечивается силой капиллярного притяжения, возникающей от поверхностного натяжения связующей жидкости. Затем происходит уплотнение частиц в грануле и отжатие влаги на поверхность, в результате чего силы сцепления между отдельными частицами ещё более увеличиваются. Вытесненная жидкость обеспечивает последующее прилипание мелких частиц к грануле, за счёт чего и происходит ее рост. Эксперименты с техническим углеродом по подбору связующего показали, что он является гидрофобным и общеизвестные связующие (меласса, силикат натрия и др.) для него не подходят. В связи с вышеизложенным возникла необходимость проведения углубленных исследований ТУ по определению химического, фазового и гранулометрического составов, структурно-морфологических и текстурных характеристик ТУ, полученного при термолизе моносырья – резиновой крошки из автомобильных шин, а также комбинированного сырья – органических ТКО (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Исходное сырье. Отсортированные и измельченные ТКО

. На рисунке 4.2 представлены энергодисперсионные спектры элементов ТУ, полученного при переработке резиновой крошки из автомобильных шин.

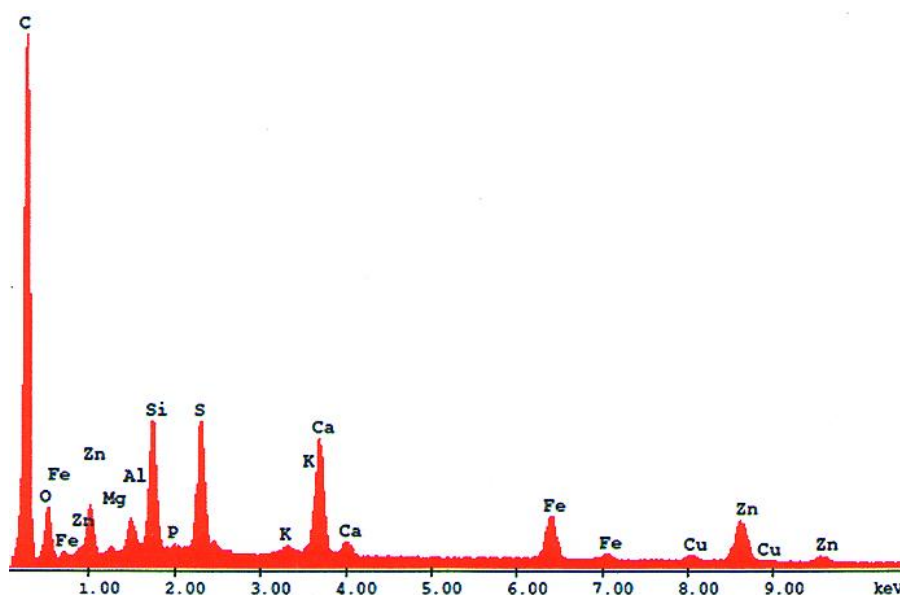


Рисунок 4.2. Энергодисперсионные спектры элементов ТУ, полученного при термоллизе автомобильных шин

В таблице 4.1 представлен элементный состав технического углерода, полученного при термоллизе отработанных автомобильных шин.

Таблица 4.1 – Элементный состав технического углерода при переработке резинотехнических изделий (автомобильных шин)

Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %
C	75.32	Si	2.37
O	8.36	Al	0.58
Zn	4.48	Cu	0.58
Ca	2.89	K	0.26
Fe	2.51	Mg	0.17
S	2.39	P	0.10

На основе энергодисперсионного анализа сделан вывод о том, что содержание углерода в анализируемом материале составляет 75,32 масс. %. Помимо углерода в большом количестве присутствует кислород 8,36 масс. %, цинк 4,48 масс %, сера 2,39 масс. % и кремний 2,37 масс. %.

На рисунке 4.3 представлены энергодисперсионные спектры элементов ТУ, полученного при переработке органических ТКО.

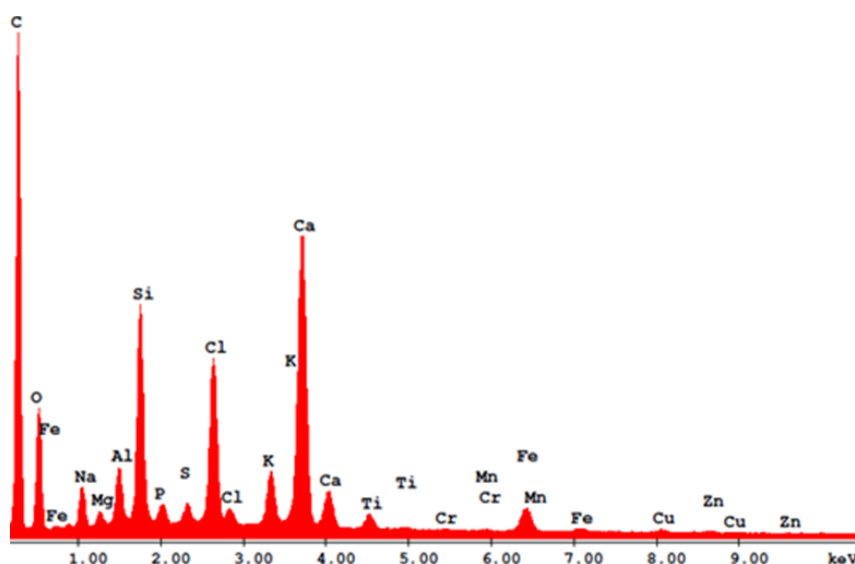


Рисунок 4.3. Энергодисперсионные спектры элементов ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО

В таблице 4.2 представлен элементный состав технического углерода, полученного при термоллизе органических ТКО.

Таблица 4.2 – Элементный состав технического углерода при переработке органических ТКО.

Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %
C	66.84	Na	1.27	P	0.33	Mn	0.05
O	14.35	Fe	1.19	S	0.31	Cr	0.03
Ca	6.30	K	1.04	Mg	0.30		
Si	3.42	Al	0.97	Zn	0.23		
Cl	2.71	Ti	0.44	Cu	0.23		

На основе энергодисперсионного анализа сделан вывод о том, что в анализируемом материале преобладает углерод. Его содержание составляет 66,84 масс. %. Помимо углерода в большом количестве присутствует кислород 14,35 масс. %, кальций 6,30 масс % и кремний 3,42 масс. %, а так же зафиксирован хлор 2,71 масс. %.

На рисунке 4.4 представлен результат исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе резиновой крошки из автомобильных шин.

В таблице 4.3 представлены результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе резиновой крошки из автомобильных шин.

Название фазы	Формула	Пространственная группа	Номер карты
Аморфный углерод	C	69 : Fmmm	9000046
Кальцит	Ca(CO ₃)	167 : R-3с,гексагональ	9000095
Кварц	SiO ₂	152 : P3121	9012605

На рисунке 4.5 представлен результат исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО.

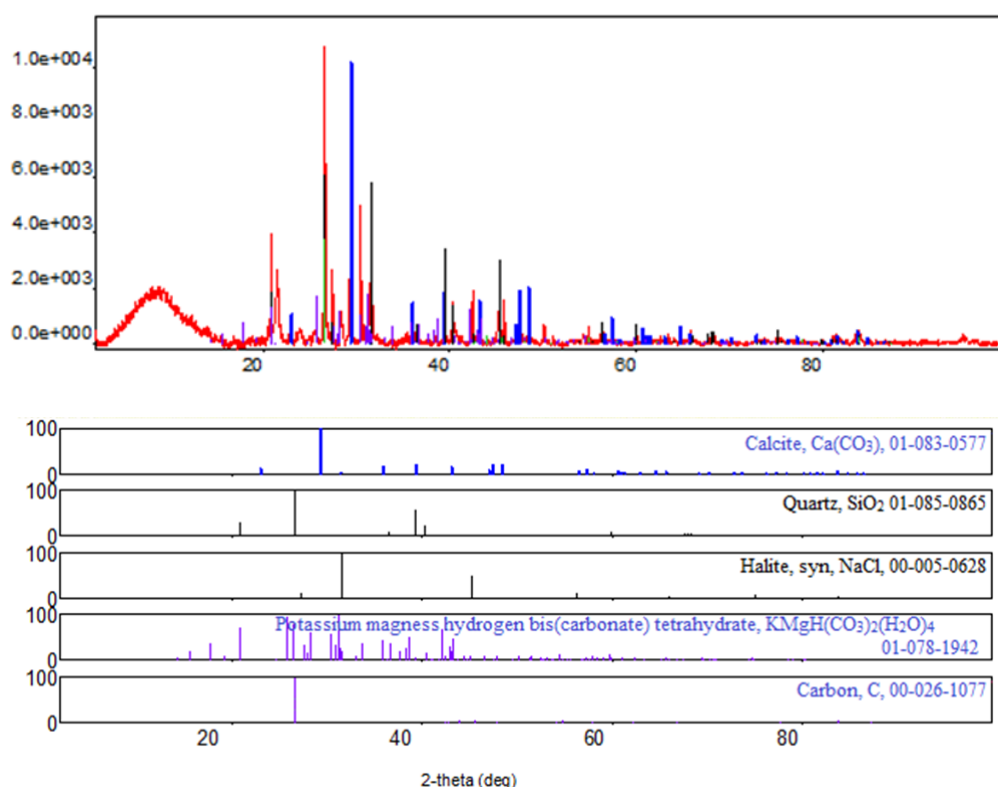


Рисунок 4.5. Рентгеновская порошковая дифрактограмма ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО

В таблице 4.4 представлены результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО.

Таблица 4.4 – Результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО.

Название фазы	Формула	Пространственная группа	Номер карты
Аморфный углерод	C	143 : P3	00-026-1077
Калиймагнев. Дигидрокарбонат	$\text{KMgH}(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_4$	2 : P-1	01-078-1942
Галит	NaCl	225 : Fm-3m	00-005-0628
Кварц	SiO_2	152 : P3121	01-085-0865
Кальцит	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	167 : R-3c, гексагональ	01-083-0577

Интерпретация рентгеновской порошковой дифрактограммы, также позволяет идентифицировать преобладающее количество аморфного углерода.

Для определения пористости и величины удельной поверхности технического углерода, полученного при термолизной переработке органических ТКО, методом низкотемпературной адсорбции азота (метод ВЕТ), нами проведено соответствующее исследование.

Результаты газоадсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке резиновой крошки из автомобильных шин, представлены на рисунке 4.6 и в таблице 4.5

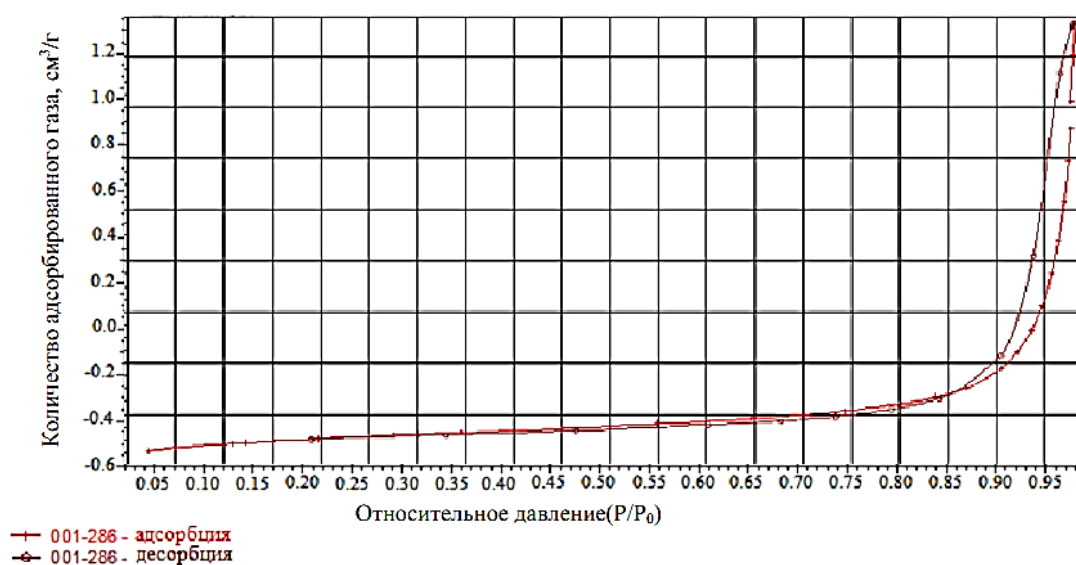


Рисунок 4.6 График изотермы адсорбции и десорбции для технического углерода, полученного при термолизной переработке резиновой крошки из автомобильных шин

Таблица 4.5 – Результаты газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке резиновой крошки из автомобильных шин

Показатель	Значение
Удельная поверхность исследуемого образца по однотоочечному методу БЭТ в точке $P/P_0 = 0.300636144$:	37.3733 м²/г
Удельная поверхность исследуемого образца по пятиточечному методу БЭТ:	38.4596 м²/г
Объем пор в образце при давлении $P/P_0 = 0.977295806$:	0.230217 см³/г
Средний размер пор в образце:	239.43 Å

Результаты газоадсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО, представлены на рисунке 4.7 и в таблице 4.6.

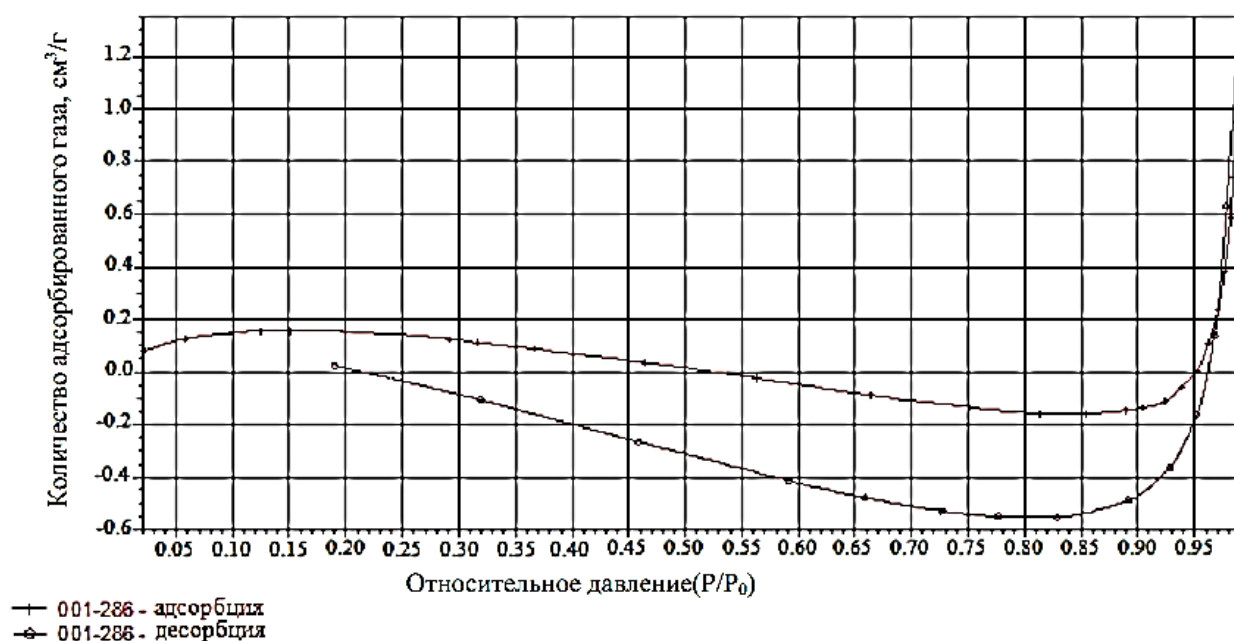


Рисунок 4.7 График изотермы адсорбции и десорбции для технического углерода, полученного при термолизной переработке органических ТКО

Таблица 4.6 – Результаты газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО.

Показатель	Значение
Удельная поверхность исследуемого образца по однотоочечному методу БЭТ в точке $P/P_0 = 0.266612809$:	33.3527 м²/г
Удельная поверхность исследуемого образца по пятиточечному методу БЭТ:	22.8179 м²/г
Объем пор в образце при давлении $P/P_0 = 0.984479441$:	0.1148 см³/г
Средний размер пор в образце:	145.72 Å

В результате проведенных углубленных исследований ТУ низкотемпературной термолизной технологии, переработки органических техногенных отходов, было установлено следующее:

- содержание аморфного углерода в ТУ, получаемом при переработке резиновой крошки из автомобильных шин выше (75,32 масс.%), чем при переработке ТКО (66,84 масс.%). Отличительными особенностями ТУ, полученного при переработке ТКО, является содержание хлора (2,71 масс.%), в

свою очередь ТУ, полученный при переработке резиновой крошки, содержит цинк (4,48 масс.%) и серу (2,39 масс.%).

- ТУ является мезо-макро порошком с преобладанием макропор. Его физико-механические характеристики такие как: удельная поверхность – $33 \div 38$ м²/г, объем пор – $0.11 \div 0.23$ см³/г, средний размер пор – $14 \div 24$ нм., варьируются в зависимости от перерабатываемого материала;

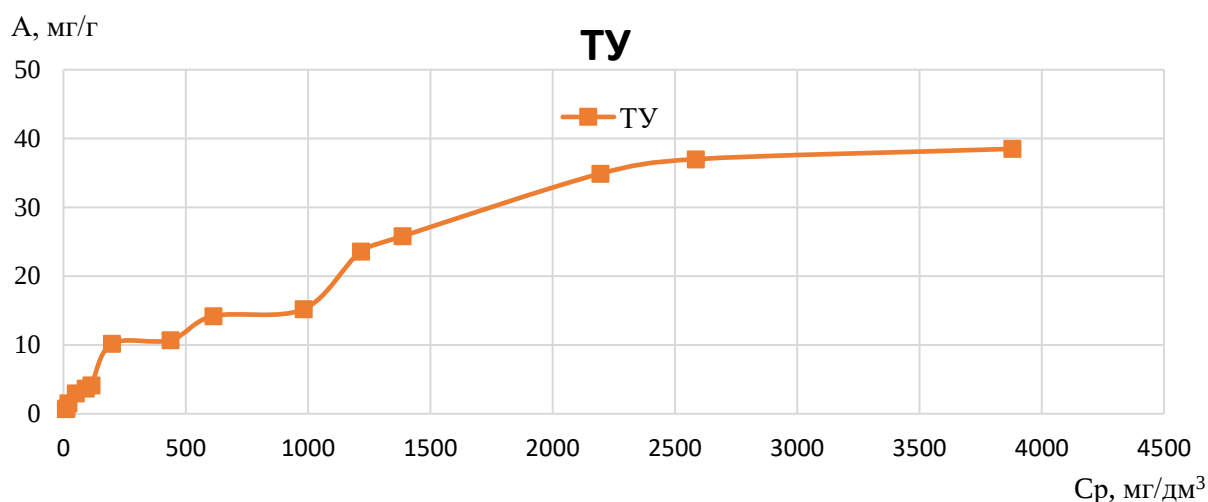
- методом лазерной дифракции, установлено, что исследуемый материал является полидисперсным $10 \div 700$ мкм., а средний размер наибольшего количества частиц ТУ – $40 \div 50$ мкм;

- методом низкотемпературной адсорбции азота установлено, что средний размер пор в ТУ при термолизе резиновой крошки – $239.43 \text{ \AA}$, а при термолизе ТКО составляет $145.72 \text{ \AA}$.

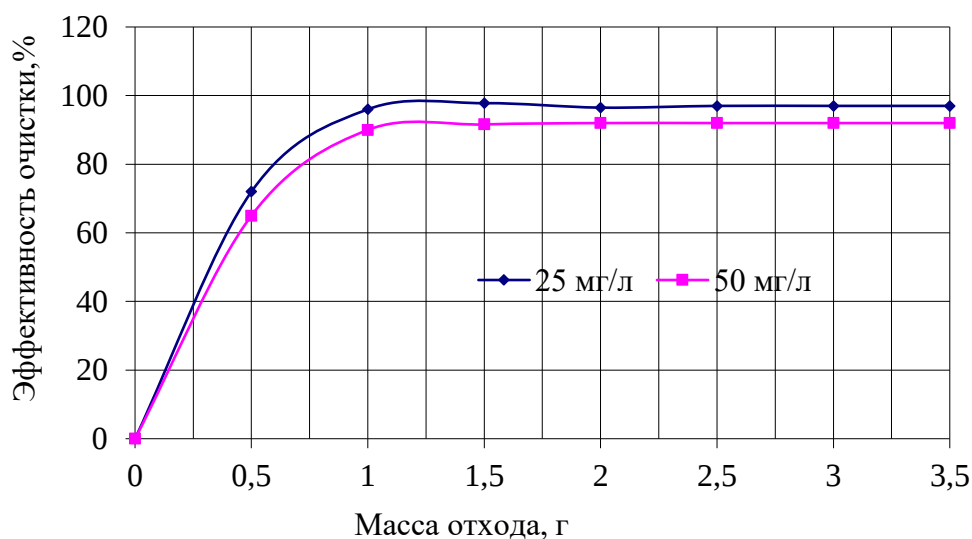
4.2. Изучение адсорбционных свойств технического углерода низкотемпературной термолизной технологии

При изучении физико-химических свойств ТУ нами проведены исследования его сорбционной емкости по отношению к водным растворам, содержащим тяжелые металлы и нефтепродукты.

При установлении величины адсорбции A , мг/г, модельные растворы имели концентрацию адсорбента в диапазоне $C_p = 10 \div 4000$ мг/дм³. Очистку растворов проводили статическим способом при добавлении навесок сорбционного материала к модельному раствору известной концентрации. Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} отображены на рисунке 4.8. При использовании ТУ максимальная сорбционная емкость составила $A = 38,5$ мг/г, а $C_p = 3000$ мг/дм³. Шероховатая высокоразвитая поверхность ТУ обеспечивают ему сорбционную активность. Однако ТУ показывает не высокие показатели по отношению к ионам металлов.

Рисунок 4.8. Изотерма адсорбции ионов Ni^{2+}

Технический углерод исследовали в качестве адсорбента модельных растворов, содержащих краситель метиленовый синий (МС). При очистке растворов определяли количество ТУ, необходимого для очистки. В работе использовались модельные растворы, содержащие краситель в концентрациях 25 и 50 мг/л (рисунок 4.9)

Рисунок. 4.9. Зависимость эффективности очистки красителя МС от массы добавки для растворов с концентрациями 25 и 50 мг/л ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = 10$ мин)

Установлено, что максимальная эффективность очистки модельных растворов с концентрацией 25 и 50 мг/л достигается при добавлении 1 г отхода и достигает 92-98 %. Анализ полученных зависимостей показал, что в зависимости от массы адсорбента возрастает и эффективность очистки модельных растворов от красителя метиленового синего до определенного значения. При дальнейшем добавлении большей массы отхода эффективность очистки существенно не изменяется.

ТУ исследовался в качестве сорбционного материала нефтепродуктов. Целевыми показателями для нефтесорбентов являются нефте- и маслосорбимость. Согласно полученным результатам, ТУ имеет высокие показатели по нефтесорбимости с результатом 13,55 кгУВ/кг отхода. Маслосорбимость составляет 15,33 кг/кг. Для сравнения, коммерческий сорбент для нефтепродуктов Профсорб-Эко имеет показания нефтесорбимости 2,8 – 7 кг УВ/ кг сорбента. Таким образом, ТУ, кроме других областей применения, может существенно расширить спектр эффективных бюджетных нефтесорбентов, как для государственных, так и частных секторов экономики.

При проведении исследований нами использовались модельные растворы, содержащие нефтепродукты в концентрациях 5 и 10 мг/дм³. К раствору объемом 1 дм³ добавляли ТУ. Содержание варьировали в интервале от 0,5 до 5 г. Время перемешивания суспензии составляло 15 мин.

Согласно полученным результатам, представленным на рисунке 4.10, эффективность очистки, возрастает при добавлении материала от 0,5 до 4 г и составляет 85 и 74%, далее эффективность повышается незначительно, и, следовательно, увеличение количества добавляемого материала не целесообразно.

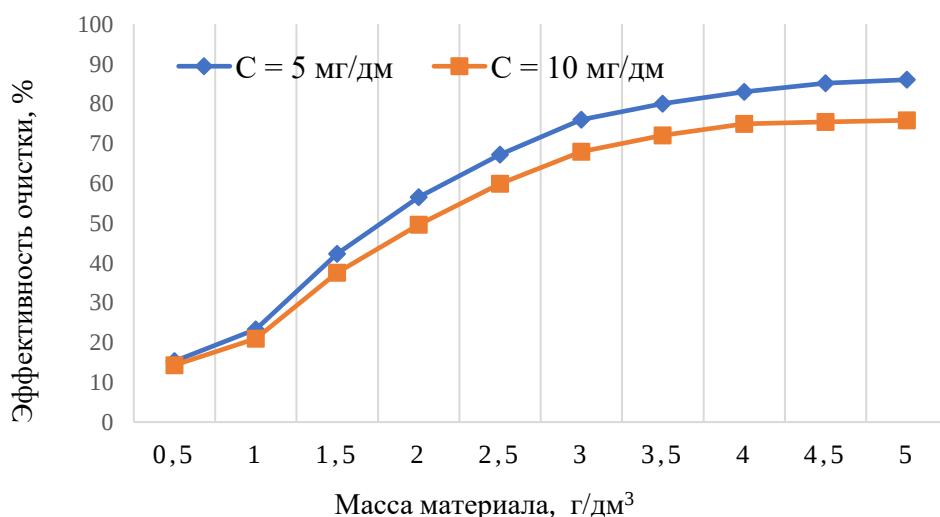


Рисунок. 4.10. Зависимость эффективности очистки растворов от массы ТУ.

Для нефтесодержащих эмульсий достаточным количеством сорбционного материала является 4 г на 1 дм³.

Таким образом, нами подтверждена перспективность использования ТУ термолизной технологии производства при получении сорбционных материалов, способных обеспечить высокую эффективность очистки органических жидких сред от загрязнений. ТУ может являться также эффективной альтернативой имеющимся сорбционным материалам по очистке сточных вод от красителей и нефтепродуктов.

4.3. Изучение и определение вещественного состава связующего для агломерирования технического углерода

Для агломерирования ТУ низкотемпературной термолизной технологии переработки ТМ важное значение имеет установление эффективного связующего и условий агломерирования подготовленной шихты.

По данным различных литературных источников технический углерод, выпускаемый отечественной и зарубежной промышленностью, согласно стандартов ГОСТ и ASTDM, может быть сгранулирован способом окатывания или прессованием с добавлением связующего. В качестве связующего могут быть использованы: масло ПНБ, меласса, натриевое жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$ и др. Для получения гранул из технического углерода низкотемпературной термолизной технологии способом окатывания в качестве связующего были исследованы следующие вещества: меласса, натриевое стекло, водный раствор неионогенного ПАВ (Синтанол ДТ-7), поликарбоновая кислота.

Предварительно, для проверки связующего на смешиваемость и возможность его дальнейшего применения, навеску ТУ равномерно распределяли по пластиковой тарелке и далее из шприца дозированно вводили связующее, перемешивая деревянной палочкой. Если связующее смешивалось, далее проводились эксперименты с его количественным и качественным составом.

Для опробования мелассы в качестве связующего был приготовлен ее водный раствор с различным процентным содержанием от 15 до 40%. Далее

полученный раствор вводили в ТУ и пробовали смешивать. Во всех случаях результат был отрицательным, смешивания не происходило.

Также была опробована меласса в качестве связующего, не разбавленная водой. К навеске ТУ массой 2,9 г добавили 1,6 г мелассы стремясь смешать компоненты. Результат отрицательный (рисунок 4.11). Во всех случаях смешивания связующего с ТУ не происходило.



Рисунок 4.11. Состояние компонентов: «ТУ – меласса» при смешивании

Для установления возможности использования ПАВ в качестве связующего был приготовлен его водный раствор. К 91 г воды добавили 20,5 ПАВ и тщательно перемешали. Далее к навеске ТУ массой 3,3 г добавили 2,7 г полученного раствора и перемешали. Получилась вязкопластичная масса. Уменьшение количества связующего до 1 г привело к образованию агломератов. Было принято решение снизить концентрацию ПАВ в растворе в 2 раза. Для этого к 91,1 г воды добавили 10,2 г средства. Дальнейшие эксперименты проводились с этим раствором. Затем в емкость засыпалась навеска ТУ и равномерно распределялась по всему объему. Из шприца, дозированно, ориентируясь на показания весов, вводилось связующее и смесь интенсивно перемешивалась. Далее – осуществляли процесс агломерирования полученной смеси в течение 3 мин. В дальнейших экспериментах процентное соотношение ТУ и связующего изменяли (таблица 4.7) с целью достижения лучших условий агломерирования смеси.

Таблица 4.7 – Результаты исследований при различных соотношениях «ТУ – связующее»

№ обр.	Кол-во ТУ, г	Кол-во связ. Г	Общий вес, г	%	Гранулообразование
1	5,35	0,45	5,8	7,75	Низкое
2	5,35	0,65	6,0	10,8	Среднее
3	5,35	1,0	6,35	15,7	Высокое
4	5,35	1,65	7,0	23,5	Наилучшее
5	5,35	2,0	7,35	27,2	Низкое
6	5,35	2,45	7,8	31,4	Появление крупных агломератов
7	5,35	2,64	8,0	33,0	Преобладание крупных агломератов

В качестве связующего было опробовано также натриевое жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$. В навеску ТУ массой 8,7 г. вводили 60% связующего. Полученную смесь перемешивали в течении 3-х минут, но окомкования не происходило. Увеличение и снижение количества связующего к образованию агломератов не приводило. Эксперимент показал, что данное связующее не вмешивается и не образует зародышей, а остается на поверхности ТУ в виде капель.

В качестве связующего была опробована поликарбоновая кислота – класс органических соединений, содержащих одну или несколько карбоксильных групп COOH .

Для начала данное связующее было опробовано в чистом виде. Результаты были такими же, как при использовании натриевого жидкого стекла. Материал не смешивался и оставался на поверхности в виде капель. Далее кислота была разбавлена водой в пропорции 1:1 и проверена на возможность гранулообразования. В навеску ТУ 5,5 г ввели 40% полученного раствора связующего и перемешали. Далее – окатывали вручную. В результате были получены гранулы. Для определения минимальной концентрации поликарбоновой кислоты в водном растворе связующего были опробованы различные его процентные соотношения. Так, минимальное содержание поликарбоновой кислоты в растворе, при котором происходило гранулообразование, составило 18%.

В результате моделирования и изучения постадийных процессов гранулообразования полидисперсных материалов с использованием технического углерода низкотемпературной термолизной технологии было установлено следующее:

- общеизвестные связующие – меласса и силикат натрия, а также их водные растворы не подходят для агломерирования ТУ;
- наиболее подходящим связующим является 10-15%-й водный раствор ПАВ (Синтанол ДТ-7);
- оптимальное количество связующего при агломерировании ТУ составляет $18 \div 22\%$.

4.4. Моделирование технологических процессов подготовки и агломерирования технического углерода

Анализ исследований и патентозащищенных научно-технических разработок в области различных технологических процессов: классификации, смешивания, гомогенизации и других, показывает высокую эффективность объемно-пространственного перемещения перерабатываемых материалов при соответствующем взаимодействии рабочих органов: разно и однонаправленных двухзаходных винтовых лопастей (РДВЛ и ОДВЛ), разно и однонаправленных однозаходных винтовых лопастей (РОВЛ и ООВЛ). Особое значение указанный технологический прием оказывает на процесс агломерирования полидисперсных материалов, что обусловлено достижением следующих преимуществ:

- увеличение внутренней рабочей площади камер гранулообразования и соответственно, повышения полезной работы при получении агломерированного ТУ;
- увеличение степени свободы окатываемого гранулята при перемещении, обуславливает равномерную плотность гранул и их повышенную прочность;
- снижение ударного воздействия (водопадного режима движения гранулята) и повышение окатывающего режима движения материальных тел по винтообразным траекториям вдоль внутренней поверхности рабочих камер;

- при использовании винтообразных рабочих органов достигается плавное и равномерное их вхождение в слой микрогранулята и выход из него, что исключает динамическое разрушение формуемых тел и обеспечивает стабильный режим агломерирования;

- сочетание вращающейся камеры агломерирования и лопастных рабочих элементов обеспечивает скоростное воздействие на агломерируемый ТУ. За счет этого интенсифицируется процесс гранулообразования, а также существенно расширяются технологические возможности БВА: при использовании ТУ термолизной технологии с учетом физико-механических характеристик и физико-химических свойств, а также специфических особенностей полидисперсного поризованного материала с повышенной гидрофобностью;

- использование последовательно установленных в зоне гранулообразования БВА винтообразных лопастных устройств, обеспечивает объемно-пространственное перемещение сформованного ранее микрогранулята, вдоль внутреннего корпуса рабочей камеры, устраняет «застойные зоны» в слоях ТУ, вдоль всей траектории движения материала.

Одним из основных параметров при агломерировании ТУ винтовыми устройствами является частота вращения вала, на котором они закреплены. Для установления рациональных режимов работы лопастных устройств камеры агломерирования нами были проведены поисковые эксперименты с использованием стендовой установки периодического действия. Было установлено следующее:

- при частоте вращения вала $20 \div 40$ об/мин микрогранулы (в основной своей массе) перемещаются в нижней части барабана стендовой установки. Двухзаходные винтовые лопасти «разрезают» слой материала на зоны и реализуют внутренний рециклинг. Движение материала по боковой стенке материала не происходит;

- при повышении частоты вращения вала от 40 до 60 об/мин возрастает угол подъема микрогранул, а следовательно, площадь их контакта с боковой поверхностью барабана. Процесс гранулообразования существенно интенсифицируется;

- при увеличении частоты вращения вала свыше 60 об/мин агломерируемый материал перемещается по всему объему зоны агломерирования барабана, т.е.

большую часть времени микрогранулы не взаимодействуют с боковой поверхностью камеры и процесс окатывания снижается.

Таким образом, проведенное нами моделирование процесса агломерирования ТУ позволило установить основные закономерности гранулообразования при различных скоростных режимах воздействия винтообразных лопастных устройств. При частоте вращения вала $40\div 60$ об/мин наблюдается интенсивное перемещение агломерируемого материала с обеспечением наибольшей поверхности его контакта – «гранулят-боковая поверхность камеры». Кроме того, винтообразные траектории движения гранул становятся более протяженными. Это, естественно, увеличивает полезную работу агломерирования ТУ, т.е. интенсифицирует процесс гранулообразования.



а)



б)

Рисунок 4.12 Изображение лопасти при ее воздействии на агломерируемый материал (а) в момент входа в шихту, в момент выхода из шихты (б)

Для изучения процесса воздействия однозаходной винтовой лопасти на агломерируемый материал нами были проведены экспериментальные исследования с использованием модельной установки периодического действия. Проведенный нами анализ взаимодействия ОВЛ с материальным потоком (рисунок 4.12) и использованием фотосъемки исследуемых процессов позволил установить зависимость площади контакта лопасти с материалом от угла ее поворота.

Нами установлено, что при реализации процесса агломерирования технического углерода со связующим в БВА винтовая лопасть ОВЛ разрезает слой

материала в заданном направлении и по мере погружения в него смещает шихту вдоль рабочей поверхности.

За счет изменения угла поворота ОВЛ можно регулировать количество перемещаемого материала внутри барабана. На рисунке 4.13 представлены снимки площадей контакта агломерируемого ТУ с рабочей поверхностью лопасти при различных углах ее поворота.

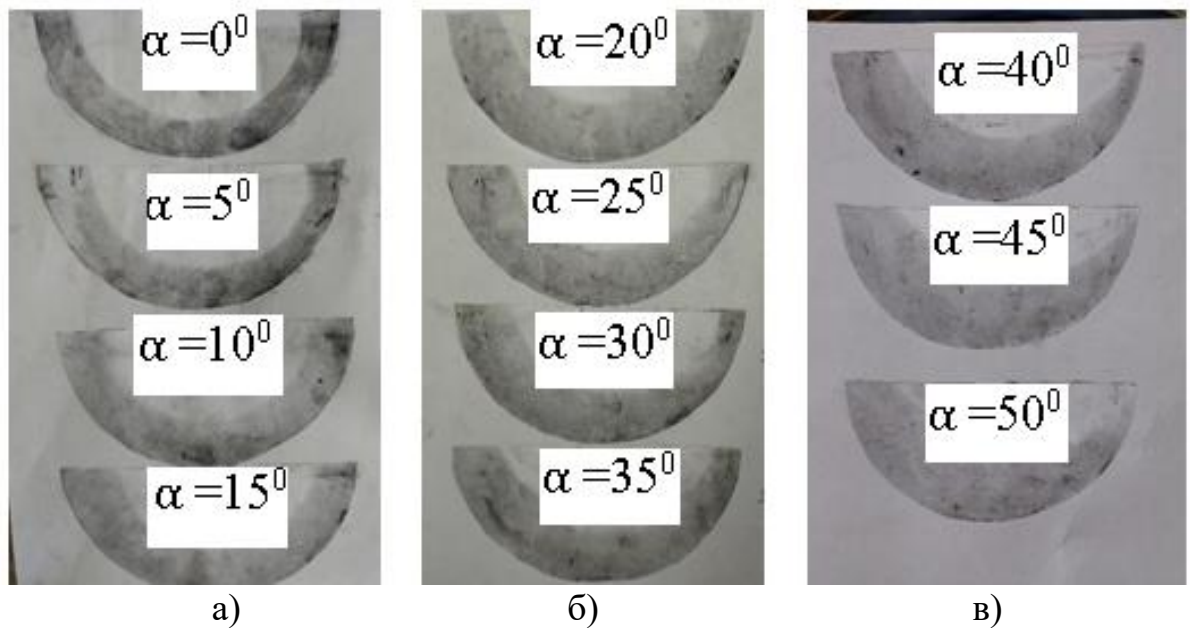


Рисунок 4.13. Площадь воздействия ОВЛ при агломерировании ТУ при различных углах ее поворота: а) $\alpha = 0^\circ - 15^\circ$; б) $\alpha = 25^\circ - 35^\circ$; в) $\alpha = 40^\circ - 50^\circ$

Углы поворота лопастей $\alpha = 0^\circ - 50^\circ$, представлены на рисунке 4.14.

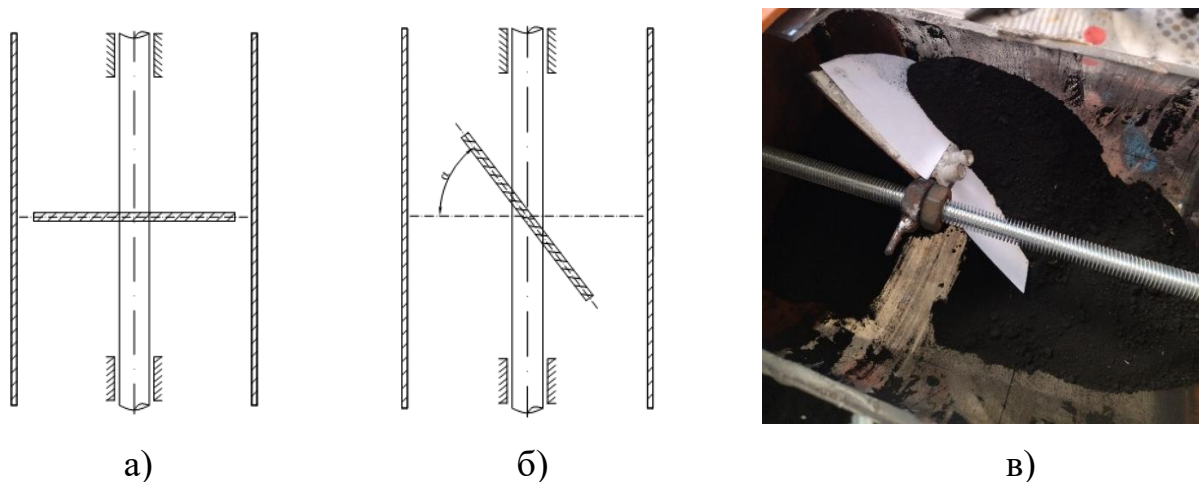


Рисунок 4.14 Схема углов поворота винтовой лопасти при а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 50^\circ$, в) $\alpha = 45^\circ$

В таблице 4.8 представлены результаты расчета площади контакта лопасти с агломерируемым материалом при различных углах ее поворота.

Таблица 4.8 – Величина площади контакта лопасти с материалом при различных углах ее поворота

Угол поворота, град.	Ширина, см			Площадь, 10^{-4}м^2
	На входе	В середине	На выходе	
0	1,5	1,7	1,5	31,18
5	1,7	1,7	1,7	32,83
10	2,0	2,0	2,3	39,24
15	2,3	2,5	2,5	43,15
20	2,0	2,7	2,7	44,58
25	1,5	2,7	3,0	43,71
30	1,2	2,7	3,0	42,25
35	1,2	2,5	3,0	41,20
40	0,5	3,0	3,0	40,20
45	0	3,5	2,5	37,68
50	0	4,0	2,5	40,20

Анализ результатов экспериментальных данных воздействия рабочей лопасти на агломерируемый ТУ показывает:

- при углах поворота винтовой лопасти 0-15° ширина отпечатка при входе в материал, в середине и при выходе, почти не изменяется;
- при углах поворота 20-35° происходит уменьшение ширины линии при входе лопасти в материал и увеличение ширины линии при выходе лопасти из материала. Лопасть начинает частично поднимать материал;
- при углах поворота 40-50° лопасть перестает перемещать материал вдоль поверхности барабана и начинает его поднимать.

4.5. Экспериментальные исследования процесса агломерирования при варьировании конструктивно-технологических параметров

4.5.1. Поисковые экспериментальные исследования

Физико-химические свойства и физико-механические характеристики получаемых гранул ТУ, в основном, определяются технологическими режимами процесса агломерирования и количеством связующего. Принимая во внимание характерные особенности исследуемого материала, в частности, пылевидность;

высокую удельную поверхность, тонкодисперсность и другие, нами были проведены экспериментальные исследования влияния содержания связующего $C_{св}$, %, коэффициента заполнения $\varphi_{зап}$, частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{овл}$ на выходные характеристики $\sigma_{сж.сл}$, $\rho_{сл}$, $Q_{тг}$, $\varepsilon_{ист}$, получаемых в ББА гранул.

Полученные, в ходе экспериментов данные свидетельствуют о том, что стабильные и установившиеся характеристики гранул при реализации процесса агломерирования достигаются при содержании связующего $C_{св}=17\div19\%$. Процентный выход товарных гранул $Q_{тг}$ является максимальным, отклонения не превышают $5\div10\%$. Прочность слоя $\sigma_{сж.сл}=200\div210$ кПа соответствует вышеуказанному содержанию связующего и частоте вращения вала винтовых лопастей в диапазоне $n_{овл} = 30\div50$ об/мин.

Незначительное уменьшение прочности слоя гранул от $\sigma_{сж.сл}=208$ кПа до $\sigma_{сж.сл}=198$ кПа при увеличении содержания связующего от $C_{св}=19\%$ до $C_{св}=20\%$ и одновременном увеличении коэффициента заполнения от $\varphi_{зап}=0,18$ до $\varphi_{зап}=0,22$ объясняется ростом количества гранул размером ≥ 5 мм. Последующее увеличение процентного содержания связующего в агломерируемом материале приводит к снижению всех значений выходных параметров. Это объясняется переувлажнением технического углерода и образованием гранул размером более $d_{гр} > 10\div15$ мм, а также слипанием между собой мелких гранул размером $d_{гр} = 1,5\div3$ мм (рисунок 4.15).

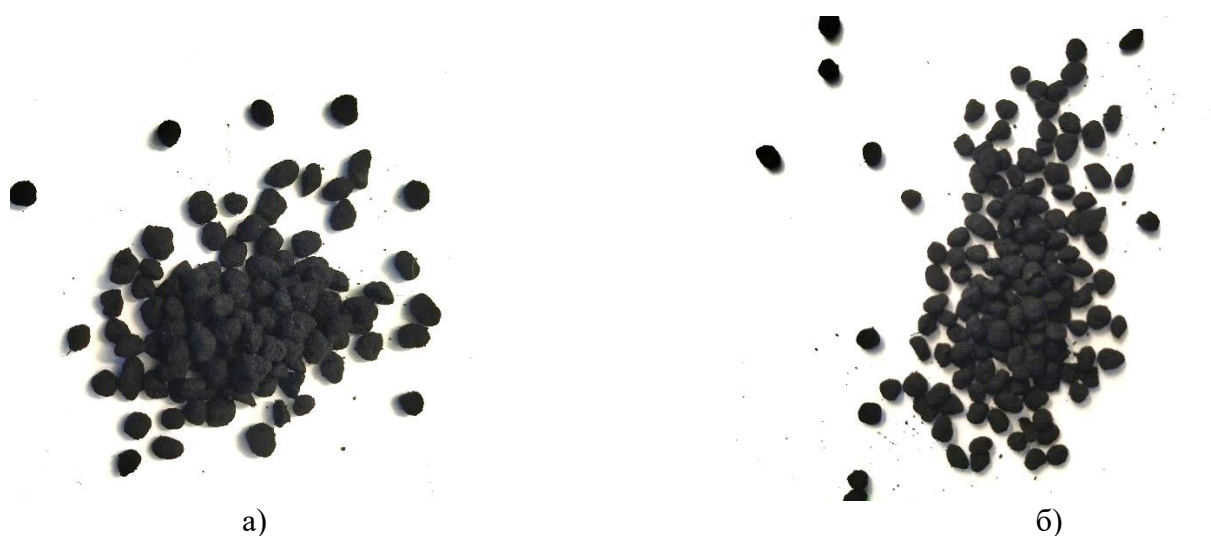


Рисунок 4.15. Гранулы ТУ ≥ 10 мм (а) и слипшиеся гранулы ТУ размером $1,5\div3$ мм (б)

Изменение содержания связующего в меньшую сторону $C_{св} \leq 16\%$ не представляется возможным, так как помимо снижения прочности слоя $\sigma_{сж.сл}$, выход товарных гранул $d_{гр} = 2 \div 5$ мм прекращается и образуется только микрогранулят $d_{гр} = \leq 2$ мм.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований были установлены значения варьируемых параметров: содержание связующего $16 \div 20\%$; коэффициент заполнения $0,18 \div 0,22$; частота вращения вала винтовых лопастей $20 \div 60$ об/мин⁻¹; угол поворота винтовой лопасти относительно оси $19 \div 21^\circ$. При вышеуказанных условиях наблюдается наибольший выход товарных гранул $2 \div 5$ мм.

4.5.2. Многофакторное планирование эксперимента при исследовании функциональной зависимости $\sigma_{сл}, \rho_{сл}, Q_{тг}, \varepsilon_{ист} = f(\varphi_{зап}, n_{овл}, C_{св})$

Для установления параметров, влияющих на выходные функции, а также диапазона их варьирования ранее были проведены поисковые эксперименты. Последние определили связь между функцией отклика и варьируемыми параметрами. В качестве исследуемых параметров поисковых экспериментов были выбраны:

- количество связующего в агломерируемом материале – $C_{св}$, %, x_1 ;
- коэффициент заполнения камеры БВА – $\varphi_{зап}$, x_2 ;
- частота вращения вала винтовых лопастей БВА – $n_{овл}$, об/мин, x_3 .

В качестве функций отклика были выбраны:

- прочность слоя сухих гранул ТУ – $\sigma_{сл}$, кПа;
- плотность слоя сухих гранул ТУ – $\rho_{сл}$, кг/м³;
- относительное сопротивление истиранию сухих гранул ТУ – $\varepsilon_{ист}$, %;
- процентный выход товарных гранул – $Q_{тг}$, %.

Результаты проведенных поисковых экспериментальных исследований позволили определить следующие диапазоны варьирования факторов (таблице 4.9).

Таблица 4.9 – Уровни варьирования факторов

Факторы	Обозначения	Уровни варьирования					Интервал
		-1,21	-1	0	1	1,21	
Количество связующего $C_{св}$, %	X_1	15,58	16	18	20	20,42	2
Коэффициент заполнения $\varphi_{зап}$, ед	X_2	0,175	0,18	0,20	0,22	0,224	0,02
Частота вращения вала винтовых лопастей $n_{овл}$, об/мин	X_3	15,8	20	40	60	64,2	20

Матрица планирования, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблице 4.10.

Методика организации экспериментов предусматривала проведение как минимум трех дублирующих измерений параметра выхода в трех точках факторного пространства. Расчеты коэффициентов уравнения регрессии и анализ полученной модели выполнен с использованием программы Excel. В качестве оптимизируемых величин была принята прочность слоя гранул $\sigma_{сл}$ и его плотность $\rho_{сл}$.

Таблица 4.10 – Матрица планирования эксперимента

№	$X1$ $C_{св}$, %	$X2$ $\varphi_{зап}$, ед	$X3$ $n_{овл}$, об/мин	$Y1$ Плотность слоя гранул, кг/м ³	$Y2$ Прочность слоя гранул, кПа	$Y3$ Относит. сопр.истир. %.	$Y4$ Вых.тов. гранул, %
1	1	1	1	625	173	36,4	77,9
2	-1	1	1	615	168	35,2	76,1
3	1	-1	1	640	199	39,6	79,4
4	-1	-1	1	635	189	34,3	78,2
5	1	1	-1	630	181	60,7	73,1
6	-1	1	-1	630	180	62,4	71,4
7	1	-1	-1	650	243	65,9	75,6
8	-1	-1	-1	610	160	66,5	79,8
9	1,21	0	0	665	272	33,4	76,7
10	0	1,21	0	660	269	66,7	74,9
11	0	0	1,21	670	280	54,1	81,5
12	-1,21	0	0	650	242	54,3	84,2
13	0	-1,21	0	675	317	55,4	84,7
14	0	0	-1,21	645	207	53,8	80,3
15	0	0	0	650	243	54,6	83,8

При математической обработке полученных результатов экспериментов были получены следующие уравнения регрессии (4.1) – (4.4).

$$Y1(\sigma_{\text{сл}}) = 294 - 25,46X_1 - 14,36X_2 - 22,76X_3 - 37,03X_1^2 - 46,53X_2^2 - 45,53X_3^2 - 29,9X_1X_2 - 18,45X_1X_3 - 15,7X_2X_3; \quad (4.1)$$

$$Y2(\rho_{\text{сл}}) = 667,4 - 17,3X_1 - 12,95X_2 + 10,45X_3 - 23,86X_1^2 - 8,86X_2^2 - 21,36X_3^2 - 17,89X_1X_2 - 12,89X_1X_3 - 16,19X_2X_3; \quad (4.2)$$

$$Y3(\varepsilon_{\text{ист}}) = 54,4 - 14,3X_1 - 1,18X_2 + 0,58X_3 - 4,33X_1^2 - 0,18X_2^2 - 0,21X_3^2 + 0,87X_1X_2 + 1,1X_1X_3 - 0,65X_2X_3; \quad (4.3)$$

$$Y4(Q_{\text{тг}}) = 82,7 + 1,35X_1 - 1,72X_2 + 0,49X_3 - 6,71X_1^2 + 0,33X_2^2 - 0,02X_3^2 + 0,91X_1X_2 - 0,68X_1X_3 + 0,81X_2X_3. \quad (4.4)$$

4.5.3. Регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований

Величина коэффициентов перед соответствующими членами в уравнениях регрессии (4.1) – (4.4) и их знаков позволяет провести анализ и оценить характер влияния варьируемых параметров и их сочетаний на физико-механические характеристики получаемых в БВА гранул технического углерода.

Прочность слоя гранул (4.1) в пределах выбранного диапазона варьирования фактора существенно зависит от частоты вращения винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ (x_3). При увеличении частоты вращения происходит более интенсивное уплотнение шихты и гранулята. Одним из факторов, оказывающим влияние на прочность слоя гранулированного ТУ, является коэффициент заполнения камеры БВА $\varphi_{\text{зап}}$ (x_2). Не менее значимым фактором, влияющим на прочность слоя, является количество связующего $C_{\text{св}}$ (x_1). При этом отрицательные знаки перед линейными членами x_1 , x_2 , x_3 (4.1) свидетельствуют об отрицательном влиянии на функцию отклика данных технологических параметров в заданном диапазоне.

Анализ полученного уравнения регрессии (4.2) показывает, что наибольшее влияние на изменение плотности слоя оказывает количество связующего $C_{св}$ (x_1), в меньшей степени – коэффициент заполнения $\varphi_{зап}$ (x_2) и частота вращения винтовых лопастей $n_{в.овл}$ (x_3). Отрицательные знаки, стоящие перед линейными членами x_1 , x_2 свидетельствуют об уменьшении плотности гранул при изменении этих факторов. Отрицательный знак, стоящий в уравнениях перед квадратичными членами, свидетельствует о том, что ветви параболы графика функции направлены вниз.

Рассматривая выражение (4.3), также следует отметить наибольшее отрицательное влияние количества связующего $C_{св}$ (x_1) на относительное сопротивление истиранию гранул $\mathcal{E}_{ист}$. Линейный член (x_2) также имеет отрицательный знак, что свидетельствует о снижении сопротивления истиранию гранул при увеличении коэффициента заполнения камеры БВА $\varphi_{зап}$. Наименьшее влияние на относительное сопротивление гранул истиранию оказывает частота вращения винтовых лопастей $n_{в.овл}$ (x_3).

Аналитическое выражение (4.4) отражает функциональную зависимость процентного выхода товарных гранул от выбранных нами варьируемых факторов. Положительное влияние на количество кондиционных гранул оказывает процентное содержание связующего $C_{св}$ (x_1) и частота вращения вала винтовых лопастей $n_{в.овл}$ (x_3). Отрицательное действие на процентный выход товарных гранул оказывает коэффициент заполнения камеры агломерирования БВА $\varphi_{зап}$ (x_2), что может быть объяснено усилением динамического воздействия ОВЛ на гранулируемый материал при увеличении значений $\varphi_{зап}$. Увеличение значений варьируемых факторов x_1 , x_3 способствует росту процентного выхода товарных гранул, об этом свидетельствуют положительные знаки перед линейными членами.

С целью выяснения характера влияния параметров: количества связующего $C_{св}$, % (x_1); коэффициента заполнения $\varphi_{зап}$, % (x_2); частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{в.овл}$, об/мин (x_3), рассмотрим их воздействия на выходные величины: прочность слоя $\sigma_{сл}$, кПа (Y_1); плотность слоя гранул $\rho_{сл}$, кг/м³ (Y_2);

относительное сопротивление истиранию $\varepsilon_{\text{ист}}$, % (Y_3); процентный выход товарных гранул $Q_{\text{тг}}$, % (Y_4).

На рисунках 4.16–4.19 представлены графические зависимости, наиболее выраженные при парном взаимодействии.

На примере изменения частоты вращения вала винтовых лопастей и коэффициента заполнения рассмотрим влияние варьируемых параметров на выходные величины. Первоначально рассмотрим характер влияния коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ на прочность слоя $\sigma_{\text{сл}}$ при его сжатии, с изменяемой частотой вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 40 \div 60$ об/мин и постоянным количеством связующего $C_{\text{св}} = 18\%$, (рисунок 4.16).

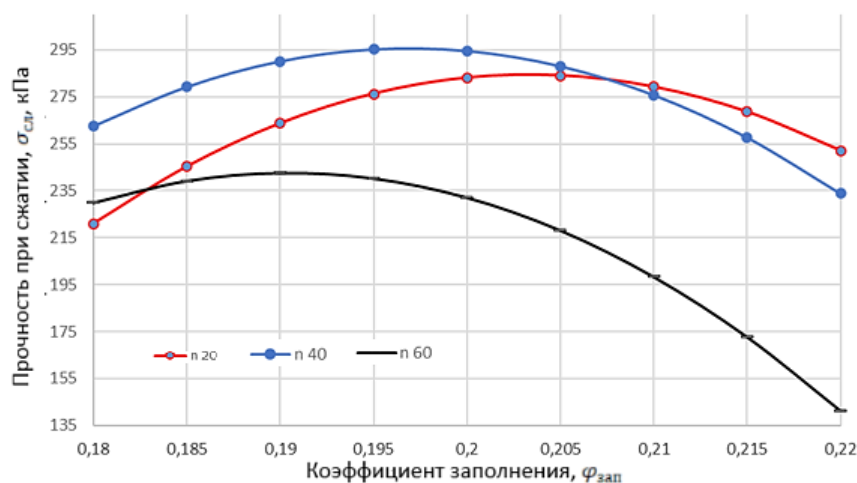


Рисунок 4.16. График зависимости прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

Увеличение коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$ и изменяемой частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 40 \div 60$ об/мин, оказывает положительное влияние на прочность слоя гранул до определенных значений $\varphi_{\text{зап}} = 0,19 \div 0,2$. Это можно объяснить тем, что происходит заполнение связующим пор ТУ и, соответственно, сил сцепления между частицами.

Однако приближение значения $\varphi_{\text{зап}}$ к 0,22 приводит к снижению прироста $\sigma_{\text{сл}}$ агломерируемого ТУ. Частота вращения вала винтовых лопастей также оказывает влияние на прочностные характеристики слоя. Наилучшие значения $\sigma_{\text{сл}}$

достигаются при частоте вращения $n_{\text{овл}} = 40$ об/мин. Однако, увеличение значений до $n_{\text{овл}} = 60$ об/мин и соответствующим повышением коэффициента заполнения до $\varphi_{\text{зап}} = 0,22$ приводит к снижению роста $\sigma_{\text{сж.сл}}$ до наименьших значений $\sigma_{\text{сл}} \sim 140$ кПа. Это может быть объяснено повышенным образованием конгломератов частиц ТУ при повышенных значениях $\varphi_{\text{зап}} = 0,22$ и $n_{\text{овл}} = 60$ об/мин.

На рисунке 4.17. представлены графические зависимости плотности слоя $\rho_{\text{сл}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$.

Как видно из графиков, первоначально до $\varphi_{\text{зап}} = 19,5 \div 20,0$, для $n_{\text{овл}} = 20 \div 40$ об/мин с увеличением коэффициента заполнения плотность слоя гранул возрастает, но затем начинает снижаться.

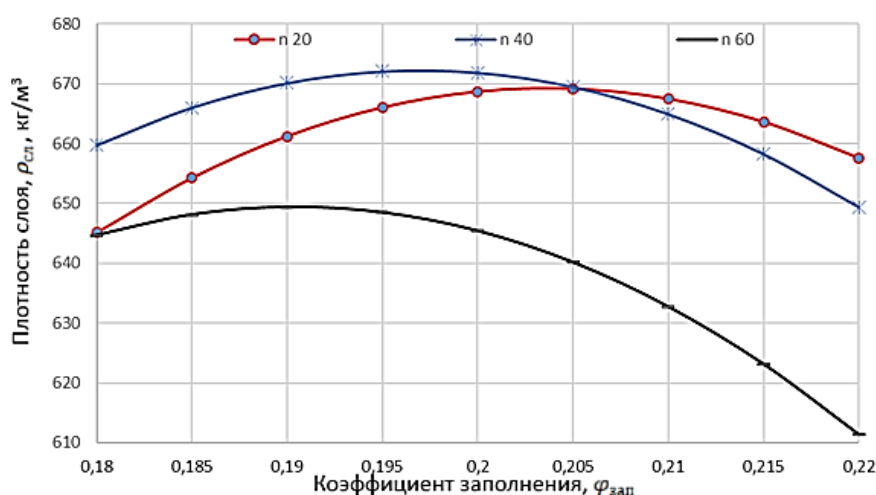


Рисунок 4.17. График зависимости плотности слоя $\rho_{\text{сл}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

Это объясняется тем, что при агломерировании частиц со связующим (водный раствор неионогенного ПАВ Синтанол ДТ-7) в поры ТУ может проникнуть только определенное количество жидкой фазы. При увеличении $\varphi_{\text{зап}}$ адсорбируемой на поверхности гранул за счет содержания в связующем ПАВов влаги и испаряющейся при сушке гранул с их поверхности, становится недостаточно. Плотность слоя гранул значительно снижается. Однако это проявляется при коэффициенте заполнения $\varphi_{\text{зап}} = 0,20 \div 0,22$ т.е. при большем

коэффициенте заполнения камеры агломерирования частицами ТУ. Наиболее выражено это проявляется при ($\varphi_{\text{зап}} = 0,22$). Частота вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$, также влияет на плотность, т.к. частицы не успевают адсорбировать на своей поверхности влагу и процесс гранулообразования останавливается. Наиболее выражено это при $n_{\text{овл}} = 60$ об/мин. Так же, как и в случае с прочностью слоя, наибольшая плотность $\rho_{\text{сл}} \sim 670$ кг/м³ достигается при коэффициенте заполнения $\varphi_{\text{зап}} = 0,19 \div 0,20$ ед.

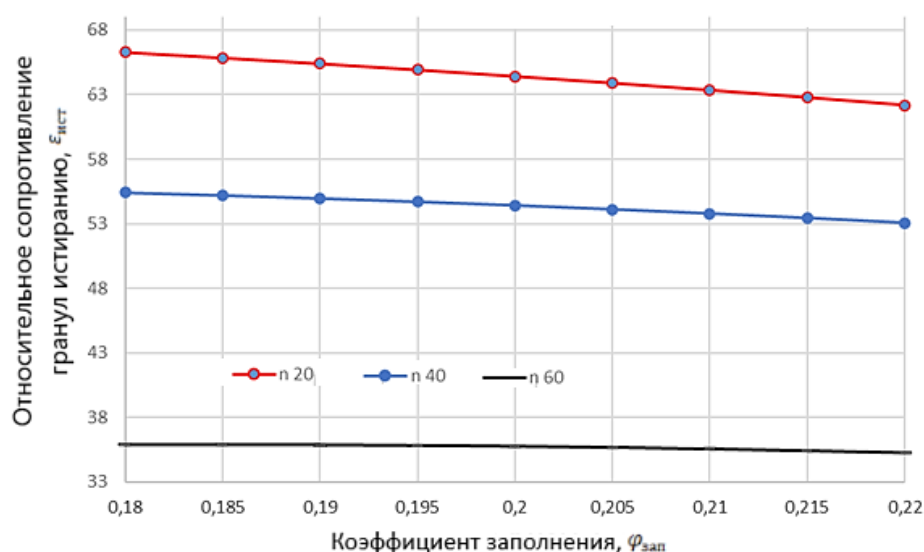


Рисунок 4.18 График зависимости относительного сопротивления гранул истиранию $\varepsilon_{\text{ист}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

При рассмотрении графиков зависимости относительного сопротивления гранул истиранию $\varepsilon_{\text{ист}}$ (рисунок 4.18) от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$, установлено, что с увеличением коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}} = 0,18 \div 0,22$ при $n_{\text{овл}} = 20 \div 40$ об/мин наблюдается спад значений $\varepsilon_{\text{ист}}$ от $\varepsilon_{\text{ист}} = 67\%$ до $\varepsilon_{\text{ист}} = 53\%$.

Для значений $n_{\text{овл}} = 60$ об/мин в указанном диапазоне $\varphi_{\text{зап}}$ существенных изменений показателя $\varepsilon_{\text{ист}}$ не происходит $\varepsilon_{\text{ист}} = 35\%$. Это свидетельствует о завышенной загрузке камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,22$ техническим углеродом и ухудшением условий гранулообразования при указанных параметрах $C_{\text{св}}$, $\varphi_{\text{зап}}$, $n_{\text{овл}}$.

Анализируя график зависимости процентного выхода товарных гранул $Q_{\text{тг}}$ от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ (рисунок 4.19), при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$, можно констатировать, что наибольшее значение выходного параметра $Q_{\text{тг}} = 85\%$, достигается при $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$ ед. и $n_{\text{овл}} = 40$ об/мин.

Однако для данных условий при увеличении значений с $\varphi_{\text{зап}} = 18\%$ до $\varphi_{\text{зап}} = 22\%$ наблюдается некоторое снижение значений $Q_{\text{тг}} = 81,5\%$. Это свидетельствует о «переполнении» камеры агломерирования. Увеличение частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 60$ об/мин, также приводит к снижению выхода товарных гранул до $Q_{\text{тг}} = 77 \div 78\%$.

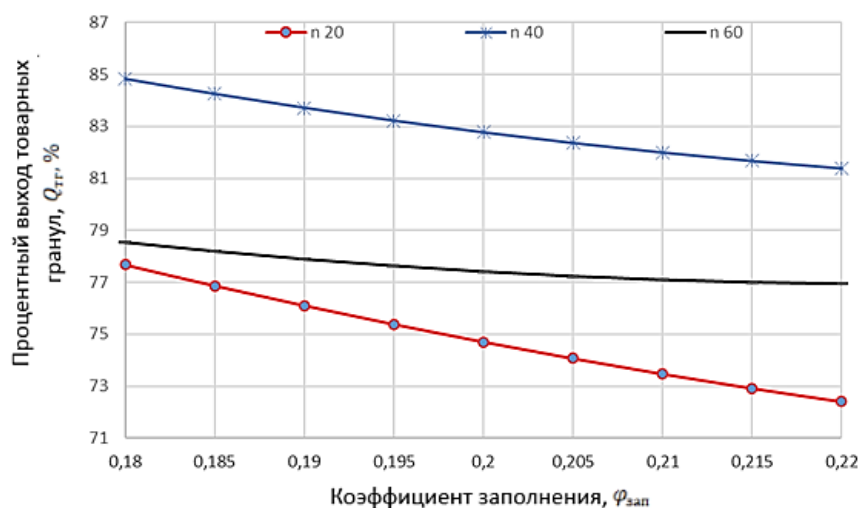


Рисунок 4.19 График зависимости процентного выхода товарных гранул $Q_{\text{тг}}$ от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ при различной частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 60$ об/мин и постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

Анализируя представленные выше графические зависимости (рисунках 4.16 – 4.19) можно сделать вывод о том, что для получения гранул с необходимыми прочностными характеристиками необходимо обеспечение строго определенного режима работы камеры агломерирования $n_{\text{овл}}$ и коэффициента ее загрузки $\varphi_{\text{зап}}$ материалом при постоянном содержании связующего $C_{\text{св}} = 18\%$. Количественное значение фактора $\varphi_{\text{зап}}$ не должно выходить за пределы, определенные в ходе экспериментальных исследований $\varphi_{\text{зап}} = 18 \div 20$ ед. Также необходимо учитывать физико-механические характеристики и физико-химические свойства технического углерода, подвергаемого агломерированию.

На рисунках 4.20 – 4.23 представлены графические зависимости совокупного влияния коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ и частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ на следующие характеристики гранул ТУ: прочность слоя $\sigma_{\text{сл}}$; плотность слоя $\rho_{\text{сл}}$; относительное сопротивление $\varepsilon_{\text{ист}}$ и процентный выход товарных гранул $Q_{\text{тг}}$, при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$.

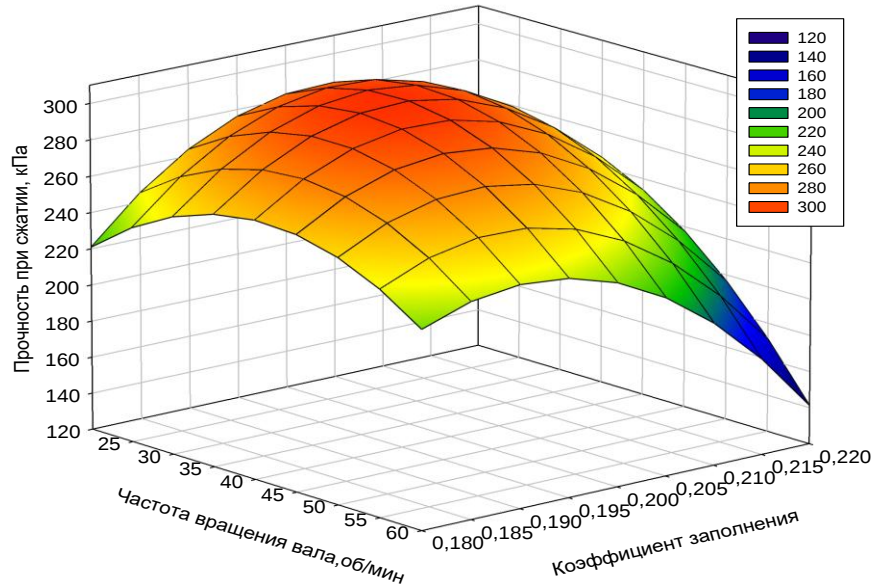


Рисунок 4.20. График зависимости прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ и частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

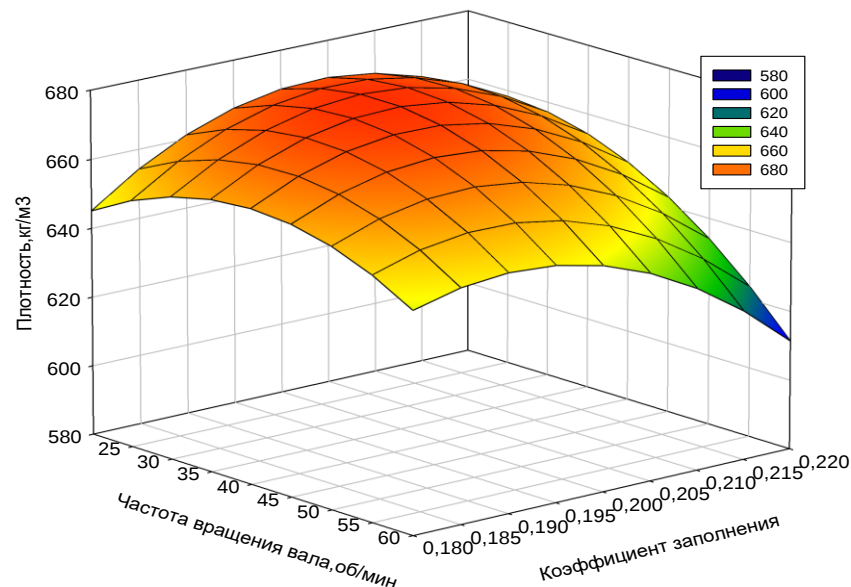


Рисунок 4.21. График зависимости плотности слоя $\rho_{\text{сл}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ и частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

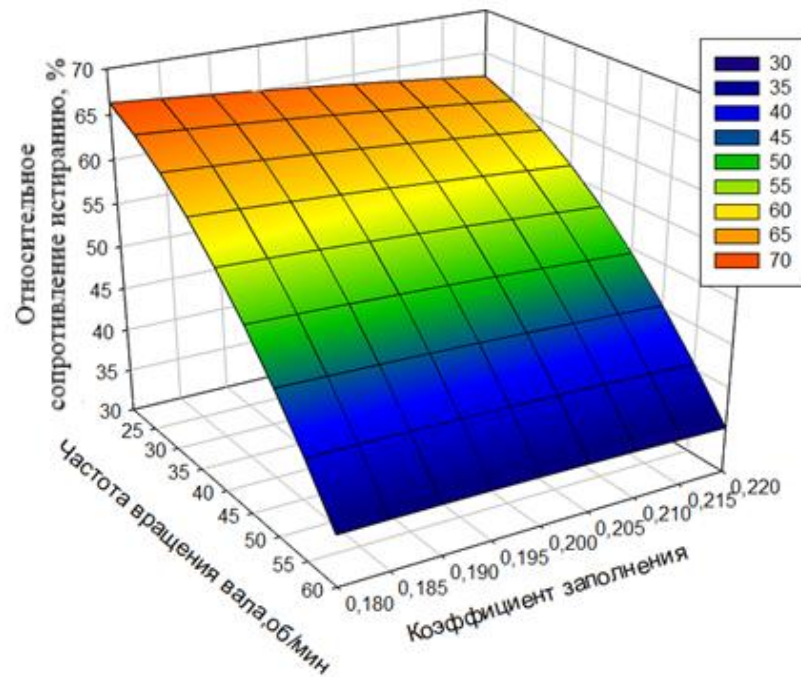


Рисунок 4.22. График зависимости относительного сопротивления истиранию $\varepsilon_{\text{ист}}$ гранул от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ и частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

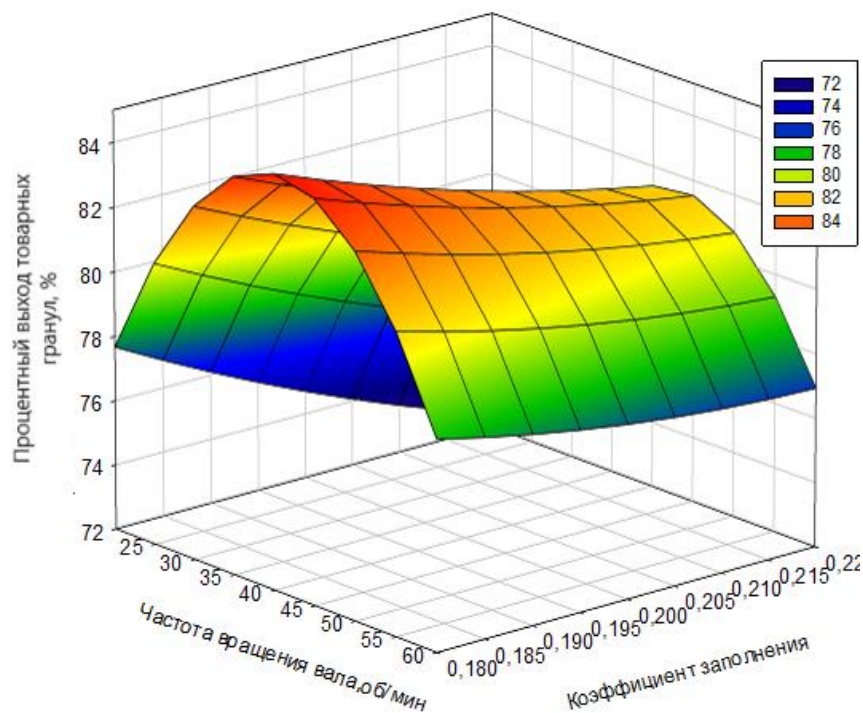


Рисунок 4.23. График зависимости процентного выхода товарных гранул $Q_{\text{тг}}$ от коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}$ и частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ при постоянном количестве связующего $C_{\text{св}} = 18\%$

4.6. Экспериментальные исследования технологических режимов работы барабанно-винтового агрегата

Для изучения процесса агломерирования ТУ в реальных условиях разработанного нами БВА, была исследована функциональная зависимость: прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$, плотности $\rho_{\text{сл}}$, мощности БВА $P_{\text{БВА}}$ и приведенной производительности БВА $Q_{\text{БВА}}$ при различном коэффициенте заполнения $\varphi_{\text{зап}}=0,14\div0,24$ камеры агломерирования; частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}=10\div100$ об/мин; угле разворота винтовых лопастей $\psi_{\text{овл}}=110\div150^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{овл}}=0,006\div0,016$ м².

Рассмотрим представленные на рисунке 4.24 зависимости $\sigma_{\text{сл}}$, $\rho_{\text{сл}}$, $P_{\text{БВА}}$, $Q_{\text{БВА}}=f(\varphi_{\text{зап}})$ и характер влияния коэффициента заполнения $\varphi_{\text{зап}}=0,14\div0,24$ на выходные показатели при неизменных: частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}=40$ об/мин, угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{овл}}=120^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{овл}}=0,016$ м².

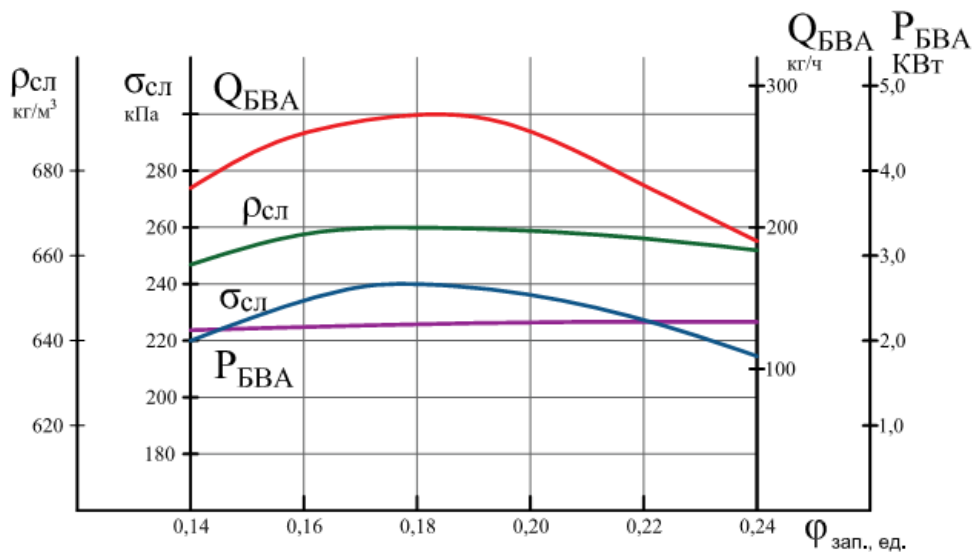


Рисунок 4.24. Графические зависимости $\sigma_{\text{сл}}$, $\rho_{\text{сл}}$, $P_{\text{БВА}}$, $Q_{\text{БВА}}=f(\varphi_{\text{зап}})$ при неизменных: частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}=40$ об/мин, угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{овл}}=120^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{овл}}=0,016$ м²

Так, наибольшее влияние степень заполнения камеры агломерирования ТУ оказывает на приведенную производительность БВА $Q_{\text{БВА}}$. Это объясняется увеличением объема материала, находящегося в камере агломерирования и возможностью получения $Q_{\text{БВА}}=300$ кг/ч при $\varphi_{\text{зап}}=0,19$. Однако, как только коэффици-

ент заполнения превышает значение $\varphi_{\text{зап}} \geq 0,19 \div 0,20$, увеличивается процентный выход некондиционных гранул $D \leq 2,0 \div 5,0 \text{ мм}$ и приведенная производительность снижается. Уменьшение гранул в диаметре объясняется снижением их объемно-пространственного перемещения и ухудшением условий гранулообразования.

Менее значимое влияние коэффициент заполнения оказывает на плотность $\rho_{\text{сл}}$ и прочность $\sigma_{\text{сл}}$ слоя. При $\varphi_{\text{зап}} = 0,14 \div 0,18$ происходит незначительное увеличение данных показателей. Однако далее, при $\varphi_{\text{зап}} = 0,18 \div 0,24$, наблюдается снижение значений $\rho_{\text{сл}}$ и $\sigma_{\text{сл}}$.

Величина степени заполнения камеры агломерирования существенно не сказывается на значениях потребляемой приводом БВА мощности $P_{\text{БВА}}$. Данное явление объясняется специфическими особенностями ТУ, а именно низкой насыпной плотностью $\rho_{\text{нас}}$. Даже со связующим она не превышает значений $\rho_{\text{нас}} = 600 \div 700 \text{ кг/м}^3$.

На рисунке 4.25 представлены графические зависимости плотности слоя $\rho_{\text{сл}}$, прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$, производительности БВА $Q_{\text{БВА}}$ и мощности привода БВА $P_{\text{БВА}}$, при изменяемой частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{ОВЛ}} = 10 \div 100$ об/мин и неизменных: коэффициенте заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$, угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{ОВЛ}} = 120^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{ОВЛ}} = 0,016 \text{ м}^2$.

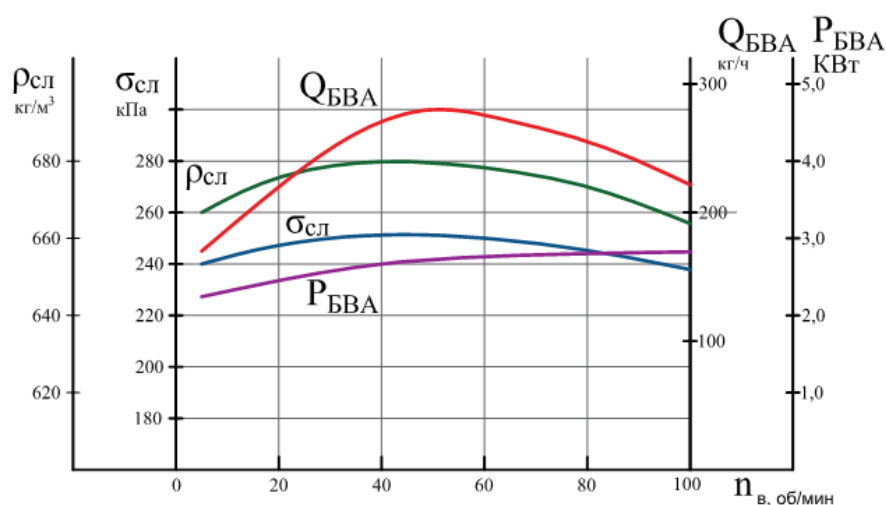


Рисунок 4.25. Графические зависимости $\sigma_{\text{сл}}, \rho_{\text{сл}}, P_{\text{БВА}}, Q_{\text{БВА}} = f(n_{\text{ОВЛ}})$ при неизменных: коэффициенте заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$, угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{ОВЛ}} = 120^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{ОВЛ}} = 0,016 \text{ м}^2$

В данном случае, при неизменном коэффициенте заполнения $\varphi_{\text{зап}}=0,18$ камеры агломерирования, зависимость мощности от частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}}$ представлена в виде возрастающей линейной зависимости. Так, в интервале $n_{\text{овл}} = 10 \div 100$ об/мин значение мощности изменяется в пределах $P_{\text{БВА}} \sim 2,2 \div 2,8$ кВт.

Увеличением частоты вращения вала винтовых лопастей в диапазоне $n_{\text{овл}} = 10 \div 50$ об/мин повышает значение $\sigma_{\text{сл}}$ до 250 кПа, в дальнейшем сопротивление сжимающим нагрузкам снижается до $\sigma_{\text{сл}} = 240$ кПа. Наблюдается соответствующее изменение значений плотности слоя гранул до максимальных значений $\rho_{\text{сл}} = 680$ кг/м³ и его прочности в пределах $\sigma_{\text{сл}} = 240 \div 250$ кПа. С увеличением интенсивности силового воздействия от действия инерционных сил, при повышении частоты вращения вала винтовых лопастей до значений $n_{\text{овл}} = 40 \div 60$ об/мин, наблюдается насыщение кривых. При дальнейшем увеличении $n_{\text{овл}} \geq 60$ об/мин начинается спад значений кривых. Превышение указанных значений частоты вращения вала приводит к «броскам» материала не на стенку камеры агломерирования, с его последующим окатыванием, а в свободное пространство. В следствии чего, агломерируемый материал имеет меньшее время соприкосновения с рабочей поверхностью камеры. Кроме того, изменяется траектория движения всех гранул, что также ухудшает условия агломерирования материала.

Производительность БВА также увеличивается в пределах $Q_{\text{БВА}} = 220 \div 280$ кг/ч при значениях частоты вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 20 \div 50$ об/мин. Дальнейшее увеличение значений $n_{\text{овл}} > 50$ об/мин, снижает производительность БВА на 60 кг/ч, $Q_{\text{БВА}} \sim 220$ кг/ч.

На рисунке 4.26 представлены графические зависимости $\sigma_{\text{сл}}$, $\rho_{\text{сл}}$, $P_{\text{БВА}}$, $Q_{\text{БВА}} = f(\psi_{\text{овл}})$ и характер влияния угла разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{овл}} = 110 \div 150^\circ$ на выходные показатели при неизменных: частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 40$ об/мин, неизменном коэффициенте заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$ и площади ОВЛ $F_{\text{овл}} = 0,016$ м².

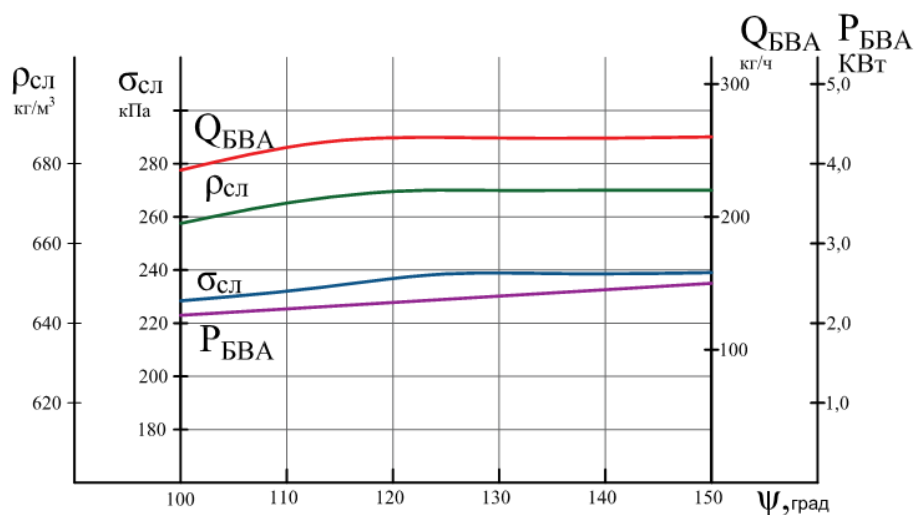


Рисунок 4.26. Графические зависимости $\sigma_{\text{сл}}, \rho_{\text{сл}}, P_{\text{БВА}}, Q_{\text{БВА}} = f(\psi_{\text{ОВЛ}})$ при неизменных: коэффициенте заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$, частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{ВОВЛ}} = 40$ об/мин и площади ОВЛ $F_{\text{ОВЛ}} = 0,016 \text{ м}^2$

Анализ представленных графических зависимостей свидетельствует о незначительном влиянии угла разворота винтовых лопастей $\psi_{\text{ОВЛ}}$, расположенных в камере агломерирования, на выходные показатели. Данный параметр не оказывает существенного влияния на потребляемую приводом БВА мощность $P_{\text{БВА}}$, она носит линейный характер. Однако изменение угла разворота винтовых лопастей, в пределах значений $\psi_{\text{ОВЛ}} = 110 \div 120^\circ$, незначительно увеличивает прочность $\sigma_{\text{сл}}$ и плотность $\rho_{\text{сл}}$ слоя гранул. Оказывает влияние на производительность $Q_{\text{БВА}}$, повышая ее на $7 \div 10\%$. Данное обстоятельство объясняется увеличением полезной работы, выполняемой винтовыми лопастями в камере агломерирования БВА. Так как на третьей стадии процесса осуществляется окончательное агломерирование микрогранул с помощью однонаправленных винтовых лопастей (ОВЛ), то наибольшее значение имеют возникающие силы трения гранулята о боковую поверхность камеры агломерирования. При реализации этого процессного явления важен длительный механический контакт гранул с поверхностью. Также необходимо обеспечить своевременный отбор материала из зоны подпора со стороны ДВЛ.

На рисунке 4.27 представлены графические зависимости плотности $\rho_{\text{сл}}$, прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$, производительности БВА $Q_{\text{БВА}}$ и мощности БВА $P_{\text{БВА}}$ при различной площади ОВЛ $F_{\text{ОВЛ}} = 0,006 \div 0,016 \text{ м}^2$ и постоянных: частоте вращения вала

винтовых лопастей $n_{\text{ОВЛ}} = 40$ об/мин, степени заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$ и угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{ОВЛ}} = 120^\circ$.

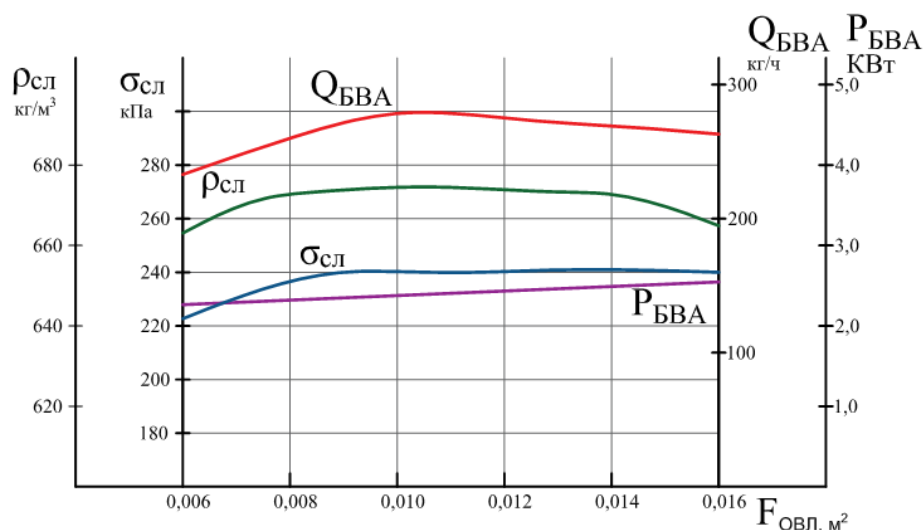


Рисунок 4.27. Графические зависимости $\sigma_{\text{сл}}, \rho_{\text{сл}}, P_{\text{БВА}}, Q_{\text{БВА}} = f(\psi_{\text{ОВЛ}})$ при неизменных: коэффициенте заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = 0,18$, частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{ОВЛ}} = 40$ об/мин и угле разворота вала винтовых лопастей $\psi_{\text{ОВЛ}} = 120^\circ$.

Увеличение площади ОВЛ в пределах значений $F_{\text{ОВЛ}} = 0,006 \div 0,016 \text{ м}^2$ оказывает влияние на производительность, увеличивая её на 10% при значениях площади $F_{\text{ОВЛ}} = 0,010 \div 0,012 \text{ м}^2$. Дальнейшее увеличение площади ОВЛ, наоборот, приводит к снижению производительности. Это явление можно объяснить снижением интенсивности процесса агломерирования микрогранулята, обеспечиваемым геометрическим профилем ОВЛ. Указанное увеличение площади ОВЛ $F_{\text{ОВЛ}} > 0,012 \text{ м}^2$ ухудшает объемно-пространственное перемещение микрогранулята в координатах X,Y,Z, а следовательно, и процентный выход товарных гранул.

Повышение мощности БВА $P_{\text{БВА}}$ при увеличении площади ОВЛ, находится в пределах погрешности и составляет не более 3-4%.

Значения плотности $\rho_{\text{сл}}$ и прочности слоя $\sigma_{\text{сл}}$ изменяются также незначительно. Это объясняется тем, что увеличение площади ОВЛ после значений ($F_{\text{ОВЛ}} = 0,010 \div 0,012 \text{ м}^2$), как было указано выше, влияет на объемно-пространственное перемещение гранул в камере агломерирования. Гранулят перестает перекашиваться через ОВЛ и образует застойные зоны, что, в свою очередь, снижается качество гранулята.

4.7. Сравнительный анализ полученных результатов исследований

Для оценки адекватности полученных математических выражений и установления погрешности выходных показателей нами осуществлен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Были сопоставлены математические зависимости потребляемой мощности привода БВА, затрачиваемый на процесс агломерирования ТУ в центральном барабане $P_I(2.122)$, $P_1(2.123)$, $P_2(2.126)$, $P_3(2.127)$, $P_4(2.128)$ устройствами, закрепленными на приводном валу, от частоты его вращения, а также мощности, расходуемой на вращение корпуса БВА с барабанами $P_{II}(2.130)$, $P_{III}(2.131)$, $P_{тр.п}(2.133)$, $P_{тр.б}(2.138)$, с результатами экспериментальных исследований зависимости $P_{БВА} = f(n_6)$.

Потребляемая мощность приводов БВА определялась экспериментально с использованием частотного преобразователя.

Вторым важным показателем БВА являлась приведенная производительность агрегата $Q_{БВА}$ или выход товарной продукции $Q_{тг}$, регламентированных по размерам $d_{гр} = (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$ мм гранул.

Учитывая, что получение качественного гранулята в БВА зависит не только от его конструктивных и энергосиловых параметров, но и от технологических (коэффициента загрузки камеры агломерирования – $\varphi_{зап}$, вида и содержания связующего – $C_{св}$ и др.), то нами осуществлялось сравнение результатов, полученных при моделировании процесса агломерирования, в виде математического выражения (4.4) $Q_{тг} = f(C_{св}, \varphi_{зап}, n_в)$ с результатами экспериментальных исследований опытно-промышленного БВА.

Полученные графические зависимости представлены на рисунке 4.28.

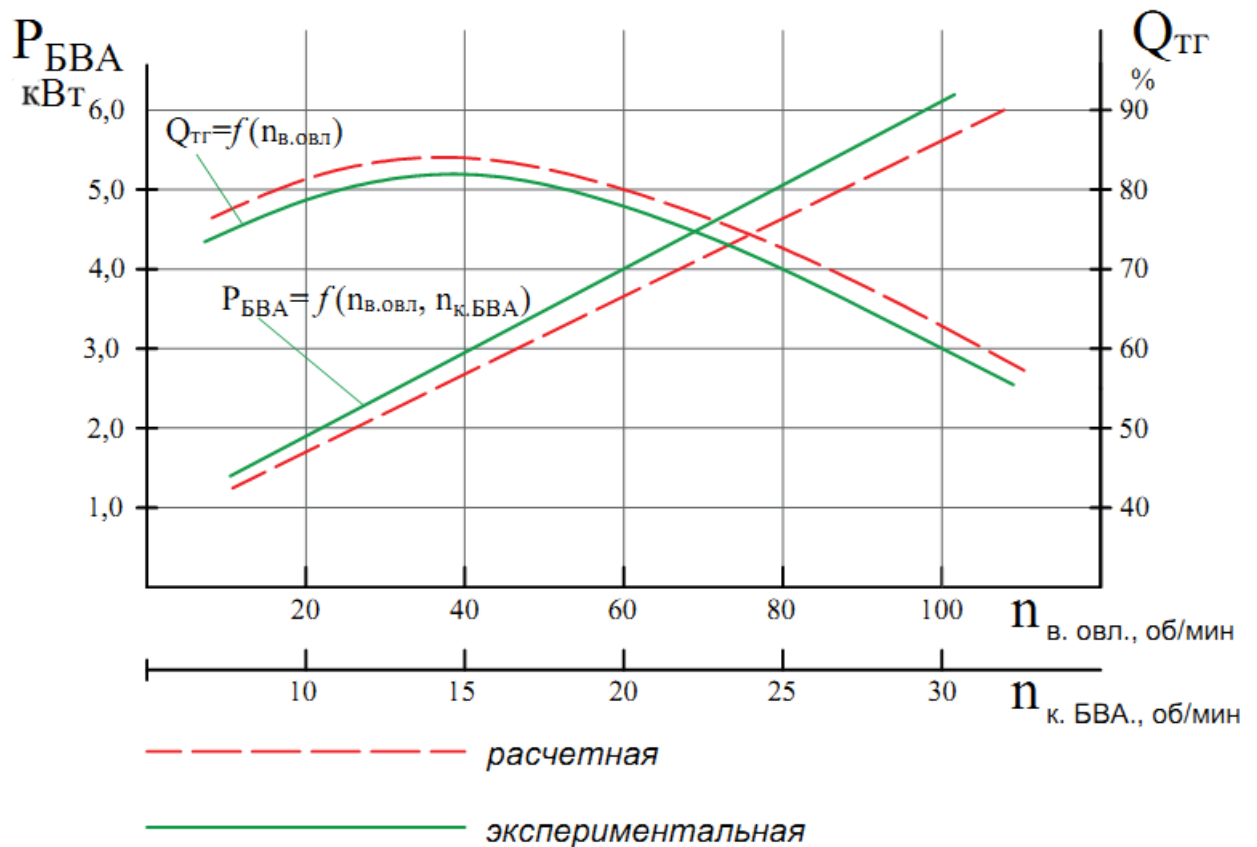


Рисунок 4.28 Графические зависимости суммарной потребляемой мощности приводов БВА $P_{\text{БВА}} = f(n_{\text{в.овл.}}, n_{\text{к.БВА.}})$ и выхода товарных гранул $Q_{\text{ТГ}}$ при различной частоте вращения вала винтовых устройств $n_{\text{в.овл.}}$.

Сопоставленный анализ графических зависимостей суммарной потребляемой мощности приводов БВА $P_{\text{БВА}} = f(n_{\text{в.овл.}}, n_{\text{к.БВА.}})$, затрачиваемой при вращении вала центрального барабана БВА с винтовыми устройствами, $n_{\text{в.овл.}}$ и корпуса БВА, $n_{\text{к.БВА.}}$, а также выхода товарных гранул $Q_{\text{ТГ}}$ при различной частоте вращения вала $n_{\text{в.овл.}}$ с агломерируемыми устройствами показывает, что расхождение между теоретически установленными и экспериментальными данными не превышает 15%.

4.8. Выводы

1. Определены: вещественный состав, физико-механические характеристики и физико-химические свойства технического углерода, получаемого способом низкотемпературного термолиза при переработке органических техногенных материалов.

2. Изучен и определен вещественный состав и процентное содержание связующего для агломерирования ТУ.
3. Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента, определены функции цели, исследуемые факторы и уровни их варьирования.
4. Представлена методика обработки результатов многофакторного планирования экспериментальных исследований.
5. По данным многофакторного планирования экспериментов, обработки полученных данных, были получены регрессионные зависимости $\sigma_{\text{сл}}, \rho_{\text{сл}}, Q_{\text{тг}}, \varepsilon_{\text{ист}}, (\varphi_{\text{зап}}, n_{\text{овл}}, C_{\text{св}})$, проведен их анализ и установлены наиболее значимые факторы и закономерности их изменения.
6. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность процесса агломерирования ТУ и качественные характеристики получаемого гранулята, установлены диапазоны варьирования каждого из исследуемых факторов: при $n_{\text{овл}}=40$ об/мин; $C_{\text{св}}=18\div 19\%$; $\varphi_{\text{зап}}=0,18\div 0,20$. Получено: минимальная прочность слоя сухих гранул ТУ – $\sigma_{\text{сл}} = 205 \div 215$ кПа; плотность слоя сухих гранул ТУ – $\rho_{\text{сл}}=630\div 670$ кг/м³; относительное сопротивление истиранию сухих гранул ТУ – $\varepsilon_{\text{ист}}=56$ %; процентный выход товарных гранул – $Q_{\text{тг}}=83\div 85$ %.
7. В процессе опытно-промышленных испытаний БВА были определены зависимости: прочности слоя $\sigma_{\text{сл}} = 220 \div 250$ кПа, плотности $\rho_{\text{сл}}=660\div 680$ кг/м³, мощности БВА $P_{\text{БВА}} = 2,2 \div 2,8$ кВт и производительности БВА $Q_{\text{БВА}} = 180 \div 280$ кг/ч при различной степени заполнения $\varphi_{\text{зап}}=0,18\div 0,24$, частоте вращения вала винтовых лопастей $n_{\text{овл}} = 10\div 100$ об/мин, угле разворота винтовых лопастей $\psi_{\text{овл}}=110\div 130^\circ$ и площади ОВЛ $F_{\text{овл}}=0,006\div 0,016$ м².

5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ЕГО АГЛОМЕРИРОВАНИЯ

5.1. Разработка и испытания низкотемпературной термолитической технологии переработки органических отходов и технических средств для получения высококалорийной продукции

Как было указано ранее (глава I), анализ отечественных и зарубежных научно-технических разработок, показывает, что одним из наиболее эффективных и перспективных способов переработки ТМ, является термомеханическая обработка органических ТКО, базирующаяся на технологии низкотемпературного термолитиза ($\leq 500^\circ$).

На (рисунке 5.1), представлена технологическая схема термомеханической переработки ТКО с использованием патентозащищенного нами способа низкотемпературного термолитиза (Пат. РФ № 2744225, Евразийский пат. № 043162) [40,41].

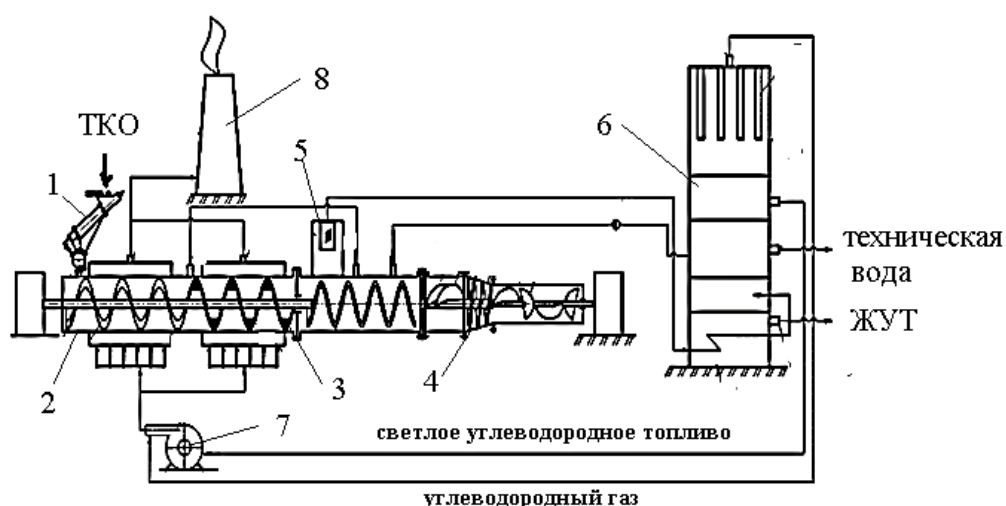


Рисунок 5.1. Схема цепей термомеханической переработки ТКО способом низкотемпературного термолитиза:

1 – герметизирующий узел загрузки; 2 – термолитический реактор; 3 – комбинированный винтообразный транспортирующий орган; 4 – герметизирующий узел выгрузки ТУ; 5 – фильтр парогазовой смеси; 6 – колонна конденсации парогазовой смеси; 7 – двухтопливная горелка; 8 – труба выхода дымовых газов.

Для исследования процесса низкотемпературного термолиза органических ТКО, совместно с ИТР ООО «ТК «Экотранс», была разработана и создана опытно-промышленная установка (рисунок 5.2), производительностью $40.0 \div 50.0$ кг/ч, в зависимости от влажности исходного сырья.



Рисунок 5.2. Опытно-промышленная установка низкотемпературного термолиза, производительностью $Q=50$ кг/ч. Геометрические параметры: длина – 12.0 м.; ширина – 1.0 м., высота – 3.0 м., диаметр реактора – 0.1 м.

Конструктивными особенностями данной установки являются: герметизирующие узлы загрузки и выгрузки, реактор трубного типа с транспортирующим органом в виде безосевой спирали, высокотемпературный газопылевой фильтр, ректификационная колонна. Технологический процесс имеет высокий уровень автоматизации и обеспечивает возможность регулировки, контроля и архивации параметров. На рисунке 5.3 представлен монитор пульта управления оператора для визуализации технологического процесса.



Рисунок 5.3. Монитор пульта управления оператора для визуализации параметров технологического процесса

Проведенные нами опытно-промышленные испытания малотоннажной термолизной технологии получения ТУ $Q=30\div 50$ кг/ч позволили установить рациональные режимы работы термореактора для дальнейшего проектирования и создания установки производительностью $Q=500$ кг/ч.

5.2. Конструктивно-технологическое совершенствование термореактора и процессов для получения технического углерода.

В рамках дальнейшего развития данного научного направления – комплексной переработке ТКО по программе НОЦ (проект № 10089447) нами разработана (рисунок 5.4) и проведены опытно-промышленные испытания патентозащищенной (Пат. РФ № 2773396, Евразийский пат. № 043232) технологической линии большей производительности, $Q=500$ кг/ч (рисунки 5.5, 5.6). При этом использовались результаты предшествующих испытаний.

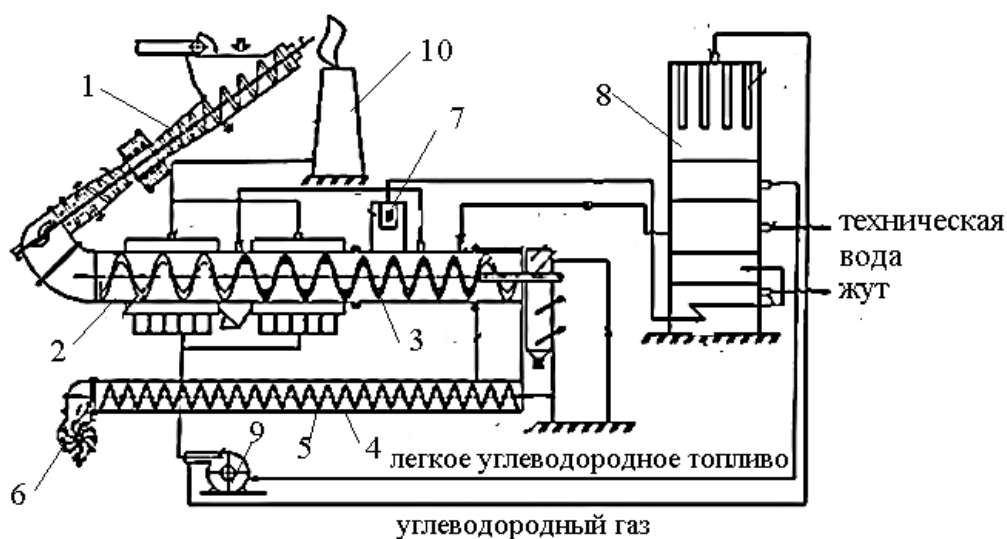


Рисунок 5.4. Схема цепей установки низкотемпературного термолиза органических ТКО:

1–герметизирующий узел загрузки; 2–реактор низкотемпературного термолиза органических ТКО; 3–винтообразный транспортирующий орган; 4–реактор облагораживания ТУ; 5 –сегментно-спиралевидный транспортирующий орган; 6–герметизирующий узел выгрузки ТУ; 7 – фильтр парогазовой смеси; 8 – колонна конденсации паро-газовой смеси; 9 – двухтопливная горелка; 10 – труба выхода дымовых газов.

При разработке, изготовлении, наладке и испытаниях технологической линии, также учитывались патентозащищенные технические решения. К их числу относится постадийная двухкаскадная термолизная деструкция органических ТКО, а также технические решения герметизации узлов загрузки и выгрузки материалов

[148-150], конструктивно-технологического исполнения внутренних устройств термореактора, технологии процессов термообработки и аспирации.



Рисунок 5.5 Общий вид опытно-промышленной установки низкотемпературного термолиза на производственной площадке ООО «ТК «Экотранс» в стадии сборки и монтажа оборудования



Рисунок 5.6. Общий вид реактора установки низкотемпературного термолиза $Q=500$ кг/ч

Учитывая, что результатом диссертационной работы, является разработка и исследование БВА для агломерирования ТУ с заданными физико-механическими характеристиками, то в данной главе представлены основные результаты опытно-промышленных испытаний термолизной технологии, обеспечивающей стабильные показатели получаемой продукции – технического углерода для последующего его гранулирования. При проведении экспериментов в промышленных условиях на

установке низкотемпературного термолиза были установлены следующие рациональные технологические режимы, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технологические режимы переработки органических ТКО

Наименование параметра	Значение
Количество перерабатываемого материала (РТО, ТКО и др.)	450÷500 кг/ч
Температура в реакторе	450÷470 ⁰ С
Температура в фильтре-сепараторе	470÷480 ⁰ С
Температура в колонне разделения жидких продуктов	120÷130 ⁰ С
Давление в реакторе	0.01÷0.015Мпа
Время пребывания материала в реакторе	20÷23 мин.
Влажность перерабатываемого материала	≤ 30.0%

Основываясь на полученных при физическом моделировании процесса низкотемпературной термолизной переработки ТКО данных по установке, Q=500 кг/ч рекомендуются следующие технологические условия (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Рекомендуемые технологические условия работы термореактора

Наименование параметра	Условия
Режим подачи сырья	Непрерывный
Режим вывода конечных продуктов	Непрерывный
Коэффициент заполнения реактора	0.30÷0.35
Скорость перемещения сырья в реакторе	0.6 м/мин

Получаемый в процессе переработки органических ТКО технический углерод, с заданными характеристиками выводится из трубчатого термореактора через выгрузочный питатель-уплотнитель и направляется на дальнейшее агломерирование в БВА. Получаемый агломерированный ТУ используют для получения адсорбентов или композиционных смесей [146,147].

Технический углерод являются не только высококалорийной вторичной продукцией, полученной из органических ТКО, но и базовым сырьевым ресурсом для производства различных видов его производных (теплоизоляционных композиционных смесей, компактированных адсорбентов для очистки загрязненных жидких сред, производства резинотехнических изделий и лакокрасочных материалов и др.).

Результаты опытно-промышленных испытаний могут быть базовой основой для дальнейшего развития в стране инновационных ресурсо-сберегающих технологий при комплексной переработке ТКО.

Вышеуказанные разработки являлись также необходимым условием для решения поставленных в диссертационной работе задач – разработке и исследованиям БВА для агломерирования ТУ, полученного из органических ТКО. Достижение поставленной цели значительно расширяет области использования гранулированного ТУ в различных отраслях промышленности.

5.3. Опытные-промышленные испытания барабанно-винтового агрегата для получения агломерированного технического углерода.

Для получения агломерированной товарной продукции, технического углерода низкотемпературной термолизной технологии, а также композиционных смесей с его использованием, нами был разработан технологический модуль, включающий следующее оборудование, рисунке 5.7.

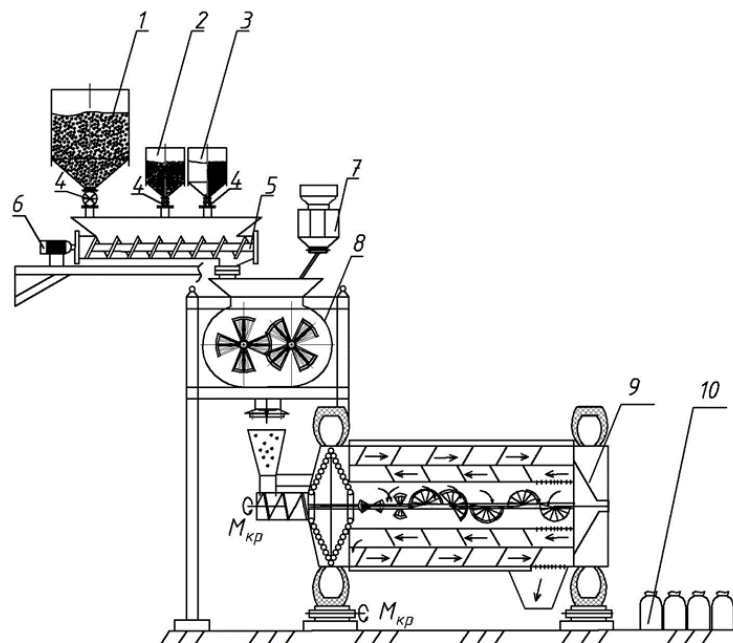


Рисунок 5.7. Схема технологического модуля для производства агломерированного технического углерода и композиционных смесей с его использованием:

1 – бункер-питатель технического углерода; 2,3 – бункера добавок; 4 – ячейковые питатели; 5 – герметичный шнековый питатель; 6 – мотор-редуктор; 7 – емкость с прецизионным дозированием жидкого связующего; 8 – смеситель композиционной смеси с рециркуляционным воздействием; 9 – барабанно-винтовой агрегат комбинированного действия; 10 – агломерированная продукция.

Принцип работы технологического модуля заключается в следующем.

В бункер-питатель 1 поступает охлажденный технический углерод низкотемпературной термолизной технологии. С помощью ячейкового питателя 4 ТУ подается в герметичный шнековый питатель 5, приводимый во вращение мотор-редуктором 6. Из бункеров 2,3 в этот же питатель дозированно подаются необходимые добавки (базальтовый фибронаполнитель, механоактивированные кремнеземистые материалы и другое). Далее указанные компоненты поступают в смеситель 8, в который, также из емкости 7, поступает жидкое связующее. В смесителе осуществляется рециркуляционное воздействие на композиционную смесь и реализуется гомогенизация всех компонентов. Далее готовая композиционная смесь с жидким связующим поступает в барабанно-винтовой агрегат комбинированного действия 9. В БВА происходит агломерирование полученных в двухвальном смесителе полидисперсных композиционных смесей. Сформованные гранулы затариваются в емкости 10 готовой продукции.



Рисунок 5.8. Общий вид опытно-промышленного технологического модуля с барабанно-винтовым агрегатом (1) и смесителем рециркуляционного действия (2)

На рисунке 5.8 изображен БВА в составе технологического модуля для производства агломерированного технического углерода и композиционных смесей с его содержанием. Разработанная нами патентозащищенная конструкция БВА [122-124] обеспечивает выполнение следующих технологических операций:

- получение микрогранул (зародышей) в спиралевидном блоке микрогранулирования;
- последующее упрочнение микрогранул в режиме рециклинга ДВЛ;
- окончательное формирование сферических гранул в режиме объемно-пространственного перемещения агломерата ОВЛ, имеющих специальный геометрический профиль;
- постадийную классификацию с помощью разнонаправленных ОВЛ полифракционного гранулята.
- теплотехническую обработку получаемого в БВА агломерата;

В таблице 5.3 представлены технические характеристики БВА

Таблица 5.3 – Технические характеристики БВА

Наименование характеристики	Значение
Габаритные размеры БВА:	
-длина;	1,5 м.
-ширина;	1,0 м.
-высота;	1,8 м.
Диаметр барабанов:	
- наружного;	0,62 м.
- среднего;	0,49 м.
-центрального;	0,25 м.
Частота вращения камеры агломерирования	10÷15 мин ⁻¹
Частота вращения вала внутренних рабочих органов	30÷60 мин ⁻¹
Установленная мощность привода камеры агломерирования	3,5 кВт.
Установленная мощность привода вала внутренних рабочих органов	1,5 кВт.
Коэффициент загрузки камер БВА	0,18÷0,22
Производительность по сырью	250÷300 кг/ч

Испытания барабанно-винтового агрегата проводили в составе технологического модуля с использованием технического углерода, полученного на установке низкотемпературного термолiza при переработке органических ТКО. Физико-механические характеристики ТУ: насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$ – 400÷500 кг/м³; средний размер частиц – 40÷50 мкм; влажность, W – 5÷7%;

В результате испытаний были получены гранулы со следующими характеристиками: диаметр гранул, $D_{\text{ср}} - 2 \div 5$ мм.; насыпная плотность гранул, $\rho_{\text{нас}} - 600 \div 700$ кг/м³; прочность слоя, $\sigma_{\text{сж}} - 220 \div 250$ кПа.

Полученные значения физико-механических характеристик гранул удовлетворяют требованиям ГОСТ – Р54095-2023.

Для получения гранул заданного качества технологические режимы БВА были следующие: частота вращения камеры агломерирования – $10 \div 15$ мин⁻¹; частота вращения вала внутренних рабочих органов – $35 \div 40$ мин⁻¹; коэффициент заполнения – $0,18 \div 0,22$.

Производительность барабанно-винтового агрегата по исходному сырью (ТУ), составила $Q = 250 \div 300$ кг/ч. Мощность, потребляемая БВА не превышала $P_{\text{БВА}} = 3,0$ кВт. Данные результаты получены при заданных характеристиках БВА.

Работоспособность БВА и его эксплуатационная надежность подтверждается полученными результатами опытно-промышленных испытаний. Использование разработанной патентозащищенной конструкции БВА, не только в составе технологического комплекса, но и самостоятельно, обеспечивает получение качественных товарных гранул из техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками [151-157].

5.4. Инженерная методика расчета теплотехнических параметров обработки агломерированного технического углерода в БВА

Разработанная нами конструкция БВА [122-124] реализует как механо-технологические, так и теплотехнические процессы (рисунки 5.7, 5.8). Последние, позволяют обеспечить замкнутый цикл производства гранул с рациональным использованием тепло-энергетических внешних источников [158-159]. На основании общепризнанных классических принципов теплотехники [160-163] нами разработана методика расчета теплотехнических параметров БВА при обработке агломерированного ТУ. Расчет теплотехнических параметров осуществляют в следующей последовательности. На первом этапе, по формулам

(5.1) и (5.2) определяем соответственно объем БВА, $V_{\text{БВА}}$ и его поверхность теплообмена, $F_{\text{БВА}}$.

$$V_{\text{БВА}} = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{н}}^2}{4} \right) \cdot L_{\text{б}}; \quad (5.1)$$

$$F_{\text{БВА}} = \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot L_{\text{б}}, \quad (5.2)$$

где $D_{\text{н}}$ и $L_{\text{б}}$ – соответственно наружный диаметр и длина внешнего барабана, м.

На втором этапе определяем влагосодержание и энтальпию воздуха, нагреваемого электрокалорифером, для соответствующей стадии процесса сушки. Влагосодержание воздуха, поступающего в электрокалорифер X_0 , выходящего из него X_1 , входящего и выходящего из БВА X_2 , X_3 , определяем по формуле (5.3).

$$X_0 = \frac{0,622 \cdot P_{\text{нас}} \cdot W_{\text{БВА}}}{P_{\text{атм}} - P_{\text{нас}} \cdot W_{\text{БВА}}}, \quad (5.3)$$

где $P_{\text{нас}}$ – давление насыщенного пара при соответствующей температуре воздуха, кПа;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, кПа;

$W_{\text{БВА}}$ – влажность воздуха, %.

Энтальпию воздуха на входе в электрокалорифер h_0 и выходе из него h_1 , рассчитываем по формуле (5.4).

$$h_0 = (C_{\text{в}} + C_{\text{п}} \cdot x_0) \cdot t_0 + r_0 \cdot x_0, \quad (5.4)$$

где $C_{\text{в}}$ – средняя удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении, $C_{\text{в}} = 1,01$ кДж/(кг⁰С);

$C_{\text{п}}$ – средняя удельная теплоемкость водяного пара, $C_{\text{п}} = 1,971$ кДж/(кг⁰С);

t_0 – температура воздуха на входе и выходе электрокалорифера, °С;

r_0 – удельная теплота парообразования воды при 3,6°С, $r_0 = 2493$ кДж/кг.

Проводим расчет массы влаги, удаляемой из гранул в процессе сушки (5.5).

$$W_{\text{уд}} = Q_{\text{сух.гр}} \frac{W_{\text{нач.гр}} - W_{\text{кон.гр}}}{100 - W_{\text{нач.гр}}}, \quad (5.5)$$

где $Q_{\text{сух.гр}}$ – производительность БВА по сухим гранулам, кг/ч;

$W_{\text{нач.гр}}$, $W_{\text{кон.гр}}$ – соответственно, начальное и конечное влагосодержание гранулята, %.

Напряжение БВА по удаляемой влаге, $A_{\text{БВА}}$, кг/м³час рассчитываем по (5.6)

$$A_{\text{БВА}} = \frac{W_{\text{уд}}}{V_{\text{БВА}}}. \quad (5.6)$$

Удельный расход сухого воздуха ($L_{\text{уд}}$), при сушке гранул, кг/кг

$$L_{\text{уд}} = \frac{1}{X_2 - X_3}. \quad (5.7)$$

Далее, по формуле (5.8) производим расчет тепла $q_{\text{БВА}}$, необходимого для процесса сушки гранул, кДж/кг.

$$q_{\text{БВА}} = L_{\text{уд}} \cdot (h_3 - h_2), \quad (5.8)$$

где h_2, h_3 – соответственно, теплосодержание воздуха на входе и выходе БВА

Также, по формуле (5.9) определяем для БВА коэффициент теплопередачи $K_{\text{БВА}}$, Вт/(м² К).

$$K_{\text{БВА}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \left(\frac{\delta_1 + \delta_3}{\lambda_1} \right) + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (5.9)$$

где α_1, α_2 – соответственно, коэффициент теплопередачи от сушильного агента к стенке БВА, Вт/(м² К) и от стенки БВА к теплоизоляции;

λ_1, λ_2 – соответственно, коэффициент теплопроводности стали и теплоизоляции, Вт/(м К); $\lambda_1 = 46$, $\lambda_2 = 0,060$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – соответственно, толщина стенки БВА, теплоизоляции и защитного кожуха, м.

Далее определяем среднюю разность температур, с учётом направления движения гранул и сушильного агента. В нашем случае, движение осуществляется в противотоке.

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_{1\text{бва}} - t_{\text{м2}}) - (t_{2\text{бва}} - t_{\text{м1}})}{2,3 \log \frac{t_1 - t_{\text{м2}}}{t_2 - t_{\text{м1}}}}, \quad (5.10)$$

где $t_{1\text{бвв}}, t_{2\text{бвв}}$ – соответственно, температура воздуха на входе и выходе БВА, °С

$t_{\text{м1}}, t_{\text{м2}}$ – соответственно, температура гранул на входе и выходе БВА, °С;

Потери тепла в окружающую среду определяем по формуле (5.11), Вт/кг.

$$Q_{\text{пот}} = \frac{K_{\text{БВА}} \cdot F_{\text{БВА}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}}{W_{\text{уд}}} \quad (5.11)$$

По представленным выражениям, используя численные значения, проведем теплотехнический расчет БВА. Для этого определим и выберем основные исходные данные: температура ТУ на входе и выходе БВА $t_{\text{вх}} = 20^0 \text{ С}$, $t_{\text{вых}} = 50^0 \text{ С}$; коэффициент заполнения БВА $\varphi_{\text{зап}} = 0,2$; теплоемкость ТУ $C_{\text{ту}} = 1256 \text{ кДж/(кг}^0\text{С)}$. Объем БВА $V_{\text{БВА}} = 0,39 \text{ м}^3$, площадь внешней поверхности теплообмена БВА, $F_{\text{БВА}} = 2,57 \text{ м}^2$; температура входящего в электрокалорифер воздуха (принимая среднегодовую) – $t_0 = 3,6^0 \text{ С}$; атмосферное давление в данном регионе $P_{\text{атм}} = 745 \text{ мм рт ст (99,4 кПа)}$; удельная теплота парообразования при $t_0 - r_0 = 2453 \text{ кДж/кг}$; давление насыщенного пара при $t_0 - P_{\text{нас.1}} = 0,8 \text{ кПа}$; температура воздуха на выходе из электрокалорифера t_1 и входе в БВА $t_2 - t_1 = t_2 = 120^0 \text{ С}$; удельная теплота парообразования при $t_2 - r_2 = 2202 \text{ кДж/кг}$; давление насыщенного пара при $t_2 - P_{\text{нас.2}} = 101,32 \text{ кПа}$; температура воздуха на выходе из БВА – $t_3 = 60^0 \text{ С}$; давление насыщенного пара при $t_3 - P_{\text{нас.3}} = 19,93 \text{ кПа}$; удельная теплота парообразования при $t_3 - r_3 = 2380 \text{ кДж/кг}$; относительная влажность воздуха в БВА – $W_{\text{БВА}} = 18\%$; относительная влажность воздуха (среднегодовая) $W_{\text{ср.г}} = 80\%$;

Влагосодержание: поступающего в электрокалорифер воздуха (X_0 , кг/кг), поступающего в БВА ($X_2 = X_1$) и выходящего из БВА (X_3), определяем по формуле (5.3)

$$X_0 = \frac{0,622 \cdot 0,80 \cdot 0,8}{99,4 - 0,80 \cdot 0,8} = 0,004 \text{ кг/кг}; \quad X_1 X_2 = \frac{0,622 \cdot 101,32 \cdot 0,8}{99,4 - 101,32 \cdot 0,8} = 0,62 \text{ кг/кг};$$

$$X_3 = \frac{0,622 \cdot 19,9 \cdot 0,17}{99,4 - 19,9 \cdot 0,17} = 0,022 \text{ кг/кг}.$$

Энтальпия наружного воздуха на входе в электрокалорифер, входе в БВА и выходе из него

$$h_0 = (1,01 + 1,971 \cdot 0,004) \cdot 3,6 + 2493 \cdot 0,004 = 13,64 \text{ кДж/кг};$$

$$h_1 = h_2 = (1,01 + 1,971 \cdot 0,62) \cdot 120 + 2202 \cdot 0,62 = 1632,84 \text{ кДж/кг};$$

$$h_3 = (1,01 + 1,971 \cdot 0,022) \cdot 60 + 2380 \cdot 0,022 = 115,54 \text{ кДж/кг}.$$

Масса гранул на начальной ($G_{\text{нач}}$) и конечной ($G_{\text{кон}}$) стадиях процесса сушки, при начальном ($W_{\text{нач.гр}}=18\%$) и конечном ($W_{\text{кон.гр}}=5\%$) влагосодержании гранул. Производительность БВА по абсолютно сухим гранулам – $G_{\text{сух}}=300 \text{ кг/ч}$;

Количество удаляемой влаги (5.5)

$$W_{\text{уд}} = 300 \cdot \frac{18,0 - 5,0}{100 - 18,0} = \frac{47,4 \text{ кг}}{\text{ч}} = 0,013 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Напряжение БВА по удаляемой влаге (5.6)

$$A = \frac{47,4}{0,39} = 121,53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{ч}.$$

Удельный расход сухого воздуха ($L_{\text{уд}}$), проходящего через БВА при сушке гранул, кг/кг (5.7)

$$L_{\text{уд}} = \frac{1}{0,62 - 0,022} = 1,66 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Общий расход тепла, требуемого для сушки гранул в БВА ($q_{\text{БВА}}$), кДж (5.8)

$$q_{\text{БВА}} = 1,66 \cdot (1632,84 - 115,54) = 2\,458,02 \text{ кДж/кг} = 0,68 \text{ кВт/кг}$$

Общий коэффициент теплопередачи БВА ($K_{\text{БВА}}$), при следующих исходных данных: коэффициент теплопередачи от сушильного агента к стенке БВА, $\alpha_1 = 8,4 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, коэффициент теплопередачи от стенки БВА к теплоизоляции, $\alpha_2 = 8,9 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$; коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1 = 50,0 \text{ Вт/(м К)}$, коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_2 = 0,151 \text{ Вт/(м К)}$; толщина стенки БВА $\delta_1 = 0,005 \text{ м}$; толщина теплоизоляции $\delta_2 = 0,050 \text{ м}$; толщина защитного кожуха $\delta_3 = 0,001 \text{ м}$.

$$K_{\text{БВА}} = \frac{1}{\frac{1}{8,4} + \frac{1}{8,9} + \left(\frac{0,005 + 0,001}{50,0} \right) + \frac{0,050}{0,151}} = 1,77 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}.$$

Расчет средней разности температур при движении гранул и сушильного агента в противотоке.

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(120 - 50) - (60 - 20)}{2,3 \log \frac{(120 - 20)}{(60 - 50)}} = 13,04.$$

Потери тепла в окружающую среду на 1 кг испаряемой влаги

$$Q_{\text{пот}} = \frac{1,77 \cdot 2,62 \cdot 13,04}{40,29} = 1,5 \text{ Вт/кг.}$$

Выполненный нами тепловой расчет БВА позволяет определить основные теплотехнические характеристики: напряжение БВА по испаряемой влаге $A=121,53 \text{ кг/м}^3\text{ч}$; потери тепла в окружающую среду на 1 кг испаряемой влаги $Q_{\text{пот}}=1,5 \text{ Вт/кг}$; общий коэффициент теплопередачи $K_{\text{БВА}}=1,77 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$; общий расход тепла, требуемый для сушки гранул $q_{\text{БВА}}=0,68 \text{ кВт/кг}$.

5.5. Технологический регламент получения агломерированного технического углерода в барабанно-винтовом агрегате непрерывного действия.

Настоящий технологический регламент на производство агломерированного технического углерода, получаемого способом низкотемпературного термолиза ($T \leq 500^\circ\text{C}$) органических техногенных материалов, рекомендован для реализации научно-технических разработок на производственной площадке по переработке ТКО ООО «ТК «Экотранс». В основу данного технологического регламента положены результаты экспериментальных исследований процесса агломерирования ТУ и опытно-промышленных испытаний БВА при различных технологических режимах.

1. Гранулируемый технический углерод является продуктом низкотемпературного термолиза органических отходов, в т.ч. резинотехнических и ТКО, при температуре $450-470^\circ\text{C}$.
2. Перед началом процесса гранулирования необходимо провести классификацию ТУ, отделив крупные агломераты и спеки.
3. Для отделения включений металлов проводят магнитную сепарацию.

4. Подготовленный ТУ шнековым транспортом подается в рециркуляционный смеситель комбинированного действия (патент РФ № 2022112968) с дозировкой и вводом связующего.

5. Связующее – 15% водный раствор неионогенных ПАВ.

6. Для предотвращения образования крупных агломератов и получения некондиционных зародышей, связующее вводится в распыленном состоянии, дозированно. Норма расхода связующего $18 \div 20\%$ масс частей от агломерируемого ТУ.

7. Полученная в смесителе композиционная смесь шнековым транспортом подается в приемный бункер питателя БВА и далее на вход спиралевидного блока микрогранулирования.

8. В рабочей зоне технологического комплекса необходимо обеспечить систему аспирации, обеспечивающую, согласно гигиеническим нормам ГН 2.2.5.3532-18, величину ПДК не превышающую 6 мг/м^3 .

9. Оператор БВА в рабочей зоне должен находиться в противопылевом респираторе.

10. Технологический режим агломерирования выбирается исходя из требуемого размера конечных гранул. Для адсорбентов жидких сред он составляет 2-5 мм, при этом – обороты камеры агломерирования 10-12 об/мин, обороты вала винтовых лопастей 30-40 об/мин.

11. Основные физико-механические характеристики получаемых гранул: насыпная плотность сухих гранул $\rho_{\text{нас}} = 600 \div 700 \text{ кг/м}^3$; конечная влажность $W_{\text{кон}} = 5 \div 7\%$; прочность сухих гранул $\sigma_{\text{сж}} = 220 \div 250 \text{ кПа}$.

12. Производительность шнекового питателя устанавливается меньшей или равной производительности БВА – $Q_{\text{шп}} \leq Q_{\text{БВА}}$.

13. БВА устанавливается на площадке строго горизонтально. Для исключения осевого смещения предусматриваются специальные ограничители.

14. Технологический процесс агломерирования ТУ предусматривают возврат просыпи в камеру агломерирования.

15. Конструктивное исполнение ДВЛ и ОВЛ различных зон агломерирования и их крепление на приводном валу позволяет изменение

варьируемых параметров: угла наклона винтовых поверхностей, расстояний между устройствами, количества устройств и др.

16. Конструктивное исполнение БВА предусматривает герметизацию основных узлов агрегата и исключение теплопотерь.

17. Гранулированный ТУ затаривается в крафт-мешки или Биг-Бэги и поступает на склад хранения.

18. На каждую партию гранулированного ТУ составляется паспорт качества с указанием гранулометрического состава и основных физико-механических характеристик п.11. и др.

5.6. Технико-экономическая эффективность получения технического углерода способом низкотемпературного термолиза и использования агломерированной продукции.

Проведенные нами экспериментальные и опытно-промышленные испытания БВА подтвердили технологическую эффективность процесса агломерирования ТУ термолизной технологии, работоспособность и эксплуатационную надежность агрегата. Агломерируемый ТУ может быть использован для различного технологического назначения: как наполнитель композиционных смесей; изготовления различных технических и строительных изделий; при производстве лакокрасочных материалов и др. Технический углерод в агломерированном состоянии обладает также высокими адсорбционными свойствами при очистке загрязненных жидких сред. Так, по ионам тяжелых металлов $A = 38,5 \text{ мг/г}$, а $Cp = 3000 \text{ мг/дм}^3$; по метиленовому синему при $Cp=25$ и 50 мг/л – 92-98%; по нефтемаслосемкости-13,3-15,3 кгУВ/кг ТУ.

Определим годовую производительность технологической линии $Q_{\text{год}}$, учитывая, что оборудование работает в две смены

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \cdot T_{\text{ном}} \cdot K_{\text{экт. исп.}} \quad (5.13)$$

где $Q_{\text{час}}$ – часовая производительность технологической линии по исходному сырью (ТКО) - 0,5 т.

$T_{\text{ном}}$ — номинальный фонд рабочего времени, час;

$K_{\text{экспл}}$ — коэффициент экстенсивного использования - 0,87.

Количество выходных и праздничных дней при пятидневной рабочей неделе, согласно производственному календарю, составляет 118 дней.

$$T_{\text{ном}} = (T_{\text{кал}} - T_{\text{вых., праздн.}}) \cdot T_{\text{см. час}} = (365 - 118) \cdot 8 \cdot 2 = 3952 \text{ час.} \quad (5.14)$$

$$Q_{\text{ТКО}} = 0,5 \cdot 3952 \cdot 0,87 = 1719,00 \text{ т.}$$

В таблице 5.4 представлены исходные данные для проведения расчета.

Таблица 5.4 – Исходные данные для проведения расчета ТЭО

Наименование	Ед. изм.	Значение
Производительность установки низкотемпературного термолиза по исходному сырью	Кг/ч	500,00
Стоимость переработки 1 тонны ТКО на ООО «ТК «Экотранс» способом низкотемпературного термолиза	Руб.	2 122,53
Выход технического углерода из 1 тонны ТКО	Кг.	300-330,00
Производительность БВА по исходному сырью	Кг/ч	300,00
Затраты на переработку ТКО для получения 1 т технического углерода	Руб.	6 367,59
Стоимость изготовления БВА для агломерирования ТУ	Руб.	3 200 000,00
Стоимость изготовления линии низкотемпературного термолиза	Руб.	8 250 000,00
Затраты на подготовительные работы	Руб.	580 000,00
Инвестиции в оборотный капитал	Руб.	1 280 000,00
Общие инвестиционные затраты	Руб.	13 310 000,00
Количество обслуживающего персонала при работе в две смены	Чел.	7
Заработная плата одного сотрудника	Руб.	38 572,00

Принимаем выход ТУ из 1 тонны ТКО 330 кг (таблица 5.4), следовательно годовая производительность по техническому углероду $Q_{\text{ТУ}} = 1719,00 \cdot 0,33 = 567,3 \text{ т.}$

Выход товарных гранул из БВА составляет 85%. Годовая производительность по агломерированным адсорбентам – $Q_{\text{ГР}} = 567,3 \cdot 0,85 = 482,2 \text{ т.}$

Стоимость гранулированных адсорбентов для очистки жидких сред от нефтепродуктов, по данным интернет источников, начинается от 50,0 руб. за килограмм или 50 тыс.руб. за тонну. Стоимость реализации, производимых на ООО «ТК «Экотранс» адсорбентов, с учетом создания конкурентноспособной цены

принята в расчетах – 27тыс. руб. за тонну. В таблице 5.5, представлен план производства и продаж агломерированного ТУ в виде адсорбента.

Таблица 5.5 – План производства и продаж агломерированного ТУ

Показатель	1	2	3	4
Объём производства, т	482,2 т	482,2 т	482,2 т	482,2 т
Цена, тыс. руб.	27,00	27,00	27,00	27,00
Объём продаж, тыс. руб.	13 019,40	13 019,40	13 019,40	13 019,40

Амортизация основных средств на предприятии начисляется линейным способом при норме 8%. Исходя из общей стоимости оборудования 11 450,00 тыс.руб., сумма амортизационных отчислений составит 916, 00 тыс. руб.

Состав общих затрат на производство 1 т. гранулированного адсорбента представлен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Текущие затраты на производство 1 т продукции

Составляющие себестоимости 1 тн. гранулированного продукта	Норма расхода на 1т	Затраты на 1 т, руб.
Затраты на сырье, кг	1 000	6 367,6
Электроэнергия, кВт•ч	20.0	118.0
Упаковка (Биг-Бэг), шт.	1	750.0
Затраты на связующее, кг	80	3 200.0
Затраты на оплату труда		3 240
Отчисления на соц.нужды (30%)		972
Прочие расходы		831,5
Итого себестоимость производства		15 493,0

Оценку эффективности инвестиций в реализацию проекта можно провести с помощью значений следующих показателей: чистого приведенного дохода (NPV), внутренней нормы рентабельности (IRR); индекса прибыльности (PI); периода окупаемости вложенных средств (PP).

Для получения численных значений, указанных выше показателей, необходимо составить план денежных потоков (таблица 5.7) по соответствующим видам деятельности, а именно: инвестиционной, операционной, финансовой. Также, принимая во внимание ключевую ставку ЦБ РФ, необходимо определить ставку дисконтирования, для дальнейшего расчета коэффициента дисконтирования.

Ставка дисконтирования — расчетная величина, которая позволяет оценить доходность будущих инвестиций. По оценочным расчетам, учитывая, что ключевая ставка ЦБ РФ на 09.02.2023 – 9,5%, с учетом возможных рисков, примем ставку дисконтирования равной 17%. Источник финансирования – собственные средства организации – чистая прибыль и амортизационные отчисления.

Рассчитаем коэффициент дисконтирования

$$K_d = \frac{1}{(1 + r)^n}. \quad (5.15)$$

Таблица 5.7 – План денежных потоков

Показатель, тыс.руб.	0	1	2	3	4
Инвестиционная деятельность					
Стоимость оборудования	-11 450,00				
Оборотный капитал	-1 280,00				
Подготовительные работы	- 580,00				
Итого:	-13 310,00				
Операционная деятельность					
Доход		13 019,40	13 019,40	13 019,40	13 019,40
Себестоимость продукции		7 470,72	7 470,72	7 470,72	7 470,72
В т.ч. амортизационные отчисления		916,00	916,00	916,00	916,00
Прибыль до налогов		5 548,68	5 548,68	5 548,68	5 548,68
Налог на прибыль, 20%		-1 109,73	-1 109,73	-1 109,73	-1 109,73
Чистая прибыль		4 439,05	4 439,05	4 439,05	4 439,05
Чистый доход операционной деятельности		5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
Финансовая деятельность					
Собственные средства	13 310,00				
Всего средств	13 310,00				
Сальдо	0	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
Денежный поток	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
Коэф-т дисконта (при 17%)	1,0000	0,8547	0,7305	0,6244	0,5337
Чистый приведенный доход	-13 310,00	4 576,96	3 911,86	3 343,69	2 857,99
Чистый приведенный доход нарастающим итогом	-13 310,00	-8 733,04	-4 821,18	-1 477,49	1 380,50

Проведем расчет числовых значений показателей для оценки эффективности проекта.

Чистый приведенный доход (NPV) – характеризует результат инвестирования. Представляет собой разницу между дисконтированными денежными поступлениями от проекта и дисконтированными вложениями в проект.

$$NPV = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} - S, \quad (5.16)$$

где NPV – чистый приведенный доход; t – период реализации проекта; CF_i – денежный поток i-го периода; r – ставка дисконтирования (17%); S – сумма первоначальных вложений.

При $NPV > 0$, проект рекомендуется принять к реализации.

В нашем случае: $NPV = 1\,380,50$ тыс. руб, следовательно проект можно принять к осуществлению, так как он является экономически эффективным.

Индекс доходности (PI)

Индекс доходности (PI) – отношение приведенных денежных потоков от инвестиционных вложений к их сумме. Значение данного индекса позволяет сравнить начальные инвестиции с будущими приведенными денежными потоками.

$$PI = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \div I. \quad (5.17)$$

$$PI = (4\,576,96 + 3\,911,86 + 3\,343,69 + 2\,857,99) / 13\,310,00 = 1,10$$

Внутренняя норма рентабельности (IRR)

Внутренняя норма рентабельности (IRR) – ставка дисконтирования, при которой сумма поступлений и отчислений дают нулевой интегральный экономический эффект.

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (r_2 - r_1), \quad (5.18)$$

где r_1 и r_2 – соответственно нижняя и верхняя ставки дисконтирования.

Таблица 5.8 – Исходные данные для расчета внутренней нормы рентабельности

Годы осуществления проекта	2023	2024	2025	2026	2027	NPV	IRR
Чистый денежный поток	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05		
Ставка дисконта r_i							
0%	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05	8 110,20	
17%	-13 310,00	4 576,96	3 911,86	3 343,69	2 857,99	1 380,50	
20%	-13 310,00	4 462,36	3 718,54	3 098,96	2 582,20	-552,06	19,19%

$$IRR = 17 + \frac{1\,380,50}{1\,380,50 - (-552,06)} \times (20 - 17) = 19,14\%. \quad (5.19)$$

Полученное значение внутренней нормы рентабельности выше принятой нами ставки дисконтирования (17%). По рассчитанным показателям проект можно считать эффективным.

Период окупаемости проекта (PP).

Рассчитаем простой срок окупаемости проекта (PP) и дисконтированный (DPP).

$$PP = I_0/P_t, \quad (5.20)$$

где I_0 – сумма инвестиций.

P_t – чистые денежные поступления за год, $P_t = 5\,355,05$

$$PP = 13\,310,00/5\,355,05 = 2,48$$

Простой срок окупаемости проекта – 2,5 года.

$$P_{dt} = 14\,690,5/4 = 3\,672,6$$

$$DPP = 13\,310,00/3\,672,6 = 3,62$$

Дисконтированный срок окупаемости проекта – 3,62 года.

Таким образом, по рассчитанным показателям проект можно считать эффективным.

5.7. Выводы

1. Разработана патентозащищенная технология (способ и устройства) низкотемпературного термолiza органических ТКО и технические средства для ее

реализации (пат. РФ № 2744224, № 2773396, Евразийский пат. № 043162, № 043232), позволяющая получать из органических ТКО высокодисперсный технический углерод, обладающий высокими адсорбционными способностями

2. В реальных производственных условиях ООО «ТК «Экотранс», совместно с ИТР предприятия, отработаны технологические режимы термолизных технологий производительностью ($Q=40-50$ кг/ч и $Q=500$ кг/ч), для переработки органических ТКО с различными физико-механическими характеристиками и получения ТУ с калорийностью ($Q=5600$ ккал/кг).

3. Разработан, изготовлен и испытан технологический модуль, включающий патентозащищенный БВА (пат. РФ № 2748629, Евразийский пат. № 040258) для производства агломерированного ТУ различного технологического назначения.

4. Разработана инженерная методика расчета теплотехнических параметров БВА, позволяющая определить его основные теплотехнические характеристики: напряжение по испаряемой влаге $A=121,53$ кг/м³ч; расход тепла $q_{\text{БВА}}=0,68$ кВт/кг; общий коэффициент теплопередачи $K=1,77$ Вт/(м² К) при остаточной влажности агломерированного ТУ $W_{\text{ост}} = 5\%$

5. Установлены рациональные технологические режимы процесса агломерирования технического углерода в БВА производительностью $Q_{\text{бва}} = 300$ кг/ч.

6. Разработан технологический регламент получения агломерированного ТУ в БВА и условия варьирования технологических режимов его работы.

7. Произведен расчет технико-экономической эффективности от использования полученного ТУ – гранулированного адсорбента для очистки органических жидких сред от нефтепродуктов. Чистый дисконтированный доход составляет 1380,50 тыс.руб/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам анализа научно-технических разработок и исследований отечественных и зарубежных ученых установили актуальность совершенствования низкотемпературных термолизных технологий переработки органических техногенных материалов и получения из них высококалорийной продукции – технического углерода с последующим его агломерированием. Установлена целесообразность разработок отечественных патентозащищенных способов и специального оборудования непрерывного действия для агломерирования ТУ.

2. Разработана механо-реологическая модель процесса гранулообразования ТУ с учетом его специфических физико-механических характеристик и физико-химических свойств. Получены аналитические выражения, описывающие постадийный процесс агломерирования полидисперсных техногенных материалов.

3. Разработаны стендовые экспериментальные установки барабанного типа с винтовыми устройствами различного геометрического профиля и конструктивного исполнения. Проведено физическое моделирование исследуемых процессов с подтверждением закономерностей постадийного агломерирования ТУ, аналитически описанных в механо-реологической модели.

4. Разработаны патентозащищенные способы и устройства термолизной переработки органических ТМ и получения ТУ со стабильными физико-механическими характеристиками, а также его агломерирования в барабанно-винтовом агрегате.

5. Разработаны методы расчета основных, кинематических, конструктивно-технологических и энерго-силовых параметров БВА, оснащенного винтовыми устройствами.

6. Получены математические выражения для описания процессов агломерирования ТУ в БВА на различных стадиях:

- микрогранулирования и образования зародышей в спиралевидном устройстве с последующим упрочнением их поверхностного слоя

двухзаходными винтовыми лопастями в режиме технологического рециклинга;

- процесса агломерирования ТУ однонаправленными винтовыми лопастями при объемно-пространственном перемещении микрогранул;

- процесса классификации полифракционного гранулята разнонаправленными однозаходными винтовыми лопастями.

7. Получены математические выражения для расчета мощности привода агломерирующих винтовых устройств и привода барабанно-винтового агрегата.

8. С использованием современных средств исследований и аппаратурного измерения изучен морфологический состав и физико-механические характеристики ТУ: средний размер поризованных частиц – $40,0 \div 44,0$ мкм; средний размер пор в образце – $135,5 \div 140,5$ Å; удельная поверхность по пятиточечному методу БЭТ – $38,4 \div 38,5$ м²/г, подтверждающие повышенную адсорбционную способность полидисперсного материала.

9. Проведены экспериментальные исследования основных закономерностей процесса агломерирования ТУ: $\rho_{\text{сл}}, \sigma_{\text{сж.сл.}}, Q_{\text{тг}}, \mathcal{E}_{\text{ист}} = f(C_{\text{св}}, \varphi_{\text{зап}}, n_{\text{в.овл}})$ с использованием ЦКОП-2³. Установлены рациональные значения варьируемых параметров: содержание связующего ($C_{\text{св}} = 17 - 19\%$); коэффициент заполнения камеры агломерирования ($\varphi_{\text{зап}} = 0,18 - 0,2$); частота вращения вала ОВЛ ($n_{\text{в.овл}} = 30 - 50$ об/мин); процентный выход товарных гранул ($Q_{\text{тг}} = 83\%$) и относительное сопротивление истиранию гранулята ($\mathcal{E}_{\text{ист}} = 60\%$).

10. В рамках выполняемого проекта НОЦ исследованы адсорбционные свойства ТУ. Максимальные показатели составили: по ионам тяжелых металлов А = 38,5 мг/г, а Ср = 3000 мг/дм³; по метиленовому синему при Ср=25 и 50 мг/л – 92-98%; по нефтемаслоемкости-13,3-15,3 кгУВ/кг ТУ.

11. Основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований разработан и создан, для ООО «ТК «Экотранс» опытно-промышленный БВА ($Q=250 \div 300$ кг/час, установленная мощность $P=5,0$ кВт) для агломерирования ТУ с регламентированными характеристиками гранул: размер $(2 \div 5) \times 10^{-3}$ м; насыпная плотность $\rho_0 - 600 \div 700$ кг/м³; прочность слоя

$\sigma_{\text{сж.сл.}}=(220\div 250)$ кПа; угол естественного откоса гранул в статическом состоянии $\alpha_{\text{отк.ст.}}-26\div 30^{\circ}$; коэффициент внутреннего трения $\varphi_{\text{тр}}= 0,4\div 0,5$.

12. Разработан технологический регламент получения агломерированного ТУ в БВА с заданными физико-механическими характеристиками. Техничко-экономический эффект при использовании ТУ в качестве адсорбента при очистке нефте-содержащих загрязненных жидких сред составляет 1 380, 50 тыс. рублей в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численность населения в мире по данным ООН [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.un.org/ru/global-issues/population.html>.
2. ГОСТ 30772 – 2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-30772-2001.html>.
3. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020 №1, <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05ECOR120.html.
4. Количество отходов на душу населения [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://iz.ru/1241795/evgeniia-pertceva/otkhodnyi-riad-sakhalintcy-stali-liderami-po-kolichestvu-vybroshennogo-musora.html>.
5. Российский экологический оператор [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://reo.ru.html>.
6. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555.html>.
7. Королева Е.Б. Циркулярная экономика на уровне города. С-Пб 2021[Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.ecoprofi.info/docs/circular_economy_at_the_city_level_ru_2021.pdf.html.
8. Денисов В. В. Основы инженерной экологии: учебное пособие / Денисов В.В., Денисова И. А., Гутенев В. В., Фесенко Л. Н.. Ростов н/Д : Феникс, 2013. - 623 с.
9. Федеральный закон № 622-ФЗ от 25.12.2023 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312250003.html>.
10. Федеральный закон от 4 августа 2023 года № 451-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" и отдельные

законодательные акты Российской Федерации" [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://rg.ru/documents/2023/08/08/fz451-site-dok.html>.

11. Губернаторов А.М. Экономические аспекты управления твердыми коммунальными отходами: Российская и зарубежная практика / А.М. Губернаторов, Е.Е. Ломов // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 5-2. – С. 278-284;

12. Системы управления бытовыми отходами разных стран [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://stolypin.institute/analytics/sistemy-upravleniya-bytovymi-othodami-raznyh-stran-retsepty-dlya-rossii/.html>.

13. Бориславский Л.И. Государственный экологический контроль в США / Л.И. Бориславский // Журнал Российского права. – 2010. - №4. – С. 105-106.

14. U.S. Environmental Protection Agency [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.epa.gov.html>.

15. World Health Organization. Circular economy and health: opportunities and risks [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/374917/Circular-Economy_EN_WHO_web_august-2018.pdf.html.

16. Закон «Китайской Народной Республики о предотвращении и контроле загрязнения окружающей среды твердыми отходами» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://news.solidwaste.ru/wp-content/uploads/2020/12/Uvedomlenie-MEE-53-2020.pdf.html>.

17. Федеральный закон об отходах производства и потребления (с изменениями на 7 апреля 2020 года) редакция, действующая с 14 июня 2020 год [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901711591.html>.

18. Стратегия экологической безопасности РФ [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/35b/proekt_strategii.pdf.html.

19. Стратегия национальной безопасности РФ [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/135405/.html>.

20. Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами в Российской Федерации [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/499041934.html>.

21. Паспорт «Национального проекта Экология» [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/.
22. Постановление правительства РФ №1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/3hAvrl8rMjp19BApLG2cchmt35YBPN8z.pdf>.
23. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления до 2030 года. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/556353696.html>.
24. Милютин А. Г. Экология. Основы геоэкологии / А.Г. Милютин, Н.К. Андросова, И.С. Калинин, А.К. Порцевский // М. : Издательство Юрайт, 2013. - 542 с.
25. Технологические возможности использования термолиза при переработке техногенных материалов / Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов [и др.] // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды : Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Алушта, 04–08 июня 2018 года / Ответственный редактор И.В. Старостина. Том III. – Алушта: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 200-207.
26. Севостьянов, В. С. Термолиз в переработке полимерных отходов / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Всероссийская научная конференция, Белгород, 14–18 октября 2019 года. Том Часть 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 125-130.
27. Ресурсоэнергосберегающие технологии и технические средства для переработки твердых коммунальных отходов / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, Н. Т. Шеин [и др.] // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 319-326.
28. Глаголев С.Н. Технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов / С. Н. Глаголев, Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов [и др.] // Экология и

промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 12. – С. 11-15. – DOI 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15.

29. Современные технические решения по переработке твердых бытовых отходов [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.waste.ru/modules/-section/item.php?itemid=61.html>.

30. Минпромторг России. Альбом отечественных производителей оборудования для отрасли обращения с отходами производства и потребления. Москва. 2019 – 110с.

31. Пиролизная установка ТБО [Электронный ресурс] / Режим доступа URL: <https://www.globalbeston.ru/piroliznaya-ustanovka-tbo/.html>.

32. Золотарев Г.М. Новая технология и оборудование экологически чистого обращения с твердыми коммунальными отходами / Г.М. Золотарев // Вестник МАНЭБ, Том 27, №3, 2022. С-Пб, 2022 - 101с.

33. Пат. 2613063 С2 RU, МПК F23G 5/027, B10B 53/00 (2006.01) Пиролизный реактор Золотарева / Г.М. Золотарев; заявитель и патентообладатель Золотарев Г.М. – 2015114911; заявл. 21.04.2015; опубл. 15.03.2017, Бюл. №8.

34. Низкотемпературный термолиз в переработке резинотехнических отходов / К. З. Бочавер, В. Н. Клушин, П. Н. Сухоруков, Р. Ю. Шамгулов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 11. – С. 35-40.

35. Бочавер, К. З. Модернизация химического оборудования: спиральный транспортер - интенсивный химический реактор / К. З. Бочавер, В. Н. Клушин, Р. Ю. Шамгулов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2014. – № 8. – С. 30-33.

36. Пат. 2460743 С2 RU, МПК C08J 11/20, C08L 21/00, B29B 17/00 (2006.01) Процесс и установка по переработке резиносодержащих отходов / Бочавер К.З., Шамгулов Р.Ю.; заявитель и патентообладатель Бочавер К.З. – 2010120317/05 заявл.21.05.2010; опубл.27.11.2011, Бюл. №25.

37. Пат. 2448758 С2 RU, МПК B01D 46/02 (2006.01) Рукавный фильтр для очистки га от пыли с короткоимпульсной продувкой / Бочавер К.З., Шамгулов Р.Ю.; заявитель и патентообладатель Бочавер К.З. – 2010120320/05 заявл. 21.05.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. №12.

38. Bocaver K Z 2018 Spiral reactors in heterogeneous technological processes (Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing) pp 135-147.
39. Шамгулов, Р. Ю. Инновационные разработки при переработке твердых коммунальных отходов / Р. Ю. Шамгулов, В. С. Севостьянов, В. В. Оболонский // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 19–23 октября 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 280-284.
40. Пат. 2744225 С1 RU, МПК F23G 5/027, В09В 3/00 (2006.01) Способ низкотемпературной переработки органических твердых коммунальных отходов и установка для его реализации / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 2020124265 заявл. 22.07.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. №7.
41. Пат. 2773396 С1 RU, МПК F23G 5/027, В09В 3/00 (2006.01) Установка для низкотемпературного термолиза твердых коммунальных и промышленных отходов/ Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 2021134475 заявл. 24.11.2021; опубл. 03.06.2022, Бюл. №16.
42. Пат. 043162 В1 ЕА, МПК F23G 5/027, В09В 3/00 (2006.01) Способ низкотемпературной термолизной переработки органических твердых коммунальных отходов и устройство для его реализации / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - ЕА 202100188 заявл. 04.07.2021; опубл. 27.04.2023, Бюл. № ЕАb22304.
43. Пат. 043232 В1 ЕА МПК F23G 5/027, В09В 3/00 (2006.01) Установка для низкотемпературного термолиза твердых коммунальных и промышленных отходов/ Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н.; заявитель и

патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 202200075 заявл. 04.07.2022; опубл. 28.04.2023, Бюл. № ЕАb22304

44. Ноу-Хау «Способ низкотемпературной термодеструкции техногенных материалов» Св-во о регистрации Ноу-Хау №20220031 от 27.10.2022.

45. Шамгулов, Р. Ю. Существующие технологические процессы и технические средства переработки твердых коммунальных отходов / Р. Ю. Шамгулов, Ю. С. Гридчин, А. Н. Гончаров // XII Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство" : Материалы форума, Белгород, 01–20 октября 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1663-1667.

46. Шамгулов, Р. Ю. Ресурсо-энергосберегающая технология переработки техногенных материалов / Р. Ю. Шамгулов, Ю. С. Гридчин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 2864-2867.

47. Термолизная технология переработки ТКО / В. С. Севостьянов, А. И. Везенцев, Р. Ю. Шамгулов, А. Е. Раздобарин // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология : Сборник докладов. Международная научная конференция, Алушта-Белгород, 01–05 июня 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 234-239.

48. Инновационные решения по переработке промышленных отходов органоминерального состава / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, И. В. Старостина, Н. В. Ненарочкина // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 101-105.

49. Суглобов, И. Р. Технология низкотемпературного термолиза для переработки органических техногенных отходов / И. Р. Суглобов, Р. Ю. Шамгулов, Н. В. Ненарочкина // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XV

Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 226-230.

50. Ресурсосберегающая термолизная технология и оборудование переработки органических техногенных материалов / Р. Ю. Шамгулов, В. С. Севостьянов, С. В. Ключев [и др.] // Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов, Казань, 21–22 марта 2023 года. – Казань: КНИТУ, 2023. – С. 814-818.

51. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste /Glagolev S., Shein N., Sevostianov V., Obolonsky V., Shamgulov R.. Ecology and Industry of Russia. 2020;24(12):11-15. (In Russ.) doi:10.18412/1816-0395-2020-12-11-15

52. Thermolysis technology and technical means for processing organic technogenic materials/ V. S. Sevostianov, N. T. Shein, R. U. Shamgulov & V. V. Obolonsky / In book: Digital Technologies in Construction Engineering. – 2022. – Т.173. – P. 329-335. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_42

53. Study of the material composition of carbon black obtained as a result of MSW thermolysis/ A. I. Vezentsev, V. S. Sevostianov, A. E. Razdobarin & R. U. Shamgulov / In book: Digital Technologies in Construction Engineering -2022-Т.173. – P. 167-174. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_22

54. Producing marketable products by low-temperature thermolysis of municipal solid waste / V.S. Sevostyanov, N.T. Shein, M.V. Sevostyanov, R.Yu. Shamgulov and V.V. Obolonsky/ IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science/ 1045 (2022) 012166 doi:10.1088/1755-1315/1045/1/012166

55. Шаповалов, В. Ю. Использование технического углерода и базальтовых фибро-наполнителей для изготовления изделий методом 3D-печати / В. Ю. Шаповалов, В. А. Бабуков, Р. Ю. Шамгулов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 2374-2379.

56. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber, Klyuev, S., Sevostyanov, V., Sevostyanov, M., Babukov, V., Shamgulov, R Case

Studies in Construction Material is link is disabled, 2022, 16,
DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01071

57. Милевски Дж. Наполнители для полимерных композиционных материалов / [Дж. Милевски, Г. Кац, Т.Х. Ферригно и др.] ; под ред. Г.С. Каца, Д.В. Милевски; пер. с англ. С.В. Бухарова [и др.] ; под ред. П.Г. Бабаевского // Справочное пособие, М.: Химия, 1981. – 736 с.

58. Бортников, В. Г. Основы технологии переработки пластических масс / В.Г. Бортников // Л.: Химия, 1983. – С. 80–84.

59. Эстрин Р.И. Объемы и размеры пор в первичных агрегатах технического углерода как факторы, влияющие на электрические характеристики вулканизатов / Р.И. Эстрин, Н. Я. Овсянников // Вестник МИТХТ. 2008. Т.3. № 3. С. 1-7

60. Гульмисарян, Т.Г. Технический углерод: морфология, свойства, производство / Т.Г. Гульмисарян, В.М. Капустин, И.П. Левенберг. – М. : Каучук и Резина, 2017. – 585 с.

61. 3.Wang T.K., Surface nanoroughness of carbon black / T.K. Wang. – New York, 2022. – 312 с.

62. Ильина Т.Н. Физико-химические основы процессов агломерации дисперсных материалов и их аппаратное обеспечение: дис. д-ра техн. наук: 05.17.08/ Ильина Татьяна Николаевна. – Томск., 2011. – 397 с.

63. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в переработке дисперсных материалов: монография / Т.Н. Ильина. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2009 – 228 с.

64. Севостьянов, М. В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов[текст]: монография / М. В. Севостьянов. – Белгород : Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. – 205 с.

65. Севостьянов М.В. Теоретические основы, методология расчета и проектирования машин и агрегатов, технологических комплексов для компактирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью: дисс....докт.техн.наук: 05.02.13 / М.В. Севостьянов. – Тамбов : 2020. – 528с.

66. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Гонопольский А.М., Трефилова Я. А. Особенности выбора гранулирующего оборудования многокомпонентных

полидисперсных шихт со вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа / Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». №1/2013

67. Макаренков Д.А. Исследование процесса компактирования и окатывания дисперсных сред с регулируемыми реологическими характеристиками: дисс.канд.техн.наук: 05.17.08 / Д.А. Макаренков. – М.: МГУИЭ, 2000. – 260 с.

68. Christian Renk, Peter Banik // Fluidised Bed Granulation of Ammonium Sulphate. International Fertiliser Society. 2018. 26 p.

69. Dilip M. Parikh // Handbook of pharmaceutical granulation technology. Taylor & Francis group LLC. 2021. 867 p.

70. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина // М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.

71. Вилесов Н.Г. Процессы гранулирования в промышленности / Н.Г. Велесов, В.Я. Скрипко, В.Л. Ломазов, И.М. Танченко // «Техника», 1976 – 192 с.

72. Jim Litster, Bryan Ennis // The Science and engineering process. Springer-science + business media, b.v. 2013. 249 p.

73. А.Л. Майтаков Математическая модель процесса гранулообразования / Техника и технология пищевых производств. 2020 Т.50 № 3. С. 383-392.

74. Шкарпеткин Е.А. Вибрационно-центробежный гранулятор для формования композиционных смесей: дисс....канд.техн.наук: 05.02.13 / Е.А. Шкарпеткин. – Белгород.: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. – 209 с.

75. Генералов М.Б. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений / М.Б. Генералов, П.В. Классен // Машиностроение, 1984. – 192 с.

76. Newitt D.M. A contribution to the theory and practice of granulation / D.M. Newitt, F.M. Conwey-Fones // Trans, of the inst. of Chem. Eng. – 1958. – V.36. - № 6. – P. 422-442.

77. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. М.: Металлургия 1966. – 152 С.

78. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основы техники гранулирования/ М.: «Химия», 1982. – 272 с.

79. H. Rumpf, "The Strength of Granules and Agglomerates," Agglomeration, Interscience, New York, 1962, pp. 379-413
80. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений / М.: «Химия», 1975. – 224 с.
81. A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Sewille // Granulation / Handbook of powder technology 2007. V.11. 1379 p.
82. Макаренков Д.А. Техника и технология гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещенных процессов их подготовки / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров – Москва : Инфра-М, 2023 – 297 с. – (Научная мысль). – DOI: 10.12737/1873862.
83. Пат. №2381254 RU, МПК C10B 53/02 (2006/01). Пиролизная установка / П.Д. Шестаков, А.А. Чекалкин, Ю.В. Соколкин и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Наука – XXI». – № 2007141673/15; заявл. 09.11.2007; опубл. 10.02.2010, Бюл. №4.
84. Пат. №2725790 RU, МПК C10B 53/00 (2006.01), F23G 5/027 (2006.01). Установка пиролизной высокотемпературной переработки органического сырья / П.Ф. Джулай, И.О. Фильченков, Ф.Н. Трусов и др.; заявитель и патентообладатель П.Ф. Джулай, И.О. Фильченков, Ф.Н. Трусов. – №2019126905; заявл. 27.08.2019; опубл. 06.07.2020, Бюл. №19 – 1 с.
85. Пат. 2697274 RU, МПК B09B 3/00 (2006.01). Способ переработки твердых коммунальных и промышленных отходов / В.А. Чернопорт, Б.М. Лапшин, В.А. Аброськин; заявитель и патентообладатель В.А. Чернопорт, Б.М. Лапшин, В.А. Аброськин; - № 2018141008; заявл. 21.11.2018; опубл. 13.08.2019, Бюл. №23 – 2 с.
86. Пат. № 2147713 RU, МПК F23G 5/027 (2000.01). Способ термической переработки твердых отходов / А.Н. Попов, Л.А. Волохонский, А.В. Лебедев и др.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИЭТО»; - № 98118086/03; заявл. 30.09.1998; опубл. 20.04.2000, Бюл. №11.
87. Пат. №2616630 RU, МПК F23G 5/027 (2006.01), F23G 5/40 (2006.01), F23G 7/06 (2006.01). Способ термической переработки бытовых и промышленных отходов и устройство для его осуществления / В.А. Кокарев, В.В. Челноков, А.В. Матасов и

др.; заявитель и патентообладатель ООО «ТермоХимТех»; - № 2001609578; заявл. 17.03.2016; опубл. 18.04.2017, Бюл. №11 – 2 с.

88. Пат. №2460743 RU, МПК C08J 11/20, C08L 21/00, B29B 17/00 (2006/01). Процесс и установка для переработки резиносодержащих отходов / К.З. Бочавер, Р.Ю. Шамгулов; заявитель и патентообладатель К.З. Бочавер; - №2010120317; заявл. 21.05.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 25 – 1 с.

89. Пат. №2724741 RU, МПК C08J 11/00, C08J 11/04, F33J 5/027, F23J 7/12, B29B 17/00, C10B 53/02, C10B 53/07, B09B 3/00 (2006.01). Установка для переработки отходов / Ю.А. Кобаков; заявитель и патентообладатель Ю.А. Кобаков; - №2020108050; Заявл. 25.02.20; опубл. 25.06.2020, Бюл. №18 – 2 с.

90. Пат. №145466 RU, МПК F23G 5/027 (2006/01). Установка для пиролиза углеводородного сырья / Е.Н. Наumenко; заявитель и патентообладатель Е.Н. Наumenко; - № 2014116917/03; заявл. 25.04.14; опубл. 20.09.2014, Бюл. №6 – 1 с.

91. Пат. 2552259 RU, МПК F23G 5/027 (2006.01). Способ переработки бытовых и производственных отходов в печное топливо и углеродное вещество и устройство для его осуществления / С.В. Гунич, Т.И. Малышева; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерные транспортные системы» -№ 2013126238/03; заявл. 10.06.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 16 – 15 с.

92. Пат. № 2725935 RU, МПК C01B 33/12 (2006.01), C01B 32/324 (2017.01), C01B 32/348 (2017/01), C10B 53/02 (2006/01), C10B 57/10 (2006/01). Способ и устройство получения продукта, содержащего аморфный диоксид кремния и аморфный углерод / С.А. Мешков, Л.Р. Илнев, А.И. Масалевич и др.; заявитель и патентообладатель Л.Р. Илнев, А.И. Масалевич, В.Э. Таланов, М.Д. Богданов; - № 2020108527; заявл. 27.02.2020; опубл. 07.07.2020, Бюл. №19 – 2 с.

93. Пат. №2528670 RU, МПК B01J 2 /16 (2006.01). Способ и устройство для гранулирования в псевдооживленном слое / Федерико Зарди; № 2010132281/05; заявитель и патентообладатель; УРЕА КАСАЛЕ С.А. (СН); - Заявл. 19.12.2008; опубл. 20.12.2014, Бюл. №26 – 19 с.

94. Пат. №2152247 RU, МПК B01J 2/16 (2000.01). Способ гранулирования мелкодисперсных материалов / В.Г. Островский, С.П. Шеремет, О.Н. Иванов;

заявитель и патентообладатель; Государственное предприятие РФ Центральное научно-конструкторское бюро; - № 99106728/12; Заявл. 31.03.1999; опубл. 10.07.2000, Бюл. №19.

95. Пат. №2714473 RU, МПК B01J 2/14 (2006.01). Способ гранулирования мелкодисперсных материалов / А.С. Сахарова, Е.Г. Еремеев, М.В. Шершнева и др.; заявитель и патентообладатель; ФГБОУВО «ПГУПС Императора Александра I»; - № 2019121445; Заявл. 05.07.2019; опубл. 17.02.2020, Бюл. №5 – 1 с.

96. Пат. №2696468 RU, МПК B01J 2/22 (2006.01). Способ гранулирования порошков и устройство для его осуществления / Д.Н. Кравченко; заявитель и патентообладатель; Д.Н. Кравченко; - №2019101082; Заявл. 16.01.2019; опубл. 01.08.2019, Бюл. №22 – 1 с.

97. Пат. №2545252 RU, МПК F26B 11/04 (2006.01). Барабанно-винтовой сушильный агрегат для сушки гранулированных и сыпучих материалов / В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Кошуков А.В. и др.; заявитель и патентообладатель; ФГБОУВПО «БГТУ им. В.Г. Шухова»; №2013138030/06; Заявл. 13.08.2013; опубл. 27.03.2015, Бюл. №9 – 1 с.

98. Пат. №2394638 RU, МПК B01J 2/16 (2006.01). Устройство для обработки порошкообразного материала / Хюттлин Бергер; заявитель и патентообладатель; Хюттлин Бергер; - № 2007113015/15; заявл. 10.09.2004; опубл. 20.07.2010, Бюл. №20.

99. Пат. №2558893 RU, МПК B01J 2/10 (2006.01). Гранулятор / И.Ф. Шлегель; заявитель и патентообладатель; И.Ф. Щеголь; № 204119097/05; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. №22 – 8 с.

100. Пат. №2643046 RU, МПК B01J 2/00 (2006.01). Устройство для гранулирования / М.Я. Рыскин, Б.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель; М.Я. Рыскин, Б.А. Яковлев; - № 2017110627; заявл. 29.03.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. №4 – 1 с.

101. Pat. № ES2379075T3 Spain, Classifications B01J2/20, B29B 7/48. Process and apparatus for continuous wet granulation of powder material / REMON, Jean-Paul, VERVAET Chris, KELEB Eseldin y VERMEIRE, An; Priority to PCT/EP2003/013327, 26.11.2002 US 429214 P. Publication 20.04.2012.

102. Pat. № JP5192814B2 Japan, Classifications B01J2/20, B01F7/00208, B01F7/30, B02C18/00, A01K5/002. Kneading granulator / 哲 綿野裕喜 大石; Priority to JP2005033473 2005.02.09, Publication 2013.05.08.
103. Бобылев С.Н., Соловьева С.В. Циркулярная экономика и ее индикаторы для России / С.Н. Бобылев, С.В. Соловьева // Мир новой экономики. – 2020. – 14(2). – Стр. 63–72. DOI: 10.26794/2220-6469-2020-14-2-63-72.
104. Проект НОЦ №10089447. «Ресурсо-энергосберегающая инновационная технология по комплексной переработке ТКО полного технологического цикла обращения с отходами, с получением различных видов товарной продукции» 2020-2022 г.
105. Проект ЛабНОЦ 2021-2023 гг. «Разработка, исследования и опытно-промышленное освоение ресурсо-энергосберегающих инновационных технологии для производства товарной продукции и снижения экологической нагрузки на окружающую среду», по государственному заданию Минобрнауки РФ № FZWN-2021-0014.
106. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур-М.: Наука, 1966. – 400 с.
107. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учебное пособие для строительных вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447с.
108. Ничипоренко С.П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. -Киев.: Наукова думка, 1968. – 76с.
109. Фадеева В.С. Формирование структуры пластичных паст строительных материалов при машинной переработке. -М.: Стройиздат, 1972. – 222 с.
110. Исаев Е.А. Теоретическая модель формирования окатышей из сыпучих материалов в процессе их окомкования//Изв. Вузов «Горный журнал»; 1991. -№2. - С. 17-21.
111. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов. -М.: ВНИИЭСМ, 1994. -297 с.
112. Сулименко, Л. М. Агломерация порошкообразных силикатных материалов / В. В. Тимашев, Л. М. Сулименко, Б. С. Альбац // М. : Стройиздат, 1978. – 134 с.

113. Евтюков С.А. Построение механо-реологических моделей процесса взаимодействия рабочих органов строительного-дорожных машин со средой / С.А. Евтюков, А.А. Овчаров, И.В. Замараев // СПбГАСУ – СПб., 2011. – 59с.
114. Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов / Л. М. Сулименко, Б. С. Альбац // ВНИИЭСМ, 1994. – 297 с.
115. Севостьянов М.В. Ресурсосберегающий технологический комплекс для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона / М.В. Севостьянов, Т.Н. Ильина, И.А. Кузнецова и др. // Вестник ТГТУ, 2016 Том 22, № 2 С – 272 – 277.
116. Попильский Р.Я. Прессование порошковых керамических масс / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский // М. : Металлургия, 1983. - 176 с.
117. Севостьянов М.В. Теоретические и экспериментальные исследования рециркуляционного смесителя комбинированного действия / М. В. Севостьянов, А. М. Проценко, В. С. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов [и др.] // СТИН. – 2023. – № 5. – С. 17-20.
118. Проценко А. М. Технические средства и технологии получения агломерированных материалов из технического углерода / А. М. Проценко, Н. В. Ненарочкина, Р. Ю. Шамгулов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 9. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 306-310.
119. Севостьянов В.С. Разработка и исследование агрегатов рециркуляционного действия для смешения и агломерации техногенных композиционных смесей / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, М. В. Севостьянов [и др.] // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 106-110.
120. Севостьянов В.С. Технологический модуль для приготовления композиционных гранулированных смесей с техногенными компонентами / В. С. Севостьянов, А. М. Проценко, М. В. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов // Безопасность,

защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 187-190.

121. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. Для вузов / С.М. Тарг. – 15-е издание., стер. – М.: Высш. шк., 2005. -415с.

122. Пат. 2748629 С1 RU, МПК F26B 11/04 (2006.01). Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н., Оболонский В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 2020129204 заявл. 03.09.2020; опубл. 28.05.2021, Бюл. №16.

123. Пат. 040258 В1 ЕА, МПК E26B 11/04, E26B 21/04, E26B 21/06, E26B 21/10. Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н., Оболонский В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»; - ЕА202100189 заявл. 05.07.2021; опубл. 13.05.2022, Бюл. №ЕАb22205.

124. Ноу-Хау «Способ и устройство для гранулирования техногенных полидисперсных материалов» Св-во о регистрации Ноу-Хау №20220026 от 08.11.2022.

125. Шамгулов, Р. Ю. Разработка, исследования и опытно-промышленное освоение технологии агломерирования технического углерода / Р. Ю. Шамгулов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 12. – С. 124-137. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137.

126. Севостьянов В.С. Разработка технических средств для переработки и гранулирования технического углерода термолизной технологии / В. С. Севостьянов, А. С. Апатенко, Р. Ю. Шамгулов, А. М. Проценко // СТИН. – 2022. – № 3. – С. 37-40.

127. Шамгулов, Р. Ю. Конструктивно-технологическое совершенствование оборудования для агломерирования материалов / Р. Ю. Шамгулов, А. Н. Гончаров, Ю. С. Гридчин // XII Международный молодежный форум "Образование. Наука.

Производство" : Материалы форума, Белгород, 01–20 октября 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1136-1142.

128. Шамгулов, Р. Ю. Разработка барабанно-винтового агрегата для гранулирования технического углерода / Р. Ю. Шамгулов, А. Н. Гончаров // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1844-1847.

129. Гончаров, А. Н. Классификационный анализ агрегатов для гранулирования поризованных материалов / А. Н. Гончаров, Р. Ю. Шамгулов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1777-1780.

130. Шамгулов, Р. Ю. Разработка и исследование барабанно-винтового агрегата для агломерации поризованных материалов / Р. Ю. Шамгулов, А. Н. Гончаров, Ю. С. Гридчин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 8. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 47-50.

131. Шамгулов, Р. Ю. Теория и практика создания барабанно-винтового агрегата для агломерирования полидисперсных материалов / Р. Ю. Шамгулов // Научные технологии и инновации (XXV научные чтения) : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 1179-1184.

132. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

133. Лецкий, Э.К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Э.К. Лецкий. – М.: Мир, 1977. – 552 с.

134. Налимов, В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.

135. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э.К. Лецкий, В. Шефер. – М.:МИР, 1977. – 552 с.
136. ГОСТ 9758-86. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний [Текст]. – Дата введения 01.01.1988; Москва: из-во «Стандартинформ», 2006. – 43 с.
137. ГОСТ 7885-86. Углерод технический для производства резины. Технические условия [Текст]. – Дата введения 01.01.1988; Москва: ИПК Издательство стандартов, 2008. – 37 с.
138. Суриков, Е.М. Погрешность приборов и измерений / Е.М. Суриков. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
139. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э.К. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
140. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
141. Зедгенидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
142. Руминский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов / Л.З. Руминский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
143. Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений / В.Д. Большаков. – М.: Недра, 1983. – 223 с.
144. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
145. Севостьянов В.С. Ресурсо-энергосберегающая технология переработки техногенных органических материалов и производства из них гранулированных композиционных смесей / В. С. Севостьянов, Н. Т. Шеин, П. Ю. Горягин, Р.Ю. Шамгулов [и др.] // Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов, Казань, 21–22 марта 2023 года. – Казань: КНИТУ, 2023. – С. 755-760.
146. Шамгулов, Р. Ю. Применение технического углерода низкотемпературной термолизной технологии в композиции асфальтобетонных смесей / Р. Ю.

Шамгулов, В. С. Севостьянов, В. В. Оболонский // Научные технологии и инновации (XXV научные чтения) : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 1113-1117.

147. Суглобов И. Р. Конструктивно-технологическое совершенствование оборудования для переработки органических техногенных отходов / И. Р. Суглобов, Н. В. Ненарочкина, Р. Ю. Шамгулов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 240-244.

148. Шамгулов, Р. Ю. Моделирование процессов загрузки материалов при их термической переработке / Р. Ю. Шамгулов, Ю. С. Гридчин, А. Н. Гончаров // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 12. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 296-300.

149. Севостьянов, В. С. Разработка узлов герметичной подачи твердого продукта при термолизной переработке техногенного сырья / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, Л. И. Шинкарев // Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии : Сборник докладов национальной конференции, Белгород, 10 июня 2021 года / под ред. В.С. Богданова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 119-125.

150. Гридчин, Ю. С. Разработка герметизирующих узлов загрузки и выгрузки термолизного реактора / Ю. С. Гридчин, Р. Ю. Шамгулов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 2517-2520.

151. Processing and Granulation of Carbon Black / V. S. Sevost'yanov, R. Y. Shamgulov, A. M. Protsenko, A. S. Apatenko // . Russian Engineering Research – 2022. – Vol. 42, No. 5. – P. 538-540. – DOI 10.3103/S1068798X22050240.

152. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber, Klyuev, S., Sevostyanov, V., Sevostyanov, M., Babukov, V., Shamgulov, R Case Studies in Construction Materialth is link is disabled, 2022, 16, DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01071
153. Hybrid Recirculating Mixer / M. V. Sevost'yanov, A. M. Protsenko, V. S. Sevost'yanov, I.A. Kuznetsova, R.Yu. Shamgulov // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 6. – P. 719-722. – DOI 10.3103/s1068798x23060205.
154. Пат. №2788202 С1 RU, МПК А23N 17/00 Рециркуляционный смеситель комбинированного действия / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Проценко [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 2022112968 : заявл. 13.05.2022 : опубл. 17.01.2023, Бюл. №2
155. Севостьянов В.С. Технологический комплекс для получения композиционных смесей с техногенными компонентами / В. С. Севостьянов, А. М. Проценко, Р. Ю. Шамгулов [и др.] // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 1166-1170.
156. Проценко, А. М. Агрегаты для переработки продуктов термолизной технологии / А. М. Проценко, Р. Ю. Шамгулов // Образование. Наука. Производство : XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 983-986.
157. Проценко, А. М. Приготовление композиционных смесей из вторичных материалов / А. М. Проценко, Р. Ю. Шамгулов, В. А. Бабуков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 8. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 29-33.
158. Шамгулов, Р. Ю. Расчет теплотехнических параметров термолизной переработки твердых коммунальных отходов / Р. Ю. Шамгулов, Ю. С. Гридчин, А. Н. Гончаров // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник док-

ладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 10. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 380-385.

159. Шамгулов, Р. Ю. Теплотехнический расчёт барабанно-винтового агрегата для агломерации полидисперсных материалов / Р. Ю. Шамгулов, А. Н. Гончаров, Ю. С. Гридчин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 8. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 43-46.

160. Баскаков А.П. Теплотехника: Учебник для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др. // Под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

161. В.Н. Луканин Теплотехника: учебник для вузов / Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. и др. // ред. Луканин В. Н. - 2-е изд., перераб. - М.: Высшая школа, 2000. - 671 с.

162. Ерофеев, В. Л. Теплотехника в 2 т. Том 2. Энергетическое использование теплоты: учебник для вузов / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов; под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина // Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 199 с.

163. Ларионов Н.Н. Теплотехника : учебник для вузов / Н.Н. Ларионов // 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 1985. - 431 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ









ЕВРАЗИЙСКАЯ ПАТЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЕВРАЗИЙСКОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ



ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 040258

Название изобретения:

**«БАРАБАННО-ВИНТОВОЙ АГРЕГАТ ДЛЯ
ГРАНУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ
ОБРАБОТКИ»**

Патентообладатель:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА" (RU)**

Изобретатели:

**Севостьянов Владимир Семенович, Шени Николай Тихонович,
Севостьянов Максим Владимирович, Шамгулов Роман Юрьевич,
Перельгин Дмитрий Николаевич, Оболенский Виктор Васильевич
(RU)**

Заявка №: 202100189
Дата подачи заявки: 05 июля 2021 г.
Дата выдачи патента: 13 мая 2022 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан
на изобретение с формулой, опубликованной в Вестнике
Евразийского патентного ведомства «Изобретения
(евразийские заявки и патенты)» № 5 / 2022 год.

При уплате установленных годовых пошлин патент
действует на территории государств - участников
Евразийской патентной конвенции - Азербайджанской
Республики, Кыргызской Республики, Республики
Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан,
Республики Таджикистан, Российской Федерации,
Туркменистана.

ИВЛИЕВ Григорий Петрович
Президент Евразийского патентного ведомства





ЕВРАЗИЙСКАЯ ПАТЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЕВРАЗИЙСКОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ



ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 043162

Название изобретения:

«СПОСОБ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ОРГАНИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
И УСТАНОВКА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ»

Патентообладатель:

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА" (RU)

Изобретатели:

Глазголев Сергей Николаевич, Севостьянов Владимир Семенович,
Шени Николай Тихонович, Оболенский Виктор Васильевич,
Севостьянов Максим Владимирович, Шамгулов Роман Юрьевич,
Перельгин Дмитрий Николаевич (RU)

Заявка №: 202100188

Дата подачи заявки: 04 июля 2021 г.

Дата выдачи патента: 27 апреля 2023 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан
на изобретение с формулой, опубликованной в Бюллетене
Евразийского патентного ведомства «Изобретения
(евразийские заявки и патенты)» № 4 / 2023 год.

При уплате установленных годовых пошлин патент
действует на территории государств - участников
Евразийской патентной конвенции - Азербайджанской
Республики, Кыргызской Республики, Республики
Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан,
Республики Таджикистан, Российской Федерации,
Туркменистана.

ИВЛИЕВ Григорий Петрович
Президент Евразийского патентного ведомства





ЕВРАЗИЙСКАЯ ПАТЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЕВРАЗИЙСКОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ



ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 043232

Название изобретения:

«УСТАНОВКА ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ТЕРМОЛИЗА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ И
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ»

Патентообладатель:

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. В.Г. ШУХОВА»;
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТК «ЭКОТРАНС» (RU)

Изобретатели:

Глоцкий Сергей Николаевич, Севостьянов Владимир Семанович, Шеня Николай
Тихонович, Оболенский Виктор Васильевич, Севостьянов Максим Владимирович,
Шамгулов Роман Юрьевич, Перепелица Дмитрий Николаевич (RU)

Заявка №:	202200075
Дата подачи заявки:	04 июля 2022 г.
Дата выдачи патента:	28 апреля 2023 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан на изобретение
с формулой, опубликованной в бюллетене Евразийского патентного
ведомства «Изобретения (евразийские заявки на патенты)» № 4 / 2023 год.

При условии уплаты установленных государством пошлин патент действует на
территории государств - участников Евразийской патентной конвенции –
Азербайджанской Республики, Кыргызской Республики, Республики
Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Республики
Туркменистан, Российской Федерации, Туркменистана.

ИВЛИЕВ Григорий Петрович
Президент Евразийского патентного ведомства



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



**СВИДЕТЕЛЬСТВО
о регистрации ноу-хау**

№ 20220026

**«Способ и устройство для гранулирования техногенных
полидисперсных материалов»**

Правообладатель(ли): Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

Автор(ы): Севостьянов Владимир Семенович,
Шамгулов Роман Юрьевич, Севостьянов Максим Владимирович,
Бабуков Владимир Александрович, Горягин Павел Юрьевич,
Перелыгин Дмитрий Николаевич,
Проценко Анастасия Максимовна

Дата регистрации: 08 ноября 2022 г.

Срок охраны сведений: 10 лет



Ректор  С.Н. Глаголев

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



**СВИДЕТЕЛЬСТВО
о регистрации ноу-хау**

№ 20220031

**«Способ низкотемпературной термодеструкции
техногенных материалов»**

Правообладатель(ли): Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

Автор(ы): Севостьянов Владимир Семенович,
Шамгулов Роман Юрьевич, Севостьянов Максим Владимирович,
Бабуков Владимир Александрович, Горягин Павел Юрьевич,
Перельгин Дмитрий Николаевич,
Проценко Анастасия Максимовна

Дата регистрации: 27 октября 2022 г.

Срок охраны сведений: 10 лет

Ректор   С.Н. Глаголев







ДИПЛОМ

**Финалиста конкурса «Кубок молодых инноваторов
БГТУ им. В.Г. Шухова»**

Номинация «Инновационный проект по приоритетному направлению регионального социально-экономического развития и научно-технологического развития РФ»

вручается

Шамгулову Роману Юрьевичу

Проект «Разработка технологического процесса и технологических средств для утилизации твердых коммунальных отходов способом низкотемпературного термолиза»

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова

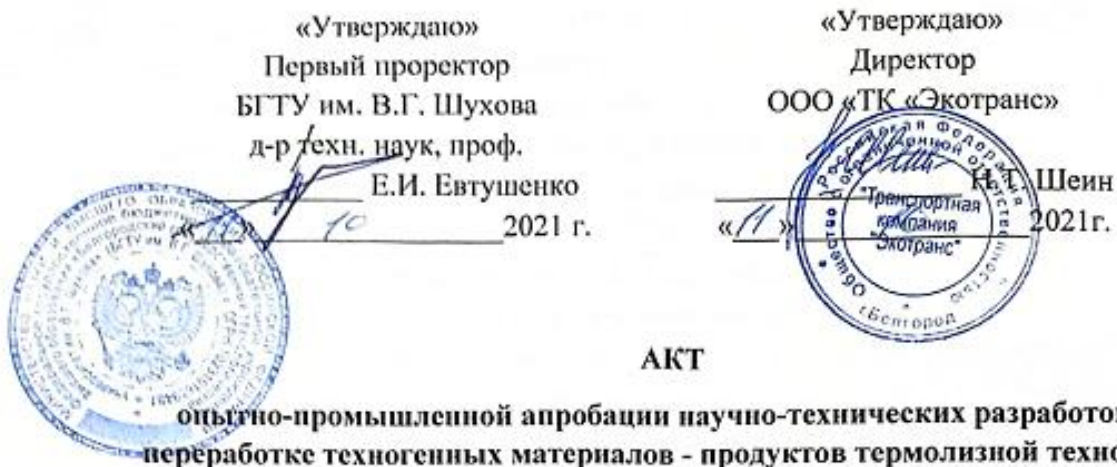
Поголев С.Н.

Проректор по научной и инновационной деятельности БГТУ им. В.Г. Шухова

Давыденко Т.М.

Белгород 2021





Настоящий акт, составлен в том, что комиссией в составе:

– от Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова: заведующий кафедрой «Технологические комплексы, машины и механизмы» (ТКММ), д-р техн. наук, проф. В.С. Севостьянов; руководитель регионального центра нормативно-технической поддержки инноваций Д.Н. Перелыгин; аспирант кафедры ТКММ Р.Ю. Шамгулов; ведущий инженер, аспирант кафедры ТКММ В.А. Бабуков; инженер 2-ой категории, аспирант кафедры ТКММ П.Ю. Горягин; инженер, аспирант кафедры ТКММ А.М. Проценко;

– от ООО «ТК «Экотранс»: главный инженер В.Г. Афонин; начальник отдела разработки новой техники В.В. Оболонский; инженер отдела разработки новой техники С.А. Чечель

в период с «06» сентября 2021 года по «04» октября 2021 года были проведены комплексные промышленные испытания технологической линии по переработке подготовленных ТКО (патенты РФ №№ 2744225, 2748629) с получением технического углерода и производству из него товарной продукции.

Указанные разработки осуществляются в рамках выполняемого проекта №10089447 «Ресурсо-энергосберегающая инновационная технология по комплексной переработке ТКО полного технологического цикла обращения с отходами, с получением различных видов товарной продукции» (2020-2024 гг.) на базе Научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» Белгородской области, платформа «Рациональное природопользование».

В основе разработок положен: многолетний (с 2010 по 2018 гг.) опыт в области переработки органических полимерных отходов в ООО «НПП Термолит», (патенты РФ №№ 2460743, №2448758), а также результаты моделирования процессов переработки органических твердых коммунальных отходов (ТКО) сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова, с учетом имеющегося опыта

инженерно-технических работников (ИТР) ООО «ТК «Экотранс» в области конструирования и машиностроения.

Целью опытно-промышленных испытаний являлось: изучение технологических режимов работы составляющих линию модулей и оборудования, их эксплуатационной надежности, а также изучение процессов подготовки исходного техногенного сырья, его термо-механической обработки в термореакторе и производству из него товарной продукции.

Результатами промышленных испытаний являлись:

- разработка технологической концепции комплексной переработки ТКО с различными физико-механическими характеристиками;
- разработка ресурсоэнергосберегающих технологических модулей для переработки органических и минеральных ТКО (полимерных, пластмассовых, ЦБО, резинотехнических изделий, базальтовых волокон и материалов и др.);
- опытно-промышленная апробация разработанных учеными БГТУ им. В.Г. Шухова и ИТР ООО «ТК «Экотранс» патентозащищенных конструкций агрегатов и отработка рациональных параметров их работы;
- получение конечных твердых и жидких теплоэнергосберегающих продуктов.

При поступлении на полигон общая масса ТКО проходит сортировку, в результате которой остаются так называемые «хвосты», предназначенные к дальнейшему захоронению на полигоне. Предварительно дезагломерированные «хвосты» поступают в технологический модуль термолитной переработки сырья (патент на изобретение РФ 2744225).

Технические характеристики первого опытно-промышленного термолитного модуля следующие: $L \times B \times H = 12 \times 1 \times 3$ м; внутренний диаметр термореактора – 0,1 м; частота вращения внутреннего транспортирующего органа – $10 \div 12 \text{ мин}^{-1}$; коэффициент загрузки – $0,25 \div 0,35$; производительность – $30 \div 50 \text{ кг/ч}$; установленная мощность – 70 кВт; масса – 1500 кг.

В результате термической деструкции исходного сырья конечными продуктами являлись (масс. частей %): жидкое углеводородное топливо (ЖУТ) $\leq 20\%$; синтезированный газ $\leq 20\%$; технический углерод (ТУ) $\leq 40\%$; техническая вода $\leq 20\%$.

Для расширения области использования ТУ последний подвергался агломерации. Процесс осуществлялся в разработанном барабано-винтовом агрегате комбинированного действия (БВА КД патент на изобретение РФ № 2748629), с предварительной гомогенизацией композиционной смеси со связующим (патент РФ № 2302285).

Смеситель рециркуляционного действия (СРД); обеспечивает интенсивное макросмешение компонентов в верхнем барабане с однозаходными винтовыми лопастями (ОВЛ), расположенными на противоположных сторонах (через 180°), и микросмешение – в двух нижних барабанах с двухзаходными винтовыми

лопастями (ДВЛ), смещенными относительно друг друга на 90° в вертикальной плоскости. Площадь ОВЛ – $S_{\lambda} = (11,5+27,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; коэффициент заполнения материалом барабана смесителя – $\varphi_{\lambda} = 0,22+0,44$; частота вращения вала смесителя – $n_{\lambda} = 60+110 \text{ мин}^{-1}$; расстояние между лопастями – $L_{\lambda} = (10+50) \cdot 10^{-3} \text{ м}$; внутренний диаметр верхнего барабана РЦС – $D = 320 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; длина верхней камеры смешения – $L_1 = 600 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; внутренние диаметры нижних барабанов РЦС – $D = 230 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; длины нижних камер смешения – $L_2 = L_3 = 600 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; угол подъёма винтовой линии – $\alpha = 30^\circ$.

Технические характеристики БВА КД: $L \times B \times H = 1,5 \times 1,0 \times 1,8 \text{ м}$; диаметр наружного барабана – 0,63 м, среднего – 0,49 м, внутреннего – 0,25 м; частота вращения – $10+15 \text{ мин}^{-1}$; установленная мощность – 5,0 кВт; производительность – $250+300 \text{ кг/час}$; коэффициент загрузки – $0,18+0,2$. Используются разработанные внутренние транспортирующие органы: однозаходные и двухзаходные геликондальные лопасти, полые геликондальные параллелепипеды-геликоны, однозаходные винтовые лопасти.

Физико-механические характеристики ТУ: средний размер частиц – 44 мкм; удельная поверхность по однотоочечному методу БЭТ составляет $11,23-33,35 \text{ м}^2/\text{г}$; средний размер пор от 9,07 до 16,51 нм. Область применения ТУ – в качестве компонента полимерсодержащих композиционных смесей при производстве полимерных изделий; красителя при изготовлении лакокрасочных покрытий; адсорбентов для очистки загрязненных жидких сред; наполнителя при производстве резинотехнических изделий; агломерированных заполнителей и др.

БВА КД реализует следующие технологические процессы: предварительное микрогранулирование, поэтапное гранулообразование, классификацию и теплотехническую обработку агломерата.

Выводы:

1. Разработанная и реализованная на производственной площадке ООО «ТК «Экотранс» ИТР предприятия совместно с сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова технологическая линия по переработке техногенных отходов (патент РФ № 2744225) с получением технического углерода и производству из него товарной продукции работоспособна. Узлы и модули обладают эксплуатационной надежностью и обеспечивают выпуск качественных конечных продуктов: жидкое углеводородное топливо (ЖУТ), синтезированный газ (СГ) и технический углерод (ТУ).
2. При дальнейшей промышленной реализации термолитной технологии переработки органических ТКО, проектирования технологической линии производительностью 2000 – 2400 т/год необходимо предусмотреть:
 - поддержание температуры в термореакторе $460+480^\circ \text{ С}$;
 - обеспечить минимальное время пребывания перерабатываемого материала в термореакторе 20+25 мин.;
 - исключить локальные перегревы термореактора.

3. Технологический модуль агломерации, включающий, разработанный барабанно-винтовой агрегат комбинированного действия (патент на изобретение РФ № 2748629), подтвердил эксплуатационную и эффективную надежность, ритмичность работы. Получаемый агломерированный ТУ характеризуется стабильным гранулометрическим составом (3÷5 мм). Прочность гранул составила 220-250 кПа. Температурный режим обработки агломерата находился в пределах (110-115°C). Процент просыпи не превышал 10-12%.

Результаты опытно-промышленной апробации научно-технических разработок будут использованы при реализации ресурсоэнергосберегающей технологии комплексной переработки органических и минеральных техногенных материалов в рамках выполняемого проекта Научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» Белгородской области.

От Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова):

д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой ТКММ

В.С. Севостьянов

руководитель регионального центра
нормативно-технической поддержки
инноваций

Д.Н. Перельгин

аспирант кафедры ТКММ

Р.Ю. Шамгулов

ведущий инженер, аспирант
кафедры ТКММ

В.А. Бабуков

инженер 2-ой категории, аспирант
кафедры ТКММ

П.Ю. Горягин

инженер, аспирант кафедры ТКММ

А.М. Проценко

от ООО «ТК «Экотранс»:

главный инженер

В.Г. Афонин

начальник отдела разработки
новой техники

В.В. Оболонский

инженер отдела разработки
новой техники

С.А. Чечель

«Утверждаю»

Первый проректор

БГТУ Им. В. Г. Шухова

д.т.н., проф. Н. Г. Габдуллин

«30» 01/2023 г.



«Утверждаю»

Директор

ООО «ТК «Экотранс»

Н.Т. Шенин

2023 г.



АКТ

**опытно-промышленных испытаний технологического модуля для
агломерирования технического углерода с использованием барабанно-
винтового агрегата комбинированного действия**

Акт, настоящий, составлен в том, что комиссией в составе:

от Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова: заведующий кафедрой «Технологические комплексы, машины и механизмы» (ТКММ), д-р техн. наук, проф. В.С. Севостьянов; аспирант кафедры ТКММ Шамгулов Р.Ю.; ведущий инженер, аспирант кафедры ТКММ Бабуков В.А.; инженер, аспирант кафедры ТКММ Проценко А.М.;

от ООО «ТК «Экотранс»: главный инженер Афонин В.Г.; начальник отдела разработки новой техники Оболонский В.В., инженер отдела разработки новой техники Чечель С.А.

в период с 13 декабря 2022 года по 29 декабря 2022 года были проведены комплексные опытно-промышленные испытания технологической линии, включающей установку низкотемпературного термоллиза (патент РФ № 2744225, 2733396, евразийский патент № 043162, 043232, св-во Ноу-Хау 20220031) и барабанно-винтовой агрегат (БВА) комбинированного действия (патент РФ № 27486292, евразийский патент № 040258, св-во Ноу-Хау 20220026) с получением агломерированного технического углерода низкотемпературной термоллизной технологией.

Указанные выше разработки ведутся в рамках выполняемого проекта по теме: «Разработка, исследование и опытно-промышленное освоение ресурсоэнергосберегающих инновационных технологий для производства товарной продукции и снижением экологической нагрузки на окружающую

среду» (FZWN – 2021 – 0014 Государственное задание Минобрнауки России), а также в рамках диссертационной работы аспиранта Шамгулова Р.Ю.

Целью настоящих опытно-промышленных испытаний являлось изучение технологических режимов работы оборудования, составляющего технологическую линию: установки низкотемпературного термолиза и БВА комбинированного действия, их эксплуатационной надежности, а также изучение процессов подготовки исходного техногенного сырья.

Результатом промышленных испытаний являлось: получение агломерированного технического углерода низкотемпературной термолизной технологии переработки органических ТКО, а также опытной партии гранулированных адсорбентов для очистки жидких сред.

Технические характеристики опытно-промышленной установки низкотемпературного термолиза следующие: геометрические размеры $L \times B \times H = 12 \times 2,0 \times 3,5$ м; внутренний диаметр термореактора – 0,3 м; частота вращения внутреннего транспортирующего органа – $10 \div 12$ мин⁻¹; коэффициент загрузки – $0,25 \div 0,35$; температура деструкции органических ТКО – $450-470^\circ\text{C}$; время термомеханического воздействия – 20-23 минут; производительность по исходному сырью – $400 \div 500$ кг/ч; установленная мощность – 150 кВт; масса – 2500 кг.

Технические характеристики БВА: $L \times B \times H = 1,5 \times 1,0 \times 1,8$ м; диаметр наружного барабана – 0,62 м, среднего – 0,49 м, внутреннего – 0,25 м; частота вращения камеры агломерирования – $7 \div 10$ об/мин⁻¹; частота вращения вала винтовых устройств – $30 \div 50$ об/мин⁻¹; установленная мощность – 5,0 кВт; производительность – $250 \div 300$ кг/час; коэффициент загрузки – $0,18 \div 0,22$; внутренние рабочие органы БВА: разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти, одно и разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти закрепленные жестко на приводном валу.

Проведенные исследования показали следующий вещественный состав ТУ. Содержание углерода – (65-67 масс. %); кислорода – (14-16 масс. %); кальция – (5-7 масс. %); кремния – (2-4 масс. %); хлора – (1,5-3 масс. %). Также в материале присутствуют оксиды: кальция – (26-28 масс. %); кремния – (25-27 масс. %); натрия – (5-7 масс. %); алюминия – (6-8 масс. %). При исследовании гранулометрического состава установлено, что средний размер частиц ТУ составляет 40-50 мкм. Насыпная плотность ТУ – $450 \div 500$ кг/м³.

Конечным продуктом технологической линии являлся:

Агломерированный технический углерод с характеристиками – размер гранул $(2 \div 5) \times 10^{-3}$ м; насыпная плотность ρ_0 – 600-700 кг/м³; угол естественного откоса гранулята в статическом состоянии $\alpha_{откл.ст}$ – 26 град.; коэффициент

трения $\varphi_{\text{тр}} = 0,4 \div 0,5$; нефтеёмкость 13,55 кг/кг агломерированного ТУ, маслосёмкость 15,33 кг/кг.

В период промышленных испытаний разработанная технологическая линия и составляющее её оборудование показали свою работоспособность и эксплуатационную надёжность.

При проектировании технологического модуля агломерирования ТУ необходимо предусмотреть:

- возможность поэтапного введения связующего, на первой стадии для получения микрогранулята, на второй – для окончательного гранулообразования;
- обеспечить точную дозировку связующего в пределах $1,5 \div 2\%$;
- довести отсев просыпи до $C_{\text{пр}} \leq 10\%$ с последующим возвратом на агломерирование;
- количество связующего $18 \div 20\%$;
- частоту вращения БВА $10 \div 12 \text{ об/мин}^{-1}$;
- частоту вращения вала внутренних рабочих органов $40-45 \text{ об/мин}^{-1}$;
- коэффициент заполнения БВА $0,2 \div 0,22$.

Результаты опытно-промышленной апробации научно-технических разработок будут использованы при реализации ресурсоэнергосберегающих инновационных технологий – производстве адсорбента для очистки жидких сред.

От Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова):

д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой «ТКММ»
аспирант кафедры ТКММ



В.С. Севостьянов

Р.Ю. Шамгулов

ведущий инженер кафедры ТКММ



В.А. Бабуков

инженер, аспирант кафедры ТКММ



А.М. Проценко

от ООО «ТК «Экотранс»:

главный инженер



В.Г. Афонин

начальник отдела разработки новой техники



В.В. Оболонский

инженер отдела разработки новой техники



С.А. Чечель

«Утверждаю»

Директор



**Расчет технико-экономической эффективности от использования
агломерированного, в барабано-винтовом агрегате, технического
углерода, получаемого способом низкотемпературного термоллиза при
переработке органических ТКО на ООО «ТК «Экотранс»**

Данный расчет предназначен для определения технико-экономической эффективности от использования научно-технических разработок по агломерированию в барабано-винтовом агрегате (БВА, патент РФ №2748629) технического углерода, получаемого при переработке органических ТКО способом низкотемпературного термоллиза и применению его в качестве адсорбента для очистки жидких сред.

Годовая производительность установки низкотемпературного термоллиза ($Q_{\text{год}}$), с учетом работы оборудования в две смены

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \cdot T_{\text{ном}} \cdot K_{\text{исп}}, \quad (1)$$

где, $Q_{\text{час}}$ – часовая производительность технологической линии по исходному сырью (ТКО);

$T_{\text{ном}}$ – номинальный фонд рабочего времени, час;

$K_{\text{исп}}$ – коэффициент экстенсивного использования.

$$Q_{\text{год}} = 0,5 \cdot 3952 \cdot 0,87 = 1719,00 \text{ т.}$$

При переработке ТКО способом низкотемпературного термоллиза выход технического углерода (ТУ) 300–330 кг на тонну исходного сырья. Тогда годовая производительность по техническому углероду ($Q_{\text{ту}}$)

$$Q_{\text{ту}} = 1719,00 \cdot 0,33 = 567,3 \text{ т.}$$

Выход кондиционных гранул из БВА составляет 83–85%.

Годовая производительность по агломерированным адсорбентам $Q_{\text{БВА}}$

$$Q_{\text{БВА}} = 567,3 \cdot 0,85 = 482,2 \text{ т.}$$

Стоимость гранулированных адсорбентов для очистки жидких сред от нефтепродуктов, по данным опубликованных источников (поставщик ПрофСорбЭко – <https://tgta-ecology.ru>), от 50 тыс. руб/т. Стоимость производимых на ООО «ТК «Экотранс» адсорбентов, с учетом сложившейся конкурентноспособной цены, принята в расчетах – 27 тыс. руб/т

В таблице 1 представлены исходные данные для проведения расчета технико-экономической эффективности.

Таблица 1. Исходные данные для проведения расчета технико-экономической эффективности.

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Значение
1	Производительность установки низкотемпературного термоллиза по исходному сырью	кг/ч	5000
2	Стоимость переработки 1 тонны ТКО на ООО «ТК «Экотранс» способом низкотемпературного термоллиза	Руб.	3 122,53
3	Выход технического углерода из 1 тонны ТКО	кг.	3000–3300
4	Затраты на переработку ТКО для получения 1 т технического углерода	Руб.	6 367,50
5	Стоимость изготовления БВА для агломерирования ТУ (с учетом использованных аппаратных средств)	Руб.	3 200 000
6	Стоимость изготовления линии низкотемпературного термоллиза	Руб.	8 250 000
7	Затраты на монтаж и пусконаладку оборудования	Руб.	500 000
8	Инвестиции в оборотный капитал	Руб.	1 200 000
9	Общие инвестиционные затраты	Руб.	13 310 000
10	Количество обслуживающего персонала при работе в две смены	Чел.	7
11	Зарботная плата одного сотрудника	Руб.	38 572

Амортизация основных средств на предприятии осуществляется линейным способом при норме 8%. Исходя из общей стоимости оборудования 11 450

тыс.руб., сумма амортизационных отчислений составит 916 тыс. руб. Для оценки эффективности проекта и доходности будущих инвестиций, учитывая ключевую ставку ЦБ РФ на 09.02.2023 – 9,5%, а также возможные риски, была принята ставка дисконтирования – 17%. Источник финансирования – собственные средства организации, чистая прибыль и амортизационные отчисления.

Состав общих затрат на производство 1 тонны гранулированного адсорбента представлен в табл. 2. План денежных потоков представлен в табл. 3.

Таблица 2. Текущие затраты на производство 1 тонну продукции.

№	Составляющие себестоимости 1 тн. гранулированного продукта	Норма расхода на 1т	Затраты на 1 т, руб.
1	Затраты на сырье, кг	1 000	6 367,6
2	Электроэнергия, кВт•ч	20,0	118,0
3	Упаковка (Биг-Бэг), шт.	1	750,0
4	Затраты на связующее, кг	80	3 200,0
5	Затраты на оплату труда		3 240
6	Отчисления на соц. нужды (30%)		972
7	Прочие расходы		831,5
	Итого себестоимость продукции		15 493,0

Таблица 3. План денежных потоков.

Показатель, тыс.руб.	0	1	2	3	4
I. Инвестиционная деятельность					
Инвестиции в основной капитал	-11 450,00				
Прирост оборотного капитала	-1 280,00				
Инвестиции в подготовку производства	- 580,00				
Итого инвестиций	-13 310,00				
II. Операционная деятельность					
Выручка		13 019,40	13 019,40	13 019,40	13 019,40
Полная себестоимость продукции		7 470,72	7 470,72	7 470,72	7 470,72
В том числе амортизационные отчисления		916,00	916,00	916,00	916,00

Показатель, тыс.руб.	0	1	2	3	4
Прибыль от продаж		5 548,68	5 548,68	5 548,68	5 548,68
Налог на прибыль		-1 109,73	-1 109,73	-1 109,73	-1 109,73
Чистая прибыль		4 439,05	4 439,05	4 439,05	4 439,05
Чистый операционный доход		5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
III. Финансовая деятельность					
Собственные средства	13 310,00				
Итого	13 310,00				
Сальдо реальных денег	0	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
Поток реальных денег	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05
Коэффициент дисконтирования (при ставке 17%)	1,0000	0,8547	0,7305	0,6244	0,5337
Чистый дисконтированный доход	-13 310,00	4 576,96	3 911,86	3 343,69	2 857,99
Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом	-13 310,00	-8 733,04	-4 821,18	-1 477,49	1 380,50

Оценка эффективности проекта производилась по следующим показателям:

1. Чистый дисконтированный доход (Net Present Value, NPV) – формула (2)

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} - I, \quad (2)$$

где n – срок реализации проекта; CF_i – денежный поток i -го периода; r – ставка дисконтирования (17%); I – величина первоначальных инвестиций.

Результат расчета чистого дисконтированного дохода представлен в табл.3.

2. Индекс рентабельности инвестиций (Profitability Index, PI) – формула (3)

$$PI = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \div I = 1,72 > 1 \quad (3)$$

$$PI = (4 576,96 + 3 911,86 + 3 343,69 + 2 857,99) / 13 310,00 = 1,10$$

3. Внутренняя норма доходности (IRR) – формула (4)

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (r_2 - r_1), \quad (4)$$

где r_1 и r_2 – соответственно нижняя и верхняя ставки дисконтирования.

$$IRR = 17 + \frac{1 380,50}{1 380,50 - (-552,06)} \times (20 - 17) = 19,14\%$$

Срок окупаемости проекта (PP) составил – 2,5 года.

Дисконтированный срок окупаемости проекта (DPP) составил – 3,6 лет.

В табл. 4 представлен результат расчета внутренней нормы доходности

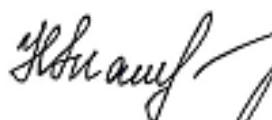
Таблица 4. Расчет внутренней нормы доходности

Годы осуществления проекта	2023	2024	2025	2026	2027	NPV	IRR
Чистый денежный поток	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05		
Ставка дисконта r_i							
0%	-13 310,00	5 355,05	5 355,05	5 355,05	5 355,05	8 110,20	
17%	-13 310,00	4 576,96	3 911,86	3 343,69	2 857,99	1 380,50	
20%	-13 310,00	4 462,36	3 718,54	3 098,96	2 582,20	-552,06	19,19%

Представленный выше расчет, в частности, чистый дисконтированный доход – 1380,50 тыс.руб/год, подтверждает технико-экономическую эффективность внедрения научно-технических разработок на ООО «ТК «Экотранс».

от ООО «ТК «Экотранс»:

Главный бухгалтер

 Н.П. Матренина

Начальник отдела разработки новой техники

 В.В. Оболонский