



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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: **Севостьянов Владимир Семенович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические комплексы машины и механизмы» БГТУ им. В.Г. Шухова.

Официальные оппоненты: **Петровский Эдуард Аркадьевич**
доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Игнатьев Алексей Александрович
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита состоится «06» ноября 2025 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03 на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. ГУК214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте (URL:https://gos_att.bstu.ru/dis/Shamgulov)

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2025г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Семикопенко
к.т.н., доцент

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время, в России, реализуется реформа в сфере обращения с отходами производства и потребления. Ее основные положения определены стратегией 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.

Согласно исследованиям ученых: проф. Э.А. Петровского, проф. Г.М. Золотарева, к.т.н. А.Г. Копачева и др., одним из перспективных направлений развития ресурсо-энергосберегающих технологий является комплексная переработка органических отходов, в т.ч. по низкотемпературной ($T \leq 400-500^{\circ}\text{C}$) термолизной технологии с получением жидкого углеводородного топлива, технического углерода (ТУ) и синтез-газа. ТУ находит широкое применение в различных отраслях промышленности: лакокрасочной, резинотехнической, электротехнической и др. Большие потенциальные возможности ТУ имеет при его использовании в качестве адсорбента для очистки жидких сред от загрязнений. Однако широкое использование ТУ ограничено его специфическими особенностями: высокой дисперсностью; низкой насыпной плотностью и сыпучестью; пылением; пористостью и др. Для расширения технологических возможностей использования ТУ, его целесообразно агломерировать в специальном оборудовании.

Анализ способов и технических средств для агломерирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью свидетельствует о множестве проблемных задач: научно-технических; производственно-технологических и др. при реализации указанного процесса. В этой связи настоящая диссертационная работа является весьма актуальной.

Диссертация выполнена в рамках: Федерального проекта НОЦ (2020 – 2023гг) № 10089447, а также государственного задания FZWN-2021-0014 и FZWN-2024-0002.

Степень разработанности темы исследования. основополагающие исследования в области физико-химической механики, механики сплошных сред, теории и практики агломерирования полидисперсных материалов в нашей стране и за рубежом выполнены: акад. П.А. Ребиндером, проф. П.В. Классеном, проф. М.Б. Генераловым,

проф. И.Г. Гришаевым, проф. В.С. Севостьяновым, проф. Д.А. Макаренковым, проф. А.А. Игнатьевым проф. Т.Н. Ильиной, проф. В.Ф. Першиным, проф. Л.М. Сулименко, проф. А.Б. Капрановой, проф., Н. Rumpf, М. Wada, D.M. Newitt, A.D. Salman, M.J. Hounslow, и др.

Существующий опыт реализации термолизных технологий переработки органических техногенных материалов с получением ТУ высокой дисперсности и низкой насыпной плотности вызывают необходимость его дальнейшего агломерирования. Для этого требуется разработать специальную конструкцию агрегата, способного реализовать процесс получения товарной продукции – гранулята с учетом специфических особенностей исходного материала - ТУ.

Объект исследования – барабанно-винтовой агрегат для агломерирования технического углерода низкотемпературной термолизной технологии переработки органических техногенных материалов.

Предмет исследования – процесс агломерирования ТУ и других полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью с учетом их физико-механических характеристик и физико-химических свойств.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования:**

1. На основе анализа современных технологий и технических средств определить перспективные направления получения агломерированного ТУ 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 патенто-защищенные способы и устройства для термолизной переработки ОТМ и агломерирования полученного ТУ.
5. Разработать методы расчета кинематических, конструктивно-технологических, энергосиловых и теплотехнических параметров барабанно-винтового агрегата (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 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 винтообразных 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, представленных 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;

- Выполненные научно-технические разработки используются при подготовке специалистов-выпускников различных кафедр БГТУ им. В.Г. Шухова (ТКММ, промышленной экологии, СМИК и др.).

Методы исследования. В диссертационной работе использовались общенаучные теоретико-экспериментальные методы ис-

следования: идеализации и формализации, наблюдение, эксперимент и сравнение; методы индукции, математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Механо-реологическая модель процесса агломерирования ТУ-продукта термолизной переработки органических ТКО, учитывающая физико-механические и реологические характеристики поризованных полидисперсных материалов.
2. Патентозащищенные научно-технические разработки способа и устройств НТТ переработки ТКО и агломерирования ТУ в БВА.
3. Аналитические выражения, описывающие конструктивно-технологические и кинематические параметры рабочих органов БВА, и рациональные условия постадийных процессов агломерирования ТУ.
4. Уравнения для расчета энергосиловых параметров рабочих органов БВА различного геометрического профиля и конструктивно-технологического исполнения.
5. Методы расчета кинематических, 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.

Достоверность полученных результатов. Обеспечивается за счет использования точного измерительного и технологического оборудования, применения современного программного обеспечения, аттестованных методик исследований, использования многочисленных экспериментальных данных, а также сопоставимых с результатами теоретических и экспериментальных исследований, их подтверждением в производственных условиях.

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 работы опубликовано 28 научных работ, в том числе - 6 в изданиях Scopus, 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 3 патента РФ на изобретения, 3 Евразийских патента на изобретения. Зарегистрировано 2 Ноу-Хау.

Структура и объем работы. Общий объем работы 200 страниц, в том числе: 80 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 163 наименований. Приложения на 25 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указана научная новизна, практическая значимость. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ состояния технологии и технических средств комплексной переработки органических техногенных отходов и существующие проблемные задачи, а также нормативно-правовая база. Обоснована целесообразность развития комплексной переработки техногенных материалов способом низкотемпературного термолиза с получением технического углерода.

Проведен анализ существующих патентозащищенных отечественных и зарубежных технических средств для компактирования пылевидных материалов с низкой насыпной плотностью. Установлены их конструктивно-технологические преимущества и недостатки. Представленный анализ подтверждает целесообразность разработки и создания специального БВА комбинированного действия для агломерирования ТУ ($Q=5600$ ккал/кг) термолизной технологии. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе представлены и обоснованы результаты теоретических исследований процесса агломерирования полидисперсных материалов. Разработана механо-реологическая модель, научно обоснованно подтверждающая реализацию постадийного процесса агломерирования ТУ, исходя из его физико-механических и реологических характеристик, а также учитывающая специфические особенности техногенных материалов (Рис.1). Представлены аналитические выражения постадийных процессов агломерирования ТУ в БВА: I–

упруго-вязко-пластическое микрогранулирование шихты с объемно-пространственным ориентированием (ОПО) частиц; II–упруго-вязко-пластическое уплотнение и упрочнение микрогранул при их ОПО и внутреннем рецикле; III–вязко-пластическое гранулообразование микрогранулята при его однонаправленном ориентировании; IV–упруго-вязко-пластическое деформирование гранулята при его классификации, внутреннем рецикле и последующей релаксации.

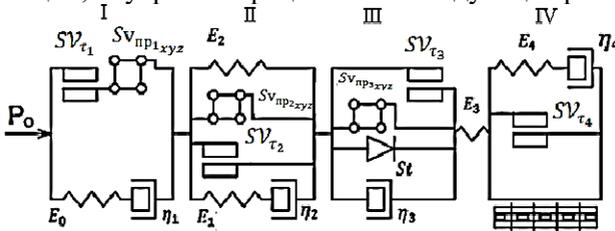


Рисунок 1 – Механо-реологическая модель процесса агломерирования полидисперсного материала на различных ее стадиях

($E_0 - E_4$) –элементы Гука и ($\eta_1 - \eta_4$) элементы Ньютона – соответственно, для каждой стадии агломерирования; ($SV_{\tau_1} - SV_{\tau_4}$) –элементы Сен-Венана на соответствующей стадии гранулообразования; ($SV_{np1xyz} - SV_{np3xyz}$) – элементы пространственной ориентации частиц; St – элемент стопор, характеризующий частичное разрушение и образование новых гранул.

С учетом представленной механо-реологической модели (Рис.1) параметры относительной деформации формуемого гранулята можно представить в виде

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} + \varepsilon_{IV}, \quad (1)$$

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

Уравнение деформационного воздействия на микрогранулы на первой стадии их агломерирования имеет вид

$$\varepsilon_I = \bar{\sigma}_r^I (E_0)^{-1} + [\sigma_n^I (\eta_I)^{-1}] t_I + \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I (\tau_I)^{-1} + [\bar{\sigma}_{r_{xyz}}^I (E_{0_{xyz}})^{-1} + \bar{\sigma}_{r_{xyz}}^I (\tau_{xyz}^I)^{-1}]. \quad (2)$$

Уравнение деформационного воздействия на сформованный микрогранулят при упрочнении его поверхностного слоя для второй стадии агломерирования представлено в виде

$$\varepsilon_{II} = \frac{\bar{P}_{II}}{E_{II}} \left(1 - \exp E_1 \frac{t_2}{\eta_2} \right) + \frac{\bar{P}_{II_{\text{упр.сл}}} - \bar{P}_{II_{\text{мкр.гр}}}}{2\tau_I} + \sigma_{Sv_{\text{пр}}} (\sigma_{xyz}^{-1} + \tau_{xyz}^{-1}). \quad (3)$$

На третьей стадии окончательного гранулообразования, характеризующегося процессом массообмена – параллельного разрушения менее прочных гранул и образования новых, относительная деформация гранулята может быть описана выражением

$$\varepsilon_{III} = \frac{e_{xyz} \cdot t_3 \cdot (\bar{P}_{III_{\text{maxSt}}} - \bar{P}_{III_{\text{maxупр}}}) \cdot t_3}{\eta_{3\text{св}} \cdot \text{Sin} \gamma_{\text{max} S v_{\text{пр}3}(xyz)}}. \quad (4)$$

На четвертой стадии реализуется классификация полифракционного агломерата с выделением готового продукта – гранулята заданного фракционного состава. Величина относительной деформации для четвертой стадии определяется выражением

$$\varepsilon_{IV} = \varepsilon_{E_{3IV}} + (\varepsilon_{E_{4IV}} + \varepsilon_{\tau_4}) + \varepsilon_{Sv_{t_4}} = P_{IV} \cdot E_3^{-1} + (P_{IV} \cdot E_4^{-1} + P_{IV} \cdot \eta_4 \cdot t_4) + (P_{IV} - P_{\text{max}}) E_4^{-1}, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_r^I, \bar{\sigma}_n^I, \bar{\sigma}_{CV_r}^I, \bar{\sigma}_{r_{xyz}}^I$ - нормальные напряжения, Н/м²; τ_I, τ_{xyz}^I - касательные напряжения, Н/м²; $\eta_1, \eta_2, \eta_{3\text{св}}, \eta_4$ - соответственно, вязкость жидкой фазы, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с}$; t_1, t_2, t_3, t_4 - соответственно, продолжительность каждой стадии, с; $\bar{P}_{II}, \bar{P}_{II_{\text{упр.сл}}}, \bar{P}_{II_{\text{мкр.гр}}}, \bar{P}_{III_{\text{maxSt}}}, \bar{P}_{III_{\text{maxупр}}}$ - соответственно, давление от силового воздействия, Н/м²; $E_0, E_{0_{xyz}}, E_1, E_{II}, E_3^{-1}, E_4^{-1}$ - модули Гука, Н/м²; $\gamma_{\text{max} S v_{\text{пр}3}(x,Y,z)}$ - предельная величина угла поперечно-продольной переориентации элемента $Sv_{\text{пр}3_{xyz}}$, град.

Полученные аналитические зависимости постадийного гранулообразования ТУ термолитной технологии отражают основополагающие закономерности исследуемого процесса с учетом специфических особенностей материала и подтверждены при последующем моделировании.

При этом, для каждой стадии агломерирования ТУ обосновано определены конструктивно-технологическое исполнение и геометрический профиль рабочих органов (Рис.2, поз.4,6,7,8), патентозащищенной конструкции БВА (Пат. РФ №2748629, Евразийский пат. №040258).

Разработаны необходимые условия для реализации в БВА постадийных процессов агломерирования ТУ, а именно: увеличение

времени движения частиц по соприкасаемой поверхности; возможность объемно-пространственного перемещения (степени свободы гранулируемых частиц по осям X,Y,Z); непрерывный контакт движущихся частиц с рабочей поверхностью окатывания в период их соприкосновения и др.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления слоя микрогранулята при прохождении через него ДВЛ, $P_{\text{рец,сл}}$, Вт.

$$P_{\text{рец,сл}} = 0,5\pi S_{\text{ДВЛ}i} \Delta p_i (R^2 - r^2) n_B, \quad (6)$$

где $S_{\text{ДВЛ}i}$ -путь, пройденный ДВЛ за один оборот вала, м; Δp_i -удельное сопротивление слоя микрогранулята, Н/м²; R -радиус ДВЛ, м; r -радиус вала, м; n_B -частота вращения вала, с⁻¹.

Мощность, затрачиваемая при парном воздействии на микрогранулят разнонаправленных ДВЛ, $P_{\text{рец,возд}}$, Вт, при $\omega_B = 2\pi n$, рад/с.

$$P_{\text{рец,возд}} = M_{\text{ТР,ДВЛ}} \omega_B = 4\pi P_{\text{т,ДВЛ}} f_0 \frac{R_i^3 - r_i^3}{3} \omega_B, \quad (7)$$

где $P_{\text{т,ДВЛ}}$ -давление на внешнюю поверхность ДВЛ, Н/м²; f_0 -коэффициент внешнего трения гранулята о поверхность ДВЛ.

Разнонаправленные ДВЛ (Рис. 2, поз.6) интенсивно воздействуют на рециркулируемый слой микрогранул, значительно упрочняя их поверхностный слой, что необходимо для его дальнейшего агломерирования на последующей стадии воздействия ОВЛ.

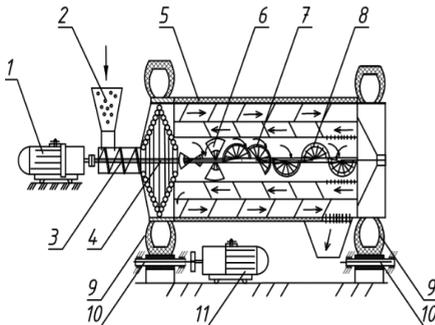


Рисунок 2. Кинематическая и конструктивно-технологическая схема БВА

гранулообразования БВА ОВЛ (Рис.2, поз.7), обеспечивается объемно-пространственное перемещение ранее сформированного микрогранулята, вдоль внутреннего корпуса рабочей камеры (Рис.3).

1,11-мотор-редукторы; 2-загрузочное устройство; 3-транспортный шнек; 4-спиралевидный блок микрогранулирования; 5-внешний теплоизолированный барабан; 6-разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти; 7-однонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 8-разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 9-бандажи; 10-опорные ролики.

С использованием последовательно установленных в зоне

установленных в зоне

Процесс агломерирования ТУ осуществляется за счет силового воздействия ОВЛ на гранулят, а также за счет сил трения о внутреннюю поверхность камеры агломерирования.

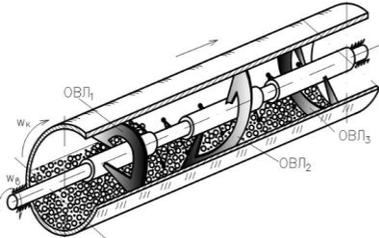


Рисунок 3. Схема к расчету процесса агломерирования ТУ

Последние возникают от действия инерционных сил $F_{ин\tau}$, как со стороны ОВЛ ($F_{ин.ОВЛ}$), так и за счет вращения самой камеры ($F_{ин.ОВЛ}$) (Рис. 4).

Энергия, затрачиваемая одной ОВЛ, при преодолении силы тяжести в момент подъема гранулята на высоту H_{max} , м, составляет

$$E_{ОВЛ} = 0,25G_{ОВЛ}R_K(1 + \sin \beta_{ОВЛ}) \frac{(\pi + 2\beta_{ОВЛ})}{\pi}. \quad (8)$$

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

Учитывая сложное движение гранулы, учитывается ее переносное ускорение, которое при совместном движении с вращающейся камерой может быть представлено центробежным ускорением

$$a = \omega_K^2 R_K = 4\pi^2 n_K^2 R_K, \text{ м/с}^2, \quad (9)$$

где n_K - частота вращения камеры агломерирования, об/с; R_K -радиус камеры, м;

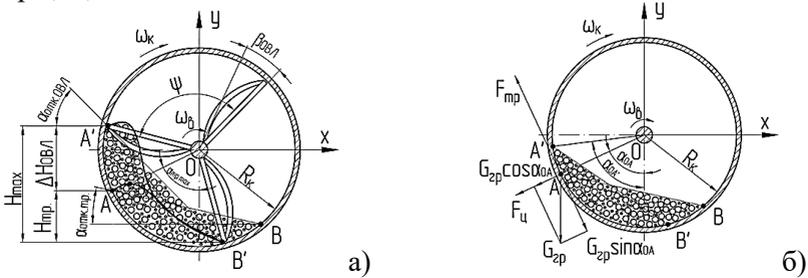


Рисунок 4. Схема к расчету: а) процесса агломерирования гранулята ТУ; б) условий движения гранулы от сил внешнего трения.

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

$m \frac{dv}{dt} = 2R_k \omega_k \omega_f$ дин.гр. При этом вектор Кориолисова ускорения направлен вдоль радиуса камеры R_k .

В результате общего взаимодействия указанных радиальных ускорений суммарную радиально направленную центробежную силу $F_{цс}$ можно представить в виде:

$$F_{цс} = m_{гр}(\omega_k + \omega_f \text{ дин.гр})^2 R_k = m_{гр} \omega_k^2 R_k + m_{гр} 2\omega_k \omega_f \text{ дин.гр} R_k + m_{гр} \omega_f^2 \text{ дин.гр} R_k. \quad (10)$$

Уравнение (11) описывает колебательное движение формуемых гранул («подъем – опускание») вдоль камеры с учетом сил трения до последующего силового воздействия на них, со стороны ОВЛ.

$$\frac{d\omega_{гр}}{d\alpha_{0A}} = \frac{(f_{\text{дин.гр}} \cos \alpha_{0A} - \sin \alpha_{0A})g + \omega_k^2 R_k f_{\text{дин.гр}}}{\omega_{\text{дин.гр}} R_k} + 2(\omega_{\text{дин.гр}} + \omega_k) f_{\text{дин.гр}}. \quad (11)$$

Проведенный численный расчет аналитического выражения (11) при следующих исходных значениях параметров: $R_k=0,15\text{м}$; $f_{гр}=0,48$; $f_{\text{дин.гр}}=0,35$; $\alpha_{0A}=15 \div 35^\circ$; $\omega_{\text{дин.гр}}=4,18$ рад/с; $\omega_k=1,57$ рад/с позволил определить максимальный угол подъема гранулята, при котором прекратится его движение – $\alpha_{0A \max}=34^\circ$ и минимальный угол, до которого гранулы скатываются вниз – $\alpha_{0A \min}=3^\circ$.

Использование в зоне гранулообразования БА вращающихся ОВЛ, в сочетании с параллельным вращением камеры агломерирования, увеличивает путь, преодолеваемый материалом вдоль внутреннего корпуса камеры. Подъем с помощью ОВЛ гранулята на большую высоту H_{\max} , также повышает потенциальную энергию ($E_{\text{пот}} = m_{гр} g H_{\max}$) агломерируемого слоя материала и обеспечивает более протяженные винтообразные траектории перемещения гранул вдоль внутренней агломерирующей поверхности агрегата. Все это, в совокупности, увеличивает полезную работу и повышает эффективность процесса агломерирования.

При установке ОВЛ в зоне классификации, угол наклона винтовых линий устройств направлен навстречу друг другу, что обеспечивает рециклинговое перемещение сформованных гранул вдоль классификационной решетки.

Расстояние между ОВЛ и угол раскрытия винтовой поверхности β влияют на качество получаемых гранул.

Потребляемая приводом БВА мощность включает составляющие

$$P = \frac{P_I}{\eta_I} + \frac{P_{II}}{\eta_{II}}. \quad (12)$$

Суммарная мощность, затрачиваемая на процесс агломерирования

$$P_I = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (13)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 , соответственно, мощности, расходуемые: шнековым питателем; на упрочнение микрогранулята ДВЛ рециркуляционного действия; на процесс агломерирования ОВЛ постадийного действия; на классификацию агломерируемого ТУ ОВЛ рециркуляционного действия, Вт,

$$P_1 = Q_{\text{шп}} \cdot L_{\text{шп}} \cdot g \cdot k_1 \cdot k_2 + M_{\text{тр}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (14)$$

где $Q_{\text{шп}}$ - массовая производительность шнекового питателя, кг/с; $L_{\text{шп}}$ - длина шнека, м; $k_1 = 1,1$, $k_2 = 4,0 \div 5,5$, соответственно, коэффициенты запаса мощности и сопротивления перемещению материала; $M_{\text{тр}}$ - момент трения, возникающий между торцевой поверхностью выгрузочной винтовой лопасти и решеткой растирателя конгломератов, Н · м;

$$P_2 = Z_{\text{р.пов.двл}} \cdot F_{\text{двл}} \cdot \bar{p}_{\text{м.гр}} \cdot S_{\text{двл.гр}} \cdot n_{\text{в}}, \quad (15)$$

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

$F_{\text{двл.гр}}$ - площадь рабочей поверхности ДВЛ, м²;

$\bar{p}_{\text{м.гр}}$ - удельное сопротивление, преодолеваемое ДВЛ при прохождении через слой агломерируемого материала, Н/м²;

$S_{\text{двл.гр}}$ - шаг ДВЛ, м;

Аналогично (15) рассчитываем значения мощности для P_3 и P_4 .

Мощность привода барабана БВА

$$P_{II} = P_{\text{пм}} + P_{\text{тр.п}} + P_{\text{тр.б}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{пм}}, P_{\text{тр.п}}, P_{\text{тр.б}}$ - соответственно, мощности, затрачиваемые на перемещение материала; преодоление сил трения в подшипниках опорных роликов; сил трения бандажей по опорным роликам, Вт.

$$P_{\text{пм}} = Q_{\text{БВА}} \cdot g \cdot L_{\text{БЗ}} \cdot k_3, \quad (17)$$

где $Q_{\text{БВА}}$ - массовая производительность БВА, кг/с. $Q_{\text{б}} = Q_{\text{шп}}$;

$L_{\text{БЗ}}$ - длина рабочей поверхности камер БВА, м;

k_3 - коэффициент сопротивления перемещению материала.

$$P_{\text{тр.п}} = 0,115(G_{\text{Б}} + G_{\text{м}}) r_{\text{р}} \cdot \omega_{\text{Б}}, \quad (18)$$

где $G_{\text{Б}}$, $G_{\text{м}}$, соответственно, сила тяжести корпуса БВА и материала, Н;

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

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

$$P_{\text{тр.б}} = M_{\text{Т}} \cdot \omega_{\text{Б}}, \quad (19)$$

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

В третьей главе представлена разработанная стендовая установка БВА (Рис.5). Определены методики экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.



Рисунок 5 Стендовая установка для моделирования процесса агломерирования ТУ.

1-спиралевидный блок микрогрануляции; 2-внешний барабан; 3-опорные ролики; 4-привод барабана; 5-привод внутреннего шнека (вала); 6-торцевая крышка; 7-внутренние рабочие органы.

Технические характеристики стендовой установки: длина спиралевидного канала $L_{\text{к}}=4,5$ м; частота вращения спирали $n_{\text{с}}=10\div 100$ об/мин; длина барабана $L_{\text{в}}=0,5$ м; внутренний диаметр центрального барабана $D_{\text{цб}}=0,067$ м, среднего $D_{\text{сб}}=0,15$ м, внешнего $D_{\text{вб}}=0,25$ м; частота вращения барабана $n_{\text{б}}=5\div 30$ об/мин; мощность привода барабана $P_{\text{б}}=150$ Вт, привода рабочих органов $P_{\text{с}}=70$ Вт. Также, разработаны отдельные блоки его камер с геометрическими параметрами: $D_{\text{к}}=0,15$ м; $\alpha_{\text{двл}}=25\div 35^{\circ}$; $\alpha_{\text{овл}}=35\div 45^{\circ}$.

С использованием современных аппаратных средств: растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450; цифровой камеры высокого разрешения с высокочувствительной матрицей Digiview II; рентгеновского дифрактометра SmartLab (Rigaku), изучены специфические особенности исследуемого ТУ: средний размер 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.

В четвертой главе В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено: тип связующего – водный раствор (15%) ПАВ; содержание связующего 17÷19%; коэффициент заполнения 0,18÷0,20; частота вращения вала винтовых лопастей 30÷50 об/мин; угол поворота винтовой лопасти относительно оси $\xi_{\text{овл}} = 18 \div 30^\circ$. При $\xi_{\text{овл}} = 19 \div 21^\circ$ наблюдается наибольший выход товарных гранул $d_{\text{гр}} = (2 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Проведено многофакторное планирование эксперимента по ЦКОП-2³. В качестве исследуемых параметров были выбраны: количество связующего в агломерируемом материале – $C_{\text{св}}$, %, x_1 ; коэффициент заполнения БВА – $\varphi_{\text{зап}}$, x_2 ; частота вращения вала винтовых лопастей БВА – $n_{\text{в.овл}}$, об/мин, x_3 . В качестве функций отклика были выбраны: прочность слоя сухих гранул ТУ – $\sigma_{\text{сл}}$, кПа; плотность слоя сухих гранул ТУ – $\rho_{\text{сл}}$, кг/м³; относительное сопротивление истиранию сухих гранул ТУ – $\mathcal{E}_{\text{ист}}$, %; процентный выход товарных гранул $d_{\text{гр}} = (2 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – $Q_{\text{тг}}$, %.

Получены уравнения регрессии, описывающие зависимости, указанных функций отклика:

$$\sigma_{\text{сл}} = 294 - 25,46X_1 - 14,36X_2 - 22,76X_3 - 37,03X_1^2 - 46,53X_2^2 - 45,53X_3^2 - 29,9X_1X_2 - 18,45X_1X_3 - 15,7X_2X_3; \quad (20)$$

$$\rho_{\text{сл}} = 667,4 - 17,3X_1 - 12,95X_2 + 10,45X_3 - 23,86X_1^2 - 8,86X_2^2 - 21,36X_3^2 - 17,89X_1X_2 - 12,89X_1X_3 - 16,19X_2X_3; \quad (21)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ист}} = 54,4 - 14,3X_1 - 1,18X_2 + 0,58X_3 - 4,33X_1^2 - 0,18X_2^2 - 0,21X_3^2 + 0,87X_1X_2 + 1,1X_1X_3 - 0,65X_2X_3; \quad (22)$$

$$Q_{\text{тг}} = 82,7 + 1,35X_1 - 1,72X_2 + 0,49X_3 - 6,71X_1^2 + 0,33X_2^2 - 0,02X_3^2 + 0,91X_1X_2 - 0,68X_1X_3 + 0,81X_2X_3 \quad (23)$$

Установлены рациональные значения варьируемых параметров: содержание связующего $C_{\text{св}} = (17 \div 19\%)$; коэффициент заполнения камеры агломерирования $\varphi_{\text{зап}} = (0,18 \div 0,2)$; частота вращения вала ОВЛ $n_{\text{в.овл}} = (30 \div 50 \text{ об/мин})$, для получения выходных показателей: прочности $\sigma_{\text{сл}} = (220 \div 250)$ кПа и плотности $\rho_{\text{сл}} = (630 \div 670)$ кг/м³ слоя; процентного выхода товарных гранул ($Q_{\text{тг}} = 83\%$) и относительного сопротивления истиранию гранулята ($\mathcal{E}_{\text{ист}} = 60\%$).

Графические зависимости по полученным уравнениям регрессии представлены на рисунке 6.

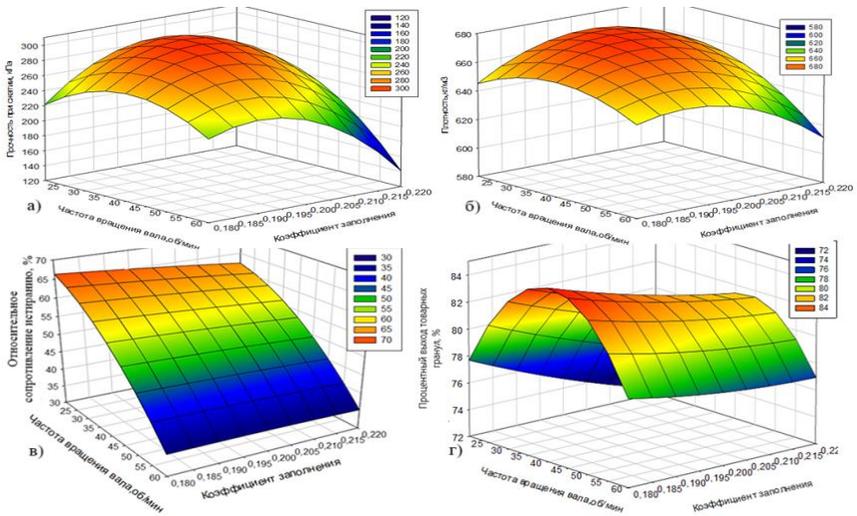


Рисунок 6. Графические зависимости: прочности ($\sigma_{сд}$, кПа) и плотности ($\rho_{сд}$, кг/м³) слоя гранул ТУ; относительное сопротивление гранул истиранию ($\epsilon_{ист}$, %) и процентного выхода товарных гранул ($Q_{тг}$, %) от коэффициента заполнения ($\varphi_{зап}=0,18-0,22$) и частоты вращения вала винтовых лопастей ($n_{ввл}=20-60$ об/мин) при постоянном количестве связующего ($C_{св} = 18\%$).

В пятой главе представлены результаты опытно-промышленных испытаний технологических линий ($Q_T=40\div 50$ кг/час и $Q_T=400\div 500$ кг/час) термолизной переработки органических ТМ с получением ТУ стабильного состава. С учетом специфических особенностей материала разработан опытно-промышленный БВА для агломерирования ТУ (Рис.7) в производственных условиях. Получены результаты опытно-промышленных испытаний технологической линии и БВА.



Рисунок 7. Технологический модуль для агломерирования полидисперсных материалов в БВА.

Установлены технологические параметры термолизной установки (Пат. РФ 2744225, 2773396, Евразийский патент, 043162,

043232), обеспечивающие получение ТУ с требуемыми физико-механическими характеристиками и физико-химическими свойствами: температура процесса, $T=450-470^{\circ}\text{C}$; время пребывания сырья в реакторе, $t=18-20$ мин; давление, $P_{\text{терм}} \leq 0,1 \div 0,15$ МПа; влажность исходного сырья $W \leq 20-25\%$; содержание механических примесей $\leq 1\%$; температура ТУ на выходе из реактора $T_{\text{ту}} \leq 140 \div 160^{\circ}\text{C}$ и после дальнейшего охлаждения до 30°C .

Технические характеристики БВА (Рис. 7): $L \times V \times H = 1,5 \times 1,0 \times 1,8$ м; диаметр внешнего барабана – 0,67 м, среднего – 0,49 м, центрального – 0,25 м; частота вращения цилиндрического корпуса агрегата – $(10 \div 15)$ об/мин⁻¹; вала винтовых устройств – $(30 \div 60)$ об/мин⁻¹; установленная мощность – 5,0 кВт; производительность – $(250 \div 300)$ кг/час; коэффициент заполнения – $(0,18 \div 0,20)$; Конечный продукт – агломерированный ТУ: диаметр $d_{\text{гр}} = (2 \div 5) \times 10^{-3}$ м; насыпная плотность $\rho_0 = (600 \div 700)$ кг/м³; прочность слоя $\sigma_{\text{сл}} = (220 \div 250)$ кПа; угол естественного откоса гранулята в статическом состоянии $\alpha_{\text{отк.ст}} = (26 \div 30)^{\circ}$; коэффициент трения $f_{\text{тр}} = 0,4 \div 0,5$.

Проведены опытно-промышленные испытания БВА, в результате которых были определены зависимости: прочности слоя ($\sigma_{\text{сл}}$), плотности ($\rho_{\text{сл}}$), мощности ($P_{\text{БВА}}$) и производительности БВА ($Q_{\text{БВА}}$) при различной степени заполнения ($\varphi_{\text{зап}} = 0,14 \div 0,24$), частоте вращения вала винтовых лопастей ($n_{\text{в.овл}} = 10 \div 100$ 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) (Рис. 8).

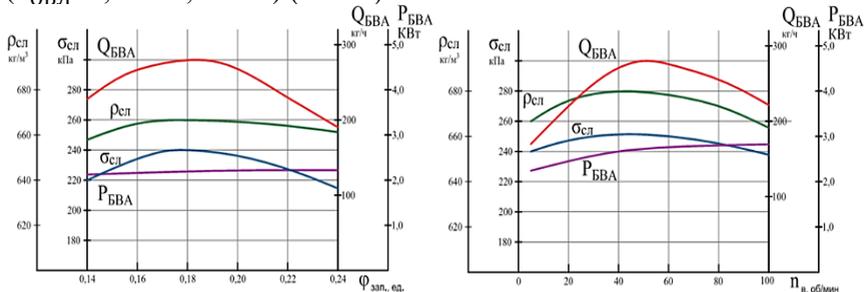


Рисунок 8 Графические зависимости плотности ($\rho_{\text{сл}}$) и прочности слоя ($\sigma_{\text{сл}}$), производительности БВА ($Q_{\text{БВА}}$) и мощности привода БВА ($P_{\text{БВА}}$) от коэффициента заполнения ($\varphi_{\text{зап}}$) и частоты вращения вала винтовых лопастей ($n_{\text{в.овл}}$)

Снижение значений $\rho_{\text{сл}}$ при $\varphi_{\text{зап}} \geq 18\%$ объясняется ухудшением условий агломерирования гранул. При $n_{\text{в.овл}} = 40$ об/мин достигаются максимальные значения $\sigma_{\text{сл}} = (230-250)$ кПа.

Разработаны инженерная методика расчета механо-теплотехнических параметров и технологический регламент получения агломерированного ТУ в БВА. Исследованы адсорбционные свойства ТУ. Так, максимальные показатели составили: по ионам тяжелых металлов $A = 38,5$ мг/г, а $C_p = 3000$ мг/дм³; по метиленовому синему при $C_p = 25$ и 50 мг/л – 92-98%; по нефтемаслоемкости 13,3-15,3 кгУВ/кгТУ. Определена технико-экономическая эффективность от использования агломерированного ТУ в качестве сорбента для очистки органических загрязненных жидких сред, составляющая 1 380, 50 тыс. рублей в год.

В заключении диссертации изложены основные результаты исследований и выводы по работе.

В приложении представлены акты производственных испытаний и внедрения результатов исследований, патенты, Ноу-Хау, дипломы, а также документы об участии в различных выставках и апробации научно-технических разработок.

Заключение

1. По результатам анализа научно-технических разработок и исследований отечественных и зарубежных ученых установлена 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 поэтапного 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 аппаратного измерения изучен морфологический состав и физико-механические характеристики ТУ: средний размер 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.

9. Проведены экспериментальные исследования основных закономерностей процесса агломерирования ТУ с использованием ЦКОП-2³: $\rho_{\text{сл}}, \sigma_{\text{сл}}, Q_{\text{тг}} \epsilon_{\text{ист}} = f(C_{\text{св}}, \varphi_{\text{зап}}, n_{\text{в.овл}})$. Установлены рациональные значения варьируемых параметров: содержание связующего ($C_{\text{св}} = 17 \div 19\%$); коэффициент заполнения камеры агломерирования ($\varphi_{\text{зап}} = 0,18 \div 0,2$); частота вращения вала ОВЛ ($n_{\text{в.овл}} = 30 \div$

50 об/мин); для получения выходных показателей: прочности $\sigma_{\text{сл}}=(220\div 250)$ кПа и плотности $\rho_{\text{сл}}=(630\div 670)$ кг/м³ слоя; процентного выхода товарных гранул ($Q_{\text{тг}} = 83\%$) и относительного сопротивления истиранию гранулята ($\varepsilon_{\text{ист}} = 60\%$).

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, $P=5,0$ кВт) для агломерирования ТУ с регламентированными характеристиками гранул: диаметр $d_{\text{гр}}=(2\div 5)\times 10^{-3}$ м; насыпная плотность $\rho_0=600\div 700$ кг/м³; прочность слоя $\sigma_{\text{сл}}=(220\div 250)$ кПа; угол естественного откоса гранул в статическом состоянии $\alpha_{\text{отк.ст}}=26\div 30^0$; 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 загрязненных органических жидких сред составляет 1 380, 50 тыс. рублей в год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ:

1. **Шамгулов, Р.Ю.** Разработка, исследование 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.

2. Высокотехнологичное оборудование и технологии для производства композиционных смесей с техногенными компонентами / М. В. Севостьянов, М. С. Агеева, В. С. Севостьянов, **Шамгулов Р.Ю.** [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 7. – С. 98-110. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110.

Публикации в издании, рекомендованном ВАК РФ:

1. 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.

Публикации в изданиях из перечня Scopus:

1. Glagolev, S. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste / S. Glagolev, N. Shein, V. Sevostianov, V. Obolonsky, **R. Shamgulov** // Ecology and Industry of Russia. 2020;24(12):11-15. (In Russ.) doi:10.18412/1816-0395-2020-12-11-15.

2. Vezentsev, A.I. 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** // (2022). In: Klyuev, S.V. (eds) Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 173. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_22.

3. Sevostianov, V.S. Thermolysis Technology and Technical Means for Processing Organic Technogenic Materials / V.S. Sevostianov, N.T. Shein, **R.U. Shamgulov**, V.V. Obolonsky // (2022). In: Klyuev, S.V. (eds) Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 173. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_42.

4. Sevostyanov, V.S. 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.

5. Klyuev, S. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber / S. Klyuev, V. Sevostyanov, M. Sevostyanov, V. Babukov, **R. Shamgulov** // Case Studies in Construction Materials [this link is disabled](#), 2022, 16, DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01071.

6. Sevost'yanov, V. S. Processing and Granulation of Carbon Black / **R. Y. Shamgulov**, A. M. Protsenko, A. S. Apatenko // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42, No. 5. – P. 538-540. – DOI 10.3103/S1068798X22050240.

Публикации в других изданиях:

1. **Шамгулов Р. Ю.** Теплотехнический расчёт барабанно-винтового агрегата для агломерации полидисперсных материалов / Р. Ю. Шамгулов, А.Н. Гончаров, Ю.С. Гридчин // 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.
2. **Шамгулов Р. Ю.** Разработка и исследование барабанно-винтового агрегата для агломерации поризованных материалов / Р. Ю. Шамгулов, А. Н. Гончаров, Ю. С. Гридчин // 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.

Патенты на изобретения и полезные модели, Ноу-Хау:

1. Пат. 2748629 С1 RU, МПК F26B 11/04 Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., **Шамгулов Р.Ю.** и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»-2020129204 заявл. 03.09.2020; опубл. 28.05.2021. Бюл. № 16
2. Пат. ЕА040258 В1 Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов/ Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., **Шамгулов Р.Ю.** и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»-ЕА202100189 заявл.05.07.2021; опубл. 13.05.2022.
3. 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., Перельгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»-2020124265 заявл. 22.07.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. №7.
4. Пат. ЕА043162 В1 Способ низкотемпературной термолитической 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.,

- Перельгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»- ЕА202100188 заявл. 04.07.2021; опубл. 27.04.23
5. Пат. 2773396 С1 RU, МПК F23G 5/027, B09B 3/00 (2006.01) Установка для низкотемпературного термоллиза твердых коммунальных и промышленных отходов/ Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перельгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» - 2021134475 заявл. 24.11.2021; опубл. 03.06.2022. Бюл. №16.
6. Пат. ЕА043232 В1 Установка для низкотемпературного термоллиза твердых коммунальных и промышленных отходов / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перельгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»-ЕА202200075 заявл. 04.07.2022; опубл. 28.04.23.
7. Ноу-Хау «Способ и устройство для гранулирования техногенных полидисперсных материалов» Св-во о регистрации Ноу-Хау №20220026 от 08.11.2022.
8. Ноу-Хау «Способ низкотемпературной термодеструкции техногенных материалов» Св-во о регистрации Ноу-Хау №20220031 от 27.10.2022