

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137

Шамгулов Р.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: shamguloff@mail.ru

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА**

Аннотация. В статье исследованы вопросы агломерирования полидисперсных техногенных материалов с низкой насыпной плотностью, в частности технического углерода (ТУ). Представлены патентозащищенные технические решения и технология переработки органических твердых техногенных материалов, получаемых при переработке ТКО способом низкотемпературного термолиза ($T \leq 500$ °C). Отличительными особенностями разработанных технических средств являются: герметизирующие узлы загрузки и выгрузки без доступа кислорода воздуха, геометрический профиль и конфигурация внутренних рабочих органов, система аспирации и конденсации парогазовой смеси и др. Представлена патентозащищенная конструкция барабанно-винтового агрегата для агломерирования ТУ низкотемпературной термолизной технологии. Проведены исследования ТУ, полученного при переработке органических твердых коммунальных отходов способом низкотемпературного термолиза. Разработана механо-реологическая модель процесса агломерирования исследуемого материала. Проведены теоретические исследования механо-реологической модели постадийного агломерирования полидисперсных материалов. Установлены основополагающие принципы организации технологических процессов гранулообразования на каждой стадии обработки материала и классификации гранулята. Обоснована необходимость использования на различных стадиях элементов (Гука, Ньютона, Сен-Венана и др.) и построенных на их основе механо-реологических моделей объемно-пространственной ориентации частиц ТУ и агломерируемого гранулята. Теоретически обосновано сочетание используемых элементов в моделях Максвелла, Бингмана, Шведова и др., на каждой из стадий процесса агломерирования.

На основании проведенных теоретических исследований и моделирования постадийных процессов агломерирования, разработаны специальные устройства, реализованные в патентозащищенной конструкции барабанно-винтового агрегата комбинированного действия (БВА КД). Разработана конструкторская документация и изготовлен опытно-промышленный образец БВА КД для агломерирования техногенных полидисперсных материалов.

Ключевые слова: низкотемпературный термолиз, агломерирование, технический углерод, барабанно-винтовой агрегат, механо-реологическая модель.

Введение. Человек и природа неотъемлемо связаны между собой. Стремительное развитие промышленности неизбежно приводит к необходимости увеличения добычи полезных ископаемых, производству новых материалов и товаров из них. Растет население планеты, а вслед за ним и потребительская корзина. Все вышеизложенное приводит к увеличению генерируемых человеком отходов. По данным Организации Объединенных Наций (ООН) население планеты на 15.11.2022 составило 8 млрд. человек [1]. Количество отходов, производимых человечеством, ежегодно увеличивается. Согласно данным, приводимых в отчете Росстата, количество образующих в России отходов производства и потребления в 2021 году составило 8,5 млрд. тонн/год [2]. Актуальность проблемы подтверждается: проводимой в стране реформой обращения с отходами, стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, а также иными принимаемыми законами в области охраны окружающей среды. В Послании Президента РФ Федеральному собранию от 15.01.2020

г. говорилось о необходимости скорейшего перехода на экономику замкнутого цикла. Целью политики, проводимой государством в сфере экологии, является снижение отходов, вывозимых на полигон и увеличение доли отходов, вовлекаемых во вторичный хозяйственный оборот [3].

В мире существуют различные способы переработки органических отходов: биохимическое разложение (компостирование), термическое разложение (пиролиз, сжигание, газификация), депонирование на полигонах ТКО и др. Все способы разделяются на три основных направления. На рисунке 1 представлена схема разделения существующих способов переработки по направлениям. Наиболее перспективным развитием ресурсосберегающих технологий является низкотемпературная термомеханическая переработка – термолиз, обеспечивающая получение из органических ТКО высококалорийной продукции. Данный способ впервые был предложен и опробован в 2010 году в ООО «НПП Термолиз» г. Москва при переработке резиновой крошки из изношенных автомобильных шин [4–5].

Биохимическая переработка – аэробно-анаэробное разложение органической составляющей ТКО [6]. Преимуществом данного способа является переработка органической составляющей ТКО, с получением конечного продукта – биогаза. Недостатком является: необходимость вовлечения в хозяйственный оборот полезных земельных площадей; длительность процесса – до 2-х лет; необходимость дальнейшей переработки неразложившейся составляющей – полимеров, минералов, металлов и др.

Пиролиз, сжигание, газификация – в их основе лежит деструкция отходов под действием

температуры. От 600 °С – при пиролизе, до 1200 °С – при газификации [7]. Преимуществом данного направления является возможность получения большого количества тепловой и электрической энергии. Недостатками – отсутствие качественных конечных продуктов; высокая стоимость заводов сжигания и газификации; выделяемые в процессе работы канцерогенные вещества; необходимость последующей переработки образуемой золы, шлаков, углеродсодержащего остатка.

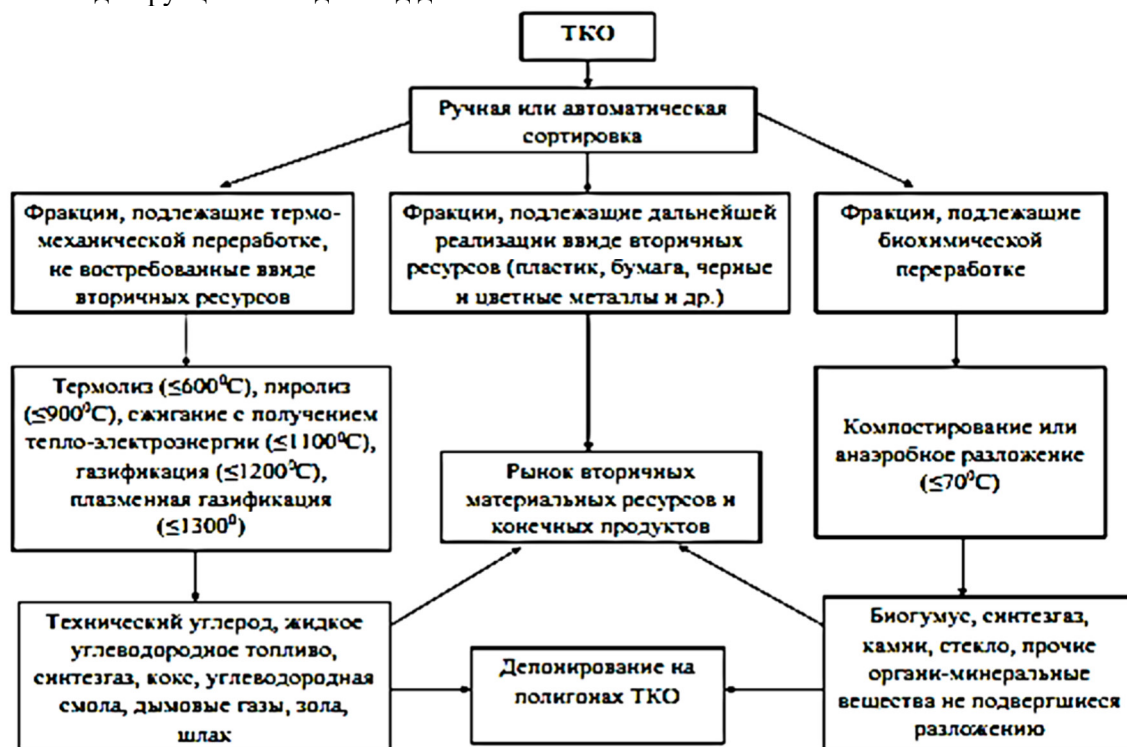


Рис. 1. Схема существующих направлений переработки органических ТКО

Представленные технологии переработки органических техногенных отходов направлены в основном на их депонирование (захоронение) на полигонах, либо на получение тепловой или электрической энергии – сжигание, газификация, пиролиз.

Материалы и методы. Термолиз – инновационный способ термомеханической переработки органических техногенных отходов при низких – ≤ 500 °С температурах. Основным преимуществом технологии является возможность получения востребованных, высококалорийных конечных продуктов. Процентный выход зависит от состава исходного сырья и варьируется в пределах: 1–10 % для синтетического газа (СГ) (3600 ккал/кг); 20–55 % для жидкого углеводородного топлива (ЖУТ) (10500 ккал/кг); 30–45 % для технического углерода (ТУ) (6800 ккал/кг); 2–20 % техническая вода [8–9]. Классическая схема технологического процесса

низкотемпературного термолиза представлена на рисунке 2.

Согласно представленной схеме, предварительно измельченные органические ТКО (автомобильные шины, целлюлозно-бумажные и полимерсодержащие отходы и др.) загружаются в приемный бункер 1, далее транспортером 2 подаются в узел герметичной загрузки 3, откуда поступают в реактор низкотемпературного термолиза 4. В реакторе сырье подвергается термической деструкции ($T \leq 500$ °С) и продвигается к выгрузочной части при помощи транспортирующего органа 5, приводимого во вращение мотор-редуктором 6. В процессе продвижения и термодеструкции без доступа кислорода воздуха сырье разлагается на парогазовую смесь и твердый углеродный остаток (технический углерод). Последний выводится из реактора через узел герметичной выгрузки 7. Парогазовая смесь через

фильтр-сепаратор 8 поступает в ректификационную колонну 9, где разделяется на жидкие продукты (жидкое углеводородное топливо, техническая вода) и газообразные (синтетический газ), дожигаемый в газогорелочном устройстве 10. Жидкие продукты выводятся через соответствующие штуцера на промежуточное хранение и дальнейшее использование по заданным технологическим направлениям.

С использованием результатов многолетних научных исследований, конструкторско-технологических разработок, их патентной защите в стране и за рубежом (патент РФ № 2744225, № 2773396, Евразийский патент № 043162, № 043232) совместно с ИТР ООО «ТК «Экотранс» нами разработаны опытно-промышленные ресурсосберегающие технологические линии ($Q=50$ кг/ч, $Q=500$ кг/ч) низкотемпературной термолитической переработки органических ТКО [10–11].

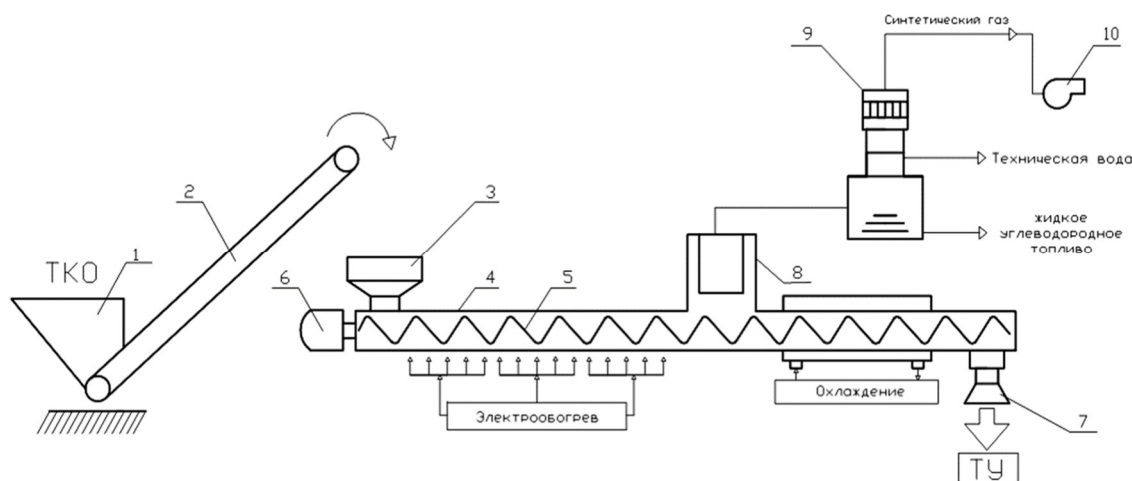


Рис. 2. Технологическая схема низкотемпературного термолитического процесса:

- 1 – приемный бункер измельченных ТКО; 2 – транспортер; 3 – узел герметичной загрузки сырья;
4 – реактор низкотемпературного термолитического процесса; 5 – транспортирующий орган; 6 – мотор-редуктор;
7 – узел герметичной выгрузки твердого продукта из реактора; 8 – фильтр-сепаратор;
9 – ректификационная колонна; 10 – газо-горелочное устройство

Отличительными особенностями данного оборудования являются: герметизирующие узлы загрузки и выгрузки без доступа кислорода воздуха, геометрический профиль и конфигурация внутренних рабочих органов, система аспирации и конденсации парогазовой смеси, а также другие системы аппаратного оформления технологического процесса.

Получаемые продукты по своим физико-механическим характеристикам и физико-химическим свойствам близки к своим аналогам, получаемым промышленным способом. Так, например, жидкое углеводородное топливо (ЖУТ) аналогично печному. Характеристики ЖУТ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства жидкого углеводородного топлива

№	Параметры	Ед. изм.	Метод исследования	Результат
1.	Плотность: при 15 °С	кг/м ³	ГОСТ Р 51069	820.0-830.0
2.	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477	Отсутствует
3.	Массовая доля серы	%	ГОСТ 32139	0.65-0.75
4.	Температура вспышки в закрытом тигле	°С	ГОСТ 6356	15.0-25.0
5.	Массовая доля механических примесей	%	ГОСТ 6370	0.012-0.016
6.	Фракционные данные – 50% перегоняется при	°С	ГОСТ 2177 метод Б	224.0
7.	Процентный выход	%	ГОСТ 2177 метод Б	87.0

Низкое содержание серы в исследуемом образце свидетельствуют о возможности применения получаемого жидкого углеводородного топлива в качестве альтернативы мазутам и темному

печному топливу. Плотность мазутов М40 и М100 составляет в среднем 950-970 кг/м³. Это вызывает определенные трудности при их приме-

нении в условиях пониженных ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. Для снижения вязкости и температуры застывания в мазут добавляют до 10–15 % дизельных фракций. Жидкое углеводородное топливо, получаемое по технологии низкотемпературного термоллиза, имеет плотность $820\text{--}830\text{ кг/м}^3$ и температуру застывания до ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это исключает необходимость проведения подготовительных операций при применении ЖУТ в котельных, а также облегчает его налив, транспортировку и слив в зимний период. Научные работы по использованию ЖУТ в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» в настоящее время продолжаются.

Сбор, хранение, транспортировка и применение по технологическому назначению жидких и газообразных продуктов общеизвестно и не вызывает затруднений. Наибольшее внимание в наших научных разработках уделялось техническому углероду (ТУ) – продукции, используемой в различных отраслях промышленности (лакокрасочной, химической, строительной и др.). Технический углерод востребован и в других об-

ластях промышленности. Однако в силу специфических характеристик и свойств ТУ (полидисперсность, низкая насыпная плотность, пыление и др.) его применение ограничивается в качестве конечного продукта с высокой добавленной стоимостью, или как исходное сырье для дальнейшего технологического передела. Получаемый при переработке органических ТКО способом низкотемпературной термоллизной технологии ТУ, был исследован в специализированной лаборатории.

С помощью растрового ионно-электронного микроскопа FEI Nova NanoSEM 450 проводилось измерение размера объекта, выведенного на экран монитора. Результаты исследований свидетельствуют о том, что ТУ имеет полидисперсный состав (10–700 мкм), а частицы имеют неправильную форму. Также, с использованием данного оборудования было проведено исследование элементного состава ТУ. Результаты представлены в таблице 2.

В таблице 3 представлены результаты исследования фазового состава ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО.

Таблица 2

Элементный состав технического углерода при переработке органических ТКО

Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %	Элемент	Масса, %
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		

Исследование фазового состава проводилось с использованием рентгеновского дифракто-

метра SmartLab (Rigaku). На рисунке 3 представлен результат исследования фазового состава ТУ.

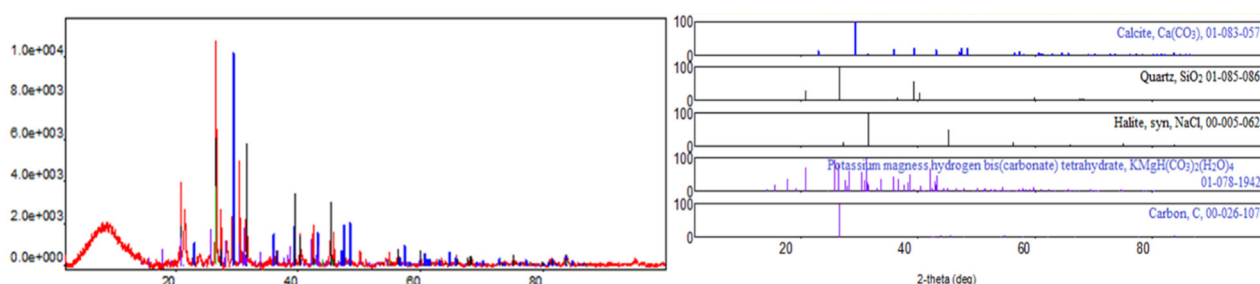


Рис. 3. Рентгеновская порошковая дифрактограмма ТУ, полученного при термоллизе органических ТКО

Таблица 3

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

С помощью газо-адсорбционного анализатора TriStar II 3020 были определены такие характеристики ТУ как: удельная поверхность по БЭТ; объем пор; средний размер пор. Результаты

газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты газо-адсорбционного исследования ТУ, полученного при переработке органических ТКО

Удельная поверхность исследуемого образца по однотоочечному методу БЭТ в точке $P/P_0 = 0.266612809$:	33.3527 м ² /г
Удельная поверхность исследуемого образца по пятиточечному методу БЭТ	22.8179 м ² /г
Объем пор в образце при давлении $P/P_0 = 0.984479441$:	0.1148 см ³ /г
Средний размер пор в образце:	145.72 Å

Основная часть. Установленные нами специфические особенности физико-механических характеристик и физико-химических свойств ТУ (широкий диапазон гранулометрического состава – $10 \div 700$ мкм при преобладающем среднем размере частиц $40 \div 45$ мкм; низкая насыпная плотность – $300 \div 400$ кг/м³, склонность к слеживаемости, высокое пыление при транспортировке, а также гидрофобность ввиду малого размера пор $120\text{--}150$ Å и др.) ограничивают его применение при производстве широкого ассортимента продукции (пластика, красок, резинотехнических изделий и др.). Все это свидетельствует о целесообразности разработки технологии и аппаратурного исполнения агрегата для агломерирования высокодисперсного компонента (ТУ), получаемого способом низкотемпературного термолиза.

Однако, проведенные исследования показали, что при агломерировании ТУ невозможно использовать известные водные растворы связующих из-за малого размера пор частиц, а наличие до 10 % масс. частей кремния и кальция не позволяют использовать общеизвестные для ТУ связующие (силикат натрия, мелассу и др.). В этой связи возникает ряд технических требований при разработке и создании специального агрегата для агломерирования указанного материала.

Агломерирование технического углерода является проблемной и в тоже время актуальной задачей, решение которой не только расширяет потребительские свойства ТУ, но и позволяют реализовать процесс термолиза технологически завершенным. Для решения поставленной задачи нами был проведен анализ существующих разработок [12–15], а также преимуществ и недостатков известных агломерирующих агрегатов: тарельчатых, роторно-центробежных, пальцевых, барабанных и др. [16–18]. Вышеуказанные особенности ТУ не позволяют использовать данные агрегаты ввиду следующих особенностей: больших габаритных размеров при относительно небольшой производительности, отсутствии герметичности для сильно пылящего материала, ограниченности управления постадийным процессом

гранулообразования, невозможности использования аппаратов экструзионного типа из-за высокой абразивности материала и др. Все это вызвало необходимость разработки и создания агрегата, соответствующего механо-технологическим требованиям. В этой связи, нами был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, конструкторско-технологических разработок и моделирования технологического процесса агломерирования ТУ.

В основу изучаемого процесса агломерирования ТУ и разрабатываемых технических средств были положены классические принципы физико-химической механики, разработанные известными учеными (Л.М. Сулименко, Б.С. Альбац, М.Б. Генералов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Д.А. Макаренков и др.) [19–23]. С учетом условий упруго-вязко-пластического деформирования ТУ со связующим нами разработана механо-реологическая модель постадийного процесса агломерирования с использованием элементов Гука, Ньютона, Сен-Венана и др., объединяющих их моделей. Разработанная механо-реологическая модель, позволяет постадийно исследовать процесс агломерирования технического углерода с учетом его особенностей.

Согласно изученных кинетических закономерностей процессов агломерирования полидисперсных систем, разработанных учеными теоретических положений и их практической реализации [24–26], нами сформулированы следующие концептуальные положения по организации постадийного технологического процесса агломерирования ТУ, с учетом их подтверждения при физическом моделировании на стендовых установках.

Для получения качественного агломерированного продукта из ТУ (заданных размеров и геометрической формы, плотности и прочности гранул, сопротивления истирающим нагрузкам и др.), согласно разработанной механо-реологической модели и результатам моделирования процесса гранулообразования, необходимо, на соответствующей стадии процесса, обеспечивать:

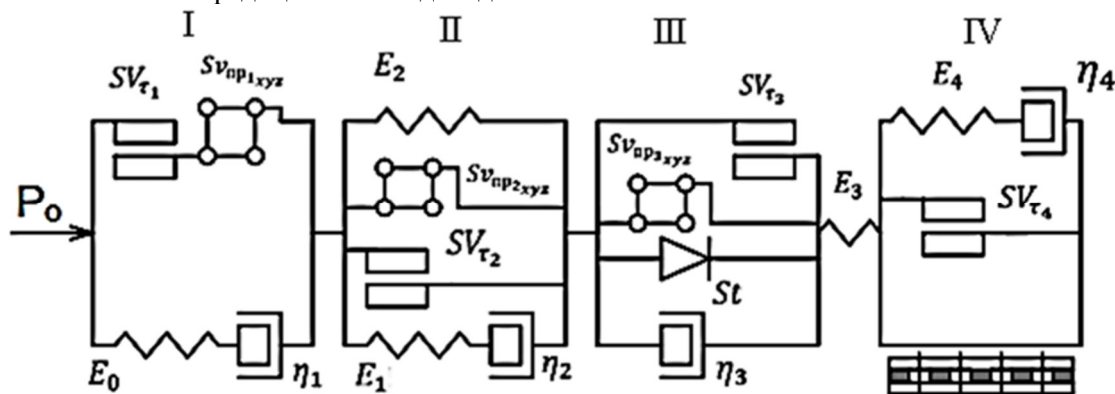
- исходное образование микрочастиц (центров гранулообразования) из гомогенной смеси ТУ с органическим связующим (15 % водный раствор ПАВ), при обеспечении объемно-пространственного перемещения частиц в спиралевидном устройстве;

- для дальнейшего процесса гранулообразования из полученных микрочастиц с низкой исходной насыпной плотностью целесообразно обеспечить упрочнение их поверхностного слоя при объемно-пространственном перемещении в технологическом режиме «рециклинга»;

- с целью повышения эффективности процесса гранулообразования наиболее целесообразно использовать не традиционный водопадно-

каскадный режим с ограниченной траекторией соприкосновения гранулы с боковой поверхностью камеры агломерирования, а каскадный режим – с более протяженной винтообразной траекторией соприкосновения за один период объемно-пространственного силового воздействия на гранулируемый слой;

- для расширения технологических возможностей использования агломерированного ТУ целесообразно осуществлять классификацию полученной агломерированной продукции по её размерам с использованием внутреннего рециклинга сгранулированного материала.



($E_0 - E_4$) – 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;

I	II	III	IV
Уруго-вязко-пластическое микрогранулирование шихты с объемно-пространственным ориентированием частиц	Уруго-вязко-пластическое уплотнение и упрочнение микрогранул при их объемно-пространственном ориентировании и внутреннем рециклинге	Вязко-пластическое гранулообразование микрогранулы при его однонаправленном ориентировании	Уруго-вязко-пластическое деформирование гранулы при его внутреннем рециклинге и релаксации

Рис. 4. Механо-реологическая модель процесса агломерирования полидисперсного материала на различных стадиях

Процесс формирования микрогранул (зародышей) на первой стадии агломерирования реализуется при упруго-вязком проявлении частиц (тела Гука и Ньютона), с последующим пластическим течением (трение – тело Сен-Венана SV_{mp_1}) и обязательной объемно-пространствен-

ной переориентацией (окатывающим воздействием) микрогранулы в системе координат XYZ (тело SV_{np1xyz}).

Уравнение деформационного воздействия на микрогранулы на первой стадии агломерирования имеют вид:

$$\varepsilon_I = \bar{\sigma}_e^I (E_0)^{-1} + [\sigma_n^I (\eta_1)^{-1}] t_1 + \bar{\sigma}_{CV_\tau}^I (\tau_I)^{-1} + [\bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I (E_{0_{xyz}})^{-1} + \bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I (\tau_{xyz}^I)^{-1}], \quad (1)$$

где $E_0, E_{0_{xyz}}$ – соответственно, модули Гука при силовом воздействии на частицу при ее объемно-пространственном перемещении, H/m^2 ;

t_1 – время окатывания частицы на первой стадии, с;

η_1 – вязкость жидкой фазы, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

$\bar{\sigma}_{e_{xyz}}^I, \tau_{xyz}^I$ – соответственно, нормальные и касательные напряжения, возникающие в результате механического трения между частицами в ходе их окатывания, H/m^2 ;

$\bar{\sigma}_{CV_\tau}^I$ – напряжение, действующее на частицу в результате механического трения, H/m^2 ;

σ_n^I, τ_1 – соответственно, предельные нормальные и касательные напряжения при сдвиговом деформировании, H/m^2 .

На второй стадии необходимо осуществить упрочнение поверхностных слоев полученных микрогранул. Это может быть обеспечено при реализации интенсивного внутреннего рециклинга микрогранул, характеризующегося несколько ограниченной траекторией их движения вдоль корпуса барабана, но интенсивным рециклингом материала. Указанный процесс может быть реализован с помощью специальных устройств, например, двухзаходных винтовых лопастей. Последние обеспечивают, при объемно-пространственной переориентации (элемент - Sv_{np2xyz})

$$\varepsilon_{II} = \frac{\bar{P}_{II}}{E_{II}} \left(1 - \exp E_1 \frac{t_2}{\eta_2} \right) + \frac{\bar{P}_{II_{ynp.cl}} - \bar{P}_{II_{mkr.zp}}}{2\tau_1} + \sigma_{Sv_{np}} (\sigma_{xyz}^{-1} + \tau_{xyz}^{-1}), \quad (2)$$

где $\bar{P}_{II_{mkr.zp}}, \bar{P}_{II_{ynp.cl}}$ – соответственно, давление от силового воздействия при микрогранулировании и упрочнении поверхностного слоя микрогранул на второй стадии, H/m^2 ;

E_1, E_2 – соответственно, модули Гука при силовом воздействии на жидкую фазу при ее перемещении в порах и упрочнении микрогранулята, H/m^2 ;

t_2 – время упрочнения микрогранулята на второй стадии, c ;

η_2 – вязкость жидкой фазы в порах микрогранул, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

τ – предельное напряжение при сдвиговом деформировании (текучести) микрогранул, H/m^2 ;

$\sigma_{Sv_{np}}$ – напряжение, воздействующее на слой микрогранул, при их объемно-пространственном перемещении, H/m^2 ;

σ_{xyz}, τ_{xyz} – соответственно, нормальные и касательные напряжения, возникающие при объемно-пространственном перемещении микрогранулята, H/m^2 .

На третьей стадии, реализуется окончательный процесс гранулообразования, характеризующийся совокупностью элементов: объемно-пространственного перемещения гранулята (элемент Sv_{np3xyz}), 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. Важное значение для эффективного процесса гранулообразования на третьей стадии имеет рациональное сочетание водопадно-каскадного режимов работы агрегата, обеспечивающего наибольший период соприкос-

микрогранул и частиц материала, их механический контакт и взаимодействие. Процесс представлен моделью Максвелла (элементы, Гука E_1 и Ньютона η_2), реализующей упруго-вязкое и пластическое (элемент Сен-Венана SV_{τ_2}) воздействие. 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-пространственное перемещение частиц, в виде нелинейно-деформированного структурного элемента Sv_{np2xyz} .

Относительную деформацию микрогранулята на второй стадии можно представить в виде

новения 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_{np3xyz} .

Относительная деформация гранулята (процесс гранулообразования) на третьей стадии может быть описана выражением:

$$\varepsilon_{III} = \frac{e_{xyz} \cdot t g \left(\bar{P}_{III_{maxSt}} - \bar{P}_{III_{maxynp}} \right) \cdot t_3}{\eta_{3ce} \cdot \sin \gamma_{maxSv_{np3}(xyz)}}, \quad (3)$$

где e_{xyz} – сдвиговая деформация при полной переориентации гранулята от действия элемента Sv_{np3xyz} ;

$\bar{P}_{III_{maxSt}}; \bar{P}_{III_{maxynp}}$ соответственно, максимальные значения давлений при разрушении гранул (элемент St) и их упрочнении, H/m^2 ;

t_3 – время гранулообразования на третьей стадии, c ;

η_{3ce} – вязкость связующего в порах гранул, $\frac{H}{m^2} \cdot c$;

$\gamma_{maxSv_{np3}(xyz)}$ – предельная величина угла поперечно-продольной переориентации элемента Sv_{np3xyz} , град.

На четвертой стадии 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.

Данное сочетание элементов представляет модель Шведова.

Для интенсификации процесса классификации гранулята нами предлагается использовать его внутренний рециклинг вдоль классифицирующей поверхности, что обеспечивается принуди-

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

где $\varepsilon_{E_{3IV}}$, $\varepsilon_{E_{4IV}}$, ε_{τ_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/м²;

P_{max} – предел текучести деформируемого элемента Сен-Венана, наступающий при предельных состояниях на слой гранул, Н/м²;

t_4 – период классификации сгранулированного материала, с.

Каждое из сочетаний указанных элементов обосновано предопределяет различные механизмы упруго-вязко-пластического деформирования формуемых частиц и сформованных тел

тельным силовым воздействием (представляющим элемент Гука, E_3) со стороны разнонаправленных рабочих органов.

Выражение относительной деформации гранулы на четвертой стадии имеет вид:

согласно кинетической закономерности уплотняемых шихт. Это позволяет, совместно с физическим моделированием технологических параметров, аргументировано принимать решения по выбору конструктивно-технологических параметров рабочих органов разработанного нами барабанно-винтового агрегата (БВА), схем сочетаний устройств и их установки в рабочей камере агломерирования. Проведенные нами теоретические исследования, а также физическое моделирование постадийных процессов позволили разработать патентозащищенную конструкцию для агломерирования техногенных материалов и их последующей обработки [27-28]. На рисунке 5 представлена схема патентозащищенной конструкции БВА.

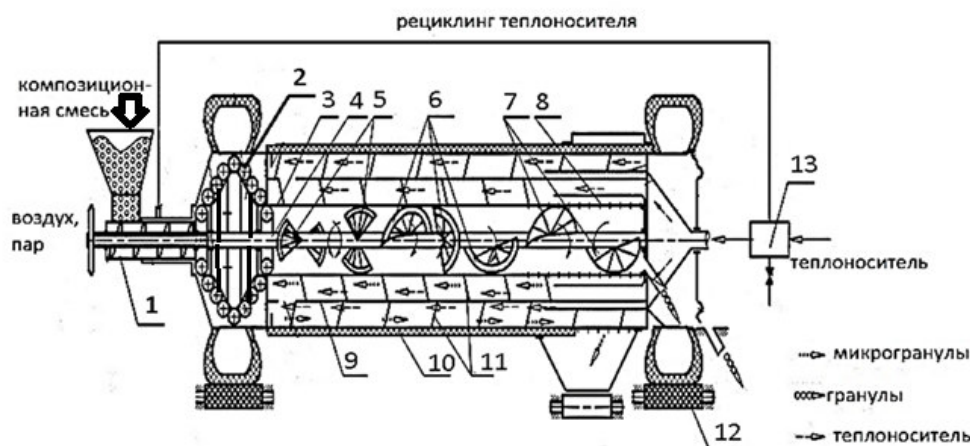


Рис. 5. Схема барабанно-винтового агрегата для агломерирования техногенных материалов

- 1 – приемно-загрузочное устройство; 2 – спиралевидный блок микрогранулирования; 3 – центральный барабан; 4 – центральный вал; 5 – разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти; 6 – однонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 7 – разнонаправленные однозаходные винтовые лопасти; 8 – сетчатая поверхность; 9 – средний барабан; 10 – внешний теплоизолированный барабан; 11 – винтовые ленточные поверхности; 12 – опорные ролики; 13 – распределительный блок рециркуляции теплоносителя

Принцип работы БВА заключается в следующем: исходная композиционная смесь технического углерода со связующим поступает в приемно-загрузочное устройство 1, откуда материал подается в спиралевидный блок микрогранулирования 2. Первая стадия – полученные микрогранулы из спиралевидного блока 2, расположенного во внешнем теплоизолированном барабане 10, поступают в центральный барабан 3. В последнем, с помощью расположенных на валу 4 рабочих органов различного геометрического профиля микрогранулы проходят дальнейшие

стадии обработки. Вторая стадия – упрочнения микрогранулята разнонаправленными двухзаходными винтовыми лопастями 5. Третья стадия – последующее агломерирование микрогранул однонаправленными однозаходными винтовыми лопастями 6. Четвертая стадия – классификация полученного полифракционного гранулята разнонаправленными однозаходными винтовыми лопастями 7 через сетчатую поверхность 8. Отклассифицированные гранулы подвергаются сушке, перемещаясь вдоль оси среднего 9 и внешнего теплоизолированного барабана 10 при

помощи винтовых ленточных поверхностей 11. Внешний теплоизолированный барабан 10 упругими торообразными поверхностями (бандажами) опирается на прорезиненные опорные ролики 12. Конструкция агрегата предусматривает рециркуляцию теплоносителя через распределительный блок 13.

Разработанный нами агрегат позволяет в полном объеме реализовать все требуемые технологические операции, необходимые для получения качественных гранул, соответствующих требованиям потребителя: предварительное микрогранулирование, упрочнение поверхностного слоя микрогранул, объемно-пространственное агломерирование, классификация гранул полифракционного состава. Кроме того, готовый агломерированный материал подвергается тепловой обработке (сушке) в БВА комбинированного действия с замкнутым циклом движения теплоносителя.

Проведенные нами теоретические исследования механо-реологической модели постадийного агломерирования полидисперсных материалов позволили установить основополагающие

принципы организации технологических процессов гранулообразования на каждой из четырех стадий обработки материала 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.

Полученные расчетные зависимости и общая математическая модель процесса агломерирования таких специфических техногенных материалов, как технический углерод, с учетом основополагающих принципов физико-химической механики, подтверждают обоснованность теоретико-экспериментального подхода (моделирования) при разработке специального агломерирующего оборудования. Разработанное оборудование позволяет получать качественные гранулы, требуемого гранулометрического состава, представленные на рисунке 6.

Физико-механические характеристики получаемого гранулята, а также его гранулометрический состав представлены в таблице 5.

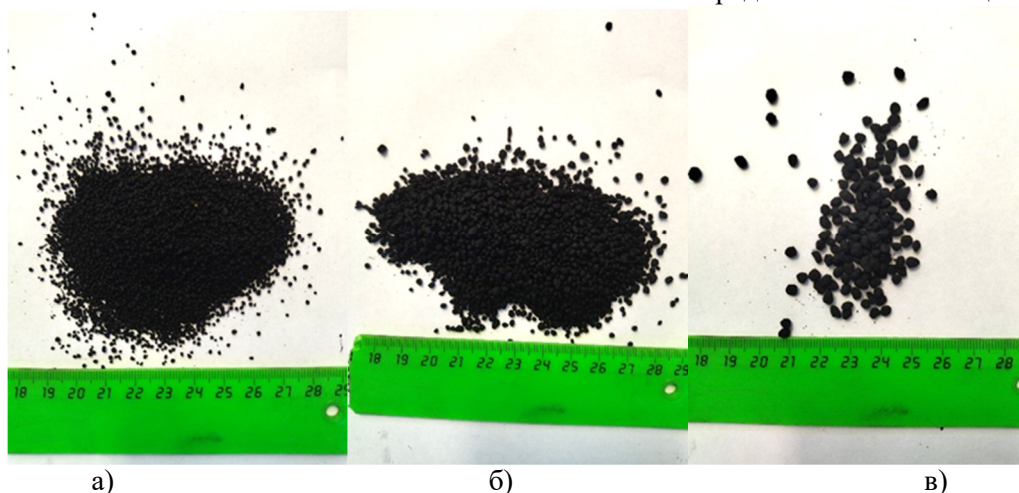


Рис. 6. Гранулы ТУ, полученные при переработке органических ТКО:
а) гранулы размером 2–3 мм; б) гранулы размером 3–4 мм; в) гранулы размером 4–5 мм

Таблица 5

Физико-механические характеристики и гранулометрический состав получаемого гранулята

Наименование параметра	Значение
Содержание связующего, масс. частей	20–22 %
Гранулометрический состав:	
≥5мм	8–9 %
4–5 мм	4–5 %
3–4 мм	5–6 %
2–3 мм	65–70 %
≤2 мм	18–20 %
Плотность насыпная фракций 2–4 мм	600–700 кг/м ³
Сорбционная емкость по метиленовому голубому	92–98 %
Маслоемкость	8–11 кг/кг

Разработанное учеными БГТУ им. В.Г. Шухова – научный руководитель д.т.н., проф. В.С. Севостьянов, патентозащищенное оборудование

и технические средства, в настоящее время проходят опытно-промышленные технологические испытания и внедрение на производственной

площадке индустриального партнера ООО «ТК «Экотранс» г. Белгород – директор Н.Т. Шейн, руководитель научно-производственного объ-

единения В.В. Оболонский. На рисунке 7 представлена технологическая линия низкотемпературного термолiza органических ТКО.



Рис. 7. Опытно-промышленная установка низкотемпературного термолiza, расположенная на ООО «ТК «Экотранс». Производительность Q – 500 кг/ч

На рисунке 8 представлен барабанно-винтовой агрегат для агломерирования полидисперсных техногенных материалов, входящий в состав

технологической линии низкотемпературного термолiza.



Рис. 8. Барабанно-винтовой агрегат для агломерирования полидисперсных материалов. Производительность Q – 200–300 кг/ч

Получаемый в БВА гранулят может быть использован в следующих областях промышленности:

- при производстве резинотехнических изделий в качестве наполнителя. Размер гранул – 1÷2мм.;
- при производстве полимерных труб в качестве красителя. Размер гранул – 2÷3 мм;
- в качестве адсорбента для очистки жидких сред. Размер гранул – 2÷4 мм.

Кроме того, гранулят используется в других востребованных технологиях.

Выводы. Реализация вышеуказанных инновационных технологий базируется на выполненных научно-технических разработках:

1. Механо-реологической модели процесса агломерирования полидисперсных материалов, а

также уравнениях деформационного воздействия рабочих органов на обрабатываемый материал.

2. Патентозащищенных конструкциях: термолizных технологиях и специальных технических решениях, а также БВА для агломерирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью. Последний обеспечивает получение технического углерода низкотемпературной термолizной технологии в агломерированном состоянии.

3. Разработанной опытно-промышленной установки БВА производительностью 200–300 кг/ч.

4. Полученной агломерированной продукции (технического углерода 2–4 мм) и регламентированного состава композиционной смеси (в

виде связующего, фракционных соотношений ТУ и др.).

5. Технологическом регламенте на процесс постадийного агломерирования ТУ в патентозащищенной конструкции БВА.

Источник финансирования: Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта “Наука и университеты” новой лабораторией под руководством молодых исследователей “Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы” (FZWN-2021-0014).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Народонаселение по данным ООН [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/population> (дата обращения: 24.07.2023).
2. Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб./Росстат. –0-92 М., 2022. 115 с.
3. Мочалова Л.А., Соколова О.Г., Полежаева М.В., Гриненко Д.А. Институциональные условия решения проблем в сфере обращения с отходами производства и потребления // Управление техносферой. 2020. Т. 3. Вып. 2. С. 159-179. DOI: 10.34828/UdSU.2020.85.39.001.
4. Пат. 110745, Российская Федерация, МПК C08J 11/00. Установка для переработки резиносодержащих отходов // Бочавер К.З.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП Термолиз» заявл. 19.04.2011; опубл. 27.11.2011, бюл. №33. 2 с.
5. Bochaver K. Spiral reactors in heterogeneous technological processes: Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 200 с.
6. Кирейчиков И.В., Унжаков В.В., Маслов Д.И. Органика на полигоне: вредное воздействие и как его избежать // Журнал ТБО – обращение с отходами 2021. Вып. 6 (179). С. 28-33.
7. Хафизов И.Ф., Мусин Р.Р. Современные тенденции развития процесса пиролиза // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 231–234.
8. Разноушкин А.Е., Хайбуллин А.А., Жирнов Б.С., Разноушкин А.Е., Когот Ю.Е., Нуриева С.А. Исследование термолитиза нефтяных пеков из различного сырья // Кокс и химия. 2019. № 1. С. 34–38.
9. Гунич С.В., Дьячкова С.Г., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Состав углеродного остатка при утилизации несортированных твердых бытовых отходов методом СВЧ-термолитиза // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 9. С. 572–575.
10. Glagolev S., Shein N., Sevostianov V., Obolonsky V., Shamgulov R. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste // Ecology and Industry of Russia. 2020. №24. Pp. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15
11. Sevostianov V.S., Shein N.T., Shamgulov R.U., Obolonsky V.V. Thermolysis technology and technical means for processing organic technogenic materials // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Т.173. Pp. 329–335. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_42
12. Пат. №2528670, Российская Федерация, Способ и устройство для гранулирования в псевдооживленном слое: МПК B01J/ Федерико Зарди (CH); заявитель и патентообладатель УРЕ КАСАЛЕ С.А. (CH). № 2010132281/05; заявл. 19.12.2008; опубл. 20.12.2014, Бюл. №26. 19 с.
13. Пат. №2152247, Российская Федерация, Способ гранулирования мелкодисперсных материалов: МПК B01J/ В.Г. Островский, С.П. Шеремет, О.Н. Иванов; заявитель и патентообладатель Государственное предприятие РФ Центральное научно-исследовательское бюро. № 99106728/12; заявл. 31.03.1999; опубл. 10.07.2000, Бюл. №19. 3 с.
14. Пат. №2714473, Российская Федерация, Способ гранулирования мелкодисперсных материалов: МПК B01J/ А.С. Сахарова, Е.Г. Еремеев, М.В. Шершнева и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. № 2019121445; заявл. 05.07.2019; опубл. 17.02.2020, Бюл. №5. 1с.
15. Пат. №2394638, Российская Федерация, Устройство для обработки порошкообразного материала: МПК B01J/ ХЮТТЛИН Бергер (DE); заявитель и патентообладатель ХЮТТЛИН Бергер (DE)/ № 2007113015/15; заявл. 10.09.2004; опубл. 20.07.2010, Бюл. №20. 12с.
16. Пат. №2558893, Российская Федерация, Гранулятор: МПК B01J/ И.Ф. Шлегель; заявитель и патентообладатель И.Ф. Шлегель/ № 204119097; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. №22. 8 с.
17. Пат. №2643046, Российская Федерация, Устройство для гранулирования: МПК B01J/ 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.
18. Pat. № ES2379075T3, Spain, Process and apparatus for continuous wet granulation of powder material: Classifications B01J2/20, B29B 7/48 / 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.

19. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов. М.: ВНИИЭСМ, 1994. 297 с.

20. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография // Белгород. Изд-во БГТУ. 2009. 228 с.

21. Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р., Шомин И.П. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений // Москва. Машиностроение. 1984. 192 с.

22. Севостьянов М.В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов: монография // Белгород. Изд-во БГТУ. 2017. 204 с.

23. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Ядыкина В.В. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2013. №6. С. 102–106.

24. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 400 с.

25. Ничипоренко С.П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии

строительной керамики. Киев.: Наукова думка, 1968. – 76с.

26. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учебное пособие для строительных вузов. М.: Высш. школа, 1978. 447с.

27. Пат. №2748629, Российская Федерация, Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки: МПК F26B / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов, Д.Н. Перельгин, В.В. Оболонский; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»/ №2020129204; заявл. 03.09.2020; опубл. 28.05.2021, Бюл. №16. 8 с.

28. Пат. №040258, Евразийский, Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки: МПК F26B / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов, Д.Н. Перельгин, В.В. Оболонский; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»/ опубл. 13.05.2022.

Информация об авторах

Шамгулов Роман Юрьевич, аспирант кафедры технологические комплексы машины и механизмы. E-mail: shamguloff@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.10.2023 г.

© Шамгулов Р.Ю., 2023

Shamgulov R. Yu.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: shamguloff@mail.ru*

DEVELOPMENT, RESEARCH AND PILOT INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF CARBON BLACK AGGLOMERATION TECHNOLOGY

Abstract. *The article examines the issues of agglomeration of polydisperse technogenic materials with low bulk density, in particular carbon black (CB). Patent-protected technical solutions and technology for processing organic solid technogenic materials obtained by processing MSW by low-temperature thermolysis ($T \leq 500$ °C) are presented. Distinctive features of the developed technical means are: sealing loading and unloading units without access to air oxygen, geometric profile and configuration of internal working parts, a system for aspiration and condensation of a vapor-gas mixture, etc. A patent-protected design of a drum-screw unit for agglomeration of technical specifications of low-temperature thermolysis technology has been presented. Specification studies have been carried out, obtained by processing organic solid municipal waste using low-temperature thermolysis. A mechano-rheological model of the agglomeration process of the material under study has been developed. Theoretical studies of the mechano-rheological model of stage-by-stage agglomeration of polydisperse materials have been carried out. The fundamental principles of organizing technological processes of granule formation at each stage of material processing and granulate classification have been established. The necessity of using elements (Hooke, Newton, Saint-Venant, etc.) and mechano-rheological models of volumetric-spatial orientation of CB particles and agglomerated granulate constructed on their basis at various stages is substantiated. The combination of elements used in the models of Maxwell, Bingman, Shvedov, etc., at each stage of the agglomeration process is theoretically justified. On the basis of*

theoretical studies and modeling of stage-by-stage agglomeration processes, special devices have been developed, implemented in the patent-protected design of a combined-action drum-screw unit (DSU CA). Design documentation has been developed and a pilot industrial sample of BVA CD has been manufactured for agglomeration of technogenic polydisperse materials.

Keywords: *Low-temperature thermolysis, agglomeration, carbon black, drum-screw unit, mechano-rheological model.*

REFERENCES

1. Population according to the UN [Narodonaselenie po dannym OON]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/population> (date of treatment: 24.07.2023).
2. Environmental protection in Russia [Ohrana okruzhayushchej sredy v Rossii]. 2022: St. col./Rosstat. –0-92 M., 2022. 115 p. (rus)
3. Mochalova L.A., Socolova O.G., Polezhaeva M.V., Grinenko D.A. Institutional conditions for solving problems in the field of industrial and consumer waste management [Institucional'nye usloviya resheniya problem v sfere obrashcheniya s othodami proizvodstva i potrebleniya]. Technosphere management. 2020. Vol. 3. Rel. 2. Pp. 159–179. DOI: 10.34828/UdSU.2020.85.39.001.(rus)
4. Bochaver K.Z. Installation for processing rubber waste. Patent RF, no. 2011115344/05, 2011
5. Bochaver K. Spiral reactors in heterogeneous technological processes: Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 200 p. (rus)
6. Kirejchikov I.V., Unzhakov V.V., Maslov D.I. Organics at the landfill: harmful effects and how to avoid them [Organika na poligone: vrednoe vozdejstvie i kak ego izbezhat']. Solid waste log - waste management 2021. Vol. 6 (179). Pp. 28–33. (rus)
7. Xafizov I.F., Musin R.R. Current trends in the development of the pyrolysis process [Sovremennye tendencii razvitiya processa piroliza]. Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18. No. 2. Pp. 231–234. (rus)
8. Rznoushkin A.E., Xajbullin A.A., Zhirnov B.S., Rznoushkin A.E., Kogot Yu.E., Nurieva S.A. Study of the thermolysis of petroleum pitches from various raw materials [Issledovanie termoliza neftyanyh pekov iz razlichnogo syr'ya]. Coke and chemistry. 2019. No. 1. Pp. 34–38. (rus)
9. Gunich S.V., D'yachkova S.G., Yanchukovskaya E.V., Dneprovskaya N.I. Composition of the carbon residue during the disposal of unsorted municipal solid waste by microwave thermolysis [Sostav uglerodnogo ostatka pri utilizacii nesortirovannyh tverdyh bytovyh othodov metodom SVCH-termoliza]. Chemical Technology. 2014. Vol. 15. No. 9. Pp. 572–575. (rus)
10. Glagolev S., Shein N., Sevostianov V., Obolonsky V., Shamgulov R. Technologies for Integrated Processing of Solid Municipal Waste. Ecology and Industry of Russia. 2020. No. 24. Pp. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15 (rus)
11. Sevostianov V.S., Shein N.T., Shamgulov R.U., Obolonsky V.V. Thermolysis technology and technical means for processing organic technogenic materials. Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Vol. 173. Pp. 329–335. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_42
12. Federico Zardi. Method and device for fluidized bed granulation. Patent RF no. 2010132281/05, 2008.
13. Ostrovskij V.G., Sheremet S.P., Ivanov O.N. Method of granulating fine materials. Patent RF no. 99106728/12. 1999.
14. Saharova A.S., Ereemeev E.G., Shershneva M.V. and etc. Method of granulating fine materials. Patent RF no. 2019121445, 2019.
15. Hyuttlin Bergert Device for processing powdery material. Patent RF no. 2007113015/15, 2004.
16. Shlegel' I.F. Granulator. Patent RF no. 204119097/05, 2014.
17. Ryskin M.Ya., Yakovlev B.A. Granulation device. Patent RF no. 2017110627, 2017.
18. Process and apparatus for continuous wet granulation of powder material: Pat. no. ES2379075T3 Spain, Classifications B01J2/20, B29B 7/48 / 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.
19. Sulimenko L.M., Al'bac B.S. Sintering processes in the production of building materials [Aglomeracionnye processy v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. M.: VNIIESM, 1994. 297 p. (rus)
20. Il'ina T.N. Agglomeration processes in technologies for processing dispersed materials [Processy aglomeracii v tekhnologiyah pererabotki dispersnyh materialov]: a monograph // Belgorod: publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 228 p.(rus)
21. Generalov M.B., Klassen P.V., Stepanova A.R., Shomin I.P. Calculation of equipment for granulating mineral fertilizers [Raschet oborudovaniya dlya granulirovaniya mineral'nyh udobrenij]. Moscow: Mechanical engineering, 1984. 192 p.(rus)
22. Sevost'yanov M.V. Calculation and design of equipment for compacting technogenic materials: a monograph [Raschet i proektirovanie oborudovaniya dlya kompaktirovaniya tekhnogennyh materialov: monografiya]. Belgorod: publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017. 204 p.(rus)

23. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Gridchin A.M., Ural'skij V.I., Sevost'yanov M.V., Yady'kina V.V. Resource-energy-saving modules for comprehensive recycling of man-made materials [Resurso-energoberegayushchie moduli dlya kompleksnoj utilizatsii tekhnogennyh materialov] // BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 6. Pp. 102–106. (rus)

24. Rebinder P.A. Physico-chemical mechanics of dispersed structures [Fiziko-himicheskaya mekhanika dispersnyh struktur]. M.: The science, 1966. 400 p.(rus)

25. Nichiporenko S.P. Physico-chemical mechanics of dispersed structures in the technology of building ceramics [Fiziko-himicheskaya mekhanika

dispersnyh struktur v tekhnologii stroitel'noj keramiki]. Kyiv.: Naukova Duma, 1968. 76 p. (rus)

26. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics [Rheological foundations of soil mechanics]: Textbook for construction universities. M.: Higher school, 1978. 447 p.(rus)

27. Sevost'yanov V.S., Shein N.T., Sevost'yanov M.V., Shamgulov R.U., Pereligin D.N., Obolonsky V.V. Drum-screw unit for granulating man-made materials and their processing. Patent RF no. 2020129204, 2020.

28. Drum-screw unit for granulating man-made materials and their processing. Pat. no 040258 Eurasian.

Information about the authors

Shamgulov, Roman Yu. Postgraduate student. E-mail: olga.koalchenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 05.10.2023

Для цитирования:

Шамгулов Р.Ю. Разработка, исследования и опытно-промышленное освоение технологии агломерирования технического углерода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 124–137. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137

For citation:

Shamgulov R.Yu. Development, research and pilot industrial development of carbon black agglomeration technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 124–137. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-124-137