

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Институт естественных и точных наук

Факультет «Химический»

Кафедра «Экология и химическая технология»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, доцент кафедры  
«Материаловедение и физико-  
химия материалов», к.х.н.

\_\_\_\_\_ Г.М. Рысс

\_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,  
«Экология и химическая  
технология», д.х.н., доцент

\_\_\_\_\_ В.В. Авдин

\_\_\_\_\_ 2019 г.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ  
УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–18.04.01.2019.388.11.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы, д.т.н., с.н.с.

\_\_\_\_\_ Б.Ш. Дыскина

\_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы,  
студент группы ЕТ-243

\_\_\_\_\_ В.А. Мельник

\_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент кафедры,  
к.т.н.

\_\_\_\_\_ Н.П. Нонишнева

\_\_\_\_\_ 2019 г.

Челябинск 2019

## АННОТАЦИЯ

Мельник В.А. Разработка технологии гранулирования пылевых углеродных материалов. Челябинск: ЮУрГУ ЕТ; 2019, 76 с, 26 рис, 16 таб., библиогр. список 35 наим.

Ключевые слова: графитированная пыль, отходы, порошковый бакелит, гранулирование, размеры гранул

Гранулирование широко применяют в различных отраслях промышленности. В углеграфитовой промышленности образуются большие количества невозвратных графитированных пылевых отходов.

Процессы гранулирования особенно актуальны в производстве многотоннажных отраслей промышленности.

Цель работы – разработать технологию гранулирования графитированных пылевых отходов электродного производства

Для достижения цели решены задачи:

- отобрать пробы графитированных отходов
- выбрать связующее;
- определить оптимальное количества связующего;
- разработать технологию изготовления гранул;
- выбрать оборудование для реализации разработанной технологии

Разработана технология гранулирования графитированных отходов электродного производства, с связующее – бакелит порошкообразный. Рекомендовано гранулирование прессованием в глухую матрицу. Получены гранулы размерами от 2 до 8 мм. Предложено технологическое оборудование для прессования: валковый пресс-гранулятор (DGZ 2.0); роторный барабанный гранулятор (TDZGZ1240) производительностью от 1,5 до 2,5 т/ч и 1,0 до 3,0 т/ч, соответственно.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ (Литературный обзор) .....	6
1.1 Гранулирование.....	6
1.2 Использование графитовой пыли.....	9
1.2.1 Гранулирование – использование отходов электродного производства для изготовления карбюризатора.....	12
1.3 Карбюризатор (науглероживатель).....	15
1.4 Классификация связующих материалов.....	20
1.5 Окатывание .....	25
1.5 Методы прессования.....	35
1.5.1 Прессование в прессформу .....	37
1.5.2 Прессование выдавливанием.....	45
1.6 Оценка гранулируемости вещества. ....	49
2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	51
2.1 Объект исследования.....	51
2.2.Методы исследования.....	51
2.2.1. Методика определение зольности.....	51
2.2.2. Методика определения действительной плотности.....	53
2.2.3 Методика определения выхода летучих веществ.....	54
2.2.4. Определение механической прочности нелетучего остатка углей. ....	55
2.2.5. Определение кажущейся плотности цилиндрических образцов .....	55
2.2.6. Методика определения гранулометрического состава гранулята ...	56

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	57
3.1 Гранулирование методами окатывания и протираия через сито .....	57
3.2. Гранулирование методом прессования выдавливанием со шнековой подачей массы .....	61
3.2.1 Подготовка массы .....	61
3.2.2 Прессование выдавливанием через фильеры .....	62
3.2.3 Опробование связующего – порошок BakelitePF 6357 FP.....	64
3.3. Гранулирование методом прессования в глухую матрицу .....	66
3.4 Выбор оборудования для гранулирования графитированной пыли.....	69
ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	75

## ВВЕДЕНИЕ

Гранулирование широко применяют в различных отраслях промышленности: химической, нефтехимической, фармацевтической, металлургической, пищевой и др. В то же время в углеграфитовой промышленности образуются большие количества невозвратных графитированных пылевых отходов.

Современные методы гранулирования обеспечивают получение большого класса продуктов с улучшенными физико-механическими свойствами. Гранулы обладают хорошей сыпучестью и высокой плотностью, имеют прочную структуру, однородны по размерам, не пылят при транспортировке и применении. Процессы гранулирования особенно актуальны в производстве многотоннажных отраслей промышленности.

Цель работы – разработать технологию гранулирования графитированных пылевых отходов электродного производства

Для достижения цели решены задачи:

- отобрать пробы графитированных отходов
- выбрать связующее;
- определить оптимальное количества связующего;
- разработать технологию изготовления гранул;
- выбрать оборудование для реализации разработанной технологии

Разработана технология гранулирования графитированных отходов электродного производства, связующее – бакелит порошкообразный. Рекомендовано гранулирование прессованием в глухую матрицу. Получены гранулы размерами от 2 до 8 мм. Предложено технологическое оборудование для прессования: валковый пресс-гранулятор (DGZ 2.0); роторный барабанный гранулятор (TDZGZ1240) производительностью от 1,5 до 2,5 т/ч и 1,0 до 3,0 т/ч, соответственно.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ (Литературный обзор)

## 1.1 Гранулирование

Гранулирование – это совокупность физико-химических и физико-механических процессов, обеспечивающих формирование частиц определенных размеров, формы, структуры и физических свойств. В общем случае гранулирование включает в себя следующие технологические стадии: подготовку исходного сырья, дозирование и смешение компонентов; собственно, грануло- образование (агломерация, наслаивание, окатывание, кристаллизация, уплотнение и др.); формирование структуры (сушка, термостатирование, полимеризация и др.); сортировка (разделение частиц по размерам) и дробление крупных фракций с последующим выделением товарного продукта.

В работе [1]использован обширный материал, накопленный авторами при исследовании процессов гранулирования минеральных удобрений и ряда других химических продуктов и соответствующих аппаратов.

Поскольку гранулирование представляет интерес для широкого круга инженерно-технических работников различных отраслей промышленности, в монографию включены разделы, касающиеся основ техники гранулирования. Впервые публикуются инженерные методы расчета типовых процессов гранулирования, рассматриваются способы интенсификации и совершенствования. Даны детальный анализ состояния техники и технологии гранулирования, стадии гранулообразования, определяющей выбор методов гранулирования и аппаратурного оформления.

Общая тенденция развития техники гранулирования химических продуктов тесно связана с повышением эффективности производства и качества выпускаемой продукции. Известные способы гранулирования в основном обеспечивают получение готового продукта с заданными качественными показателями (гранулометрический состав, прочность гранул,

слеживаемость, рассыпчатость, пылимость и т. п.). В случае ужесточения качественных показателей продукта приходится изыскивать приемы и методы совершенствования известных процессов гранулирования и разрабатывать новые более эффективные способы.

Для гранулирования пластично-вязких порошковидных и пастообразных материалов более пригодны методы формования и экструдирования, для пластично-невязких порошковидных веществ можно рекомендовать непрерывное или периодическое прессование, для гранулирования пульпенных или суспензионных растворов предпочтение следует отдавать методам распыливания этих растворов на поверхность частиц, составляющих вращающийся, взвешенный или псевдоожиженный слой, с одновременной сушкой продукта до требуемой влажности. Гранулирование безводных расплавов целесообразнее осуществлять разбрызгиванием и охлаждением их в грануляционных башнях (для расплавов с малым содержанием твердой взвеси) или распыливанием на поверхность частиц динамического слоя с одновременным охлаждением гранул.

Гранулирование порошковидных материалов и сопутствующие ему процессы (смешение, дробление, грохочение и др.) в значительной степени определяются физико-механическими и реологическими свойствами этих материалов. Основной динамической характеристикой порошкообразных и гранулируемых материалов является коэффициент внутреннего трения, определяющий характер движения и перемешивания шихты в смесительных устройствах, грануляторах, загрузочных и разгрузочных узлах. При гранулировании и смешении в аппаратах барабанного типа слои материала перемещаются один относительно другого. В этом случае угол внутреннего трения определяет градиент скорости слоев. Коэффициент внутреннего трения оказывает значительное влияние на сыпучесть порошков, которая, в свою очередь, определяет минимальную скорость прокатки при гранулировании методом прессования, а также работу дозирующих устройств.

Адгезионные свойства порошков определяют выбор материалов для аппаратного оформления процессов гранулирования и в значительной мере влияют на характер связей при гранулообразовании. Смачиваемость порошков также оказывает влияние на механизм гранулообразования, так как характеризует эффективность взаимодействия жидкой и твердой фаз. Таким образом, создание обоснованных инженерных методик расчета процессов гранулирования тесно связано с исследованием свойств порошков.

На основании ГОСТ 22898-78\* Коксы нефтяные малосернистые. определяют гранулометрический состав.

Пробу взвешивают с погрешностью не более 0,1 кг, помещают на противень и вручную отбирают крупные куски размером ориентировочно более 70 мм. Оставшееся количество кокса на противне рассеивают ручным или механическим способом. Толщина слоя кокса, подаваемого каждый раз на сито, не должна превышать полуторного размера наибольшего куска рассеиваемого кокса. Рассев каждой порции кокса, подаваемой на сито, должен проводиться до видимого прекращения выделения мелочи, но не более 3 мин.

При использовании ручного метода отсева допускается квартование. Для этой цели после отбора крупных кусков, последующего перемешивания и разравнивания слоя кокса на противне его делят крестовиной на четыре части и отсеивают кокс только из двух противоположных частей [2].

Просеянный кокс с размером кусков менее 8 или 25 мм (в зависимости от марки кокса) взвешивают с погрешностью не более 0,1 кг.

Если массовая доля общей влаги превышает 3%, то кокс подсушивают при комнатной температуре или в сушильном шкафу при температуре не выше 180 °С. Момент прекращения подсушки определяют визуально при видимом разделении кусков кокса различной величины. Проба кокса, подсушенная в сушильном шкафу, перед отсеиванием должна быть охлаждена в течение 30 мин, а затем взвешена. Определение процента мелочи относят к подсушенной массе кокса.



## Обработка результатов

Массовую долю мелочи (X) в процентах вычисляют по формуле

$$X = \frac{m_1 \cdot 100}{100},$$

где m - масса пробы кокса, взятого для отсева (включая и отобранные вручную крупные куски), кг;

m<sub>1</sub> - масса мелочи, полученной после отсева, кг (при квартовании m<sub>1</sub> удваивается).

За результат испытания принимают среднее арифметическое двух параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 0,4 % при массовой доле мелочи до 4 % и 0,8 % при массовой доле мелочи свыше 4 %.

Результаты испытаний вычисляют с погрешностью не более 0,1 %.

### 1.2 Использование графитовой пыли

Графит — серо-черное кристаллическое вещество с металлическим блеском, жирное на ощупь, по твердости уступает даже бумаге.

Структура графита слоистая, внутри слоя атомы связаны смешанными ионно-ковалентными связями, а между слоями — существенно металлическими связями.

Атомы углерода в кристаллах графита находятся в sp<sup>2</sup>-гибридизации. Углы между направлениями связей равны 120° С. В результате образуется сетка, состоящая из правильных шестиугольников[3].

При нагревании без доступа воздуха графит не претерпевает никакого изменения до 3700° С. При указанной температуре он выгоняется, не плавясь.

Кристаллы графита — это, как правило, тонкие пластинки.

В связи с низкой твердостью и весьма совершенной спайностью графит легко оставляет след на бумаге, жирный на ощупь. Эти свойства графита обусловлены слабыми связями между атомными слоями. Прочностные

характеристики этих связей характеризуют низкая удельная теплоемкость графита и его высокая температура плавления. Благодаря этому, графит обладает чрезвычайно высокой огнеупорностью. Кроме того, он хорошо проводит электричество и тепло, устойчив при воздействии многих кислот и других химических реагентов, легко смешивается с другими веществами, отличается малым коэффициентом трения, высокой смазывающей и крошащей способностью. Все это привело к уникальному сочетанию в одном минерале важных свойств. Поэтому графит широко используется в промышленности.

Содержание углерода в минеральном агрегате и структура графита являются главными признаками, определяющими качество. Графитом часто называют материал, который, как правило, не является не только монокристаллическим, но и мономинеральным. В основном имеют в виду агрегатные формы графитового вещества, графитовые и графитсодержащие породы и продукты обогащения. В них, кроме графита, всегда присутствуют примеси (силикаты, кварц, пирит и др.). Свойства таких графитовых материалов зависят не только от содержания графитового углерода, но и от величины, формы и взаимных отношений кристаллов графита т.е. от текстурно-структурных признаков используемого материала. Поэтому для оценки свойств графитовых материалов необходимо учитывать, как особенности кристаллической структуры графита, так и текстурно-структурные особенности других их составляющих[4].

Из-за физико-химических свойств активно закупают предприятия промышленности. Чаще всего графитовый порошок можно встретить в нескольких областях:

- в электротехнике и приборостроении графитовый порошок применяется при производстве электроприборов и батарей,
- в металлургии графитовый порошок востребован при металлообработке, производстве чугуна и стали. Сырье снижает количество

бракованного материала и положительно влияет на физико-химические свойства готовых изделий,

- в строительстве добавляют в цемент, чтобы добиться нужного оттенка,
- также графитовый порошок используется в лакокрасочной промышленности и при изготовлении пластмасс [5].

Благодаря таким основным свойствам графита как электропроводность и огнеупорность, этот минерал нашёл широкое применение в промышленности. Metallургия использует его для изготовления тугоплавких ковшей, форм для сплавов, ёмкостей для кристаллизации. Литейное производство применяет графитовый порошок как смазку форм для литья. Является одной из составляющих при изготовлении огнеупорного кирпича. Полировочные и шлифовальные пасты получают из графитовых смесей. Учитывая электропроводящие свойства природного элемента, он незаменим для изготовления контактов электроприборов и электродов. Промышленность по производству графитовых карандашей, смазочных материалов и изготовления красок тоже не обходится без этого вещества. Стержни для карандашей изготавливаются из чёрного графита, хотя в природе существует серый графит со стальным блеском. Является наполнителем пластмассы, с его помощью налажено производство искусственных алмазов. Даже атомная энергетика оценила свойства графита и взяла его на использование. Машиностроение – материал для подшипников, уплотнительных и поршневых колец. В быту также стали использовать графитовую смазку – обрабатывать автомобильные рессоры, велосипедные цепи, даже дверные петли. Покрасочным средством, обладающим антикоррозионными качествами является краска графитовая. Она представляет собой однокомпонентную суспензию. В её состав, кроме графитового наполнителя, входят пластификатор и связующие пигменты. Применяя такую краску, защищают бетонные, стальные, деревянные, алюминиевые, чугунные изделия от коррозии. В медицине графит зарекомендовал себя как одно из гомеопатических средств при кожных

заболеваниях, являющихся следствием внутренних и трудно поддающихся терапии нарушений. Препятствует образованию спаек и рубцов после воспалений, а также влияет на обменные процессы. Заболевания, на которые благотворно воздействует графит, сложно перечислить, поэтому он входит в состав многих лекарственных препаратов [6].

1.2.1 Гранулирование – использование отходов электродного производства для изготовления карбюратора

Для гранулирования материалов в отечественной и зарубежной практике применяют различные методы и аппаратуру. Все процессы гранулирования можно классифицировать следующим образом: из жидкой фазы диспергированием на капли с последующей кристаллизацией при обезвоживании или охлаждении;

из твердой фазы прессованием с последующим дроблением брикетов до гранул требуемого размера;

из смеси жидкой и твердой фаз агломерацией порошков с последующим окатыванием агломератов и упрочнением связей между частицами при удалении жидкой фазы;

из газообразной фазы конденсацией (десублимацией) с образованием твердых гранул;

из смеси жидкой и газообразной фаз с осуществлением химической реакции;

из смеси жидкой, твердой и газообразной фаз с осуществлением химической реакции.

Образование твердых частиц необходимого размера при гранулировании происходит либо одновременно, либо постепенно. Поэтому различают процессы гранулирования, протекающие без изменения размеров частиц во времени, с изменением размера частиц во времени и с образованием новых частиц и ростом имеющихся частиц. В зависимости от требований, предъявляемых к гранулометрическому составу продукта, получаемые при

гранулировании мелкие частицы либо возвращают в процесс (рётурный процесс), либо не возвращают (безрётурный процесс) [7].

Эффективность процесса гранулирования зависит от механизма гранулообразования, который, в свою очередь, определяется способом гранулирования и его аппаратным оформлением. В связи с этим методы гранулирования целесообразно классифицировать следующим образом:

- окатывание (формирование гранул, достигаемое агломерацией или наслаиванием частиц);
- диспергирование жидкости в свободный объем или нейтральную среду (образование и кристаллизация капель жидкости при охлаждении в воздухе, масле и т. п.);
- прессование сухих порошков с получением брикетов, плиток и т. п., с последующим их дроблением на гранулы требуемого размера;
- диспергирование жидкости на поверхность частиц во взвешенном состоянии (кристаллизация тонких пленок на поверхности частиц);
- чешуирование (охлаждение жидкости на инородной поверхности);
- формование или экструзия (продавливание пастообразной массы через отверстия).

В процессе выплавки чугунов и сталей углерод вводят в расплав или подают на зеркало металла в момент его разлива. Для этого используют специальные углеродсодержащие материалы, которые называют науглероживателями (или карбюризаторами). Науглероживатель придает сплавам железа дополнительную прочность, твёрдость, снижает их вязкость и пластичность, а также предупреждает окисление отливок во время охлаждения.

В качестве карбюризаторов активно применяется искусственный измельченный графит разных марок. Технология получения основывается на глубокой термообработке исходного материала, в результате которой он

приобретает совершенную (или приближенную к совершенной) кристаллическую решетку с упорядоченно расположенными атомами. Процесс протекает при высоких температурах (2400-2600 °С) в промышленных условиях без доступа воздуха.

Сырьем для производства карбюраторов служат:

1. Электродный бой.
2. Графитовая стружка, оставшаяся после обработки фасонных изделий.
3. Нефтяной кокс, пековый кокс.
4. Огарки графитовых электродов.
5. Графитовый лом.
6. Антрацит.

Для карбюраторов характерно особо низкое содержание азота, т.к. при массовой доле выше 0,009% он формирует структурные дефекты – газопоры или трещины.

Основные показатели, определяющие целесообразность использования материала той или иной марки, следующие:

- массовая доля углерода: чистота химического состава оказывает прямое влияние на степень насыщения расплава. Наименьшим содержанием примесей характеризуются материалы, подвергнутые графитации: при упорядочивании структуры атомных слоев происходит и снижение зольности;
- степень усвоения углерода жидким металлом: во многом зависит от типа используемого плавильного агрегата, но значение имеют также и скорость растворения науглероживающих реагентов, их химический и минералогический состав, содержание летучих веществ. Измельченный графит растворяется в расплавах быстро и равномерно даже при относительно низких температурах;
- размер фракций: пылевидные и мелкие частицы могут быть унесены конвективными воздушными потоками; кроме того, они наиболее подвержены окислению. Крупные фракции медленно растворяются. Чтобы

правильно рассчитать этот параметр, следует исходить из объема обогащаемой стали (чугуна), а также интенсивности перемешивания;

- зольность: зола состоит из разных химических элементов, которые оказывают негативное влияние на поглощение углерода жидким металлом. Минеральные примеси первыми вступают в реакцию, откладывая тем самым процесс науглероживания. Процентное содержание золы во многом зависит от состава исходного сырья, температуры его обработки и величины частиц.

Материалы, имеющие природное происхождение, отличаются повышенной зольностью (по сравнению с искусственными).

Карбюризаторы предназначены для получения стали и чугуна определенного химического состава с заданными свойствами. Основные преимущества использования для их производства искусственного измельченного графита:

- снижение себестоимости конечной продукции;
- оптимизация технологического процесса выплавки;
- глубокое, полное и равномерное растворение углерода в металле;
- удобство транспортировки и хранения;
- устойчивость к окислению.

Помимо обогащения сталей, науглероживатели широко применяются для вспенивания шлаков, при изготовлении углеграфитовых продуктов и материалов, а также служат наполнителями для графитопластов.

### 1.3 Карбюризатор (науглероживатель)

Второй материал называемый карбюризатор используется в черной металлургии. Другое его название науглероживатель.

С помощью науглероживателя увеличивают содержание углерода в металле при получении серого чугуна, производстве высокопрочного чугунного и стального литья, получении стали в электродуговых печах, в процессе внепечной обработки стали («печь-ковш») [8]. Из стальных отходов

с добавлением карбюризатора получают так называемый синтетический чугун с высокими механическими свойствами при пластинчатой форме графита [9].

В настоящее время ведутся активные разработки процессов прямого восстановления железа. Одним из таких способов является Джет-процесс. В качестве восстановителя используется природный газ, который вводится в струю раскаленных рудных частиц. Окончательное восстановление окислов железа происходит в шлаке. Поэтому в ванне жидкого металла поддерживается концентрация углерода 2–3 % путем ввода твердого карбюризатора.

Такое направление использования углеродистых материалов сравнительно новое, получило развитие с совершенствованием процесса электросталеплавления, с появлением процесса «печь-ковш».

Карбюризатор вводят в расплав металла при температуре 1600 °С. В электросталеплавлении его могут подавать в порошкообразном виде вместе с дутьем, либо в виде фракции 0–10 мм в печь или под струю металла при его разливе в ковш [8].

Для обеспечения максимальной эффективности науглероживания рекомендуется вводить науглероживатель одновременно со стальным ломом. В этом случае науглероживатель хорошо распределяется по печи и обеспечивается высокое его усвоение. При доводке углерода жидкого чугуна, находящегося в печи или ковше, расплав должен быть чистым и очищен от шлака до введения науглероживателя. Перемешивание металла во время и после введения углерода повышает его усвоение [8].

В качестве крупнодисперсного карбюризатора применяют: коксик – каменноугольный кокс крупностью 0–10 мм, бой графитированных (угольных) электродов для дуговых электропечей, бой углеродных катодных футеровок электролизеров, антрацит, пековый кокс, нефтяной кокс, карбюризатор, производимый специально для черной металлургии. Есть разработки по введению в металл углерода в составе брикетов ферросилиция с углеродными материалами, углеродкарбидкремниевых брикетов,



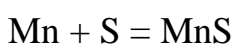
металлургических брикетов, получаемых из дисперсных отходов различных отраслей промышленности [8] (машиностроения, металлургической, угледобывающей, коксохимической, лесной промышленности, топливно-энергетического комплекса)[9].

Одним из первых углеродсодержащих материалов в качестве карбюризатора использовали древесный уголь. В нем отсутствуют вредные фосфор и сера, тяжелые металлы, содержится сравнительно небольшое количество золы [9]. Есть разработки по добавлению древесного угля в металлургический брикет, в который наряду с углеродом будут включены железосодержащие материалы, флюсы и легирующие добавки [8]. Получение древесного угля связано с вырубкой леса, он хрупкий, имеет высокую истираемость. Скорее всего, это причины по которым он реже используется в качестве науглероживателя.

Требования к крупнодисперсному науглероживателю.

- 1) Высокое содержание углерода.
- 2) Низкое содержание серы.

В стали сера вызывает красноломкость [10]. Сера способствует отбеливанию серого чугуна, уменьшает жидкотекучесть и вызывает образование газовых пузырей. При достаточном содержании в чугуне марганца и кремния заметное вредное действие серы проявляется при ее наличии более 0,15 %. Марганец нейтрализует вредное действие серы образуя с ней сернистый марганец.



Сера является вредной примесью при получении высокопрочного чугуна. Получение высокопрочного чугуна основано на модифицировании его магнием или церием. Сера, реагируя с магнием, препятствует образованию шаровидного графита и ухудшает структуру металлической основы. Кроме того, образующийся сульфид магния выделяется в виде «черных пятен» – крупного порока отливок из высокопрочного чугуна.

- 3) Низкое содержание азота. В чугуне в концентрациях 0,004–0,009 %

вес. азот может оказывать положительное воздействие, способствуя формированию полностью перлитной структуры и улучшая предел прочности на растяжение. При содержании азота свыше 0,009 % вес. он начинает выделяться в виде газа из расплава во время кристаллизации чугуна, вызывая образование дефектов типа газовой пористости или трещин, иногда в комбинации с водородом.

4) Низкое содержание водорода. Водород является вредной примесью в чугуне. Он повышает устойчивость цементита, вызывает отбел в отливках [1].

5) Ограниченное содержание влаги. Влага является отрицательной примесью как источник водорода.

6) Низкое содержание летучих. Летучие влияют на газонасыщенность стали [5].

7) Ограниченное содержание золы. Зола – это балласт, ухудшающий экономические характеристики печи.

8) Фракция: оптимальная фракция 4–7 мм, но допустимо использовать фракцию 1–10 мм. Более мелкие гранулы уносятся с дымовыми газами и увеличивают слеживаемость материала, более крупные снижают усвояемость науглероживателя и вызывают износ оборудования.

9) Быстрая растворимость.

10) Высокое усвоение углерода.

11) Постоянство качества продукта от партии к партии.

В литературе найден целый ряд предприятий производящих и реализующих науглероживатель для черной металлургии, например: Институт проблем переработки углеводородов СО РАН (карбюризатор «Карбостил»), норвежская компания Elkem ASA (карбюризаторы Elgraph), шведская компания SuperiorGraphite (науглероживатель Desulco) [11] и др.

Карбюризатор Elgraph высшего качества имеет низкое содержание серы и высокое содержание углерода, Elgraph марки «Премиум G» – низкое содержание серы, азота и водорода, быстрорастворимый, с высокой степенью

усвоения углерода, характеризуется высокой чистотой, используется в производстве высокопрочного чугуна и стального литья, при получении серого чугуна. Температура процессов получения науглероживателей 3000 °С. В результате из материала максимально удаляются все летучие вещества, в том числе сера, азот, водород, увеличивается содержание углерода. Карбюризатор Desulco – получают термообработкой нефтяного кокса при 2760 °С. Карбюризатор Карбостил характеризуется высокой чистотой, применяется для точного внепечного легирования металла углеродом в вакууме или для корректировки химического состава металла в пределах 0,02–0,2 %.

Сравнительная характеристика науглероживателей различных производителей приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика науглероживателей различных производителей

Науглероживатель	Содержание углерода, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Содержание азота, %	Летучие, %	Содержание водорода, %	Фракция, мм
Elgraph	99,1	0,5	0,4	0,15	0,4	0,005	1–5
Desulco	99,8	0,03	0,016	0,042	0,15	0,01	различная
Карбостил	99,2–99,7	0,05–0,3	0,01–0,4	—	—	—	1,0–10,0

В нашем случае требования к качеству карбюризатора предъявляет заказчик (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Требования к качеству карбюризатора.

Зольность, %, не более	Массовая доля серы, %, не более	Выход летучих веществ, %, не	Влага, %, не более	Фракция, мм	
				оптимальная	допустимая

		более			
1,0	0,05	0,5	0,5	4–7	1–10

Науглероживатели Elgraph и Desulco – углеродные материалы, прошедшие термообработку при температуре графитации. Они отличаются от искусственного графита сырьем и температурами обработки [4, 5]. Искусственный графит («бой», фракция 10–0 мм) тоже применяется в качестве карбюризатора [6]. Фракция графита 0–1,0 мм оказывается невостребованной, ее не применяют в производстве углеродных материалов, так как она вызывает упругое последствие «зеленых» заготовок [11].

Графит – твердый, хрупкий материал. Получить более крупный материал можно путем грануляции, что не представляется возможным без использования связующего.

#### 1.4 Классификация связующих материалов

Функции связующего вещества:

- 1) соединять друг с другом одинаковые или различные материалы;
- 2) обеспечивать формирование системы наполнитель-связующее;
- 3) при химических превращениях образовывать прочный монолит.

Связующие вещества могут отличаться происхождением (таблица 1.3):

– природные: животное (мездровый, казеиновый и др.), растительное (крахмал, декстрин, меласса и др.), минеральное (силикатные, битумные, каменноугольные и др.);

– синтетические высокомолекулярные соединения, полученные путем химического синтеза.

Связующие также делятся на неорганические и органические.

Неорганические связующие при прокаливании образуют устойчивые соли и оксиды. Такие вещества будут вносить в карбюризатор большое количество золы. Поэтому нам необходимо органическое связующее.

По способу синтеза, согласно [12], ВМС делятся на *полимеризационные* смолы, полученные полимеризацией одного или нескольких мономеров и

*конденсационные* – поликонденсацией не менее двух химических веществ.

Реакции полимеризации приводят к образованию полимера из ненасыщенных мономеров, имеющих в молекуле двойные или тройные связи. Они соединяются друг с другом, за счет раскрытия двойных связей.

Реакции поликонденсации – совокупность последовательно протекающих элементарных реакций конденсации, в которых участвуют две различные функциональные группы с образованием ВМС и побочного низкомолекулярного продукта. Например, альдегидные группы и подвижные атомы водорода фенольного ядра образуют фенолформальдегидную смолу (ФФС) и воду.

Таблица 1.3 – Описание и применение различных видов связующих веществ, используемых в производстве клеев

Клей	Описание	Применение
Природные клеи		
Животные	Из шкур, костей, сухожилий животных с высокой исходной липкостью (клейкостью)	В переплетом и столярном деле и др. областях, в настоящее время их заменили синтетические клеи
Казеиновые	Из казеина – белка, содержащегося в коровьем молоке	Добавляются в краски для улучшения сцепления
Альбуминовые	Из альбумина, белкового компонента крови	Используются в производстве фанеры
Растительные	Растворимые в воде клеи из различных растительных источников, состоящие из крахмала и декстрина, а также природные каучуки	Для изготовления гофрированного картона, обойные клеи; каучуки используются в повторно увлажняемой продукции (например, в «клейких ярлыках»)
Синтетические клеи		
Аминоклеи	На основе мочевино-формальдегидных смол в виде	Для соединения дерева и сочетающихся с деревом

	водных концентрированных растворов или смешиваемых с водой порошков	материалов, изготовления фанеры
Анаэробные	На основе полиэфиракрилатов. Образуют соединение только в присутствии металлов и без кислорода воздуха	Для уплотнения соединений и сохранения соосности металлических поверхностей, которые могут иметь резьбу, шпонки
Контактные	На основе растворов синтетического каучука полихлоропрена. Обе поверхности покрывают клеем и получают прочную связь в месте контакта	Для прочных соединений с высоким сопротивлением сдвигу в слоистых материалах.
Цианакрилатные	Маловязкие жидкости на основе акриловых мономеров, очень быстро схватываются, некоторые в течение 2-3 с	для сборки небольших резиновых, пластиковых и металлических деталей, уплотнения для защиты от воздействий атмосферы
Эмульсионные	Молочно-белые дисперсные системы, часто на основе поливинилацетата	деревообработка, производство упаковочных материалов, для соединения тканей и технических изделий на их основе
Эпоксидные	Термореактивные полимерные смолы при нагреве размягчаются, но не плавятся. Двухкомпонент-ные клеи (смола /отвердитель) затвердевают при смешивании, однокомпонентные – при нагреве	Прочность и малая ползучесть соединения, клеи идеальны для применений, не требующих большие нагрузки; высокая вязкость ограничивает применение в небольших деталях
Клеи-расплавы	Термопластичные материалы, которые наносят в расплавленном виде (при 65-180°C) и затвердевают при охлаждении с образованием прочных соединений	Быстрая сборка всех типов легко нагружаемых компонентов, которые не должны подвергаться воздействию высоких температур или находятся в экстремальных условиях окружающей среды

Особенности реакций поликонденсации:

1) Реакция обратима. Влияние обратной реакции может быть значительно (при синтезе полиэфирных смол) и мало заметно (при получении ФФС).

2) Процесс поликонденсации можно прервать на любой стадии, затем продолжить и завершить через некоторый промежуток времени. Обычно процесс прерывают после достижения требуемых технологических свойств смолы, например по вязкости, содержанию непрореагировавших продуктов. В действительности реакция поликонденсации не прекращается: при охлаждении уменьшается лишь ее скорость. При последующем применении смол в качестве клеящих веществ поликонденсация возобновляется и завершается в условиях, обеспечивающих склеивание материалов.

3) Ступенчатость поликонденсации. Вначале одна молекула исходного вещества соединяется с другой, полученный продукт реагирует со следующей исходной молекулой и т. д., образуя все более крупные молекулы; по мере уменьшения количества исходных веществ, происходит взаимодействие образовавшихся укрупненных молекул; на последнем этапе доминируют взаимодействия полученных полимеров с образованием длинных цепей.

По мере углубления конденсации увеличивается вязкость реакционной среды, уменьшается скорость, что приводит к прекращению роста макромолекулы и образованию полимеров с ограниченной молекулярной массой. Уменьшение молекулярной массы – следствие деструктивных реакций, с участием выделившихся низкомолекулярных и исходных веществ.

Для получения ВМС с заданными свойствами процессы полимеризации и поликонденсации ведут с участием нескольких различных исходных веществ (сополимеризация и сополиконденсация, соответственно).

Различают макромолекулы линейные, разветвленные и пространственные. Линейная и разветвленная структуры характерны для макромолекул полимеризационных смол.

Мономеры, имеющие две или несколько двойных связей, дают двух- и трехмерные полимеры. Трехмерные или «сшитые» полимеры характеризуются соединением линейных молекул поперечными химическими связями в виде мостиков, образованных различными атомами. К ним относятся терморезактивные смолы в отвержденном состоянии.

Синтетические смолы – сложная смесь близких по составу веществ, состоящих из молекул с разным числом элементарных звеньев. Разные размеры макромолекулобусловливают полидисперсность полимеров и среднюю молекулярную массу.

Химический состав, строение макромолекул и условия получения определяют их свойства. С увеличением длины цепи (возрастанием молекулярной массы), повышается температура плавления, уменьшается растворимость, увеличивается вязкость, повышаются адгезионные свойства смол до определенных пределов молекулярной массы, при дальнейшем росте – снижаются. При нормальной температуре все синтетические смолы нелетучие, при нагревании не перегоняются, т. е. не имеют точки кипения и точки плавления. При нагревании *терморезактивные* смолы плавятся в определенном температурном интервале и переходят сначала в текучее, затем – твердое необратимое состояние, *термопластичные* – в вязкое пластическое состояние.

Терморезактивные смолы почти все конденсационные. Связующее на их основе отличается большой прочностью и жесткостью. Термопластичные смолы в отвержденном состоянии обладают свойством обратимости, при последующем нагреве (ниже температуры разложения) снова размягчаются. К ним относятся смолы ПВА, ПВХ, полиамидные и др. Прочность и жесткость соединений, образующихся при отверждении термопластичных смол, значительно ниже, чем терморезактивных. Наибольшее применение в промышленности получили терморезактивные смолы.

По водостойкости синтетические смолы различают: повышенной, средней водостойкости и неводостойкие.

Смолы *повышенной водостойкости* образуют соединения, стойкие к действию кипящей воды (отвержденные при нагревании



фенолформальдегидные и другие формальдегидные смолы).

Смолы *средней водостойкости* дают стойкие соединения в холодной воде (мочевино-формальдегидные смолы различных марок).

*Неводостойкие* смолы дают соединения, полностью разрушающиеся в холодной воде, например ПВА-смола.

Связующее изготавливают в виде спиртовых и водных растворов смол, эмульсий, пленок, порошков; в пастообразном и вспененном состоянии. Одни смолы применяют только при нагреве, другие как при нагреве, так и без него.

Ценное свойство синтетических смол – способность образовывать пленки и склеивать различные материалы. Смолы, обладающие адгезионными свойствами, применяются в качестве защитных покрытий и пропиточных составов.

Способы отверждения связующих:

- поликонденсация (кислотоотверждаемые синтетические смолы);
- полимеризация, в том числе образование неорганических полимеров (полисиликатов, полифосфатов и т.п.);
- одноступенчатая полимеризация для некоторых органических связующих (олифы и т.п.) под действием теплоты;
- ступенчатая полимеризация (например, образование полиуретанов из фенолоизоцианатных или алкидноизоцианатных связующих);
- радикальная полимеризация (отверждение полиэфиров под действием  $SO_2$ );
- окислительно-восстановительные реакции с образованием кислых солей (например, железо-, алюмо-, магнийфосфатные системы связующих);
- гидратация (отверждение цементов, гипсов и т.п.);
- физические факторы (вакуум, магнитное поле, замораживание, остывание расплавов термопластичных материалов и т.д.).

### 1.5 Окатывание

Процесс гранулирования методом окатывания состоит из четырех стадий:

- 1) смешение исходного порошка с частицами ретур и связующим;
- 2) образование гранул из мелких частиц и дробление комков;

3) окатывание и уплотнение гранул в результате их перемещения по поверхности аппарата;

4) упрочнение связей в результате перехода жидкой фазы в твердую, т. е. стабилизация структуры гранулы. На всех стадиях происходит изменение распределения частиц по размерам, т. е. идет процесс гранулообразования, интенсивность которого зависит от технологии, аппаратного оформления процесса гранулирования и свойств продукта.

Стадии смешения и образования гранул. В качестве связующего применяют различные жидкости, способствующие сцеплению частиц. Чаще всего — это дешевые доступные вещества, используемые в технологии получения данного продукта (вода, раствор продукта, плав одного из компонентов и т. п.). Иногда используют смолы, бентонит, глину, гипс и другие инертные связующие или вещества, способствующие затвердеванию (кристаллизации, полимеризации и т. п.).

Характер капиллярного взаимодействия в слое сыпучего материала определяется количеством воды в точке контакта, формой контакта и числом контактов в единице объема материала. Поскольку в слое, состоящем из реальных частиц, возможны самые различные контакты, теоретически можно предсказать лишь общий характер влияния влажности материала на прочность сцепления частиц. Эта зависимость должна иметь экстремальный характер. Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала тем выше, чем из более мелких зерен он состоит.

Общая схема взаимодействия жидкости с частичками материала может быть представлена следующим образом. При небольшом содержании в сыпучем материале мелких фракций зазоры между крупными зернами остаются практически свободными. Поэтому сравнительно высокое среднее эффективное расстояние между частицами обуславливает пониженную прочность сцепления.

При увеличении содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, прочность гранул "возрастает" (рис. 1.1).

Положительная роль крупных фракций заключается в том, что они создают своеобразный скелет образца, обладающий значительным сопротивлением воздействию статических и динамических нагрузок, а определенное количество мелких частичек уменьшает среднее расстояние между крупными зернами, и возникает сила, обеспечивающая сцепление последних и препятствующая изменению жесткой структуры слоя. Только при определенном соотношении крупных и мелких частиц получается наиболее плотная упаковка и достигается наиболее высокая сила сцепления их в увлажненном материале[11].

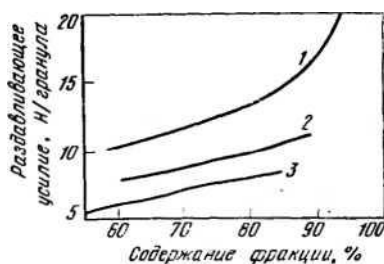


Рис. 1.1 – Зависимость прочности гранул железорудных материалов от содержания мелких фракций:

1 — 0,04 мм; 2 — 0,05 мм; 3 — 0,053 мм.

Порошок, подаваемый на гранулирование, как правило, имеет однородный гранулометрический состав. Крупные частицы поступают с ретуром, отсеянным от продукта, прошедшего обкатку и сушку. Имея разную структуру, частицы ретура и порошка по-разному смачиваются связующим. В общем случае скорость капиллярного всасывания определяется свойствами жидкости (вязкостью, плотностью, поверхностным натяжением) и материала (радиусом капилляров, природой вещества, состоянием его поверхности).

Процесс образования зародыша и формирования гранулы при подаче в гранулятор жидкости можно представить следующим образом. Капля воды, попавшая в слой материала, под воздействием капиллярных сил сразу же начинает распространяться во все стороны, заполняя поры между

отдельными частицами. Предельный размер образующихся комочков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Вода перестает распространяться в сыпучем материале, как только комочек достигнет максимальной капиллярной влагоемкости. Это время измеряется несколькими секундами[13].

Для увлажнения частиц ретура требуется значительно больше времени. Характерные кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата диаметром 2—4 мм, помещенными в слой шихты различной влажности с размером частиц 0,1—0,3 мм, приведены на рис. –1.2. Как видно из рисунка, скорость приращения влагосодержания в грануле тем больше, чем выше влагосодержание порошка и меньше прочность гранул, характеризующая их плотность. Наиболее интенсивно влага поглощается гранулами в начальный период. Обработка полученных данных в полулогарифмических координатах позволила получить уравнение для расчета времени увлажнения, справедливое для начальных участков кривых

$$\tau \approx -k \ln(1 - E)$$

где  $E = (u_p - u_{p0}) / (u_{пор} - u_{r0})$ ;  $u_p, u_{p0}$  – влагосодержание ретура текущее, исходное;  $u_{пор}$  – влагосодержание порошка;  $k$  — коэффициент пропорциональности; для фосфорсодержащих удобрений  $k = 0,52$ .

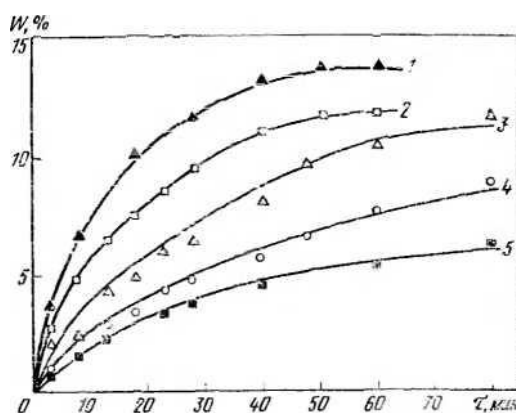


Рис. – 1.2. Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата с

различной полностью:

Кривая	Прочность гранулы, МПа	Влажность порошка, %
1	2	21,2
2	2	18,5
3	2	15,5
4	3	15,5
5	4	15,5

Изменение характера влагопоглощения с течением времени объясняется, по-видимому, тем, что вначале влага поглощается поверхностным слоем гранул под воздействием капиллярных сил. По мере насыщения этого слоя влага продвигается внутрь гранулы, где имеются не только открытые, но и закрытые поры, заполненные воздухом. Дальнейшее поглощение влаги резко замедляется и лимитируется растворением воздуха в жидкой фазе. Чем выше влагосодержание порошка, тем быстрее насыщается поверхностный слой гранулы тем быстрее наступает переход от одного характер» влагопоглощения к другому[14].

Из сопоставления времени влагонасыщения порошка и ретура видно, что для ретура оно почти на порядок больше. Следовательно, именно время увлажнения ретура является определяющим при расчете времени смешения.

При увлажнении одновременно происходит и уплотнение порошка под действием капиллярных сил. Чем мельче частицы и больше поверхностное натяжение жидкости, тем плотнее агломерат. Так, при увлажнении порошка двойного суперфосфата пористость агломерата, образованного вокруг капли, такая же, как и гранулы. Образовавшийся агломерат далее уплотняется при окатывании.

Стадия окатывания. Уплотнение частиц методом; окатывания достигается, в основном, при ударе о неподвижный слой материала или о стенку гранулятора. В этот момент большая часть кинетической энергии, которую приобрел комок при скатывании вниз, расходуется на перемещение зерен и уплотнение гранулы. Очевидно, что величина кинетической энергии определяется не только скоростью окатывания, но и массой комочка[15].

Поэтому должен существовать минимальный размер влажного комочка, при котором он приобретает достаточную кинетическую энергию во время осыпания. Если масса комочка меньше критической величины, то накопленной энергии не хватит уплотнения, и этот комочек не сможет стать зародышевым центром. Влияние размера и числа зародышей на интенсивность уплотнения видно из рис. 1.3. С увеличением диаметра и соотношения зародыши — порошок время, необходимое для достижения определенной плотности комочков, уменьшается.

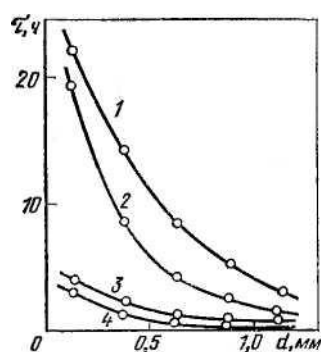


Рис. 1.3. Зависимость времени гранулирования от размера частиц ретурса при его содержании в шихте:

1 — 1:5; 2 — 1:3; 3 — 1:1; 4 — 3:1.

Комочки в результате многократных ссыпаний и ударов уплотняются, отдельные частички, перемещаясь, укладываются более плотно при этом избыточная влага выдавливается на поверхность комочка, в результате чего становится возможным дальнейшее присоединение к такому комку сухих частичек. По мере приближения частичек друг к другу толщина пленок связанной воды становится все меньше, прочность сцепления увеличивается [16].

Сближение частичек вследствие уменьшения толщины адсорбированных пленок возможно только в том случае, когда избыток воды поглощается,

например, в результате присоединения новых частичек к поверхности или поступления влаги во внутрь гранулы. При работе гранулятора внутри комка создается определенная минимальная толщина водных пленок, соответствующая величине динамических нагрузок. Как только эта толщина достигается, дальнейшее выделение воды на поверхность комка прекращается, гранула перестает расти, ее прочность становится максимальной для данного режима.

Присутствие в шихте сухих плотных частиц ретур приводит к тому, что влага не только выдавливается на поверхность, но и всасывается во внутрь. При одинаковых интенсивностях этих процессов гранулы не растут, а при преобладании всасывания над другими процессами может происходить измельчение гранул, поскольку ослабляются связи между частицами. Для дальнейшего увеличения размера гранул накатыванием следует вводить извне на их поверхность дополнительное количество жидкости. При значительном содержании ретур в шихте и одноразовом увлажнении на его поверхности создается временный избыток жидкой фазы, в результате чего происходит рост гранул, хотя данного количества жидкости явно недостаточно для устойчивого ведения процесса гранулирования. В дальнейшем частицы ретур продолжают поглощать жидкость; по истечении определенного времени на поверхности частиц ретур жидкости уже не хватает, и агломераты разрушаются.

Одноразовое введение требуемого количества жидкости приводит к чрезмерному увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. Следовательно, для получения гранул требуемого размера шихту надо увлажнять постепенно с учетом кинетики влагопоглощения. Как травило, время насыщения гранул влагой значительно превышает время, необходимое для окатывания гранул при выбранных динамических нагрузках. Для поддержания на поверхности гранул оптимальной влажности следует увлажнять шихту весь период окатывания.

Помимо динамических нагрузок при ударе уплотнению гранул

способствуют и другие силы. В момент перекатки гранулы через зерно мелкого материала происходит толчок в направлении центра гранулы. Развивающееся при этом давление достигает сотен атмосфер и способствует фтормированию гранул в сферы. На поверхности перекатывающегося шарика возникает не только толчок, но и срезающее усилие. Часть неровностей гранулы не выдерживает этих напряжений и разрушается, а прочно прилипшие зерна вдавливаются внутрь.

Катящийся шарик до тех пор не присоединяет маленькие зерна (перекатывается по ним), пока

$$d \leq \frac{2r(1 - \cos 2\beta)}{1 + \cos 2\beta}$$

где  $d$ —диаметр зерна;  $r$  — радиус гранулы;  $\beta$  — угол трения.

Для сухих минералов  $\operatorname{tg}(\beta = 0,3—0,6$ . Для сырого материала при трении его о стенку  $\operatorname{tg}'(\beta = 0,2$ . В последнем случае, как показывают расчеты, гранулы могут расти, пока их радиус не станет больше  $12,5 d$ . Частицы, меньшие  $r/12,5$ , будут проникать в скопление зерен на поверхностях гранул и уплотнять их. Так, предельная величина частиц, увлекаемых гранулами диаметром 2, 8 и 20 мм, составит соответственно 0,08; 0,32 и 0,8 мм. Более крупные зерна не увлекаются катящейся гранулой.

Структура гранулы уплотняется постепенно под действием большого числа ударов различного направления, в результате чего взаимное перемещение частичек происходит только на тех участках, где в данный момент сила сцепления имеет минимальное значение. Другими словами, работа уплотнения совершается весьма экономно. Очевидно, что динамические нагрузки в грануляторе не должны превышать допустимые, т. е. напряжения в комке не должны быть разрушающими. Предел прочности агломератов на разрыв при данной величине сил сцепления  $F$  может быть определен соотношением  $G_z = (1 - \epsilon)F/ed^2$ , где  $\epsilon$  и  $d$ — пористость и размер агломерата. Определение оптимальных условий работы гранулятора, обеспечивающего максимальную производительность при заданном размяре



комочков, представляет значительный интерес[17].

Стадия стабилизации структуры гранул. Связи между частицами, уплотненными в процессе окатывания, в значительной мере обусловлены силами поверхностного натяжения жидкости. Эти связи обеспечивают достаточную пластичность материалу и позволяют в широких пределах изменять форму гранулы без ее разрушения. Для получения готового продукта необходимо упрочнить связи, придав большую жесткость полученной структуре, что достигается удалением жидкой фазы или переводом ее в твердую фазу.

Одним из наиболее распространенных способов упрочнения гранул является сушка. При удалении влаги из растворимых в ней материалов одновременно происходит и кристаллизация твердой фазы. Сушка может осуществляться за счет тепла химической реакции. В этом случае кристаллы образуются не только в результате сушки, но и вследствие образования нового вещества. Твердая фаза может образовываться и без изменения массы шихты, например, при охлаждении или полимеризации жидкости.

В процессе удаления из гранулы жидкой фазы может происходить не только упрочнение структуры, но и ее разрушение. При интенсивной сушке и некоторых химических реакциях образуется большое количество газовой фазы. Газ, выходя наружу, значительно изменяет структуру материала, увеличивает пористость, разрушает образовавшиеся связи. Возникновение новых кристаллов и перекристаллизация веществ, вызванная изменением температуры, также приводят к нарушению начальной структуры. Следовательно, не всегда оправданы повышенные требования к структуре гранул, образуемых на стадии уплотнения, поскольку при последующей операции удаления жидкой фазы происходит перестройка структуры. В этом случае целесообразна обе операции совмещать, причем особенно важно, чтобы предыдущие стадии смешения и образования гранул были закончены.

При необходимости после удаления из агломерата жидкой фазы можно провести дальнейшее упрочнение гранулы, переводя одно химическое

соединение в другое. Сущность химико-каталитического упрочнения, например железорудных окатышей, заключается в образовании прочного скелета кальцита, играющего роль связующего, и образующегося в результате карбонизации гидроксида кальция диоксидом углерода в присутствии катализатора. Железорудные окатыши упрочняют также обжигом, водотепловой обработкой, гидратированием .

Таким образом, завершающая стадия гранулообразования при окатывании сопровождается тепло- и массообменными процессами, приводящими к стабилизации структуры гранул[18].

Окатывание включает следующие стадии: смачивание частиц материала связующим, в результате чего образуются агломераты частиц, уплотнение агломератов в слое материала [19]. Процесс осуществляют в барабанных, тарельчатых, скоростных и вибрационных грануляторах.

Принцип действия барабанного (рисунок 1.4) и тарельчатого (рисунок 1.5) грануляторов основан на вращении соответственно барабана, установленного горизонтально или под углом  $1-3^\circ$  (частота вращения  $5-20 \text{ мин}^{-1}$ ), и специальной тарелки, размещенной под углом  $45-55^\circ$  (частота вращения  $5-50 \text{ мин}^{-1}$ ), внутри которых перемещается слой материала. Степень заполнения аппаратов материалом может изменяться от 10 до 15 %. Окатывание в барабанном грануляторе происходит на боковой цилиндрической поверхности, в тарельчатом – на поверхности днища тарелки.

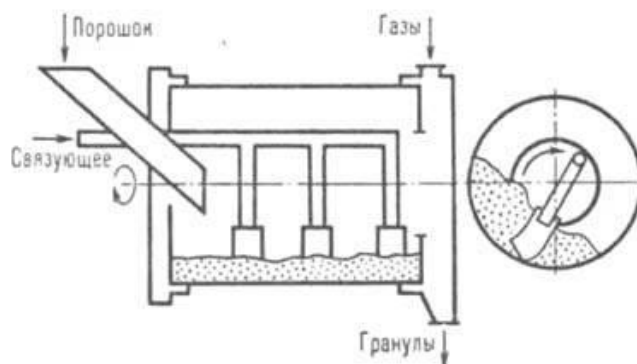


Рисунок 1.4 – Барабанный гранулятор

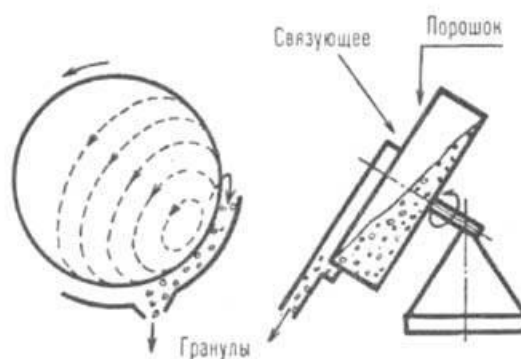


Рисунок 1.5 – Тарельчатый гранулятор (слева показана траектория движения частицы материала при вращении тарелки)

### 1.5 Методы прессования

Процесс прессования преследует две цели: во-первых, получение изделий определенной формы и размеров, т. е. формование, а во-вторых, уплотнение массы, или собственно прессование. Обычно в процессе прессования обе эти операции совмещаются. В промышленной практике получили наибольшее распространение два метода прессования: выдавливание массы, через мундштук пресса и прессование в прессформу. Реже применяют метод трамбования, заключающийся в том, что масса затрамбовывается в специальные формы ручными или пневматическими трамбовками.

В первом случае массу загружают в контейнер (массный цилиндр) пресса и выдавливают через мундштук. Формой и размерами мундштука определяется поперечное сечение изделия, причем длина его может быть получена различной. При втором способе масса непосредственно загружается в прессформу, которая определяет форму и размеры изделия. При формовании трамбованием масса набивается в специальные разборные формы, которые определяют форму и размеры по сечению изделий, длина же изделий может быть получена различной.

Наибольшее распространение получил метод прессования выдавливанием, или, как его часто называют, пробное прессование. Это наиболее экономичный способ обеспечивающий высокую

производительность при относительно небольшом количестве обслуживающего персонала. Современное оборудование прессовых установок позволяет автоматизировать этот передел. Этот способ позволяет прессовать изделия от самых мелких (диаметром 1—2 мм) до самых крупных (1200—1500 мм) причем длина может быть получена различная и обуславливается только условиями обжига. По сравнению с методом прессования в прессформу этот способ позволяет получать изделия с более равномерной плотностью по сечению, потому что масса во время прохождения через мундштук подвергается равномерному обжатию. Однако способом выдавливания нельзя получить столь высокую плотность, как в прессформе [20].

Прессование в прессформу производится главным образом при производстве конструкционных материалов, щеток для электрических машин и пр., для которых является существенным высокая плотность и тонкая однородная структура, полное отсутствие внутренних дефектов. К недостаткам этого метода следует отнести ограничения по высоте прессуемых изделий. Чем больше отношение высоты к сечению изделия, тем выше разноплотность по высоте.

Эти два метода прессования не могут заменить друг друга, потому что свойства материалов будут всегда различны, даже в том случае, если состав и способ приготовления массы будут одинаковы.

Прессование трамбованием на электродных заводах используется очень редко, чаще этим способом пользуются при строительстве электрических печей, электролизеров и др., когда требуется набивка подины или заделка швов между отдельными блоками. За рубежом этим способом производят электроды диаметром 1250—1500 мм и длиной около 3000 мм. Объясняется это тем, что изготовление прессов для таких крупных изделий довольно дорого. Способ производства трамбованием довольно простой, недорогой, но трудоемкий. Экономически оправдано применение этого способа только при относительно небольшом спросе на электроды крупных размеров. При

большом спросе на электроды всегда экономичней установка крупных прессов.

В настоящее время в электродной и электроугольной промышленности применяется способ гидростатического прессования (в очень ограниченном масштабе) Сущность его заключается в том, что пресспорошок загружается в эластичную оболочку, которая помещается в рабочий цилиндр и сдавливается жидкостью. Создается равномерное давление со всех сторон, что позволяет получать изделия высокой равноплотности.

Сравнительно невысокая производительность способа ограничивает его применение [21].

#### 1.5.1 Прессование в прессформу

На рис. 1 схематично представлено прессование в прессформу 1. Масса 2 уплотняется в результате усилий  $P$ , приложенных к пуансону  $B$  в процессе прессования усилия затрачиваются на уплотнение материала, деформацию отдельных частиц и на преодоление трения о стенки прессформы. Давление внутри материала, загруженного в прессформу, передается через контактные поверхности. В результате прессования уменьшается расстояние между отдельными частицами материала, возрастает число взаимных контактов между ними и одновременно увеличиваются поверхности контактов. Образование прочного блока из порошкообразного материала происходит в результате склеивания между собой отдельных частиц, покрытых тонким слоем каменноугольного пека. Образование прочного блока объясняется действием физических сил: капиллярных сил сцепления, сил сцепления адсорбированных пленок и частично сил молекулярного притяжения [22].

Процесс прессования в прессформу, в отличие от способа прессования выдавливанием, сопровождается рядом специфических явлений, которые существенно влияют как на свойства спрессованных деталей, так и на протекание самого процесса прессования.

Если взять спрессованный блок, разрезать его и отобрать пробы из различных участков, а затем определить плотность каждого отобранного образца, то можно наблюдать следующую картину. Как по высоте блока, так и по сечению плотность неодинакова.

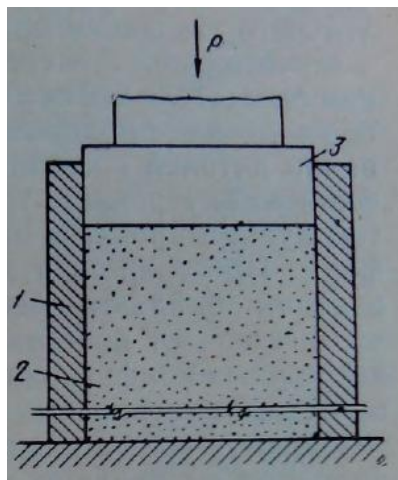


Рис. 1.6 – Схема прессования в прессформу:

1 – прессформа; 2 – масса; 3 – пуансон.

Плотность в объеме спрессованного блока изменяется следующим образом. По высоте блока плотность уменьшается от верхнего пуансона к нижнему (неподвижному) и от периферии к центру блока. С увеличением высоты разноплотность возрастает, а с увеличением сечения разброс значений плотности понижается. Неравноплотность в объеме изделия является существенным недостатком процесса прессования в прессформу.

Причины этого явления заключаются в наличии сил трения порошков о стенки прессформы, что приводит к появлению значительного перепада давления по высоте прессуемой детали. Следовательно, изменение удельного давления прессования по высоте детали за счет сил трения о стенки прессформы приводит к тому, что отдельные слои детали по высоте имеют неодинаковую плотность. При больших отношениях высоты к диаметру этим способом невозможно получить изделия, так как потери на трение по высоте становятся столь большими, что изделие не пропрессовывается по высоте и нижняя его часть после выталкивания рассыпается [23].

Существует предельное отношение высоты блока к диаметру, когда разнородность спрессованного блока находится в пределах допустимых норм. Практически, при одностороннем прессовании соотношение высоты блока к его диаметру должно быть не выше единицы ( $H/D < 1$ ). Для того чтобы увеличить это соотношение необходимы специальные приемы, заключающиеся, например, в применении двустороннего прессования и др.

В процессе прессования значительную роль играет внутреннее трение частиц порошков в момент их относительного смещения при прессовании. Внутреннее трение в значительной степени определяет величину сопротивления прессовых деформаций в процессе прессования. Особое значение приобретает внутреннее трение при прессовании деталей сложной конфигурации. Чем выше коэффициент внутреннего трения, тем ниже текучесть порошка, тем хуже в процессе прессования заполняются переходы форм. Пресспорошки для производства углеграфитовых изделий обладают очень высоким внутренним трением, что исключает прессование деталей даже относительно несложных конфигураций. Этими причинами объясняется применение станочных (механических) операций для изготовления графитовых изделий сложных конфигураций, несмотря на большие потери материала и большие трудовые затраты.

Порошкообразное состояние является промежуточным между жидким и твердым агрегатными состояниями и в соответствии с этим сочетает некоторые признаки жидких и твердых тел. В частности, как и в жидкости, порошок обладает свойствами текучести. Стремление порошков растекаться в стороны обуславливает возникновение давления на стенки прессформы, которое называют боковым давлением. Необходимость изучения вопроса о боковом давлении вызывается двумя обстоятельствами. Во-первых, надо знать величину бокового давления для определения затрат усилия прессования на внешнее трение, без чего нельзя установить закономерности изменения плотности блоков при прессовании; во-вторых, без знания

величины бокового давления нельзя правильно рассчитать детали прессформы на прочность.

Приведенная ниже формула зависимости потерь позволяет сделать ряд полезных для практики выводов. Это видно из уравнения, показывающего зависимость потерь давления на трение от нескольких факторов:

$$\Delta P/P = \mu \epsilon 4hk/D,$$

где  $\Delta P/P$  — отношение потери давления к давлению прессования;

$\mu$  — коэффициент трения порошка о стенки прессформы;

$\epsilon$  — коэффициент боковой передачи давления;

$hk$  — высота прессовки при 100%-ной ее плотности;

$D$  — диаметр прессовки

Потери на трение определяются величиной усилия, затрачиваемого на выталкивание изделия из прессформы.

Неравномерность распределения плотности в прессуемых блоках может быть в значительной степени устранена применением двустороннего прессования, когда давление к блоку прикла сверху и снизу, т. е. оба пуансона являются прессующими. На рис. 1.7 показано изменение плотности блока по высоте при одно- и двустороннем прессовании. При двустороннем прессовании распределение плотности более равномерно, хотя в середине сохраняется зона пониженной плотности.



Рис. 1.7. Изменение плотности блока при одно- и двустороннем прессовании: 1 — одностороннее; 2 — двустороннее прессование.



Для обеспечения двустороннего прессования в промышленной практике конструктивно этот процесс проще осуществить в «плавающей матрице», чем создавать два подвижных пуансона. В этой конструкции один пуансон (прессующий) делается подвижным, другой — неподвижным, а прессформа упирается на пружины или поддерживается специальным устройством, уравнивающим ее массу, т. е. предусматривается возможность перемещения ее в процессе прессования в направлении движения прессующего поршня. В этом случае передвижение подвижного поршня составит удвоенную величину хода, поскольку второй поршень неподвижен. Под действием сил трения материала о стенки прессформы последняя будет перемещаться в направлении движения подвижного поршня, а материал подвергается обжатию от давления со стороны подвижного поршня и под действием силы реакции от неподвижного поршня [24].

После снятия давления прессования наблюдается увеличение размеров спрессованных блоков по высоте. Это явление называется упругим последствием, которое претерпевает спрессованный блок в результате действия внутренних напряжений. Упругое последствие спрессованных блоков может быть определено по формуле:

$$\frac{h_1 - h_0}{h_0} * 100 \%,$$

Где  $h_0$  – высота блока под давлением;

$h_1$  – высота блока после выпрессовки.

Следует отметить, что процесс упругого расширения может продолжаться более двух суток после прессования.

Если величина упругого последствия большая, может привести к появлению трещин и даже расслаиванию спрессованных блоков.

На величину упругого последствия влияют многие факторы. С повышением давления прессов упругое последствие возрастает. Возрастает оно и с уменьшением размера порошковых частичек, подвергающихся прессованию. Повышение температуры размягчения каменноугольного пека,

применяемого в качестве связующего, также повышает упругое последствие. Особенно резко сказывается температура пресспорошков, при которой они прессуются.

Плотность и другие свойства изделий зависят от величины и удельного давления при прессовании, что хорошо иллюстрируется рис. 7, на котором показана зависимость свойств обожженных изделий от давления при прессовании. Оптимальную величину удельного давления при прессовании невозможно рассчитать теоретически и ее устанавливают экспериментально для каждого вида изделий [25].

При этом следует учитывать, что свойства обожженных изделий находятся в сложной зависимости от плотности и от усадки при обжиге, на которую в свою очередь влияет плотность спрессованных заготовок. на рис. 8 показано, что коэффициент усадки зависит от плотности зеленого блока, которая является функцией давления при прессовании, причем, чем меньше плотность, тем больше усадка. При низких давлениях плотность обожженных блоков в результате большой усадки и низкого коэффициента упругого последствия может быть получена более высокая, чем при более высоком давлении.

В заводской практике величина удельного давления при холодном прессовании колеблется в пределах 1200 – 2500 кг/см<sup>2</sup>. При прессовании горячих смесей давление может быть понижено до 500 – 700 кг/см<sup>2</sup>.



Рис. 1.8. Зависимость свойств обожженных материалов от давления при прессовании (20% нефтяного кокса и 80% сажи): 1 — механическая прочность; 2 — удельное электросопротивление

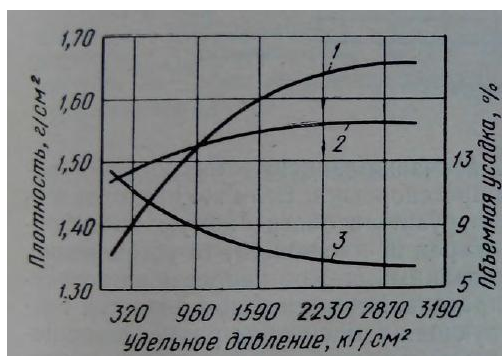


Рис. 1.9. Плотность и усадка при обжиге в зависимости от давления при прессовании;

1 — плотность зеленых блоков; 2 — плотность обожженных блоков; 3 — объемная усадка при обжиге

Объясняется это следующим. Давление прессования расходуется на преодоление трения друг о друга прессформы, а также на деформацию частиц. Необходимое для прессования давление возрастает с повышением плотности блока, т. е. при постоянном давлении наблюдается замедление процесса, которое связано с увеличением контактной поверхности при прессовании, что вызывает увеличение сил сцепления между частицами и затрудняет их взаимное перемещение. При горячем прессовании частицы порошков находятся в состоянии повышенной пластичности и для процесса прессования требуется значительно меньшее усилие.

Свойства и плотность изделий зависят от температуры пресспорошков и скорости прессования. Холодное прессование производится при комнатной температуре. Однако даже небольшие колебания температуры, связанные с изменением времени года, оказывают заметное влияние.

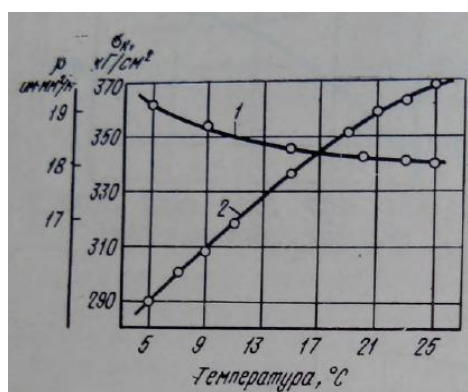


Рис. 1.10. Зависимость свойств материалов от температуры пресспорошка: 1 — удельное электросопротивление; 2 — механическая прочность

На рис. 1.10 показана зависимость свойств изделий от температуры пресспорошка. Если же приготовленные пресспорошки загрузить в обогреваемую прессформу, а затем нагреть перед прессованием, то установлено, что плотность спрессованных блоков непрерывно возрастает до некоторого предела. Этим пределом является температура, соответствующая температуре размягчения пека, который применен для производства пресспорошков.

Существенная особенность изделий холодного прессования состоит в их большой пористости, которая достигает 20%. Эти поры в значительной части — открытые, поэтому спрессованные изделия обладают газо- и водопроницаемостью. Пористость же блоков горячего прессования ничтожна, и они практически водонепроницаемы [26].

Скорость прессования равномерность пропрессовки. Поскольку процесс перемещения отдельных частиц формуемой массы протекает во времени, всякое замедление скорости прессования приводит к положительному результату. В особенности это относится к тонкозернистым массам, которые плохо передают давление. Крупнозернистые добавки облегчают передачу давления. Положительно влияет выдержка при максимальном давлении. Экспериментально оказано, что плотность несколько увеличивается при выдержке до 60 сек, более продолжительная выдержка никакого дополнительного эффекта не дает. На рис. 1.11 показана зависимость плотности спрессованной детали от времени выдержки во времени ее прессования при различных удельных давлениях.

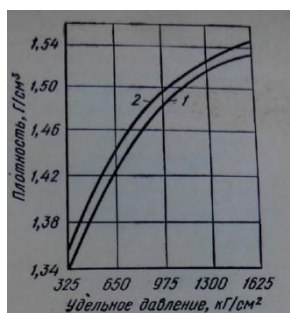


Рис. 1.11. Зависимость плотности образцов от времени выдержки при прессовании: 1 – без выдержки; 2 – выдержка 2 мин

### 1.5.2 Прессование выдавливанием

Прессование выдавливанием резко отличается от прессования в прессформу. Если прессование в прессформе осуществляется в закрытом сосуде, то при выдавливании уплотненная масса непрерывно истекает через мундштук. Если в прессформе возможно прессование холодной и горячей массы, то выдавливанием можно прессовать только горячую массу. Если при прессовании в прессформу оператор по своему желанию может провести процесс прессования при том или ином давлении, то при прессовании выдавливанием это исключено; качество массы и температурный режим определяют величину давления, при котором может протекать процесс. На рис. 1.12 показана схема прессования выдавливанием. В основном конструкция пресса состоит из цилиндра для массы (контейнер) – 1 заканчивающегося мундштуком – 2, форма и размеры которого соответствуют изготавливаемому изделию. В контейнер 1 загружается масса – 3 которая подвергаясь давлению  $P$  гидравлическим плунжером – 4, уплотняется и выдавливается через мундштук – 2.

Процесс прессования состоит из двух самостоятельных операций: подпрессовки и собственно прессования. Подпрессовкой называют операцию уплотнения массы, загруженной в контейнер пресса при замкнутом наглухо выходном отверстии мундштука [27].

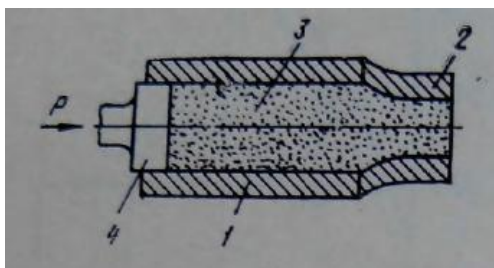


Рис. 1.12. Схема прессования выдавливанием:

1 – контейнер; 2 – мундштук; 3 – масса; 4 – пуасон

В этом случае уплотнение массы протекает также, как при прессовании в прессформу. Подпрессовка имеет большое значение. При этом достигается очень высокая степень уплотнения массы в контейнере. Подпрессовка

применяется всегда; ее не производят лишь тогда, когда в контейнер загружают предварительно затрамбованную массу или масса трамбуется непосредственно в контейнер.

Собственно, прессование заключается в выдавливании массы из контейнера через мундштук. При этом происходит дополнительное уплотнение прессуемых изделий. Блок массы под действием поршня выдавливается из контейнера через отверстие мундштука. Вследствие этого происходят значительные перемещения массы, находящейся в контейнере. Чем больше отношение сечения контейнера к площади сечения мундштука, тем большие перемещения претерпевает масса [28].

Масса продвигается вдоль контейнера спокойно слоям по сечению контейнера. Только вблизи мундштука происходит значительная передвижка массы. Внутренние слои опережают, так как пути прохождения у них короче, чем у внешних слоев.

На рис. 1.13 показан продольным разрез электрода, на котором демонстрируется движение слоев электродной массы в мундштуке. Белые меловые прослойки были загружены в контейнер параллельными слоями, при прохождении массы через мундштук они приняли форму вытянутых воронок.

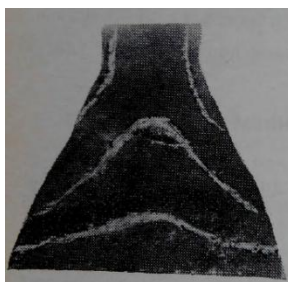


Рис. 1.13. Движение слоев массы в контейнере и мундштуке

Избежать этого явления невозможно, хотя оно ведет к расслоению массы, приводящему к снижению качества продукции, полученной методом выдавливания. Необходимо только стремиться к снижению эффекта расслоения, или не допускать его дальнейшего развития. Могут возникнуть дополнительные осложнения, вызванные нарушением теплового режима прессования, неравномерной температурой массы в объеме контейнера, крупными кусками загруженной массы, различной пластичностью массы в одной загрузке контейнера, которые резко изменяют картину истечения массы и могут привести к нежелательным результатам. В качестве примера можно привести стыкование двух загрузок. Новая загрузка внедряется в остаток прежней, находящейся в мундштуке. В этом случае участок совмещения масс должен быть удален, потому что при обжиге на нем образуются трещины из-за неодинаковых усадок для каждого слоя массы [29].

В результате собственно формования образуются структуры, имеющие большое значение для свойств изделий. Частицы коксов имеют удлиненную форму (анизометричны). Это объясняется тем, что в процессе коксования молекулы ароматических соединений имеют тенденцию ориентироваться по плоскостям бензольных колец параллельно ячеистым стенкам кокса. Форма зерен антрацита также анизометрична из-за слоистого характера строения антрацита. Это форма и свойства зерен весьма существенно влияют на анизотропные свойства спрессованных изделий.

В процессе прессования, когда масса течет из мундштука, анизометричные частицы располагаются в ней так, что их наибольшие размеры становятся перпендикулярными направлению деформирующих

усилий. Например, в струе, истекающей из мундштука прессы, продолговатые и пластинчатые частицы располагаются перпендикулярно радиусу мундштука его оси, а при прессовании в прессформу они располагаются перпендикулярно плунжера.

Степень ориентировки анизометричных частиц зависит от формы и длины пути, проходимого ими при прессовании. Если назвать степенью анизометричности отношение наибольшего размера частицы к ее наименьшему размеру то частицы во время прессования ориентируются тем легче, чем больше степень анизометричности.

Наибольший путь проходят частицы при прессовании изделий на прошивных прессах, и в этих условиях наиболее совершенная ориентировка анизометрических частиц. Этим объясняется наибольшая степень анизотропии свойств у изделий, спрессованных методом выдавливания. При прессовании в прессформу путь, проходимый частицами, очень невелик. Кроме того, в этом случае вследствие трения о стенки прессформы анизометричные частицы в поверхностном слое изделия приобретают ориентировку, резко отличающуюся от ориентировки в толще изделия. Это создает особого вида неоднородность изделия, которая может привести к отделению поверхностного слоя при обжиге или после освобождения из прессформы.

Изделия, полученные методом выдавливания, обладают небольшой разноплотностью. В этом они резко отличаются от изделий, спрессованных в прессформу. Установить зависимость разноплотности по сечению и длине изделия не представляется возможным. Она зависит в большой степени от рецептурного состава массы и коэффициента обжигания (коэффициентом обжигания называется отношение площади сечения контейнера к площади сечения мундштука). Чем выше коэффициент обжигания, тем большая неоднородность наблюдается в объеме изделия.

Давление при прессовании, как указывалось выше определяется составом массы и в значительной степени зависит от количества связующего,



введенного в шихту. Чем выше содержание связующих, тем ниже давление при прессовании. С повышением температуры массы давление также понижается. Однако следует иметь в виду, что увеличение количества связующего приводит к увеличению спекаемости засыпки при обжиге и приваривании ее к телу обжигаемых изделий [30].

Прессование можно производить в глухую матрицу с получением гранул в форме брикетов, плиток, таблеток путем уплотнения сухих порошков или порошков со связующим, иногда с последующим дроблением спрессованного материала [19] или методом экструзии.

Применяют валковые и вальцовые прессы (рисунок 1.14), таблеточные машины, зубчатые роторные грануляторы. Для непрерывной подачи порошка и его предварительного уплотнения используют подпрессовыватель (спиралевидный шнек).

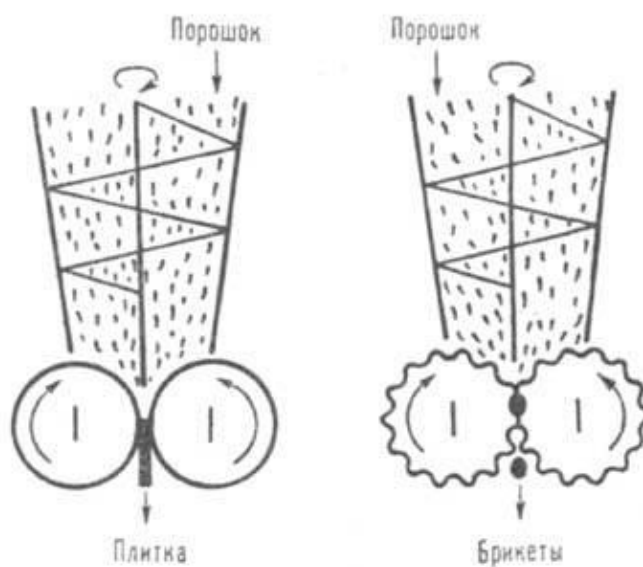


Рис. 1.14 – Валковый (слева) и вальцовый (справа) прессы

Экструзия – образование гранул путем продавливания пластично-вязкой массы с помощью шнека через головку экструдера с последующим разрезанием или дроблением материала [19].

#### 1.6 Оценка гранулируемости вещества.

Одним из показателей гранулируемости можно считать уплотняемость вещества т.е. способность вещества к уплотнению за счет воздействия определенного давления. Так же из способа оценки

формуемость, возможность сохранять форму, принятую в результате процесса гранулирования. Между этими двумя параметрами есть прямая зависимость, а именно, чем больше уплотняющая способность материала, тем лучше его формуемость.

Все эти факторы дают нам информацию о наиболее пригодном и надежном методе гранулирования продукта. Например, чем больше коэффициент гранулируемость, тем при меньших напряжениях обеспечивается одна и та же степень уплотнения, тем самым можно рекомендовать метод окатывания. И если коэффициент мал, то для его уплотнения требуется более напряжение, т.е. необходимо рекомендовать метод прессования.

Температура, влажность, рН, и т.д. это те физические свойства продукта, которые также играют важную роль на параметры гранулирования.

Сухие порошкообразные материалы, рекомендуют использовать такие методы грануляции как прессование или окатывание с добавлением связующего.

## 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Объект исследования.

Для изготовления гранул в качестве наполнителя опробованы пылевые отходы, уловленные электрофильтрами при механической обработке графитированных электродов на основе нефтяных и пековых коксах, а именно графитовая пыль В таблице 4 приведены основные показатели качества.

При выборе метода гранулирования были рассмотрены:

- окатывание;
- прессование выдавливанием;
- прессование в глухую матрицу.

Таблица 2.1 – Качественные показатели графитовой пыли[31].

Наименование показателей	ГОСТ	Фактические значения
Массовая доля влаги, %	не более 0,2	0,2
Зольность, %	не более 0,1	0,1
Размеры части, мм	Менее 0,2	-0,2+0

В качестве связующего опробовали ФФС, натриевое жидкое стекло –  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ , жидкий бакелит, порошок бакелита (табл. 2.2)[32].

### 2.2.Методы исследования

#### 2.2.1. Методика определение зольности

Зольность графитовой пыли определяли по ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности[33]

Сущность метода определения зольности аналитической пробы – озоление навески топлива в муфеле и прокаливание зольного остатка до постоянной массы при температуре 800...830 °С. Предварительно взвешивают тигли, затем вносят навеску (примерно 1 г) топлива, распределяя

её равномерно слоем по дну фарфорового тигля. Навески устанавливаем на муфель, предварительно нагретый в течение 30 мин до 500 °С.

Таблица 2.2 – Характеристики связующих веществ

Наименование показателя	Фенолформальдегидное связующее жидкое	BakelitePF 6357 FP порошок	BakelitePF 9950FL жидкий	Жидкое стекло
Внешний вид	Однородная вязкая жидкость ЭГИДА 4.2	порошок светло бежевого цвета –0,045mm	Однородная вязкая светлая жидкость	Однородная бесцветная жидкость
Вязкость динамическая при 20°С, сПз	4900		2000±150	
Массовая доля нелетучих веществ при 135°С,%	65,38		70±2	22,7-22,9
Массовая доля свободного фенола, %	0,3	0.3	0.5	
Содержание влаги по К.Фишеру, %	7,2		7.5±0.5	4-5
Кажущаяся плотностьг/л		365		1,47-1,52

Закрывают дверцу и постепенно в течении 30–60 мин повышают температуру до 800–830 °С. При этой температуре выдерживают 1,5 часа в закрытом муфеле образовавшийся зольный остаток. Затем тигли с зольным остатком вынимают из муфеля, охлаждают на воздухе до комнатной температуры и взвешивают. После этого прокаливают тигли с зольным остатком в течение 30 мин и определяют изменение массы.

Зольность аналитической пробы в %(А) определяют по формуле:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} 100\%,$$

где m1 – масса прокаленного тигля;

$m_2$ - масса тигля с навеской испытуемого образца;

$m_3$ - масса тигля с зольным остатком после прокаливания навески испытуемого образца.

### 2.2.2. Методика определения действительной плотности

(ГОСТ 22878-82, п. 4.4) [34]

Стандартный метод определения действительной плотности углеродистого материала основан на пикнометрическом определении объема массы по отношению к объему твердой фазы. Метод включает определение водного числа пикнометра и определение плотности спирта.

"Водное число" (объем пикнометра при установленной температуре) в см вычисляют по формуле. Метод основан на пикнометрическом определении массы по отношению к объему твердой фазы. Перед проведением испытания определяют «водное число» пикнометра. Взвешивают пустой пикнометр. Наполняют дистиллированной водой до метки на горлышке. Выдерживают в термостате 20–30 минут при температуре  $20 \pm 0,1$  °С. После выдержки изменившийся уровень воды доводят до метки. Взвешивают пикнометр. Взвешивание повторяют два-три раза до получения совпадающих результатов. Перед каждым повторным взвешиванием пикнометр выдерживают в термостате 15 минут.

Водное число вычисляют по формуле:

$$V = \frac{m_1 - m}{0,9982},$$

где  $m$  – масса пустого пикнометра, г;

$m_1$  – масса пикнометра с водой, г;

0,9982 – плотность воды при температуре 20 °С, г/см<sup>3</sup>.

Затем определяют плотность спирта аналогично определению «водного числа» пикнометра и вычисляют по формуле:

$$\rho_{сн} = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса спирта, г;

$V$  – «водное число» (емкость пикнометра),  $\text{см}^3$ .

При определении плотности графитированного материала навеску массой 2 г, помещают во взвешанный пикнометр и взвешивают. Пикнометр наполняют на 1/3 объема спиртом, помещают на водяную баню. Выдерживают в течение 3–5 минут. Охлаждают, доливают спиртом до метки и помещают в термостат. Выдержку в термостате и взвешивание пикнометра с навеской материала и спиртом производят так же, как и при определении «водного числа» пикнометра.

Действительную плотность материала вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{m}{\frac{V \cdot \rho_{cn} - (m_1 - m_2)}{\rho_{cn}}} = \frac{m \cdot \rho_{cn}}{V \cdot \rho_{cn} - (m_1 - m_2)},$$

где  $m$  – масса навески материала, г;

$\rho_{cn}$  – плотность спирта при 20 °С,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$m_1$  – масса пикнометра со спиртом и навеской, г;

$m_2$  – масса пикнометра с навеской, г;

$V$  – емкость пикнометра («водное число»),  $\text{см}^3$ .

### 2.2.3 Методика определения выхода летучих веществ.

Определение выхода летучих веществ проводили в соответствии с ГОСТ Р 55660–2013 [35]/ Сущность метода заключается в нагревании навески ( $1 \pm 0,01$  г) топлива в тигле с закрытой крышкой при температуре  $850 \pm 10$  в течение 8 мин. После этого определяют выход летучих веществ по разности между общей потерей массы топлива и потерей после испарения влаги.

Тигли с навеской устанавливают в нагретую печь до  $840\text{--}860^\circ\text{C}$  и выдерживают не более 7 минут. По истечении времени тигли вынимают и охлаждают в течение 5 минут в эксикаторе, затем взвешивают и освобождают от нелетучего осадка. Выход летучих веществ рассчитывают по формуле:

$$V_a = \frac{100 (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W_a$$

где  $m_1$  – масса пустого тигля с крышкой, г;

$m_2$  – масса тигля с крышкой и навеской пробы до испытания, г;

$m_3$  – масса тигля с крышкой и нелетучим остатком после испытания, г;

$W^a$  – массовая доля влаги в аналитической пробе, %.

#### 2.2.4. Определение механической прочности нелетучего остатка углей.

Нелетучий остаток, предварительно взвешивают и помещают в металлическую трубу. Поднятый груз на уровень края трубки опускается на твердое топливо три раза. Раздробленный уголь помещается на сито с размером ячейки 1 мм и рассеивается. После сбора “надрешетного” продукта взвесить его с точностью до 0.01г.

Механическая прочность вычисляется по отношению массы “надрешетного” продукта к массе исходного продукта в процентах.

$$\text{Механическая прочность} = \frac{W_{\text{надреш.}}}{W_{\text{исход}}} * 100\%$$

$W_{\text{надреш}}$  - вес надрешетного продукта, г

$W_{\text{исход}}$  – вес исходного продукта, г

#### 2.2.5. Определение кажущейся плотности цилиндрических образцов

Сущность метода – определении массы и объема цилиндрических образцов. Кажущуюся плотность ( $D_k$ , г/см<sup>3</sup>) рассчитывали по формуле:

$$D_k = m/V,$$

где  $m$  – масса образца, г

$V$  – объем образца, см<sup>3</sup>

$$V = \pi r^2 h$$

#### 2.2.6. Методика определения гранулометрического состава гранулята

Сущность метода заключается в рассеивании гранул на ситах с размером ячеек +10 мм и +5.5 мм и определении массы полученных фракций, и вычислении их процентного содержания в исходной пробе.



### 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Графитовую пыль (см. п. 2.1) гранулировали методами: окатывание, протираание через сито; прессование выдавливанием и в глухую матрицу.

#### 3.1 Гранулирование методами окатывания и протираания через сито

Для гранулирования циклонной пыли в качестве связующего опробовали жидкое стекло. Схемы операций:

а) Дозирование → окатывание.

Навеску пыли равномерно распределяли по поверхности поддона, по каплям вводили связующее, накрывали крышкой и вручную окатывали. Гранулы получены мелкие, мягкие. Продолжительность окатывания не приводит к увеличению размеров и прочности.

б) Дозирование → смешивание → окатывание.

Навеску пыли равномерно распределяли по поверхности поддона, по каплям порционно вводили связующее, после каждой порции связующего массу смешивали до получения однородного комка, накрывали крышкой и вручную окатывали. Принцип оптимизации связующего – порционное введение в постоянную навеску пыли. Количество связующего увеличивали от 5,1 до 10,25 %. Качество гранул оценивали визуально. Гранулы округлой формы. С повышением количества связующего – размер (диаметр) гранул увеличивался и при 10,25 % составил 3 – 8 мм (табл. 3.1)

Таблица 3.1 – Опробование метода окатывания с жидким стеклом

Количество связующего, %	Выход, %	Гранулят	Вывод
5,1	–	Смесь гранул 1-3 мм и пыли	недостаточно
10,25	52,4	Гранулы 3-8 мм	недостаточно

Методика определения количества связующего в массе

В навеску пыли (17,5 г) ввели жидкого стекла до общей массы 18,5 г. Расчетное количество связующего 5,1 %. Смесь компонентов тщательно смешивали, затем окатывали. Получили смесь мелких гранул и пыли.

Ввели связующее до общей массы 19,53 г, связующего стало 10,25 %. Получили окатанный полигранулят 3–8 мм и остаток пыли.

Добавка жидкого стекла до общей массы 19,53 г (10,25 %) привела к получению более крупных гранул 3–7 мм (рис. 3.1а), из некоторых гранул отмечено выдавливание жидкого стекла.

в) Дозирование → смешивание → образование комка массы → протирание через сито.

Для протирания через сито готовили пластичную массу, последовательно увеличивая количество связующего с 6,6 до 12,5 % до получения комка (табл. 3.2). Затем комок протирали через сито с размером ячейки 4 мм, получили хрупкие жирные гранулы по диаметру 4 мм.

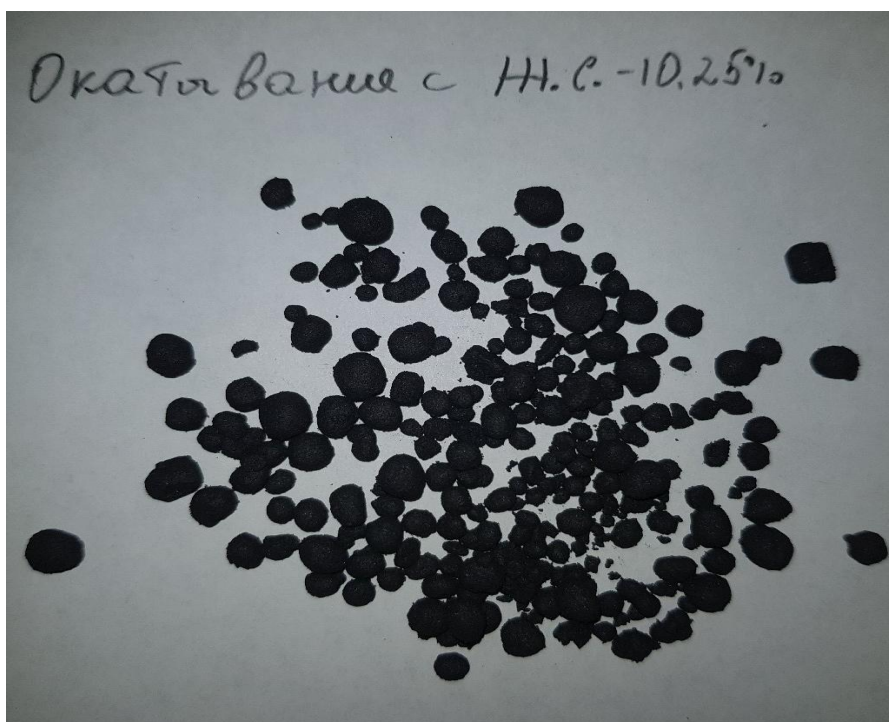


Рисунок 3.1а – Гранулы, полученные при окатывании из графитовой пыли на жидком стекле.

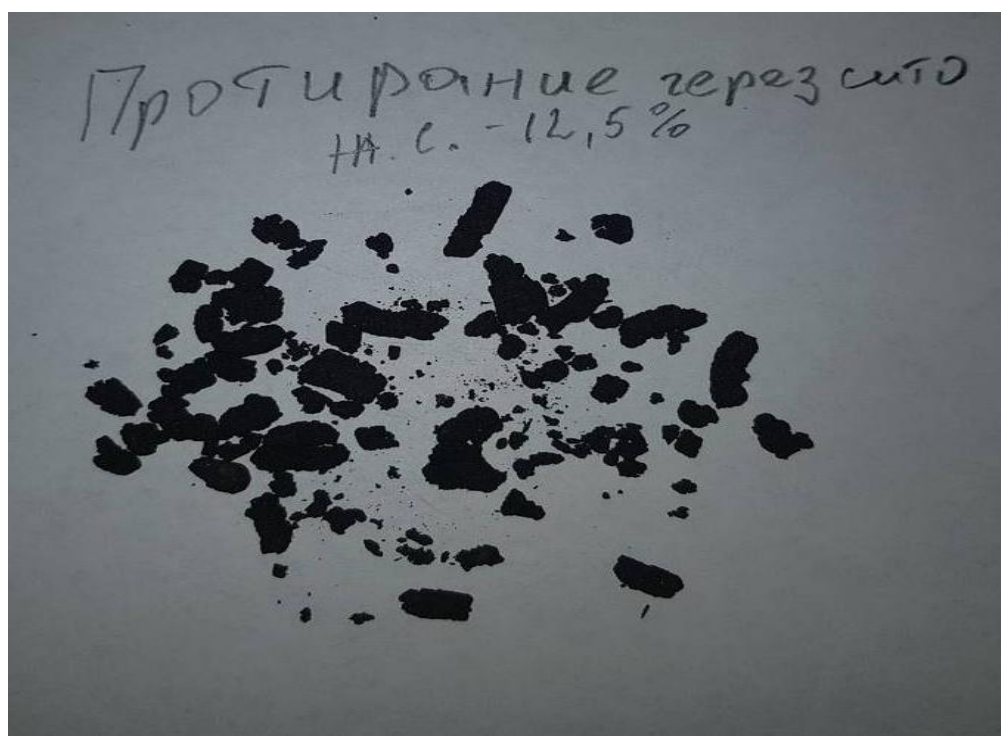


Рисунок 3.16 – Гранулы, полученные при протирании через сито из графитовой пыли на жидком стекле.

Таблица 3.2 – Опробование протирания массы с жидким стеклом через сито

Количество связующего, %	Выход сухих гранул, %	Гранулят	Вывод
6,6		Не получен ком массы, пригодный для протирания через сито	недостаточно
12,5	45,3	Получен комок массы	Не прочные гранулы

Методика подготовки комка массы для протирания.

В навеску пыли (14,0 г) ввели связующее до общей массы 15,0 г, количество связующего составило 6,6 %. Полученную смесь тщательно смешивали, пытались окатывать, но комкования не происходило. Добавили

жидкого стекла до общей массы 16,0 г, процент связки 12,5 %. Массу выложили на ровную поверхность, получили комок. Опробовали протираание через сито. Получены рыхлые гранулы червеобразной формы диаметром 4 мм (рис.3.1 б). По нашему мнению, недостаточно прочные гранулы исключаем метод протираания через сито.

Сушка гранул. Гранулы на жидком стекле – метод (б) сушили при температуре 120 °С, 40 мин. в сушильном шкафу.

Выход сухих гранул от исходной массы составил 52,4 % для (б), Остальное – зеленый бой (47,6 %) может быть использован возвратно.

Сухие гранулы независимо от метода гранулирования нерастворимы в воде.

Сухие гранулы рассеяли на ситах с размером ячеек 5,5; (табл. 3.3). Из таблицы 3.3 видно, что выход гранул размерами более 5,5 мм составил 32,25 % (б) (табл. 3.3); гранул более 4 мм – 70 %, соответственно.

Таблица 3.3 – Гранулометрический состав гранул на жидком стекле,

Метод гранулирования	Размеры частиц мм (%)
(количество жидкого стекла)	+5,5
Окатывание (10,25 %)	70

Из таблицы 3.4 видно зольность гранул на жидком стекле превышает зольность исходной графитовой пыли в среднем на 1,5 % (при 10,25 % жидкого стекла); Увеличение зольности обусловлено присутствием в составе жидкого стекла силикатного модуля  $(SiO_2)_n$

Таблица 3.4 Качественные показатели сухих гранул

Метод гранулирования (количество жидкого стекла)	Качественные показатели.	
	Зольность, %	Выход летучих веществ, %
Окатывание (10,25 %)	1,6	17,8
Исходная графитовая пыль	0,1	

Опробованием жидкого стекла в качестве связующего при гранулировании графитовой пыли методами окатывания и протирания через сито показано что:

- для получения гранул размерами более 5,5 мм требуется минимум 30–35 % жидкого стекла в качестве связующего;
- жидкое стекло приводит к повышению зольности гранул относительно исходной пыли. Превышение составило 1,5 %.
- при использовании метода протирания через сито не получили гранулы нужной формы;
- жидкое стекло не рекомендуется в качестве связующего для циклонной пыли антрацита-термоантрацита.

### 3.2. Гранулирование методом прессования выдавливанием со шнековой подачей массы

Для гранулирования циклонной пыли выдавливанием через фильтры с подачей массы шнековым способом в качестве связующего опробовали жидкий BakelitePF 9950 FL и порошковый сухой BakelitePF 6357 FP.

Схема операций: Дозирование → Смешивание → Подпрессовка → Прессование гранул

#### 3.2.1 Подготовка массы

Подготовка массы для прессования включает операции дозирования графитовой пыли и порционного введения связующего и смешивания массы после каждой порции. Введение связующего завершается после получения массы пригодной для прессования выдавливанием. Подготовка массы для всех видов связующего аналогична.

Рассмотрим методику подготовки массы на примере BakelitePF 9950 FL.

Навеску пыли массой 50,0 г равномерно распределили на поверхности дна смесителя, маленькими порциями вводили связующее. Общая масса компонентов достигла 59,25 г, количество связующего – 6,75 %, количество

воды 8,86 % и смешивали. Связующего недостаточно – масса не образовывалась. Затем порционное введение связующего и воды повторили 4 раза, смешивали и органолептически оценивали качество массы. При 25 % связующего и 24% воды, получили 87 г массы, пригодной для прессования (табл. 3.5).

### 3.2.2 Прессование выдавливанием через фильеры

Готовую массу порционно загрузили в пресс, выход из пресса закрыли заглушкой, с помощью шнековой подачи сделали подпрессовку в течение 5–7 мин. После чего заглушку убрали и массу выдавливали через фильеры размерами 6 мм. Получено 47 г гранул червеобразной формы диаметром 6 мм (рис. 3.2) Выход «зеленых» гранул составил 54,02 %. Остальное – зеленый бой 45,98 % – используется возвратно.

Таблица 3.5 – Оптимизация количества связующего жидкого Bakelite

Количество связующего, %	Визуальное качество массы	Вывод	Выход гранул, %
6,75	Масса не образуется	недостаточно	
10,5	Масса не образуется	недостаточно	
14,5	Масса не образуется	недостаточно	
20,5	Первые признаки образования массы	недостаточно	
23,8	Остался на стенках порошок	недостаточно	
25,0 (87 г)	Готовая масса для пресования	достаточно	54,02

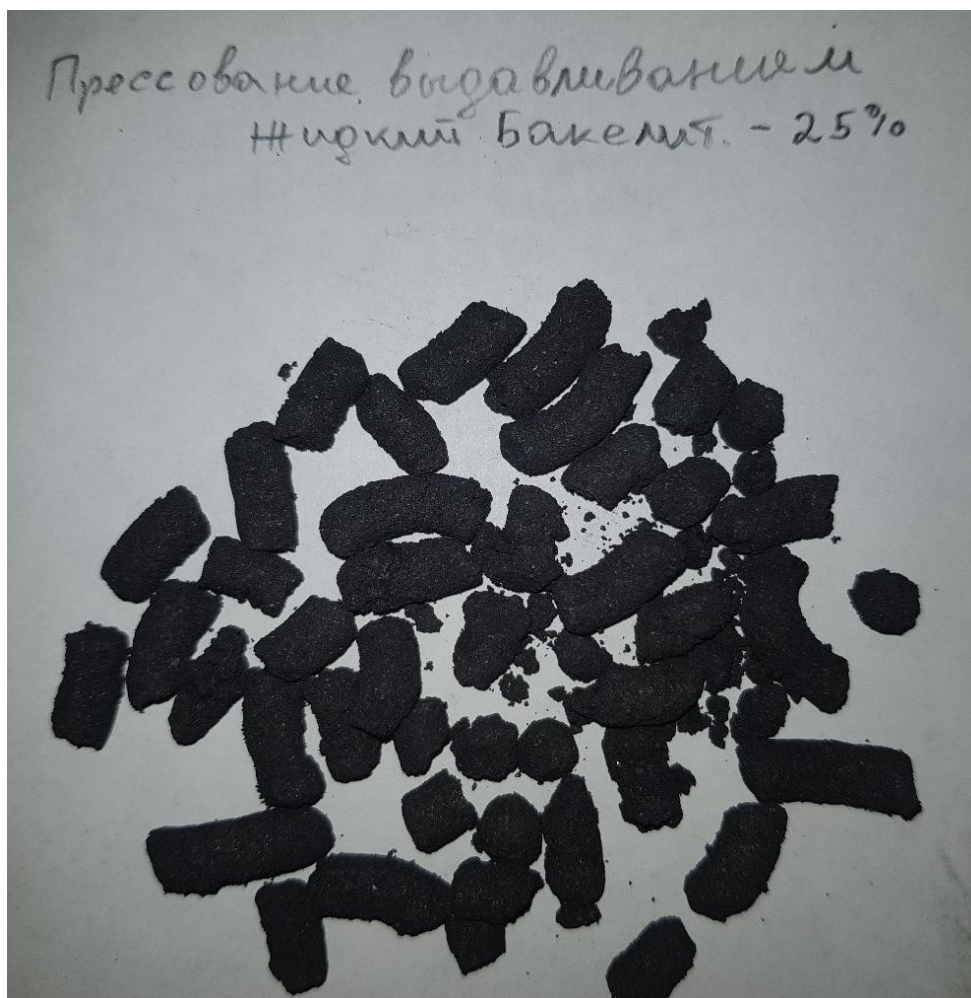


Рисунок 3.2 – Гранулы из циклонной пыли на жидком Bakellite

Полученные гранулы сушили при температуре 120 °С в течение 40 мин. в сушильном шкафу. Масса сухих гранул – 42 г. Выход сухих 89,36 % от сырых гранул, то есть массовая доля влаги – 10,64 %. Сквозной выход от исходной массы составил 60%. Остальное – влага и зеленый бой.

Сухие гранулы рассеяли на ситах с размером ячеек 5,5. Выход гранул размерами более 5,5 мм составил 92 % (табл. 3.7). Более мелкие гранулы могут быть использованы повторно.

Таблица 3.6 Выход зеленых и сухих гранул

Связующее		Выход гранул, %		
Вид	Количество, %	зеленых	сухих	сквозной
Bakellite жидкий	25,0	54,02	89,36	60
Bakellite сухой	20,8	48,15	87,0	41,89

Bakelite сухой	15,8	33,89	84,82	28,74
----------------	------	-------	-------	-------

Таблица 3.7 – Гранулометрический состав гранул, полученных выдавливанием

Связующее		Размеры частиц мм (%)
Вид	Количество, %	+5,5
Bakelite жидкий	25,0	92
Bakelite сухой	20,8	93,6
Bakelite сухой	15,8	92,018

### 3.2.3 Опробование связующего – порошок BakelitePF 6357 FP

В качестве связующего использовали бакелит порошкообразный марки BakelitePF 6357 FP. Количество – 15,8 и 20,8 %. Последовательность операций как в п.3.2.2:

Дозирование → Смешивание → Подпрессовка → Прессование

Прессовали гранулы выдавливанием через фильтры диаметром 6 мм, подачей массы шнековым способом.

Подготовка массы с порошкообразным связующим

Изготовили 2 образца сухой смеси с разным количеством связующего 15,8 и 20,8 %. Связующее вводили порционно. Чтобы масса прессовалась выдавливанием – добавляли воду. Количество воды 38 и 15 мл.

Состав массы с водой на 80 г графитовой пыли:

- 1) Связующее – 11,27 %; вода – 28,6 %
- 2) Связующее – 18,1%; вода – 12,93 %

Готовую массу порционно загружали в пресс. Для подпрессовки выход из пресса закрыли заглушкой. Подпрессовку проводили в течение 5–7 мин. После чего массу выдавливали через фильтры размерами 6 мм.

Выход зеленых гранул – 33,89 % и 48,15%. Остальное пресс-остаток, пригодный для возвратного использования. Внешний вид гранул на рис. 3.3.



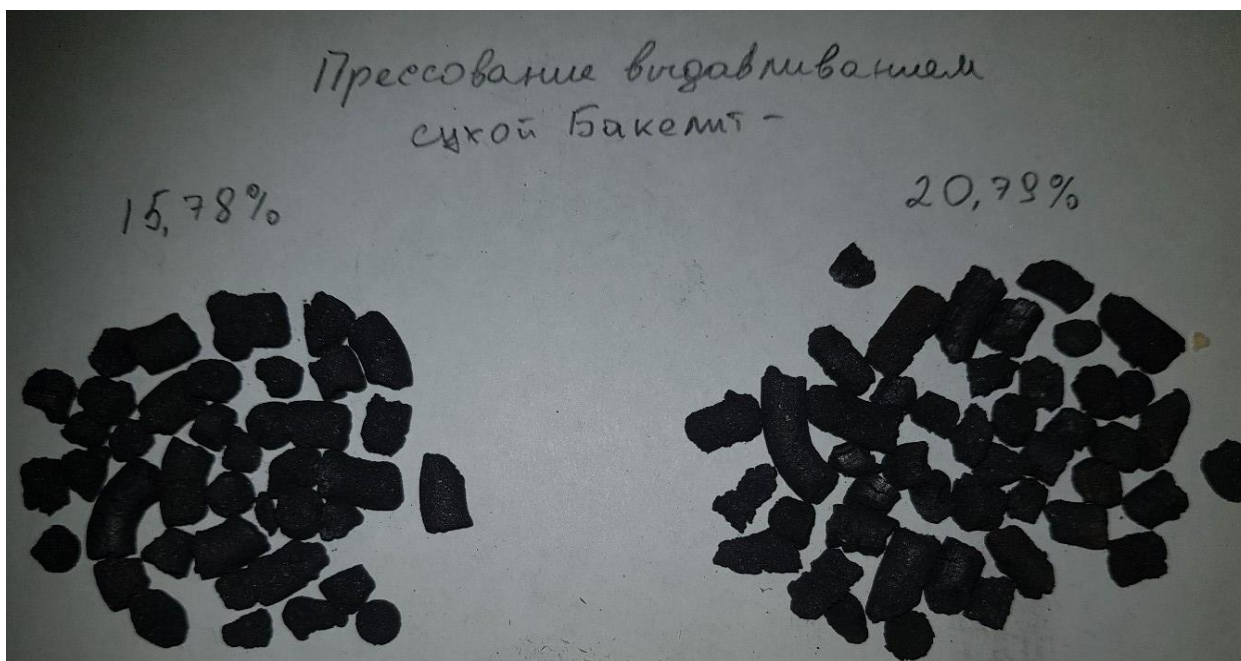


Рисунок 3.3 – Гранулы из циклонной пыли на BakelitePF 6357 FP

Гранулы сушили как в п. 3.2.2 и определяли гранулометрический состав.

Сухие гранулы рассеяли на ситах с размером ячеек 5,5. Выход гранул размерами более 5,5 мм составил 92,018 % и 93,6 % при количестве связующего 15,8 и 20,8 %, соответственно (табл. 3.7). Более мелкие гранулы могут быть использованы возвратно.

Зольность гранул на жидком Bakelite составила менее 0,1 %, Выход летучих веществ сравним с количеством жидкого связующего – 33,4 %.

При использовании сухого Bakelite зольность и выход летучих веществ из гранул при количествах связующего 15,8 и 20,8 % имеют близкие значения (табл.3.8). Зольность гранул (менее 0,1 %)

Таблица 3.8 – Качество гранул, полученных выдавливанием

Связующее		Качественные показатели	
Вид	Количество, %	Зольность, %	Выход летучих веществ, %
Bakelite жидкий	25,0	0,1	33,4
Bakelite сухой	20,8	0,1	20,4
Bakelite сухой	15,8	0,1	20,6

Графитовая пыль	0	0,1	
-----------------	---	-----	--

### 3.3. Гранулирование методом прессования в глухую матрицу

Компоненты для приготовления массы графитовую пыль и связующее – бакелит порошкообразный марки BakelitePF 6357 FP. Количество – 3,3; 6,6; 10 и 20 %. Последовательность операций:

Дозирование → Смешивание → Прессование

Навеску массы 1 г закладывали в глухую матрицу диаметром 10 мм. Прессовали на лабораторном прессе при давлениях 5,0; 7,5; 10,0 МПа. Зеленые образцы, прессованные при давлении 5,0 МПа, взвесили, измерили, рассчитали объем и Дк (табл. 3.8). Наиболее плотные образцы получены с Дк 1,42–1,543 г/см<sup>3</sup> со связующим 6,6 – 20 %. Образцы поставили на основание и оставили на хранение в течение 7 суток, вновь замеряли объем и определяли кажущуюся плотность (Дк, г/см<sup>3</sup>) (табл. 3.8). Изменений не произошло. Внешний вид образцов представлен на рисунках 3.4а, 3.4б, 3.4в, 3.4д.

Из таблицы 3.9 видно, что прочность образцов прессованных при давлении 5,0 МПа возрастает с увеличением количества связующего.

С максимальной прочностью получены образцы с 6,6 – 20 % связующего при давлении 10,0 МПа. Наименьшие значения прочности у образцов, полученных при давлении 5,0 МПа.

В таблице 3.8 – Влияние давления и концентрации связующего на плотность (г/см<sup>3</sup>).

Количество связующего, %	Давление, кГс/см <sup>2</sup>		
	50	75	100
3,3	1,42	1,430	1,435
6,6	1,42	1,447	1,448
10	1,43	1,443	1,465
20	1,42	1,478	1,543

В таблице 3.9 – Влияние давления и концентрации связующего на прочность (%) прессованных образцов

Количество связующего, %	Давление, кгс/см <sup>2</sup>		
	50	75	100
3,3	18,5	21	24,3
6,6	20,6	27,8	36
10	27	45,7	63,8
20	57,6	70,2	91,2

Таким образом, максимальная прочность получена для образцов с 20% связующего при давлении 10,0 МПа. Наименьшие значения прочности у образцов полученных при давлении 5,0 МПа. При давлении 5,0 МПа с увеличением количества связующего приводит к повышению прочности.

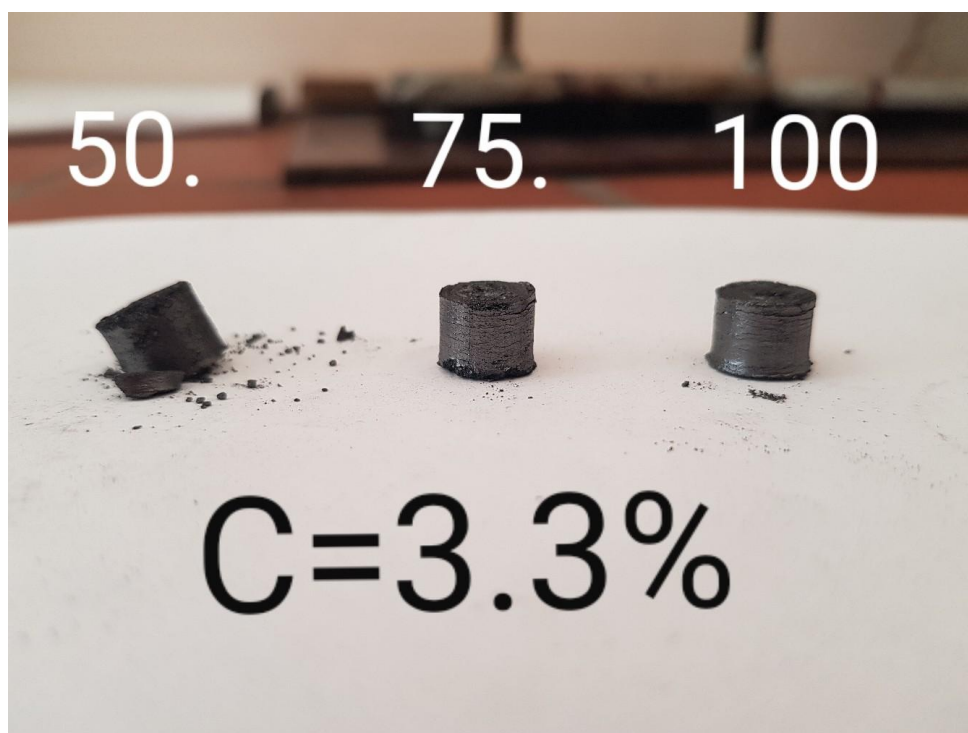


Рис. 3.4 а. –Зеленые образцы с 3,3 % связующего.

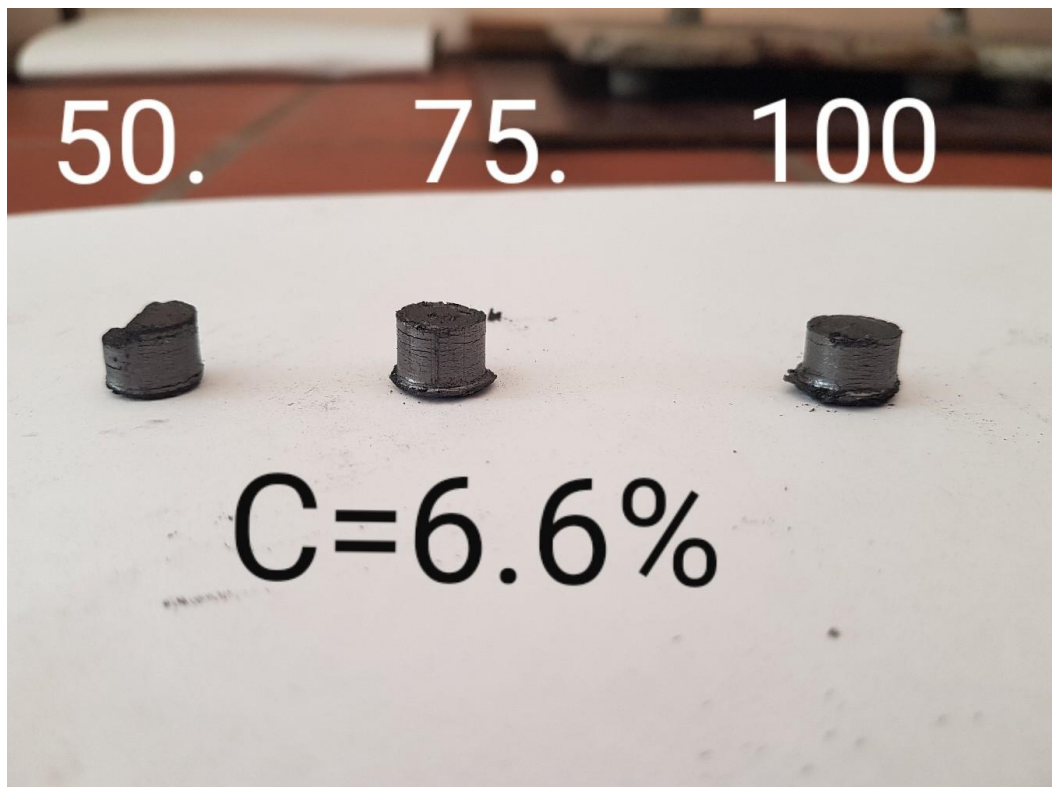


Рис. 3.4 б. –Зеленые образцы с 6,6 % связующего.

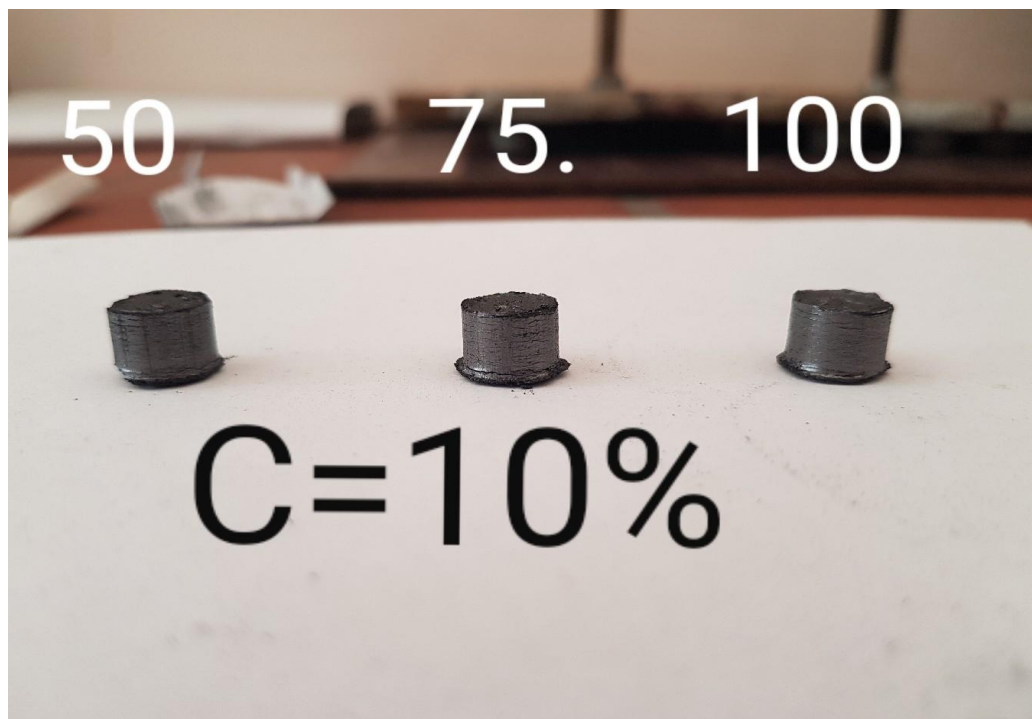


Рис. 3.4 в. –Зеленые образцы с 10 % связующего.

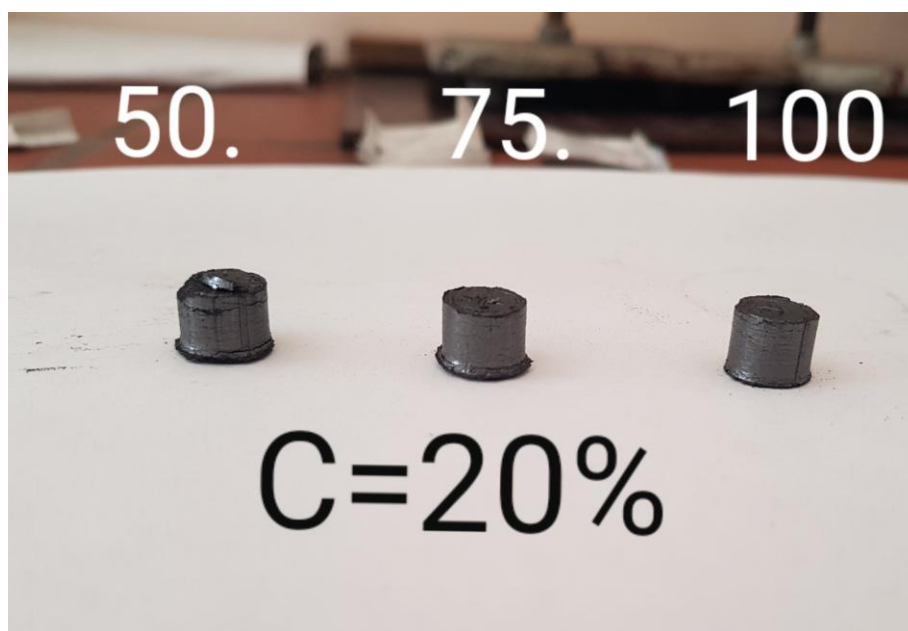


Рис. 3.4 д. – Зеленые образцы с 20 % связующего.

### 3.4 Выбор оборудования для гранулирования графитированной пыли

Исходя из требований, производительность линии должна составлять не менее 1,5 – 2,0 тн/час, размер гранул 5–7 мм.

По итогу проведенных исследований и экспериментов, в качестве оборудования рекомендуется использовать: валковый пресс гранулятор (DGZ 2.0 рис. 3.5) и роторный барабан гранулятор (TDZGZ1240 рис. 3.7). Характеристики представлены в табл. 3.10 и 3.11 соответственно.





Рис. 3.5 – Валковый пресс гранулятор (DGZ 2.0)

Таблица 3.10 – Характеристики валкового пресс гранулятора DGZ 2.0

Показатель	Значение
Производительность, т/ч	1,5~2,5
Мощность кВт/ч	18,5
Прижимной ролик, мм	150x300
Размер питания, мм	0,5
Готовая продукция d, мм	2,5 – 10
Модель редуктора	ZQH400
Содержание влаги в гранулах, %	2 – 5

Технологическая схема получения гранул с использованием валкового гранулятора. рис. 3.6 Последовательность операций:

Дозирование → Смешивание → Прессование → Сортировка → Упаковка



Рис. 3.6 – Технологическая схема гранулирования.

Показатель	Значение
Производительность, т/ч	1~3
Мощность кВт/ч	5,5
Готовая продукция d, мм	2,5 – 10
Содержание влаги в гранулах, %	2 – 5

Таблица 3.11 – Характеристики роторного барабан гранулятора



Рис. 3.7 – Роторный барабан гранулятор (TDZGZ1240)

Технологическая схема получения гранул с использованием роторного барабан гранулятор рис. 3.8 Последовательность операций:

Дозирование → Смешивание → Окатывание → Сортировка → Упаковка

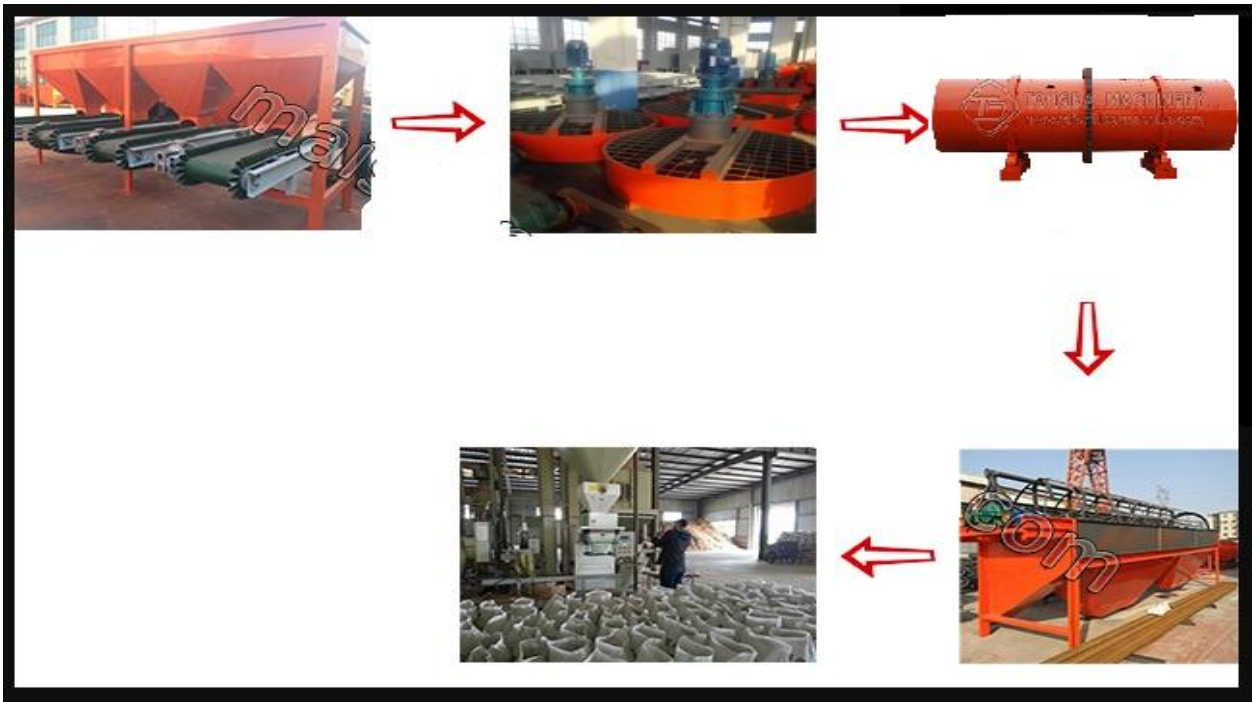


Рис. 3.8 – Технологическая схема гранулирования.



## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ литературных данных и интернет-информации о технологиях гранулирования порошковых материалов, техническим характеристикам, цене и технологичности процессов гранулирования для пылевидного графита.

Выявлено, что для гранулирования порошковых материалов применяют:

- в качестве связующего каменноугольную смолу или пек, фенол-формальдегидные смолы,
- способы окатывания, прессования выдавливанием и в глухую матрицу.

2. По результатам экспериментов и технологичности процесса гранулирования пылевидного графита в качестве связующих веществ выбран бакелит порошкообразный марки BakelitePF 6357 FP. Жидкое стекло приводит к повышению зольности и получению низкокачественных гранул – исключено из экспериментов по опробованию прессованием. Так же исключаем BakelitePF9950FL жидкий и ФФС так как гранулы с данными видами связующих получились не прочные и хрупкие, при данном оптимальном количестве связующего. При прессовании вытапливанием установлено оптимальное количество  $18 \pm 2 \%$ , в зависимости от гранулометрического состава графита.

3. В результате проведения гранулирования методом прессования в глухую матрицу образцы с 20 % связующего при давлении 10,0 МПа получились с максимальной прочностью, они же получили максимальное значение кажущейся плотности.

4. Разработана технология гранулирования графитированных отходов электродного производства, связующее – бакелит порошкообразный. Рекомендовано гранулирование прессованием в глухую матрицу. Получены гранулы размерами от 2 до 8 мм. Предложено технологическое оборудование для прессования: валковый пресс-гранулятор (DGZ 2.0); роторный барабанный гранулятор (TDZGZ1240) производительностью от 1,5 до 2,5 т/ч и 1,0 до 3,0 т/ч, соответственно.

Технологические схемы гранулирования:

Дозирование → Смешивание → Прессование → Сортировка

Дозирование → Смешивание → Окатывание → Сортировка

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен, П.В. Основы техники гранулирования / П.В. Классен, И.Г. Гришаев // учебник. – М.: Химия, 1982. – С. 224–236.
- 2 ГОСТ 22898-78 Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия
- 3 Аксенов Г. И., Семенов Ю. Н. Прокатка металлических порошков в валках. М., Metallurgizdat, 1957. 23 с..
- 4 Островский, В.С. Искусственный графит / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков, Н.Н. Шипков. – М.: Metallurgiya, 1986. – 272 с.
- 5 Чалых, Е.Ф. Технология углеграфитовых материалов / Е.Ф. Чалых. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 374 с.
- 6 Физико-химические методы исследования строительных материалов: учебное пособие / И.А. Макарова, Н.А. Лохова. – 2-е изд. перераб. и доп. – Братск: Изд-во БрГУ, 2011. – 139 с.
- 7 Книгина, Г.И. Современные физико-химические методы исследования строительных материалов: учеб. пособие / Г.И. Книгина, Л.Н. Тацки, Э.А. Кучерова. – Новосибирск: НИСИ, 1981. – 81 с.
- 8 [http://www.lityo.com.ua/elkem\\_3.html](http://www.lityo.com.ua/elkem_3.html)
- 9 Терентьев, А.А. Влияние структуры коксов на качество коксопечных композиций на их основе: дис. канд. техн. наук / А.А. Терентьев. – М: ГУП НИИ Графит, 2001. – 156 с.
- 10 Шеррюбле, В.Г. Пековый кокс в углеродной промышленности / В.Г. Шеррюбле, А.Н. Селезнев. – Челябинск: Издатель Татьяна Лурье, 2003. – 296 с.
- 11 Панов А.Г., Рогожина Т.В. К вопросу о выборе науглероживателя при производстве синтетических чугунов - Сборник докладов Литейного консилиума №2 «Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из чёрных сплавов» - Челябинск: Челябинский Дом печати, 2007

- 11 Деев, А.Н. О формировании пористой структуры углеграфитовых материалов / А.Н. Деев, Г.Н. Багров, Т.В. Лукина // Конструкционные материалы на основе графита: сб. науч. тр. № 3. – М.: Металлургия, 1967. – С. 55–63.
- 12 Каргин, В.А. Краткие очерки физико-химии полимеров / В.А. Каргин, Г.Л. Слонимский. – М.: Химия, 1967. – 254 с.
- 13 Генералов М. Б., Чайников А. П. Порошковая металлургия, 1972, № 4, с. 15—17.
- 14 Генералов М. Б., Чайников А. И., Сергеев М. Е. — В кн.: Процесс пластической деформации, качество поверхности изделий и износ оснастки. Чебоксары. Книжное издательство, 1974, с. 12—14.
- 15 Глебов С. В. Труды III Всесоюзного совещания по огнеупорным материалам. М., АН СССР, 1974, с. 17—21.
- 16 Тарабанов, А.С. Силицированный графит / А.С. Тарабанов, В.И. Костиков. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
- 17 Свойства конструкционных материалов на основе углерода: справочник / под ред. В.П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – С. 87–97.
- 18 Вилесов Н. Г. и др. Процессы гранулирования в промышленности. Киев, Техника, 1976. 192 с.
- 19 <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1143.html>
- 20 Виноградов Г. А. и др. Прокатка металлических порошков. М., Металлургия, 1969. 382 с.
- 21 Витман Л. А. Распыливание жидкостей форсунками. М—Л., ГЭИ, 1962. 264 с.
- 22 Веселовский, В.С. Угольные и графитные конструкционные материалы / В.С. Веселовский. – М.: Наука, 1966. – 226 с.
- 23 Плевин, В.Г. Изменение пористой структуры и свойств углеграфитовых материалов в процессе пропитки пеками и последующей термообработки / В.Г. Плевин, Л.И. Сычева // Совершенствование

технологии и улучшение качества электродной продукции: сб. науч. тр. № 6.  
– Челябинск: Южно-Уральское изд-во, 1974. – С. 30–39.

24 Чалых, Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е.Ф. Чалых. – М.: Metallurgia, 1972. – 432 с.

25 Привалов, В.Е. Каменноугольный пек / В.Е. Привалов, М.А. Степаненко. – М.: Metallurgia, 1981. – 208 с.

26 Бутырин, Г.М. Высокопористые углеродные материалы / Г.М. Бутырин. – М.: Химия, 1976. – 190 с.

27 Чистяков, А.Н. Химия и технология переработки каменноугольных смол / А.Н. Чистяков – Челябинск.: «Metallurgia. Челябинское отделение». – 1990. – 160 с.

28 Фиалков, А.С. Углеродные материалы / А.С. Фиалков. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.

29 Классификация, учет и использование вторичных материалов ресурсов в электродном производстве/ В.Г Зеленский , Л.А. Шкатов и др// Тезисы докладов и сообщений всесоюзной научно- технической конференции электродного производства “ Повышения качества и эксплуатации стойкости углеродной продукции. 1983г.

30 Ухов.О.А. Получение брикетированного связующего и регулирование физико-химических свойств формованного топлива-восстановителя: автореферат дис. Канд. Техн. Наук/ О.А.Ухов. 1983г.

31 ГОСТ 17022-81 Графит. Типы, марки и общие технические требования.

32 ГОСТ 20907-75 Смолы фенолоформальдегидные жидкие.

33 ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2013

34ГОСТ22898-78. Коксынефтянымалосернистые. П.4.4 Определение действительной плотности

35ГОСТ Р 55660—2013 Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. – М.: Стандартинформ, 2013