



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых

Е.Ю. Дегодя
Н.В. Гмызина

ОКУСКОВАНИЕ СЫРЬЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2023

УДК 622.7.016: 622.7.017
ББК 33.4

Рецензенты:

кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной экологии
и безопасности жизнедеятельности
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Ю.В. Сомова

начальник карьера Рудника ГОП ПАО
«Магнитогорский металлургический комбинат»
А.Г. Жуматий

Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В.

Окускование сырья [Электронный ресурс] : учебное пособие / Елена Юрьевна Дегодя, Наталья Викторовна Гмызина; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (2,57 Мб). – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2023. – 1 CD-ROM. – Систем. требования: IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM; 10 Мб HDD; MS Windows XP и выше; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9967-2873-2

Пособие составлено в соответствии с типовой программой дисциплины «Переработка и использование продуктов обогащения». Освещены процессы окускования руд и концентратов, описаны теоретические основы агломерации, окомкования и брикетирования. Представлены технологические параметры, режимы и схемы с учетом современных требований к технологиям и технике окускования.

Пособие предназначено для студентов специальности 21.05.04 Горное дело (Обогащение полезных ископаемых)

УДК 622.7.016: 622.7.017
ББК 33.4

ISBN 978-5-9967-2873-2

© Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В.2023
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2023

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АГЛОМЕРАЦИЯ.....	5
1.1. Агломерационная шихта, состав и свойства	6
1.2. Устройство агломерационной машины, принцип действия	9
1.3. Технология производства агломерата	16
1.4. Химические процессы и минералогические превращения	19
1.5. Удаление примесей.....	24
1.6. Качество агломерата.....	26
Вопросы для самопроверки	27
2. ОКОМКОВАНИЕ	29
2.1. Подготовка шихты для окомкования	30
2.2. Связующие и флюсующие добавки для производства сырых окатышей	31
2.3. Технология производства окатышей	33
Диаметр.....	42
Высота борта	42
Длина.....	42
Ширина	42
Высота.....	42
2.4. Упрочняющий обжиг окатышей	42
2.5. Безобжиговые методы упрочнения окатышей.....	46
2.6. Качество окатышей	49
Вопросы для самопроверки	50
3. БРИКЕТИРОВАНИЕ	52
3.1. Брикетная шихта, состав и свойства	54
3.2. Связующие вещества для брикетирования	55
3.3. Оборудование для брикетирования.....	59
3.4. Технология производства брикетов.....	63
3.5. Качество брикетов	69
Вопросы для самопроверки	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	74

ВВЕДЕНИЕ

Окускование руд и концентратов – это процесс превращения мелких классов полезных ископаемых в куски с заданными свойствами для их более эффективного использования. Получаемые в результате глубокого обогащения концентраты руд черных и цветных металлов как правило, непригодны для непосредственного использования в плавке или других технологических процессах и требуют окускования.

Операции окускования позволяют рационально использовать пылеватые руды, а также концентраты и отходы производств: шламы и пыли металлургических агрегатов, пиритные огарки сернокислотного производства, красные шламы глиноземных заводов, колошниковую пыль доменных и окалину прокатных цехов и др.

В зависимости от вида полезного ископаемого и его последующего передела окускование осуществляется агломерацией, окомкованием или брикетированием.

Агломерация – спекание мелких руд или концентратов в твердые пористые куски.

Окомкование – процесс получения гранул сферической формы – окатышей, подвергаемых для упрочнения обжигу.

Брикетирование – процесс получения брикетов прессованием мелкого материала.

Окусковывают материалы крупностью частиц менее 10 мм.

В результате окускования частиц получают:

при агломерации — агломерат крупностью 5—60 мм,

при окомковании — окатыши в основном крупностью 9—16 мм,

при брикетировании — брикеты разной геометрической формы и необходимых габаритов и массы. Из общего производства окускованного сырья агломерат занимает около 70 %, окатыши 28 % и брикеты 2 %.

Горные инженеры-обогащители должны иметь представление о процессах окускования. Знания, полученные при изучении данных процессов будут необходимы для разработки и совершенствования технологий переработки и окускования продуктов обогащения полезных ископаемых, для анализирования устойчивости технологических процессов и качества выпускаемой продукции горно-металлургического производства.

1. АГЛОМЕРАЦИЯ

Способы **агломерации** известны в металлургии около 100 лет. Широкое распространение агломерация получила с начала XX века в связи с введением флотационного обогащения руд цветных металлов, а также по мере роста доли добываемых пылеватых железных руд, которые без окускования невыгодно плавить в доменных печах. Благодаря получению прочного агломерата, высокой производительности агрегатов и возможности полной механизации процесса, агломерация в значительной степени вытеснила другие методы окускования руд.

Агломерация (спекающий обжиг) (от лат. *agglomerare* — присоединять, прибавлять) — термохимический процесс окускования мелких руд, тонкоизмельченных концентратов и других металлосодержащих добавок. Проводится при высоких температурах (1200–1500⁰С), при этом происходит не только окускование сырья, но и удаление вредных примесей.

Применительно к металлургии — это процесс формирования **агломерата** — закристаллизовавшейся пористой массы из рудных частиц в результате их частичного плавления и последующего охлаждения. Для производства чугуна в современных условиях по прежнему основным видом окускованного сырья остается железорудный агломерат. Агломерация также позволяет вовлечь в металлургическую переработку побочные продукты и отходы собственного и других производств, содержащие повышенное количество железа: шламы, пыль, окалину прокатных цехов, колошниковую пыль доменного цеха, пиритные огарки сернокислотных заводов и др.

Наряду с окускованием при **агломерации** осуществляется ряд физико-химических превращений, улучшающих качество спекаемого сырья:

- разложение гидратных и карбонатных соединений;
- удаление из сернистого сырья большей части серы путем окисления до SO₂ и SO₃.

Целью современной технологии **агломерации** является обеспечение высокой производительности и экономичности передела при высоком качестве агломерата по химическому составу и металлургическим свойствам: прочности, пористости, восстановимости, низком содержании вредных примесей, оптимальной основности.

Интересный факт

Процесс агломерации появился в конце XIX века. Английскими инженерами Геберлейном и Хантингтоном в 1887 г. был предложен новый способ окускования сульфидных руд — агломерирующий обжиг (окислительный обжиг сульфидных руд). Процесс проводился в так называемом котле Геберлейна-Хантингтона. В котел загружалась сульфидная руда на колосниковую решетку и через пустотелую цапфу подавался воздух

под давлением под колосниковую решетку. Вначале горячим воздухом руда зажигалась, а затем шла подача холодного воздуха. Характерной чертой нового процесса было: послойное продвижение зоны горения. Все необходимое тепло после окончания зажигания получали за счет экзотермической реакции горения сульфидов в токе воздуха, так как в слой руды не добавляли специальных добавок – топлива. Немецкий инженер Завельсберг в 1905 г. усовершенствовал идею англичан и предложил загружать в их котлы пылеватую руду в смеси с угольной или коксовой мелочью, количество которой при сгорании выделяет необходимое тепло, достаточное для полного окускования руды. В таком виде данный процесс получил название агломерация.

1.1. Агломерационная шихта, состав и свойства

Подготовка **агломерационной шихты** к спеканию является одним из важнейших факторов, определяющих эффективность агломерационного, а следовательно, и доменного производства. Подготовка шихты заключается в обеспечении рациональных значений ее химического, гранулометрического составов и влажности. Конечной задачей процессов подготовки шихты является обеспечение высокого качества агломерата (рис. 1, в) и максимальной производительности агломашин.

В состав **агломерационной шихты** (рис. 1, а, б) входят следующие компоненты: рудная часть (богатая руда, концентрат) – 40-50 %, флюсы (известняк, доломит) – 15-20 %, возврат (мелкий некондиционный агломерат) – 20-30 %, коксовая мелочь – 4-6 %, различные добавки (колошниковая пыль, пиритные огарки, окалина и др.), влага – 6-9 %.

Шихту перед спеканием подвергают тщательному перемешиванию, увлажнению и окомкованию. Окомкование ведется во вращающихся барабанах. Окомкованию способствует добавка извести.

Крупность спекаемой шихты оказывает большое влияние на процесс агломерации. Максимальный размер частиц **рудной части** в шихте не должен быть более 8-10 мм. Более крупную руду спекать нецелесообразно, так как она может быть использована в доменном производстве без окускования. При спекании тонкоизмельченных концентратов (75% кл.-0,074 мм) в шихту рекомендуется вводить 20-25% руды крупностью 6-8 мм.

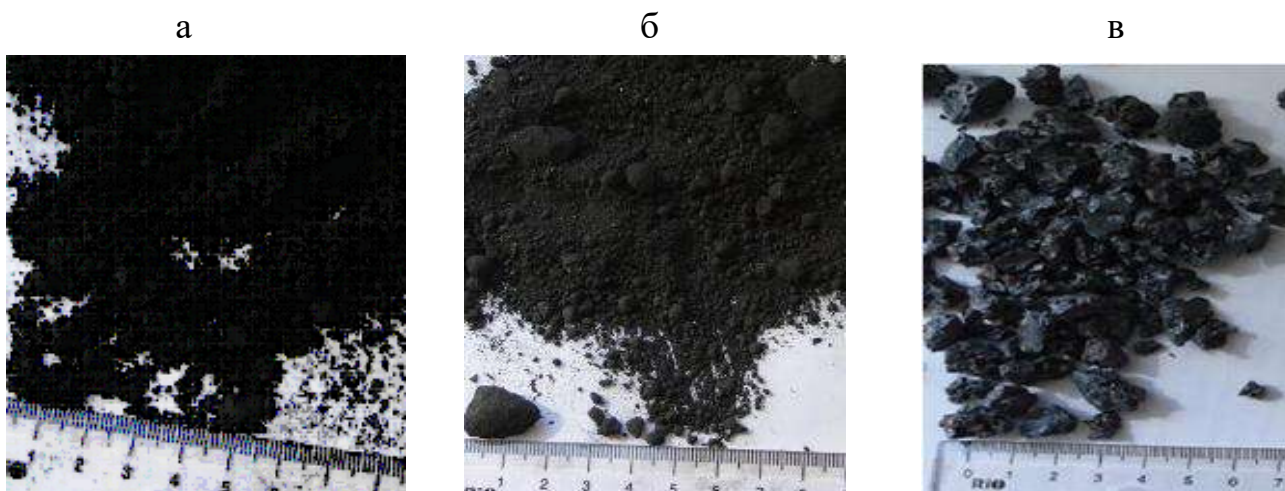


Рис. 1. Общий вид: а – железорудный концентрат; б – шихта; в - агломерат

В состав **рудной части** железорудной шихты могут входить следующие **типы железных руд**:

1. Магнетитовые, полумартитовые, мартитовые.
2. Титаномагнетитовые.
3. Гематитовые и гидрогематитовые (красные железняки).
4. Гидрогетитовые (бурые железняки).
5. Сидеритовые (карбонатные).
6. Железисто-хлоритовые (силикатные).

Кроме того, встречаются руды смешанные и комплексные, содержащие кобальт, никель, хром, марганец и другие металлы.

Рудообразующие минералы железных концентратов:

Магнетит Fe_3O_4 – плотный, трудновосстановимый минерал. Верхние зоны магнетитовых месторождений подвержены окислению, образуют полумартитовые и мартитовые руды. Степень окисления магнетитов характеризуется отношением общего содержания железа к содержанию его в закисной форме:

- для чистых магнетитов – $< 3,5$;
- полумартитов – $3,5 - 7,0$;
- мартитов – $> 7,0$.

Титаномагнетит $Fe(Fe, Ti)_2O_4$ – двуокись титана в виде твердого раствора или примеси ильменита в магнетите.

Гематит Fe_2O_3 – красный железняк, слабомагнитен, хорошо восстанавливается, легко плавится.

Водные окислы железа ($nFe_2O_3 \cdot mH_2O$):

- гидрогематит – $2Fe_2O_3 \cdot H_2O$
 - гетит – $Fe_2O_3 \cdot H_2O$
- } Бурый железняк

лимонит – $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$;
гидрогетит – $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$;
Сидерит FeCO_3 – пористый, легковосстановимый.

Нерудные минералы железных руд и концентратов:

кварц – SiO_2 ;
полевые шпаты – алюмосиликаты K, Na, Ca, Ba, Rb, Cs, Sr;
хлорит – водный алюмосиликат (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , H_2O);
эпидот – (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO);
гранат – окислы Ca, Mg, Fe, Mn, Ti, Cr;
пироксены – метасиликаты Ca, Mg, Fe;
амфиболы (роговая обманка) – магнезиально-железистые метасиликаты;
слюды – алюмосиликаты щелочей Mg, Fe;
кальцит – CaCO_3 ;
барит – BaSO_4 ;
гипс – $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

К основным факторам, определяющим металлургическую ценность железосодержащего сырья, относятся *физические свойства* и *химический состав*.

Из *физических свойств* наибольшее значение имеют пористость, газопроницаемость, кусковатость и влажность. Чем больше пористость и газопроницаемость сырья, тем выше его восстановимость. Наиболее высокой восстановимостью характеризуются бурые железняки и сидеритовые руды, наименьшей – магнетитовые; гематитовые имеют промежуточное значение восстановимости.

К *химическим компонентам* сырья относятся железо, вредные и полезные примеси, шлакообразующие соединения. Чем выше массовая доля железа в сырье, тем более высокие технико-экономические показатели достигаются при агломерации и в доменной плавке. Данные показатели зависят также от соотношения между компонентами породы в сырье: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и MgO . Руды, в которых вмещающая порода представлена, в основном, кремнеземом, называются кислыми, а руды, в которых порода имеет повышенное содержание CaO и MgO – основными.

Отношение $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ называется модулем *основности*.

Лучшие показатели при агломерации и доменной плавке достигаются при модуле основности близком к единице.

Топливом для агломерационного процесса в большинстве случаев служит **коксовая мелочь** крупностью 2-3 мм. Она должна быть малозольной ($A^c=9-10\%$) и характеризоваться незначительным выходом летучих веществ ($V^r=2-3\%$).

Введение **флюсов** в состав агломерата необходимо для понижения температуры плавления вмещающей породы железосодержащего сырья и золы кокса, а также для перевода их в легкоплавкий жидкий шлак при

дальнейшей доменной плавке. Химический состав **флюса** определяют в зависимости от состава вмещающей породы и золы топлива. Если в породе и в золе много кремнезема (кислого компонента), а зола загрязнена серой, то в агломерационную шихту добавляют основные флюсы, то есть вещества, содержащие известь. Оксид кальция, имеющий щелочной характер, нейтрализует кремнезем и связывает серу. Если в породе руды содержатся оксиды кальция и магния, приходится прибегать к добавке кислых флюсов, содержащих кремнезем. В первом случае используют известняк, во втором случае — кварциты. Процесс изменения состава шихты с целью получения заданной плавкости смеси называют офлюсованием.

Наиболее распространенным **флюсом** для агломерационного производства является известняк. Основную массу известняка составляет кальцит CaCO_3 . При нагревании известняк разлагается с образованием извести и углекислого газа: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$. Образовавшаяся известь и является шлакообразующим компонентом. Получающийся при этом офлюсованный агломерат более удобен для последующей доменной плавки, так как является самоплавким. Кроме того установлено, что технологическую эффективность известь показывает после гашения при увлажнении шихты и проявляет достаточно высокие вяжущие свойства, способствует повышению скорости грануляции железорудной шихты.

Флюсы и коксовую мелочь до смешивания с другими компонентами шихты дробят до 3 мм.

Возвратом называется мелочь, получаемая при дроблении и грохочении агломерата.

Возврат крупностью 8-13 мм используется в качестве постели на спекательной ленте, а класс 0-8 мм в виде циркулирующей нагрузки возвращается на повторное спекание.

Влага оказывает большое влияние на протекание процесса спекания и в значительной мере определяет все показатели агломерации. Влажность шихты на процессе агломерации сказывается двояко: с одной стороны, от нее зависит окомкованность и, соответственно, газопроницаемость холодной шихты; с другой стороны, влага является терморегулятором горения и оказывает влияние на газопроницаемость шихты в процессе спекания.

1.2. Устройство агломерационной машины, принцип действия

В настоящее время процесс агломерации осуществляется, как правило, на созданной Дуайтом и Ллойдом в 1906—1912 гг. прямолинейной ленточной спекательной машине непрерывного действия (рис. 2).

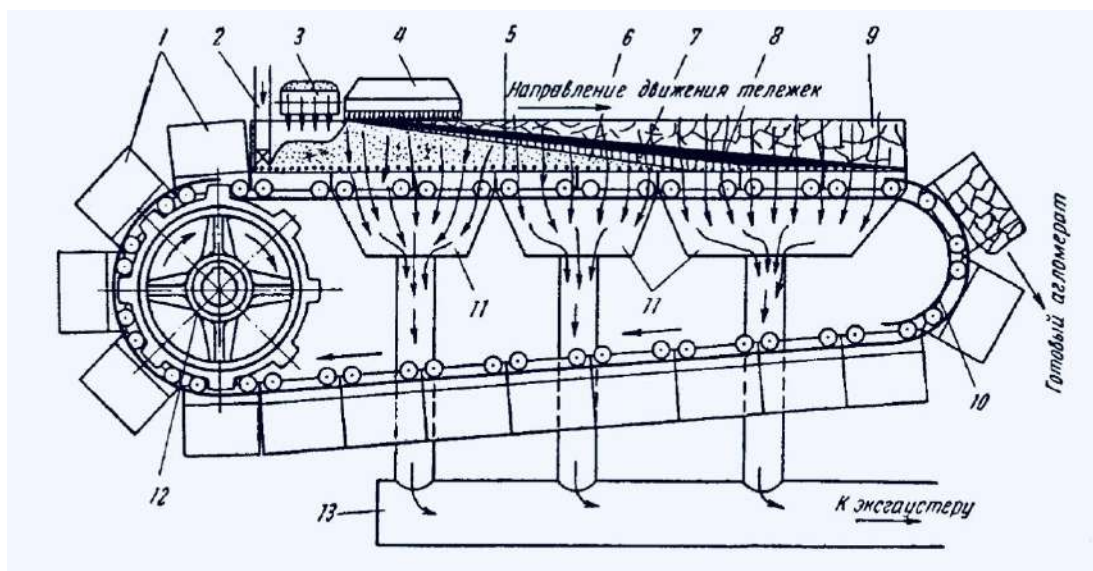


Рис. 2. Современная агломерационная (спекательная) машина ленточного типа

Спекательные решетки с просасыванием воздуха и агломерационные котлы с дутьем, имевшие в свое время довольно широкое распространение, но характеризовавшиеся периодичностью работы и малой производительностью, отжили свой век. Не получила распространения и круглая агломерационная машина непрерывного действия Шлиппенбаха также с крайне ограниченной производительностью. Между тем машины Дуайт — Ллойда открыли возможности строительства больших агломерационных фабрик.

Спекание агломерационной шихты происходит в агломерационной машине ленточного типа (рис. 3), представляющей собой конвейер, состоящий из отдельных паллет (тележек), перемещаемых по замкнутым направляющим (рис. 4).

а



б

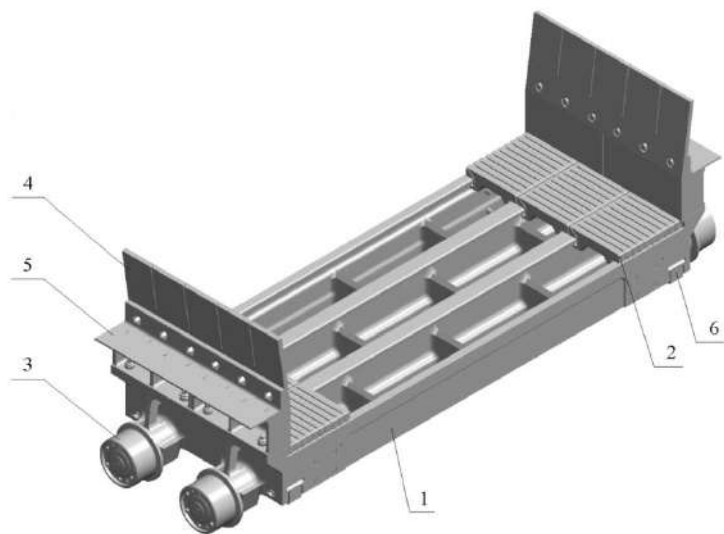


Рис. 3. Агломерационная машина ленточного типа:

а – схема устройства: 1 – спекательная тележка (паллета) с колосниковыми решетками; 2 – укладчик постели на колосники паллет; 3 – укладчик шихты; 4 – зажигательный горн; 5 – слой постели; 6 – сырая шихта; 7 – зона подогрева и сушки шихты; 8 – зона горения твердого топлива; 9 – зона готового агломерата; 10 – направляющие рельсы; 11 – вакуум-камеры; 12 – ведущая звездочка привода агломерационной ленты; 13 – сборный газопровод;

б – общий вид

Число паллет зависит от размеров агломерационной машины. Перемещение паллет осуществляется приводом, расположенным в головной части машины.



Движение паллет в обратном направлении в сторону привода происходит само-ходом вследствие уклона нижней ветви машины. Дни-ще паллеты представляет собой колосниковую реше-тку 1. Паллета современной агломе-рационной машины состоит из корпуса 1, комплекта колосников 2, четырех ходовых роликов 3, бортов 4, пластин бортового уплот-нения 5, пластины продоль-ного уплотнения типа «падающий груз» 6

Рис. 4. Паллета (спекательная тележка)

Для очистки колосников от мелочи и пригаров используются механизмы шевеления и отстукивания колосников. Механизм шевеления колосников представляет собой барабан, прижимающийся к колосникам с помощью груза. Поверхность барабана имеет специальные рифления, которые создают принудительное небольшое вертикальное перемещение колосников. Большой эффективностью очистки колосников обладает механизм отстукивания в виде рамки, вращающейся со скоростью 3м/с. На продольных спицах рамки свободно одеты кольца диаметром 159 мм и промежуточные кольца диаметром 133 мм. Под действием центробежной силы кольца отрываются от оси при вращении рамки и ударяют в колосники, из-за чего происходит их ворошение.

В головной части машины установлены питатель **2** для укладки постели (слоя мелкого агломерата для предотвращения «пригорания» агломерационного «пирога» к тележке) на днище паллеты; укладчик шихты **3** в паллеты (высота слоя шихты составляет 250-350 мм) и зажигательный горн **4**, обеспечивающий зажигание верхнего слоя шихты под горном при температуре 750-850⁰С раскаленными продуктами горения жидкого или газообразного топлива (мазутом, природным или коксовым газом). Скорость движения паллет составляет 1,5 - 4,5 м/мин. На рабочем участке агломашины паллеты проходят над вакуум-камерами **11**, находящиеся под разрежением ~ 7-10кПа и соединенные с эксгаустером (мощным вентилятором), который обеспечивает просасывание атмосферного воздуха через слой горячей шихты. Воздух просасывается сверху вниз через весь слой шихты. Горение, начавшееся в верхнем слое, постепенно распространяется вниз к колосниковой решетке. В слое горения шихты развивается температура около 1300-1400 ⁰С. Отходящие из спекаемого слоя газы попадают в вакуум-камеры, очищаются от пыли в пылеуловителях, попадают в эксгаустер и выбрасываются в дымовую трубу. В результате спекания получают спек – агломерат. По окончании горения шихты в конце агломерационной машины агломерат, разгружается, охлаждается и дробится в одновалковых зубчатых дробилках. Дробленый агломерат подвергается грохочению.

Материал крупнее 13 (15) мм направляется в металлургический передел. Класс -13+8 мм используется в качестве постели, класс -8+0 мм возвращается и присоединяется к исходной шихте, поступающей на агломерацию.

Для охлаждения вышедшего из агломашины продукта применяют специальные охладители агломерата: чашевые, линейные, кольцевые, камерные, трубчатые, барабанные, чаше-дисковые, «КС» и др.

Чашевые охладители, сходные по конструкции с дисковым смесителем, имеют очень существенный недостаток - разрушают агломерат во время загрузки из бункера и в момент выгрузки его ножом вращающейся тарелки.

Линейный охладитель представляет собой пластинчатый конвейер. Для охлаждения используется воздух, подаваемый из дутьевых камер под давлением 23 кПа. Размеры линейных охладителей достигают в длину 90 м при ширине полотна до 3,5м. Средняя производительность составляет 300 т/ч при скорости движения ленты до 3 м/мин.

При возможности охлаждения агломерата водой, применяют барабанный охладитель, сходный по конструкции с барабанным смесителем. Для усиления охлаждения применяют спираль, приваренную к внутренней поверхности барабана. Увлажняется агломерат через водяные форсунки. Существуют барабанные охладители двух типоразмеров, производительность которых составляет 250 и 65 т/ч; диаметр барабана – 10 и 4,8м; длина –10 и 4,8м; частота вращения барабана 10 и 4,8 об/мин соответственно.

Также применяют и чаше-дисковый охладитель, который представляет собой тележку, над которой установлены ворошители из вертикальных дисков,

свободно посаженных на горизонтальные оси, скрепленные с вертикально расположенным вращающимся валом. Производительность охладителя достигает 100 т/ч при диаметре чаши до 5,2м и дисков до 0,5м. Вал вращается со скоростью 6 об/мин и ворошит слой материала толщиной до 150 мм.

Для предохранения атмосферы цеха от загрязнения агломашина закрывается чехлом. Отходящие газы направляются через верхние патрубки на очистку.

Производительность агломерационной машины определяется площадью спекания и составляет 1,3-1,5т/(м³*ч). Продолжительность цикла спекания ~ 15-20мин.

Выпускаются машины с площадью спекания 50-600 м². Расход топлива на 1т агломерата составляет 60-80 кг. В таблице 1 представлены технические характеристики агломашин отечественного производителя.

Таблица 1

Основные технические характеристики агломашин

Типоразмер АКМ	50	75	75*	100	85/160	312
Производительность, т/ч	40-90	100	125	130	75-150	350-450
Площадь спекания, м ²	50	75	75	100	85	312
Ширина колосниковой решетки, м	2	2,5	2,5	2,5	2,5	4
Длина колосниковой решетки, м	25	30	30	42	34	78
Число вакуум-камер	13	15	1	21	32	26
Число дутьевых камер	-	-	15	21	12	26
Число паллет	70	80	85	106	151	130
Скорость движения паллет, м/мин	1,1-4,36	1,5-4,5	0,75-3	1,5-6	1,5-6	1,5-7,5
Мощность двигателя, кВт	11	10,5	32	19	32	85
Масса, т	295	457	545	650	851	2634

* АКМНД

Ориентировочные материальный и тепловой балансы спекания шихты в агломашине приведены в табл. 2 и 3. При составлении балансов принят следующий состав материалов. Рудная смесь, %: FeO – 7; Fe₂O₃ – 59; MnO – 2; SiO₂ – 9; Al₂O₃ – 3; CaO – 1; MgO – 3; CO₂ – 6. Агломерат, %: FeO + Fe₂O₃ + S + FeS + FeS₂ + SO₃ + P₂O₅ + MnO = 68 %; SiO₂ – 10; Al₂O₃ – 4; CaO – 15; MgO – 3 %. Топливная смесь: 80 % коксика и 20 % антрацитового штыба.

Таблица 2

**Ориентировочный материальный баланс спекания шихты
в агломашине (кг/кг)**

Приход	На 1 кг агломерата	Расход	На 1 кг агломерата
1. Влажный воздух в горн и в спекаемый слой	1,044	1. Агломерат	1,000
2. Рудная смесь	0,902	2. Отходящие газы	1,540
3. Возврат	0,420	3. Возврат	0,420
4. Известняк	0,268		
5. Гигроскопическая влага шихты	0,100		
6. Топливная смесь	0,099		
7. Окалина	0,080		
8. Коксодоменная газовая смесь на зажига- тельный горн	0,047		
Итого	2,960	Итого	2,960

Таблица 3

**Ориентировочный тепловой баланс слоя спекающейся шихты
в агломашине (на 1 кг товарного агломерата)**

Приход	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	%	Расход	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	%
1. Химическая энергия горения твердого топлива	2279	77,5	1. Физическая теплота готового пирога агломерата ($t = 700\text{ }^\circ\text{C}$)	922	31,3
2. Химическая энергия коксодо- менной смеси	335	11,4	2. Химическая энергия разложе- ния карбонатов	569	19,3
3. Химическая энергия реакций минералообразования	200	6,7	3. Физическая теплота отходя- щего дыма ($t = 130\text{ }^\circ\text{C}$)	426	14,5
4. Физическая теплота шихты ($t = 60\text{ }^\circ\text{C}$)	101	3,4	4. Химическая энергия диссо- циации гидратов и испарения гидратной влаги	342	11,6
5. Физическая теплота воздуха ($t = 25\text{ }^\circ\text{C}$)	24	0,8	5. Потери теплоты в окружаю- щую среду	300	10,2
6. Химическая энергия горения серы и сульфидов	5	0,2	6. Теплота испарения гигроско- пической влаги	226	7,7
			7. Химическая энергия диссо- циации оксидов	159	5,4
Итого	2944	100,0	Итого	2944	100,0

Коэффициент полезного действия процесса агломерации составляет 0,85-0,87. Удельный расход условного топлива (твердое топливо + газовое топливо) около 80-100 кг у.т./т офлюсованного агломерата.

Экономия топлива на агломашинах возможна по следующим направлениям:

1. Использование теплоты горячего агломерата для предварительного подогрева воздуха.
2. Использование газовой агломерации, т.е. просасывание через слой шихты смеси доменного газа с воздухом, воспламеняющейся в зоне горения. При этом можно значительно сократить расход коксика.

3. Подогрев воздуха в отдельно стоящей камере горения. Цель та же – сокращение расхода коксика.
4. Увеличение слоя шихты с одновременным увеличением разрежения под спекательными тележками. Каждые 20 мм увеличения высоты слоя шихты обеспечивают от 0,6 до 1,5 % экономии топлива. Негативное последствие: некоторая потеря производительности агломашины.
5. Внедрение малогабаритных зажигательных горнов с низким расходом топлива на зажигание за счет быстрого разогрева поверхностного слоя шихты. Возможно сокращение расхода газа в 2-3 раза.

1.3. Технология производства агломерата

Производство агломерата включает большое количество разнообразных операций, которые можно свести к следующей принципиальной схеме: подготовка компонентов и шихты, собственно процесс агломерации, обработка спека с целью получения агломерата требуемых свойств. Рассмотрим сущность процесса агломерации на примере получения агломерата *из железорудного концентрата* (рис. 5).

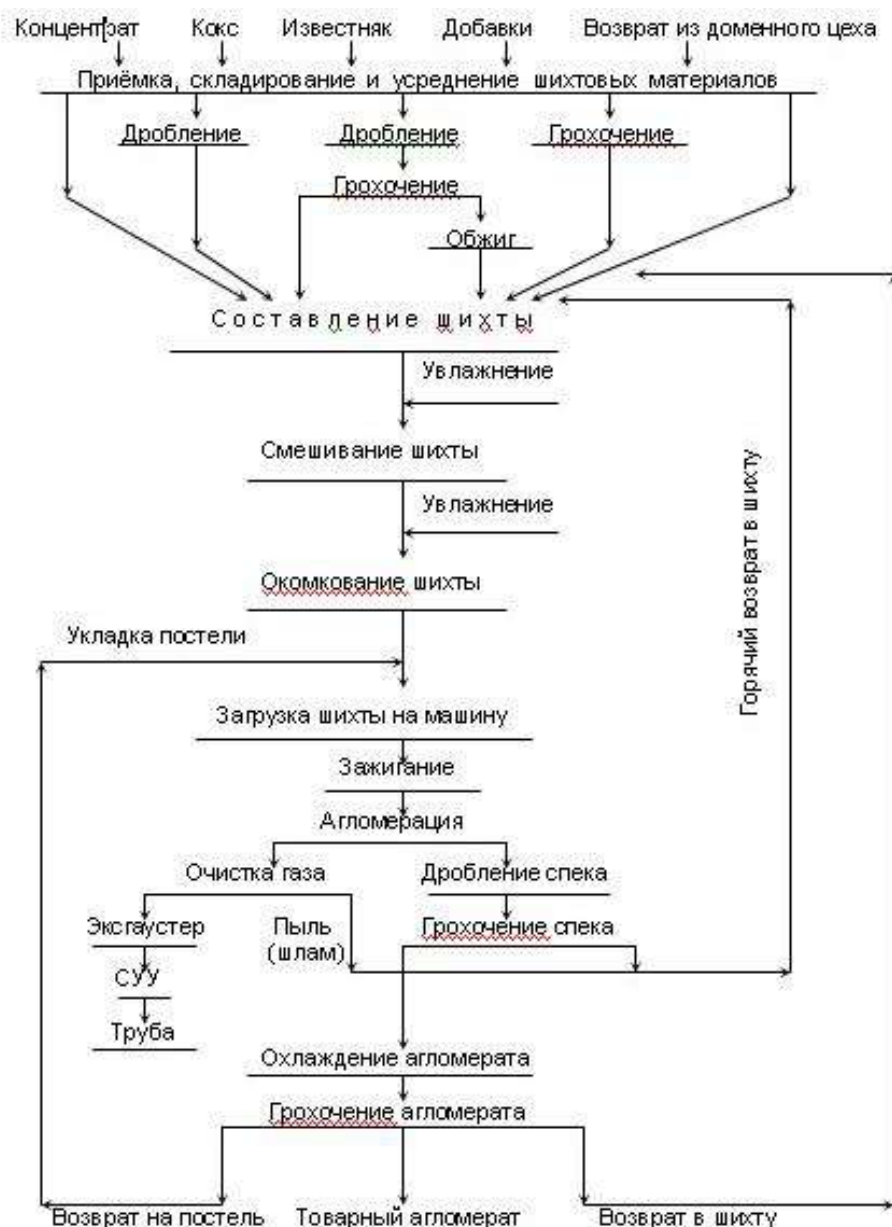


Рис. 5. Технологическая схема производства железорудного агломерата

Агломерационную машину обслуживает комплекс различных аппаратов и механизмов. В производственный цикл агломерационной фабрики входит поточно-транспортная система, выполняющая самостоятельные функции. С помощью согласованно работающего комплекса механизмов и аппаратов на аглофабрике осуществляется складирование, транспортировка, дозирование, смешение компонентов, увлажнение и загрузка шихты на агломашину (рис. 6). В комплекс входят дробилки для дробления топлива и известняка, загрузочные, разгрузочные, дозирующие, взвешивающие, смесительные и увлажняющие устройства.

Шихта с рудного двора поступает в приемные бункера 7, откуда в определенном соотношении по транспортерным конвейерам 2 она подается в первичный смеситель-окомкователь 5, где происходит ее смешивание,

увлажнение и окомкование. Из бункера 8 в смеситель поступает возврат. Мелкие увлажненные частицы шихты при перемешивании укрупняются, образуя комочки; шихта становится зернистой и рыхлой, что повышает ее газопроницаемость. Усредненная шихта из смесителя загружается в бункер 6 и транспортером 7 в определенном соотношении с коксиком, поступающим из бункера 8, подается во вторичный смеситель - окомкователь 9.

Дозирование осуществляется установлением необходимых расходов компонентов шихты, выдаваемых на сборный конвейер 2 питателями 26 из соответствующих бункеров. Для выдачи материалов из бункеров применяются в основном тарельчатые и вибрационные питатели.

Подготовленная шихта 15 из промежуточного бункера 13 равномерно и непрерывно подается системой загрузки на агломашину 17 и укладывается на бесконечную движущуюся цепь колосниковых тележек (паллет), предварительно поместив на них постель 16, которая поступает из приемного 10 и промежуточного 12 бункеров по транспортеру 11.

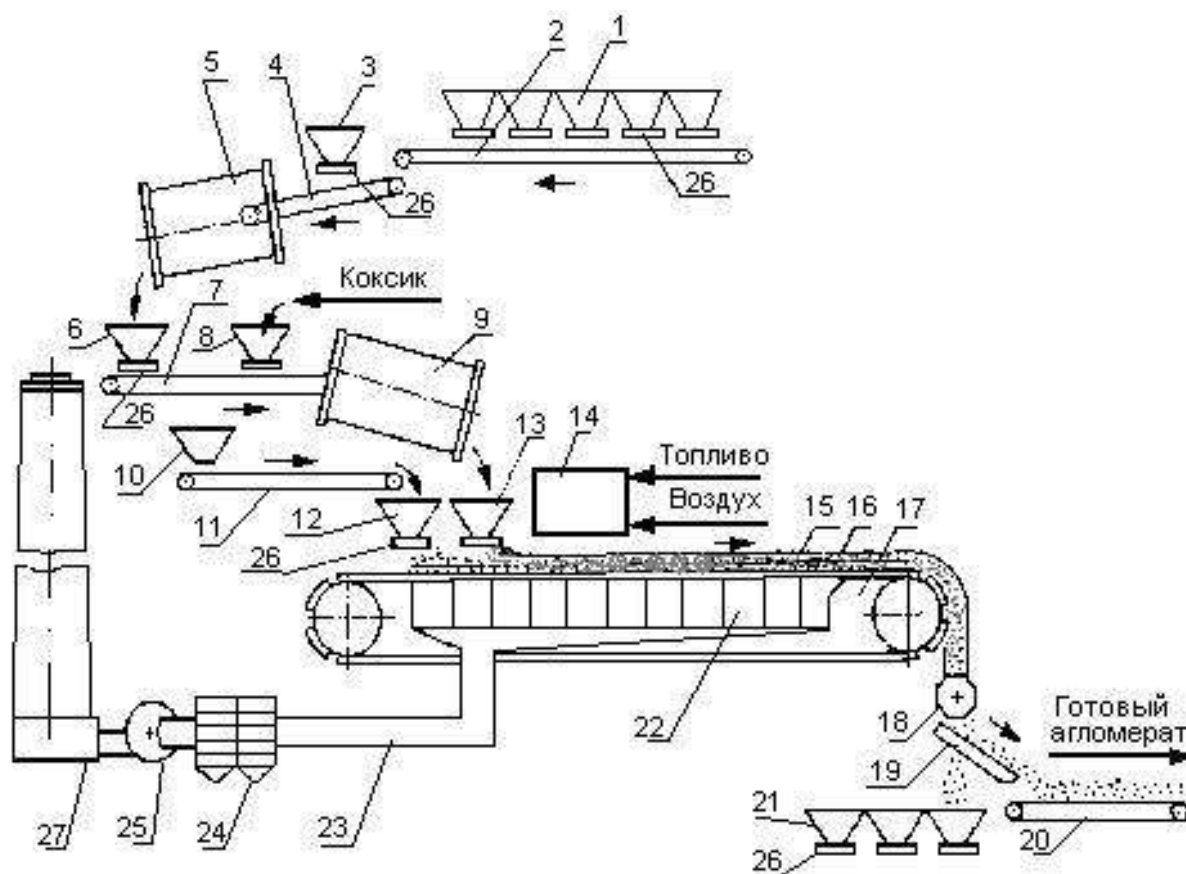


Рис. 6. Схема цепи аппаратов агломерационной фабрики

Зажигание слоя шихты, загруженной на аглоленту, производится при прохождении слоя под зажигательным горном 14 в результате сгорания в нем топлива. По мере движения паллет к хвостовой части машины горение коксика с верхнего слоя распространяется в нижние слои; этому

способствует размещению под тележками вакуум-камер **22**, в которых при помощи эксгаустера **25** создается разрежение. Готовый агломерат сбрасывается в конце машины с паллет, дробится с помощью дробилок **18**, подвергается просеиванию на грохотах **19**, охлаждается и отправляется по транспортеру **20** в доменный цех. Не спекшаяся мелочь (возврат) помещается в приемные бункера **21** и возвращается для повторного спекания в бункер **10** в качестве добавки к шихте. Продукты сгорания и воздух из вакуум-камер по коллектору **23** поступают на очистку в циклоны **24** и удаляются эксгаустером **25** через трубу **27**.

В последнее десятилетие для оптимизации процессов подготовки агломерационной шихты и производства агломерата на различных стадиях их реализации большой интерес представляет использование цифровых технологий. Постоянно совершенствуются процессы закладки и распределения железосодержащих материалов в штабеле, составление и увлажнение агломерационной шихты, контроль качества полученного агломерата, диагностика состояния основного технологического оборудования. На ряде агломерационных фабрик (ММК, Северсталь, ЕВРАЗ ЗСМК) тестируются онлайн анализаторы химического состава компонентов шихты или готового агломерата, что открывает широкие возможности оперативного регулирования качества агломерата и создания экспертных систем агломерационного производства.

Агломерационная фабрика традиционно является крупным источником выбросов загрязняющих веществ (CO , SO_2 , NO_2) и пыли в атмосферу. Поэтому при строительстве новых или модернизации старых цехов монтируются современные системы рекультивации агломерационных газов, устанавливаются высокоэффективные электрофильтры, рукавные фильтры, строятся сероулавливающие установки.

1.4. Химические процессы и минералогические превращения при агломерации сырья

В процессе спекания шихты протекают различные физико-химические реакции между компонентами шихты. Схема образования железорудного агломерата изображена на рис. 7 в момент времени, когда в слое спекаемого материала присутствуют все фазы агломерационного процесса.

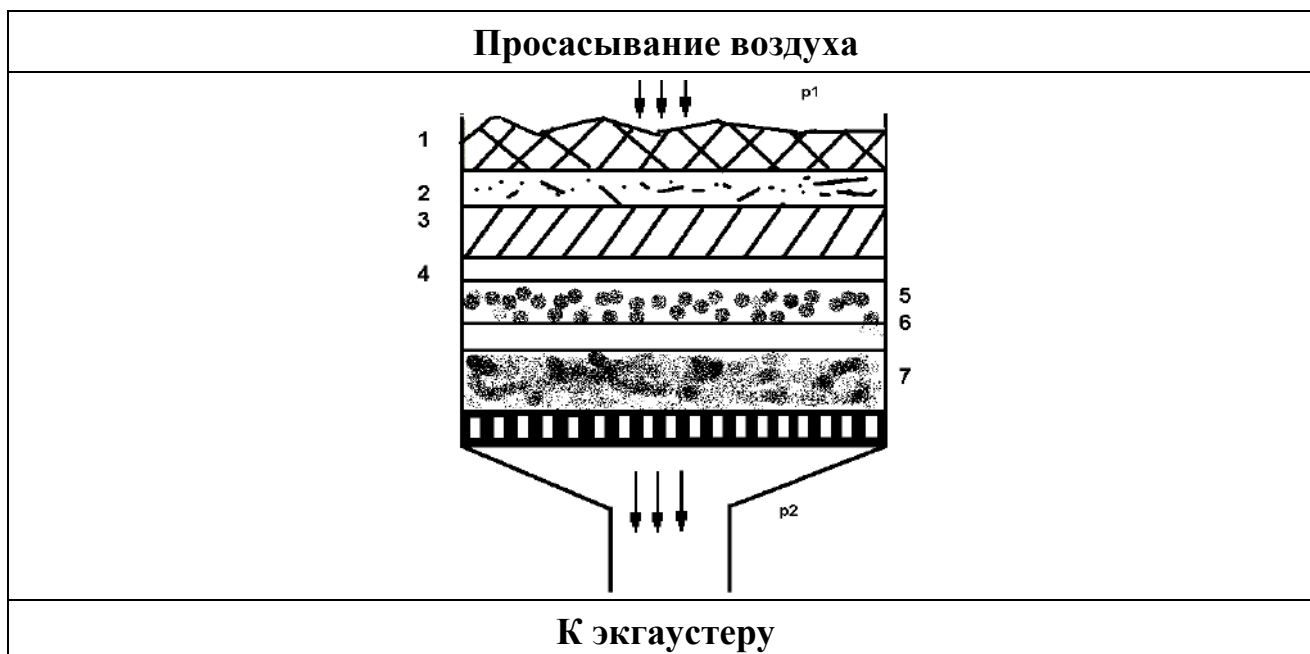


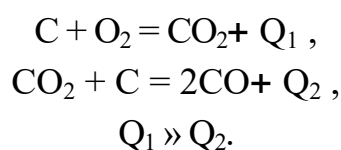
Рис. 7. Схема образования агломерата

Фазам агломерационного процесса соответствуют следующие зоны:

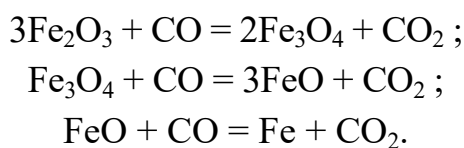
1 – готовый агломерат.

Все физико-химические процессы в этом слое закончились;

2 – зона горения. В этой зоне происходит сгорание топлива шихты (кокса) с выделением большого количества тепла и восстановителя оксида углерода CO:



За счет высокой температуры в зоне горения в шихте происходят реакции термической диссоциации, окислительно-восстановительные и др. Восстановление железа протекает ступенчато: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$:



В результате данных реакций железо, содержащееся в шихте, восстанавливается до высших окислов и металлической формы, причем

восстановление происходит через вновь образующиеся легкоплавкие минералы: феррит кальция - $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, фаялит - Fe_2SiO_4 , ларнит Ca_2SiO_4 . Для образования этих минералов в шихту добавляются флюсы (известняк). В этой же зоне происходит частичное удаление вредных примесей: серы, мышьяка, свинца, цинка;

Таким образом, спек состоит из первичных минералов и вторичных минералов, образовавшихся в процессе агломерации.

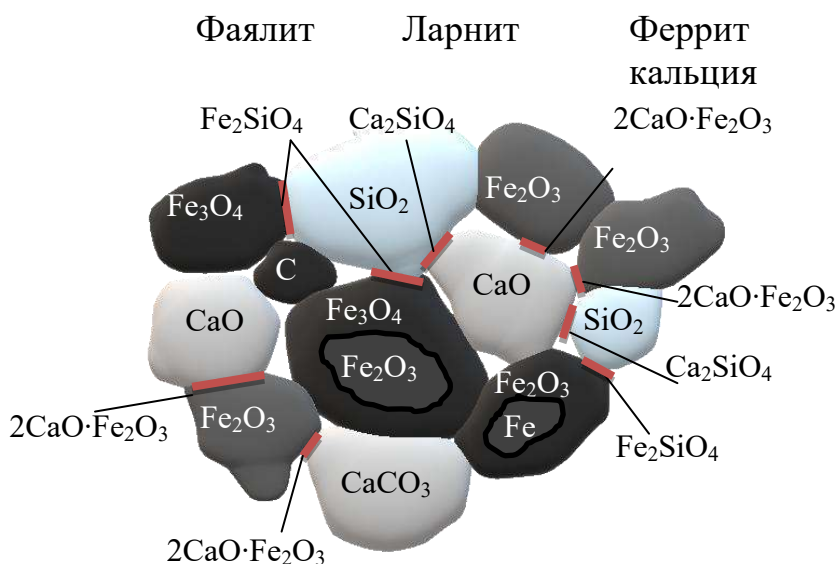


Рис. 8. Образование агломерата

Среди первичных минералов различают как неизменные зерна железорудного сырья и флюсов, так и частицы, потерявшие первоначальную структуру, но сохранившие физико-химические свойства. Вторичные минералы встречаются в виде расплавившейся и затвердевшей стекловидной массы и в виде кристаллической фазы (рис. 8).

Образующаяся при агломерации жидкая фаза обволакивает твердые частицы, соединяя их в сплошной кусок спека – агломерата (рис. 9). Прочность агломерата зависит от соотношения твердой и жидкой фаз, а также от пористости агломерата. Скорость процесса агломерации во многом зависит от условий плавления и образования жидкой фазы. В то же время чрезмерное образование жидкой фазы препятствует выжигу серы и уменьшает восстановимость агломерата.



Рис. 9. Горячий агломерат

3 – зона подогрева шихты. Подогрев шихты происходит за счет тепла, выделяющегося в зоне горения, при просасывании раскаленных газов через слой шихты. В этой зоне разлагаются карбонаты, гидраты и начинаются восстановительные процессы;

4 – зона сушки. В этой зоне происходит удаление гигроскопической влаги шихты;

5 – зона переувлажнения. Эта зона обладает повышенной влажностью вследствие конденсации водяных паров при их соприкосновении с более холодной частью шихты;

6 – постель;

7 – колосниковая решетка.

Таким образом, агломерационная шихта при высокотемпературном нагреве подвергается сложному комплексу разнообразных физических процессов и химико-минералогических превращений, последовательность протекания которых можно представить в виде следующей схемы на рис. 10.

Для получения прочного агломерата необходимо:

1. Шихтовать материал или составлять такую смесь руд, чтобы получались легкоплавкие силикаты или ферриты, образующие жидкую фазу, цементирующую всю шихту в прочные куски агломерата.

2. Тщательно перемешивать шихту для получения однородного состава, чтобы жидкая фаза была равномерно распределена.

3. Добиваться образования достаточного количества жидкой фазы за счет введения флюсов, оборотного шлака или возврата, а также путем достаточной выдержки в зоне высоких температур, обеспечивающей полноту преобразования структуры. При наличии тугоплавких компонентов создавать в

слое достаточно высокую температуру.

4. Для уменьшения ноздреватости агломерата желательно осуществлять полное удаление конституционной влаги до процесса оплавления и кристаллизации или производить дополнительное уплотнение шихты после дегидратации.

5. Агломерат охлаждать постепенно, особенно осторожно снижая температуру в области переходных точек, характерных для данного состава агломерата, чтобы увеличить прочность стекловидного шлака.

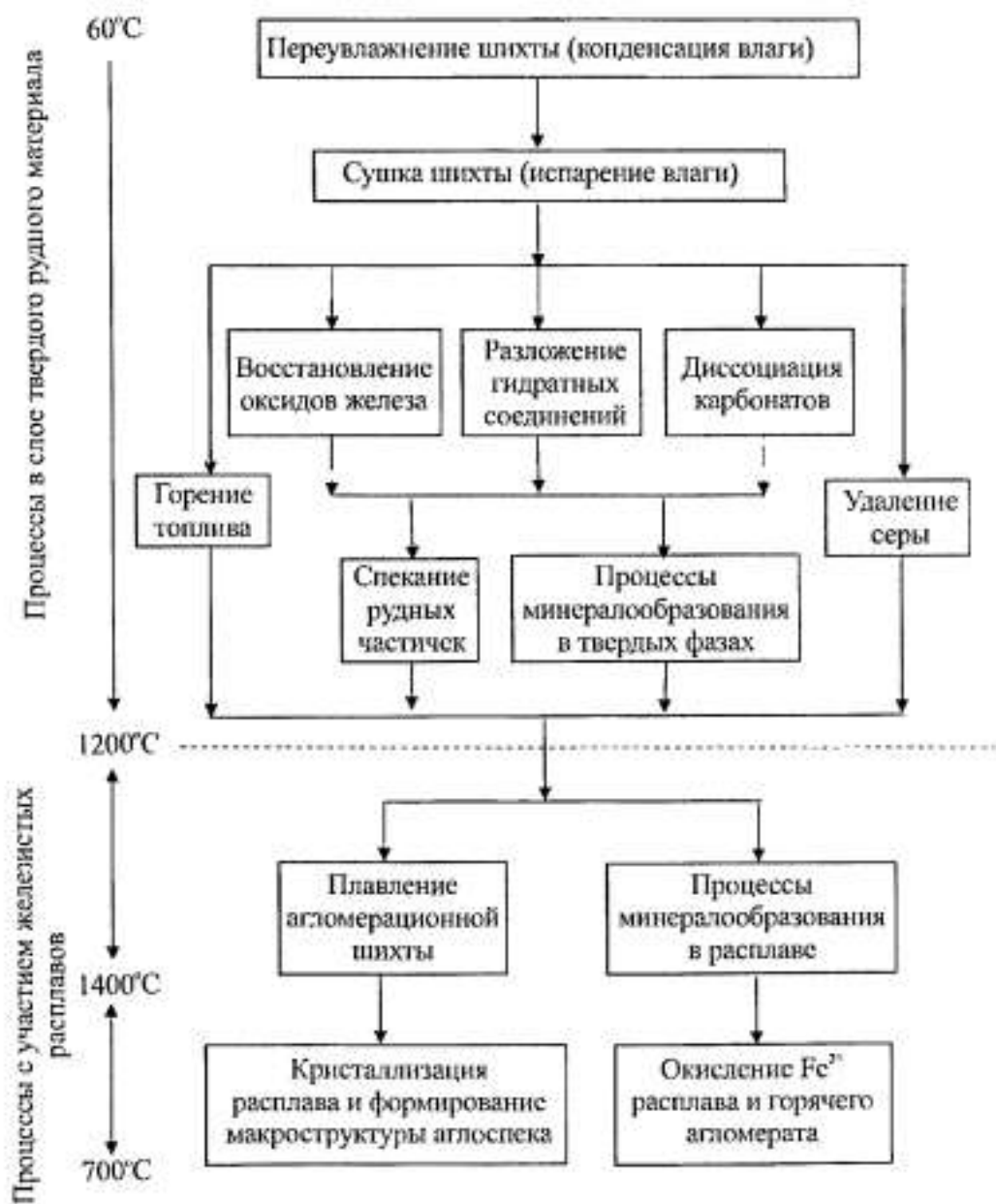


Рис. 10 Схема основных процессов, протекающих при агломерации

1.5. Удаление примесей

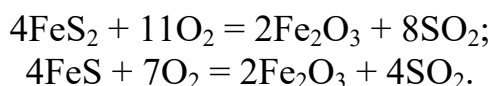
Агломерационная шихта по условиям передела содержит некоторое количество вредных или нежелательных элементов, а также полезных примесей.

Сера. В природных железных рудах и концентратах сера обычно находится в форме сульфидов: пирита FeS_2 , реже пирротина FeS или сульфатов кальция CaSO_4 или бария BaSO_4 .

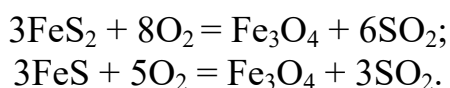
Повышение сверх нормы содержания серы в готовой стали вызывает явление краснеломкости металла и значительно ухудшает меры к весьма полному удалению серы из металла в процессе выплавки чугуна и стали.

Десульфурация – удаление серы. В процессах агломерации соединения серы подвергаются воздействию высокой температуры, вступают в различные химические реакции с газом, другими минералами рудной части шихты. В результате значительное количество серы из железорудных материалов удаляется.

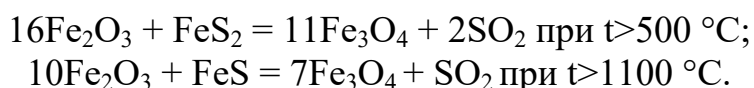
Пирит FeS_2 и пирротин FeS начинают окисляться при температуре 250-280 °С по реакциям:



При температуре выше 1383 °С по реакциям:

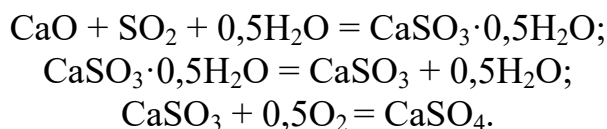


Происходит также взаимодействие оксидов железа с сульфидами железа:



В присутствии катализаторов (Fe_2O_3) около 40% SO_2 может окислиться до SO_3 . Некоторая часть органической серы коксовой мелочи переходит в газовую фазу и присутствует в ней в виде паров комплексов S_2 (500-600 °С); S_6 и S_8 (до 500 °С). В отходящих газах установлено также наличие H_2S и COS .

В зоне горения твердого топлива сернистые соединения захватываются из газовой фазы железистым силикатным расплавом и растворяются в нем в виде CaS . При температурах до 900-1000 °С известь, известняк и ферриты кальция поглощают SO_2 из газа по реакциям:



Степень десульфурации повышается с уменьшением крупности частиц шихты, но чрезмерное переизмельчение может ухудшить газопроницаемость слоя шихты. Как видно из приведенных выше реакций, избыток кислорода необходим для выгорания сульфидов шихты. Т.е. эффективное выгорание сульфидной серы возможно только при окислительном режиме агломерации – при низких расходах коксовой мелочи, если они обеспечивают достаточно высокие температуры в спекаемом слое. При агломерации магнетитового концентрата наилучшая десульфурация достигается при 3,5–4,5% твердого топлива в шихте. Степень удаления сульфидной серы может достигать при агломерации 95-99%, поскольку при окислении сульфидов выделяется значительное количество тепла (1 кг пирита в шихте по теплотворной способности заменяет 0,3 кг коксовой мелочи). Сульфатная сера гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), барита (BaSO_4) удаляется из шихты при агломерации всего на 60-70%, так как диссоциация сульфатов требует длительного воздействия высоких температур ($>1000^\circ\text{C}$). Следовательно, удалению сульфатной серы способствует увеличение расхода топлива.

Мышьяк. В железных рудах и концентратах мышьяк встречается относительно редко, однако это один из элементов, ухудшающих качество сталей. Присутствует в сырье в виде следующих соединений: As_2S_3 , As_2O_3 , AsS , FeAsS , $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeHAsO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и др. В условиях агломерации мышьяк может удаляться с газом в виде As_2O_3 (при температурах выше $275\text{-}320^\circ\text{C}$) и AsH_3 . Для перевода пятивалентного мышьяка в трехвалентный, который можно удалить при агломерации, требуется восстановительная атмосфера, т. е. повышенный расход топлива шихты. Степень удаления мышьяка при агломерации в лучшем случае достигает 50%. Присутствие в шихте известняка резко снижает степень удаления мышьяка.

Фосфор. В железных рудах и концентратах фосфор содержится в виде вивианита $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, фтор - и хлорапатита $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, $\text{Ca}_5\text{PO}_4 3\text{Cl}$. При агломерации фосфор не удаляется и полностью переходит в агломерат.

Свинец, цинк присутствуют в железных рудах и концентратах в виде оксидов или сульфидов. При обычных условиях агломерации удалить их практически не удастся. Однако при необходимости, используя хлорирующие добавки (2-3% CaCl_2), можно удалить до 90% свинца и до 65% цинка.

Цинк, свинец не входят в состав чугуна. Вредное действие этих элементов заключается в энергичном разрушении футеровки шахты, распара, заплечиков и горна доменной печи (цинк) и лещади печи (свинец).

Кроме SO_2 продуктом реакции окисления сульфидов: ZnS (сфалерит) и PbS (галенит) являются ZnO и PbO . При агломерации (обычные условия 3-6% C в шихте) цинк почти не удаляется. При расходе углерода 10-11% может быть удалено до 20% Zn.

Особенностью процесса является то обстоятельство, что восстановление Zn окисью углерода или твёрдым углеродом заканчивается выше точки его кипения (906°C). Возгоняющийся цинк может немедленно окисляться

кислородом, а при температурах 600-850°C также окисью углерода. Оксид цинка вновь осаждается ниже зоны горения.

1.6. Качество агломерата

Качество агломерата определяется свойствами концентратов, технологическим режимом агломерации, последующей обработкой агломерата.

О качестве агломерата судят по химическому составу, физико-химическим и механическим свойствам. Химический состав агломератов имеет большое значение для металлургического передела. Особенно важны содержание железа общего, закиси железа, серы, а также основность. Содержание FeO определяет восстановимость и прочность агломерата.

Агломерат должен обладать высокой прочностью, чтобы не разрушаться при транспортировании, загрузке в печь и внутри печи в процессе плавки.

Стандартным методом определения прочности железорудных агломератов является оценка их разрушения. Испытанию подвергают пробу агломерата крупностью +40 мм массой 20 кг. Время вращения барабана 4 мин. Прочность оценивают содержанием фракции – 5 мм.

Наиболее прочные агломераты получают из магнетитовых концентратов. При спекании бурых железняков образуется крупнопористый, рыхлый малопрочный агломерат.

Виды агломератов, получаемых на агломерационных фабриках

- Доломитизированный агломерат железорудный агломерат, офлюсованный доломитом.
- Железорудный агломерат – агломерат железосодержащей руды. Является сырьём для доменной печи.
- Марганцовистый агломерат – железорудный агломерат из шихты с введением марганцевой руды.
- Железомарганцевый агломерат – агломерат марганцевой руды, используемый для выплавки ферромарганца в доменных и ферросплавных печах. В сравнении с железорудным агломератом характеризуется большей оплавленностью, меньшей пористостью (39—45 %) и восстановимостью.
- Металлизированный агломерат – железорудный агломерат, в котором часть оксидов железа восстановлена до железа в ходе спекания шихты с повышенным расходом твёрдого топлива. Метод предложен В. Дэвисом (США) в 1958 г.
- Оксидный агломерат – железорудный агломерат с невысоким (3—4 %) содержанием FeO. Имеет высокие прочностные свойства.
- Неофлюсованный агломерат – железорудный агломерат, полученный без введения в шихту известняка.
- Низкофлюсованный агломерат – железорудный агломерат, полученный из шихты, в которую введен известняк в количестве меньшем необходимо для офлюсования содержащихся в шихтовых материалах SiO_2 и Al_2O_3 .

- Высокоофлюсованный агломерат – железорудный агломерат, получаемый из шихты, для улучшения металлургических свойств в которую введён известняк в количестве большем, чем необходимо для офлюсования содержащихся в агломерате SiO_2 и Al_2O_3 .
- Офлюсованный агломерат – железорудный агломерат. Введён известняк для офлюсования в шихтовых материалах SiO_2 и Al_2O_3 .
- Офлюсованный марганцевый агломерат – агломерат для выплавки высокоуглеродистого ферромарганца флюсовым способом, получаемый спеканием оксидного (карбонатного) марганцевого концентрата с флюсом (известняком или доломитом) и топливом (коксом, антрацитом, нефтекоксом и других). Как компоненты-стабилизаторы структуры офлюсованного агломерата используют оксиды магния, железа, бария и других.
- Самоплавкий агломерат – железорудный агломерат, получаемый из шихты $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$.
- Стабилизированный («калиброванный») агломерат – агломерат, механически обработанный непосредственно после спекания. В ходе стабилизации разрушаются крупные куски агломерата по неспечённым включениям шихты, скоплениям хрупкого стекла и по участкам концентрации внутренних напряжений. Полученный высококачественный агломерат обеспечивает значительное увеличение производительности доменной печи. Впервые получен Л. Р. Мигуцким во вращающихся барабанах из прутьев в 1964–1965 годах на ЮГОКе (Украина).
- Фосфористый агломерат – продукт окускования пылеватых фосфоритов для выплавки руды в руднотермических печах. Фосфориты подвергаются сушке, дегидратации, декарбонизации. При температуре 1400–1600 °С в зоне горения твёрдого топлива плавятся силикаты и, частично, зерна фторапата. Это позволяет получить достаточное количество стеклообразной силикатно-фосфатной связи, скрепляющей зерна первичного апатита в готовом агломерате.
- Хромитовый агломерат – является производной хромовых руд и их концентратов, состоящих из хромита ($\text{FeO-Cr}_2\text{O}_3$) и серпентина $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

Вопросы для самопроверки

1. Классификация процессов окускования полезных ископаемых. Основные понятия.
2. Чем отличается агломерат от концентрата?
3. В чем суть процесса агломерации сырья?
4. Какие факторы влияют на процесс агломерации?
5. Подготовка шихты к спеканию?
6. Состав железорудной аглошихты?

7. Технологические типы и сорта руд, применяемые для производства железорудного агломерата?
8. Роль топлива при агломерации сырья?
9. Роль флюсов при агломерации сырья?
10. Роль влаги при агломерации сырья?
11. Физико-химические процессы при агломерации руд и концентратов?
12. Как происходит образование расплава при агломерации?
13. Какие вредные примеси удаляются при агломерации?
14. Принцип работы агломерационной машины?
15. Что значит аглофабрика?
16. Технология производства железорудного агломерата?
17. Качество агломерата?
18. Особенности агломерации перед другими процессами окускования?
19. Достоинства и недостатки процесса агломерации?
20. Современное состояние и развитие агломерации в России и за рубежом?

2. ОКОМКОВАНИЕ

Процесс **окомкования** приобрёл актуальность при разработке относительно бедных месторождений полезных ископаемых. В этом случае руда, как правило, подвергается тонкому измельчению для раскрытия полезных минералов, что, в свою очередь, приводит к получению тонкозернистых концентратов, не пригодных для агломерации.

Окомкование (окатывание) – процесс окускования тонкоизмельченных влажных материалов, основанный на их способности образовывать при перекатывании агрегаты округлой формы – окатыши.

Окомкование применяется для подготовки тонкоизмельченных и пылеватых материалов для металлургии, передела и транспортировки их на большие расстояния. Преимущественное распространение окомкование получило для железорудных концентратов. Окомкованию подвергают также хромовые, фосфористые и флюоритовые концентраты, а в некоторых случаях и концентраты руд цветных металлов. Окомкование является наиболее целесообразным способом окускования тонкоизмельченных концентратов (менее 0,07 мм).

Целью современной технологии **окомкования** является обеспечение высокой производительности и экономичности передела путем применения энергоэффективных технологий при высоком качестве окатышей по химическому составу и металлургическим свойствам: прочности, пористости, восстановимости, низком содержании вредных примесей, оптимальной основности.

Интересный факт

Первое упоминание об этом процессе относится к 1912 г. в работах шведского инженера Андерсона. Позже были опубликовано несколько работ в Германии, Норвегии. Упрочняющий обжиг при этом не применялся. Малый интерес к проблеме окомкования в те годы объяснялся главным образом отсутствием в большом количестве сырья для окомкования. Поэтому неудивительно, что широкие исследования нового производственного процесса начались в 1942-1943 гг. В это время истощились запасы богатых железных руд США и они были вынуждены разрабатывать технологию обогащения таконитов (железистых кварцитов) района Верхних Озер. Простота их обогащения и возможность получения недорогих концентратов требовали решения проблемы их дальнейшего использования, и, прежде всего окускования. В США первая опытная установка была сооружена в Горном бюро в 1946 г. Окатыши получали в барабане, а затем их транспортировали для обжига в шахтную печь. Температура обжига составляла 1050...1150⁰С. Окатыши содержали 62...65% железа. В 1948 –1949 гг. в США, в штате Миннесотта, введена в строй первая опытно-промышленная установка. Позже аналогичные сооружаются в Англии, Германии, Швеции. В 1955 г. при

освоении железорудных месторождений в районе Верхних Озер помимо обогатительных фабрик пущена фабрика по производству окатышей.

В СССР первые исследования по окомкованию концентратов относятся к 1930 году. В СССР первая фабрика окомкования на Соколовско-Сарбайском ГОКе для производства окатышей из магнетитовых концентратов.

2.1. Подготовка шихты для окомкования

Подготовка шихты состоит в усреднении подлежащего окомкованию материала и добавке в него связующих веществ. В состав шихты входят:

- тонкоизмельченный материал и *связующие добавки* для получения **неофлюсованных окатышей**;

- тонкоизмельченный материал, связующие добавки и *флюсы (известняк, гашеная известь и железофлюс (ожелезненная известь), мел)* для получения **офлюсованных окатышей**;

- тонкоизмельченный материал, связующие добавки, *кокс и/или флюсы* для получения **металлизированных окатышей**.

Если в неофлюсованных окатышах направление минералообразования и их конечный состав определяются вещественным составом концентрата, то в офлюсованных окатышах направление минералообразования и конечный состав зависят не только от фазового состава концентрата, но и от состава флюса и степени офлюсования.

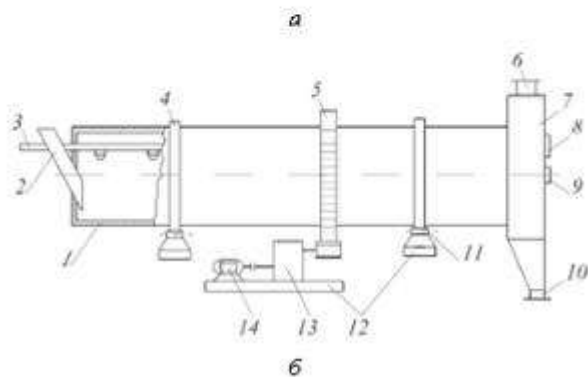
Металлизированные окатыши образуются, когда их оксиды восстанавливают в обжиговых печах с использованием твердого или газообразного восстановителя.

Основные требования к окомковываемому материалу предъявляются по **крупности и влажности**.

Перед окомкованием компоненты шихты должны быть тонко измельчены. Оптимальная крупность материала при получении прочных окатышей обычно составляет 90-95% класса -0,06 мм.

Также перед окомкованием шихта должна быть увлажнена. Например, оптимальная влажность для гематитовых и магнетитовых концентратов составляет 8-10 %, для бурых железняков 20-25 %, для пиритных огарков 15-20 %. Отклонение от этих требований вызывает необходимость повышенного расхода упрочняющих и сухих добавок в шихту.

Таким образом, к наиболее важным факторам, определяющим комкуемость компонентов шихты, относятся крупность частиц, их влажность, а также физические свойства, характеризующие взаимодействие частиц с водой, такие как краевой угол смачивания, молекулярная и капиллярная влагеёмкость.



Для смешивания компонентов шихты применяют смесительные агрегаты: барабанные (рис. 11), роторные, шнековые и вихревые.

Рис. 11. Внешний вид (а) и схема (б) барабанного смесителя: 1 – обечайка, 2 – загрузочный лоток, 3 – распределитель связующей жидкости, 4 – бандаж, 5 – зубчатый венец, 6 – отвод паров, 7 – разгрузочная камера, 8 – подсветка, 9 – смотровое окно, 10 – штуцер разгрузки, 11 – опорный ролик, 12 – фундамент, 13 – редуктор, 14 – электродвигатель.

2.2. Связующие и флюсующие добавки для производства сырых окатышей

Для улучшения процесса окомкования шихты и придания необходимых свойств сырым окатышам, в шихту вводят определенное количество **связующих добавок**. В качестве связующих и упрочняющих добавок используют **неорганические и органические вещества** – гидрофильные влагоёмкие материалы, способные образовывать с водой устойчивые суспензии.

Неорганическими связующими добавками в промышленности являются бентонитовые глины (природные и модифицированные), негашеная или гашеная известь (CaO или $\text{Ca}(\text{OH})_2$), железный купорос, известняк, доломит и др.

В качестве **органических связующих добавок** используют натрий карбоксиметилцеллюлозу, технический лигносульфонат, сульфитно-спиртовую барду и др.

Наиболее распространенная из них *бентонитовая глина*, небольшие добавки которой (0,4—1 %) повышает прочность сырых, высушенных и обожженных окатышей и, кроме того, предотвращают разрушение их при быстром подъеме температуры во время обжига. Эффективное действие бентонита как связующей добавки достигается лишь при его тщательном смешивании с концентратом.

Бентонит ($\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot n(\text{OH})_4 \cdot m\text{H}_2\text{O}$) представляет собой особый тип глины, состоящей в основном из минералов группы монтмориллонита, включающей монтмориллонит, нонтронит, бейделлит и ряд других. Определяющими факторами пригодности бентонита при окомковании являются набухаемость (бентониты высшего качества при набухании увеличиваются в объеме в 20 - 30 раз), скорость набухания и возможность образования коагуляционных структур в порах окатышей. Высокой

набухаемостью характеризуются щелочные бентониты. Их добавка позволяет довести прочность сырых окатышей до 20 - 28 Н на 1 окатыш.

Высококачественные набухающие бентониты обладают большой вязкостью и удельной поверхностью и характеризуются способностью удерживать большое количество кристаллизационной воды при температуре до 1300°С. Обычно бентонит добавляют в количестве 0,4 - 1,0 % от массы сухого концентрата, что связано, однако, с некоторым разубоживанием шихты по содержанию железа.

Помимо своего основного назначения бентонит служит для поглощения излишней влаги, содержащейся в концентрате. Приблизительно 90 % бентонита, используемого на фабриках окомкования, имеет крупность частиц менее 0,01 мм, поэтому для транспортирования сухого сыпучего бентонита применяют пневмотранспорт, предохраняющий бентонит от впитывания влаги из воздуха (в результате чего он приобретает клейкость), а фабрики - от бентонитовой пыли.

Для улучшения свойств природных бентонитов на горно-обогатительных комбинатах в качестве активаторов применяют щелочные соли. Лучшими из них оказались пиррофосфат натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ и тринатрийфосфат Na_3PO_4 . При активации пиррофосфатом натрия, добавленным к бентониту в количестве 15 %, увеличение прочности сырых окатышей достигало 15 - 35 %.

В связи со сравнительно высокой стоимостью *бентонита* постоянно ищутся новые связующие вещества для упрочнения окатышей. Исследован ряд органических и неорганических веществ. Следует отметить положительное влияние на прочность окатышей таких веществ, как *гашеная* или *негашеная известь*, *железный купорос*, *известняк*, *доломит* и др. Основное преимущество *извести* по сравнению с другими видами упрочняющих и связующих веществ - широкое распространение известняка в природе. Кроме того, *известь* вносит минимальное количество вредных примесей в состав рудной шихты. Упрочняющее действие *негашеной извести* обусловлено ее способностью диспергировать во влажной среде на мельчайшие частицы, что сопровождается увеличением содержания связанной влаги и ростом прочности окатышей.

Установлено, что крупность измельченной извести должна составлять не менее 90% класса минус 0,1 мм. Наиболее эффективным является использование быстрогасящейся извести 1 сорта, содержащей не более 5% MgO, так как окись магния в обычной извести находится в виде трудногасящейся крупнокристаллической разновидности. При использовании негашеной извести возможно окомкование концентратов повышенной влажности, так как влажность его снижается на 0,5-0,6% на каждый 1% вводимой извести. Для обеспечения достаточно высокой прочности сырых окатышей расход извести должен составлять 3-7% в зависимости от ее качества. Наличие в извести тонкодисперсных частиц крупностью 0,02-0,5 мкм придает ей пластичность и способность образовывать известковое тесто при гашении, обладающее свойствами коллоидных систем. Чем активнее известь и чем полнее она погашена, тем выше ее водопоглощающая способность и пластичность.

Гашеная известь адсорбирует на своей поверхности большое количество воды, образуя мицеллы, которые представляют собой кристаллиты $(\text{CaOH})_2$ и могут

удерживать до восьми молекул воды. Образующееся при взаимодействии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с водой известковое тесто является непрерывно кристаллизующимся гелем, т. е. для извести коллоидное состояние является неустойчивым, так как система стремится уменьшить поверхностную энергию и перейти в кристаллическое состояние. Это свойство извести способствует упрочнению окатышей. Кроме того, гидрат окиси кальция растворим в воде; так, например, из раствора он адсорбируется на поверхности тонких железорудных частиц. В результате хемосорбционной реакции взаимодействия между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и железорудным материалом повышаются адгезионные свойства системы и увеличивается прочность контактов между фазами, что также способствует упрочнению окатышей. Была также изучена возможность использования в качестве связующего *красного шлама* (отхода глиноземного производства).

Установлено, например, что при введении в шихту 5 % красного шлама прочность окатышей из бурожелезнякового концентрата увеличивается примерно в 2 раза. Установлено, что **органические вещества**, выгорают прежде, чем окатыши упрочняются при обжиге, что может привести к разрушению окатышей или их оплавлению. Имеются предложения по активации концентратов поверхностно-активными веществами типа алкилакрил-сульфоната и сульфит-спиртовой барды, по введению в шихту окатышей кремниевого золя с размером частиц менее $35 \cdot 10^{-6}$ м, карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ).

Несмотря на большой объем проведенных исследований, практически заменителей бентонита, равноценных ему по качеству, не найдено. Поэтому в качестве связующего вещества при окомковании применяется в широких масштабах только бентонит. На ряде зарубежных фабрик окомкования вместо бентонита успешно применяют гашеную известь.

2.3. Технология производства окатышей

Производство окатышей включает в себя две стадии:

1 стадия Производство сырых окатышей, выдерживающих нагрузку не менее 1,5 кг/окатыш.

Начальная стадия получения окатыша может представляться как процесс обволакивания капли воды шихтой, попавшей на неё, за счёт сил поверхностного натяжения капли воды. Очень упрощенно это аналогично процессу свертывания пыли в шарики при начале дождя. При продолжении движения сыпучего материала во вращающемся барабане или чаше окомкователя начальные зародыши накатываются шихтовыми материалами до образования гранул (окатышей) сферической формы диаметром 8—18 мм (рис. 12, 13). В дальнейшем непрерывный (установившийся) процесс окомкования поддерживается за счёт постоянного ссыпания и ударов зародышей окатышей о слой неокомкованных шихтовых материалов.

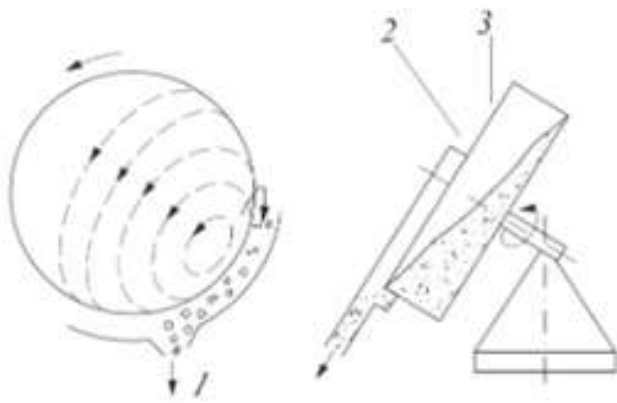


Рис. 12. Схема движения материала в тарельчатом окомкователе: 1 – гранулы; 2 – подача воды; 3 – подача шихты



Рис. 13. Сырые окатыши – гранулы сферической формы

II стадия Обжиг окатышей, в процессе которого прочность окатышей повышается до 150 кг/окатыш и более (рис. 14, 15).

Полученные в результате окатывания сырые окатыши подвергаются упрочнению обжиговым или безобжиговым методами.



Рис. 14. Обожжённые железорудные окатыши



Рис. 15. Склад готовой продукции – обожжённых окатышей

В промышленных масштабах окомкование руд и концентратов черных металлов по обжиговой технологии включает три основные стадии: подготовка компонентов шихты для окомкования, получение сырых окатышей и упрочняющий обжиг окатышей (рис. 16).

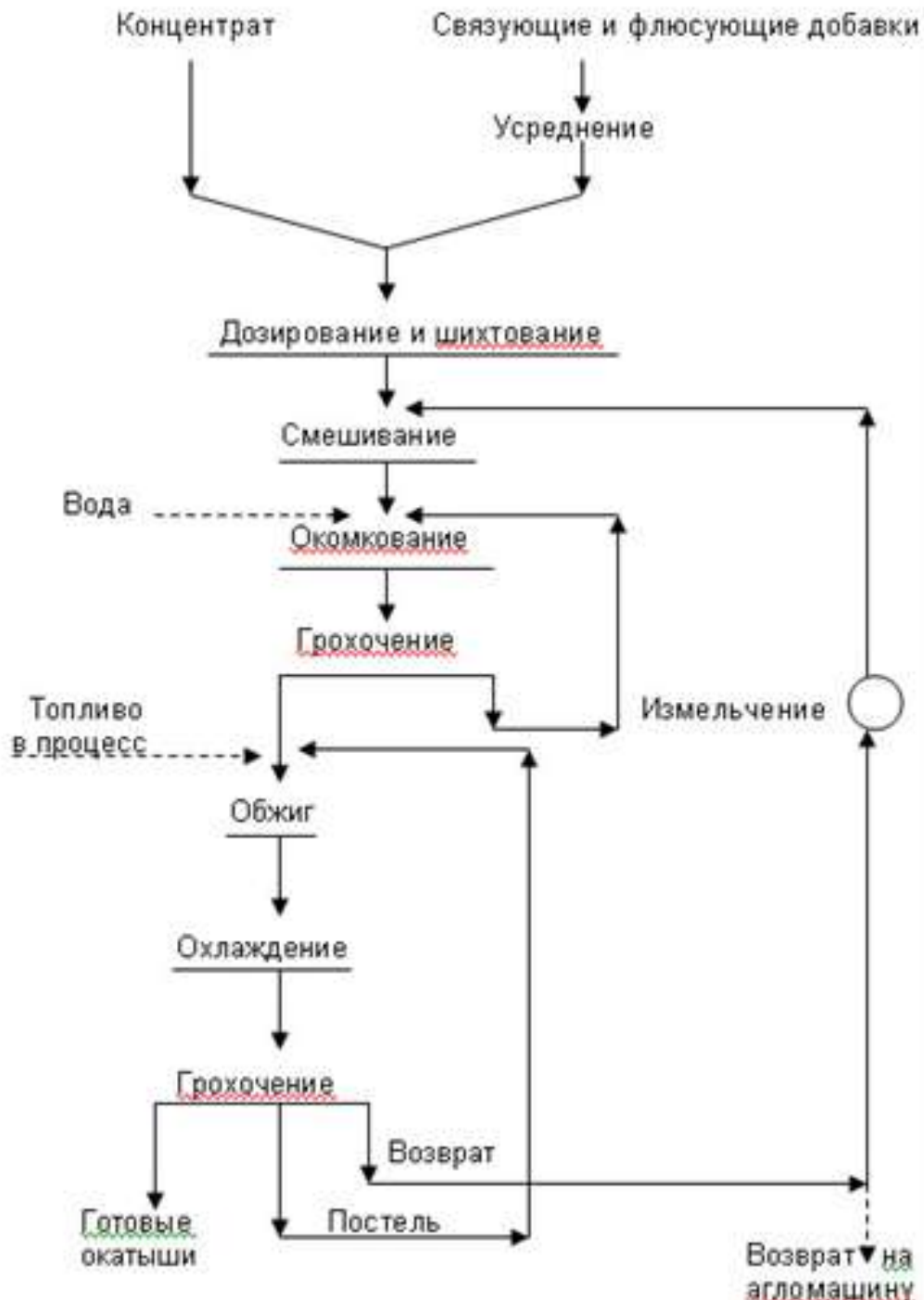


Рис. 16. Технологическая схема производства окатышей с упрочняющим обжигом

Фабрика или участок по производству железорудных окатышей состоит из отделений подготовки шихты, окомкования и обжигового отделения (рис. 17). Транспортная связь между машинами и агрегатами отделений осуществляется ленточными конвейерами. Основным компонентом для производства окатышей является тонко измельченный влажный концентрат. Перевозка его обычным железнодорожным транспортом сопряжена с существенными трудностями при разгрузке, особенно в зимнее время.

Поэтому фабрики окатышей стремятся располагать непосредственно поблизости от обогатительных фабрик, что позволяет выдаваемый ими концентрат направлять на окомкование конвейерным транспортом.

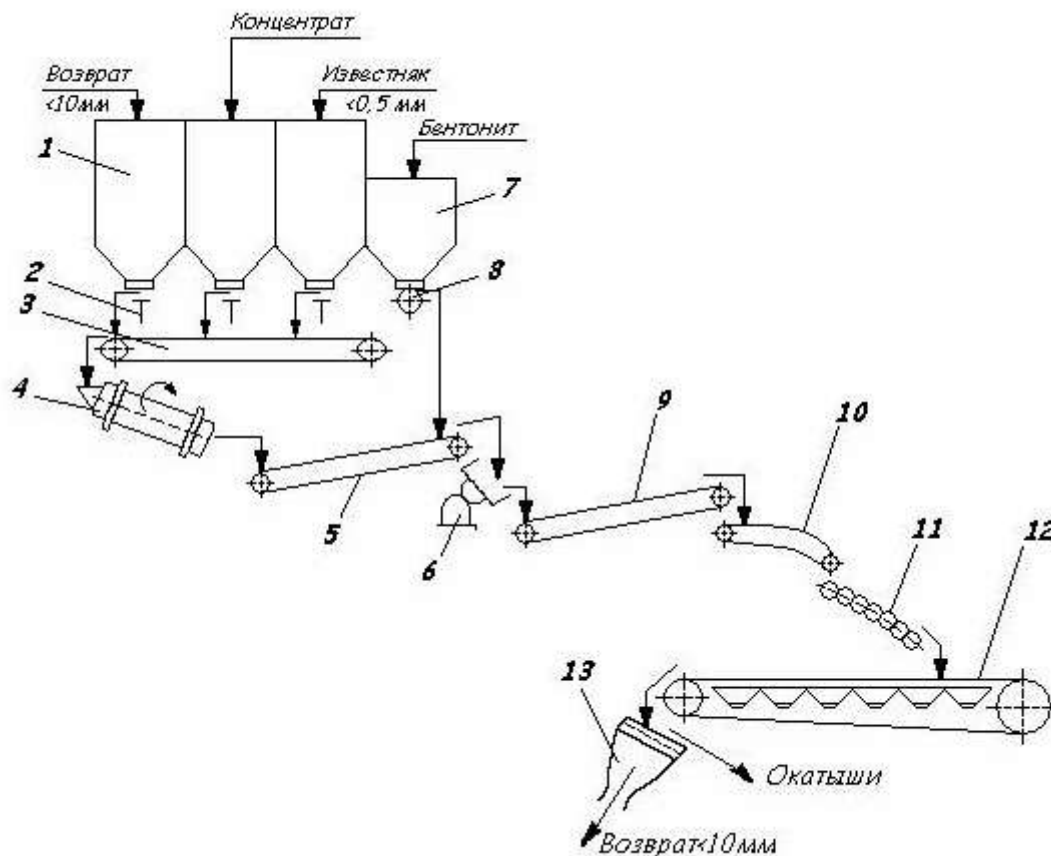


Рис. 17. Схема цепи аппаратов производства окатышей:

1 – бункера, 2 – питатели, 3 – конвейер, 4 – смесительный барабан, 5 – конвейер, 6 тарельчатый окомкователь, 7 – бункер, 8 – питатель, 9 – конвейер, 10 – укладчик, 11 – питатель, 12 – машина упрочняюще-восстановительного обжига, 13 – грохот.

Концентрат, известняк и возврат поступают в бункера 1, откуда питателями 2 в определенных соотношениях выдаются на конвейер 3, направляющий шихтовые материалы в смесительный барабан 4, по выходе из которого шихта конвейером 5 транспортируется в гранулятор 6. Перед окомкователем к шихте добавляют бентонит, подаваемый из бункера 7 питателем 8.

В окомкователе происходит образование окатышей, чему в значительной степени способствует вода, подаваемая в гранулятор через распыляющую форсунку. Выходящие из окомкователя сырые окатыши транспортируются конвейером 9 к укладчику 10.

С помощью укладчика окатыши подаются в питатель 11, который загружает их на машину 12 упрочняющего или упрочняюще-восстановительного обжига. После охлаждения готовые окатыши перед отправкой на склад подвергаются рассеvu на грохоте 13.

Холодные окатыши имеют высокую прочность, что позволяет их транспортировать на большие расстояния к доменным цехам.

2.4. Оборудование для производства сырых окатышей

Сырые окатыши получают в **барабанных или тарельчатых (чашевых) окомкователях (грануляторах).**

Барабанный окомкователь представляет собой барабан 1, внутренние стенки которого шероховаты, что препятствует проскальзыванию окатышей и улучшает условия для их укрупнения (рис. 18).

а



б

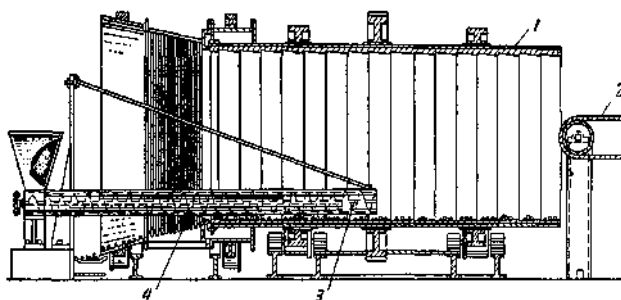


Рис. 18. Барабанный окомкователь

а – общий вид; б – схема устройства: 1 – барабан; 2 – ленточный конвейер; 3 – консольный питатель; 4 – грохот (разгрузочный конец барабана выполнен в виде грохота)

Увлажненная шихта подается в барабан конвейером 2 (рис. 19, а). Внутри барабана вводят добавки при помощи консольного питателя 3. Разгрузочный конец барабана выполнен в виде грохота 4 (рис. 19, б). Подрешетный продукт

грохота возвращается в шихту, доля возврата которого составляет 50-80%. Окружная скорость барабанов составляет 80-95 и 25-30 м/мин при получении гранул (окатышей) диаметром соответственно 10-20 и 25-30 мм; для гранул 8-12,5 мм повышают окружную скорость вращения барабанов до 120-140 м/мин.

Барабанные окомкователи устанавливают в замкнутом цикле с грохотом и подрешетный продукт (возврат) направляют обратно в барабан в рециркуляцию, что ускоряет образование окатышей. Оптимальное количество циркуляционной нагрузки составляет 100-150 % от производительности окомкователя. Она может достигать и 300 %. При циркуляционной нагрузке менее 100 % окатыши имеют меньшую прочность, а при превышении 300 % в готовых окатышах будет содержаться недопустимое количество мелочи.

а



б



Рис. 19. Барабанный окомкователь: а – подача шихты конвейером; б – разгрузка сырых окатышей на грохот

Внутренняя поверхность барабана футеруется резиной (рис. 20). Резиновая футеровка барабанного окомкователя исключает абразивный износ стенок, а также налипание на стенки тонкого слоя шихты, что в свою очередь позволяет отказаться от требующего дополнительного ухода очистного устройства.

Для футерования барабанных окомкователей применяется специальная резина, имеющая дополнительный контактный слой. Температура эксплуатации от 10°С до 60°С. Ширина резиновых полос 600 мм и 1220 мм, толщина — 6,5 мм. Для наклеивания резины применяются клеевые материалы холодной вулканизации. Срок службы резиновой футеровки составляет не менее 6-7 лет.

Производительность футерованного барабанного окомкователя увеличивается до 15%, увеличивается также и межремонтный срок службы оборудования.



Рис. 20. Внутренняя поверхность барабанного окомкователя, футерованного резиной

Барабанные окомкователи разных типоразмеров выпускают отечественные и зарубежные производители (табл. 4). Например: диаметр и длина окомкователя составляет 2,8x11,0 м или 3,6x14,0 м с частотой вращения барабана от 7 до 12 об/мин с производительностью соответственно 40 и 90-100 т/ч.

Таблица 4

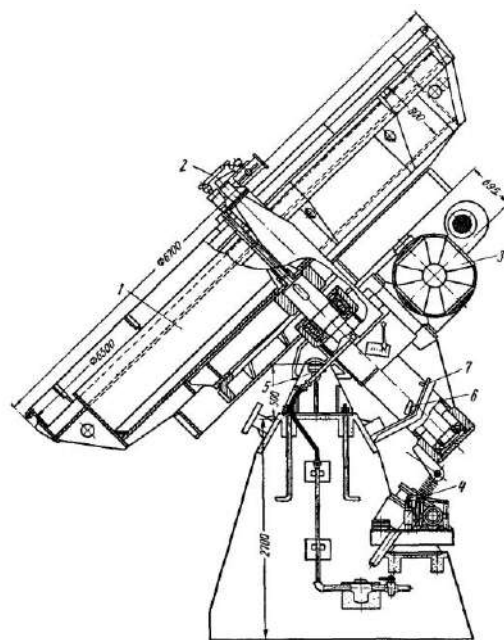
Технические характеристики барабанных окомкователей

Модель	Обичайка			Мощность (кВт)	Внешний размер (мм)
	Объем (м³)	Скорость вращения (об/мин.)	Наклон (%)		
Ф1×6	Ф1×6	5	3.5	5.5	6000×1358×2535
Ф1×15	Ф1×15	5	3.5	7.5	15000×1358×2535
Ф1.2×15	Ф1.2×15	5	3.5	15	15000×1558×2735
Ф1.2×20	Ф1.2×20	5	3.5	15	20000×1558×2735
Ф1.5×10	Ф1.5×10	5	3.5	15	10000×1858×3035
Ф1.5×14	Ф1.5×14	5	3.5	15	14000×1858×3035
Ф1.5×18	Ф1.5×18	5	3.5	18.5	18000×1858×3035
Ф1.8×16	Ф1.8×16	3-5	3.5	22	16000×2158×3335
Ф1.8×20	Ф1.8×20	3-5	3.5	22	20000×2158×3335
Ф2.0×16	Ф2.0×16	3-5	3	22	16000×3340×3420
Ф2.0×20	Ф2.0×20	3-5	3	30	20000×3340×3420

Тарельчатый (чашевый) окомкователь снабжен чашей (тарелью) и бортами (рис. 21). Ось вращения чаши наклонена к вертикали на 30-50°.



а



б

Рис. 21. Тарельчатый окомкователь: а – общий вид; б – схема устройства, 1 – чаша; 2 – установка скребков; 3 – привод чаши; 4 – механизм регулирования угла наклона; 5 – опора; 6 – копир; 7 – конечный выключатель

Шихта подается конвейером в чашу 1 окомкователя. Образующиеся окатыши постоянно обрызгиваются водой из форсунок с индивидуальными трубопроводами, выполненными в виде гибких шлангов с вентилями для регулирования расхода воды. Материал движется по замкнутому контуру, при этом частицы укрупняются и достигнув определенного размера, переваливаются через борт окомкователя. Крупные окатыши не могут подниматься на большую высоту. Достигнув нужного диаметра, они перекатываются через борт чаши и попадают в разгрузочный лоток.



Дальше окатыши сыпаются на ленту конвейера и отправляются в печь для обжига, после чего приобретают необходимую прочность. Мелкие окатыши и шихта остаются на поверхности чаши до тех пор, пока не достигнут заданного размера. Внутреннюю поверхность борта и днища чаши очищают от налипшего материала механизмом очистки, состоящим из бокового и шести регулируемых радиальных ножей.

Тарельчатые окомкователи применяют для окомкования однокомпонентных хорошо комкующихся шихт с постоянными физико-химическими и минералогическими свойствами. В этом случае чашевые окомкователи могут давать классифицируемые по крупности окатыши, что

позволяет вести технологический процесс без циркуляционной нагрузки и грохочения. Это упрощает схему цепи аппаратов и компоновочно-технологические проектные решения здания цеха окомкования. Применение чашевых окомкователей на тех фабриках, где это приемлемо по технологии, позволяет уменьшить численность оборудования на каждую технологическую линию, нагрузки на опорные конструкции здания, а также грузоподъемность обслуживающих кранов.



Рис. 22. Тарельчатые окомкователи и готовые окатыши

Тарельчатые окомкователи (рис. 22) изготавливают отечественные и зарубежные производители разных типоразмеров (табл.5,6). В промышленных условиях наиболее востребованы окомкователи (грануляторы) производительностью от 30-40 до 90-100 т/ч с тарелями диаметром от 3 до 7,5 м, с высотой борта тарели 0,8-0,9 м, частотой вращения тарели 3,6-9 об/мин.

Таблица 5

Технические характеристики тарельчатых окомкователей

Тип	Параметры тарели, мм		Производительность, т/ч	Установленная мощность, кВт	Масса, кг	Габаритные размеры, мм		
	Диаметр	Высота борта				Длина	Ширина	Высота
ОТ-080	800	160	0,03 - 0,1	1,5	300	1500	950	1700
ОТ-100	1000	200	0,1 - 0,3	2,7	600	1515	1230	1730
ОТ-150	1500	300	0,2 - 0,6	4,74	1740	2000	1885	2100
ОТ-200	2000	400	0,5 - 1,5	10,8	3420	2450	2470	2850
ОТ-250	2500	500	1,5 - 4,0	15,1	4800	2700	3000	3400
ОТ-300	3000	700	4 - 8	19,8	6860	3220	3470	4050

Таблица 6

Технические характеристики тарельчатых грануляторов

Модель	ГТ-0,6	ГТ-1,5	ГТ-2,5	ГТ-3,0
Диаметр тарели, мм	600	1500	2500	3000
Высота борта тарели, мм	200	300	500	600
Частота вращения тарели, регулируемая об/мин. (доп. опция)	0 — 45	0 — 20	0 — 10	0 — 10
Время рабочего цикла (доп. опция)	Задается реле времени			
Угол наклона тарели, регулируемый, °	45 — 75	30 — 75	45 — 75	45 — 75
Установленная мощность, кВт	1,12	5,65	11	20
Габаритные размеры, мм				
длина	1300	1740	2720	2880
ширина	950	1810	2560	3200
высота	1150	2143	3430	3450
Масса не более, кг	230	1540	3430	6300

Тарельчатые окомкователи по сравнению с барабанными имеют более высокую удельную производительность на занимаемую площадь.

2.4. Упрочняющий обжиг окатышей

Получаемые сырые окатыши для упрочнения подвергаются сушке, обжигу или другим видам обработки (упрочнению безобжиговыми методами). Также при обжиге удаляется значительная часть вредных примесей, в частности сернистых загрязнений (см. п. 1.5).

Упрочняющий обжиг окатышей производится в шахтных, трубчатых печах и, чаще всего, в обжиговых машинах конвейерного типа с тележками,

по конструкции напоминающими агломерационные машины. Основное отличие *обжиговой машины* – значительно более длинная зона действия горелок на обжигаемый материал.

На конвейерной обжиговой машине процесс упрочнения включает две основные стадии: подсушка при 300-600 °С и непосредственно обжиг при $t=1200-1350$ °С (рис. 23).

Повышение температуры по длине обжиговой машины происходит постепенно, – для предотвращения растрескивания и разрушения окатышей. В отличие от агломшины верх ленты перекрыт камерами в соответствии с делением на зоны сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. В зонах подогрева и обжига нагрев происходит за счёт сжигания топлива в горелках (мазута, природного газа, реже кокса) и просасывания продуктов горения через слой окатышей. Температура уходящих газов из слоя составляет 225-450 °С. Основное упрочнение окатышей происходит при температуре от 1000 до 1300°С, когда происходит объединение мелких зёрен в крупные, например, собирательная рекристаллизация Fe_2O_3 при обжиге железорудных окатышей.

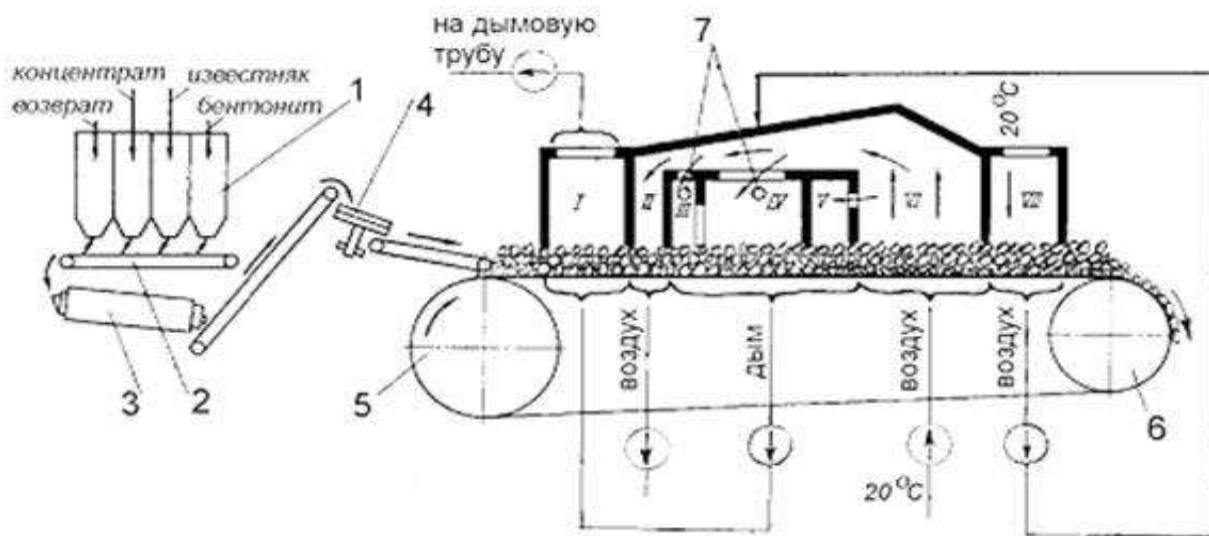


Рис. 23. Схема процесса обжига окатышей на конвейерной обжиговой машине: I, II - зоны сушки; III - зона подогрева; IV - зона обжига; V - зона рекуперации; VI, VII - зоны охлаждения; 1 - шихтовые бункера; 2 - сборный транспортёр; 3 - смесительный барабан; 4 - тарельчатый гранулятор; 5 - загрузочная часть обжиговой машины; 6 - разгрузочная часть машины; 7 - горелки

Дополнительное упрочнение происходит при температуре 1200-1350°С за счёт образования жидкой шлаковой фазы из легкоплавких соединений ($CaO-Fe_2O_3$ и др.), которые при охлаждении затвердевают внутри окатышей. Шлаковая связка между окатышами слаба из-за небольшой площади контакта.

Если в процессе обжига превысить температуру 1350°C , то произойдет оплавление поверхности окатышей и спекание в грозди. Кроме того, произойдет распад Fe_2O_3 до уровня Fe_3O_4 и снизится прочность окатышей.

Охлаждение окатышей осуществляется холодным воздухом продувкой и просасыванием через слой. Температура разгружаемых с машины окатышей составляет $90-375^{\circ}\text{C}$. Скорость охлаждения не должна быть больше 100 K/мин во избежание создания высоких термических напряжений и снижения прочности окатышей. Суммарное время пребывания окатыша на ленте составляет 30-40 минут.

Использование металлизированных окатышей, получаемых при добавлении в шихту кокса или при обжиге окатышей в слое твердого топлива, позволяет увеличить производительность доменной печи и снизить расход топлива для плавки, т.к. в процессе обжига окатышей часть содержащегося в шихте железа восстанавливается до металлического состояния.

На рис. 24 показана принципиальная схема получения металлизированных окатышей с использованием **шахтной печи**. Сырые окатыши из бункера 1 поступают на грохот-питатель 2 и далее направляются в скип 3, которым подают окатыши на колошник шахтной печи 4.

Упрочняюще-восстановительный обжиг, происходящий в верхней половине печи (*зона I*), достигается за счет омывания опускающегося столба окатышей идущим навстречу ему горячим восстановительным газом, поступающим в печь по магистрали 10. Выходящий из печи по газопроводу 5 колошниковый газ предварительно очищают от пыли в скруббере 6, а затем газодувкой 7 направляют в смеситель 11, куда по газопроводу 15 поступает также природный газ. Процесс конверсии последнего осуществляют в аппарате 9. Физическое тепло, необходимое для протекания процесса, получают за счет сжигания части колошникового газа, поступающего по газопроводу 8, и природного газа, идущего по газопроводу 13. Воздух для горения нагнетают воздуходувкой 16 по магистрали 17. Отходящие из аппарата 9 по газопроводу 12 продукты горения проходят через теплообменник 14.

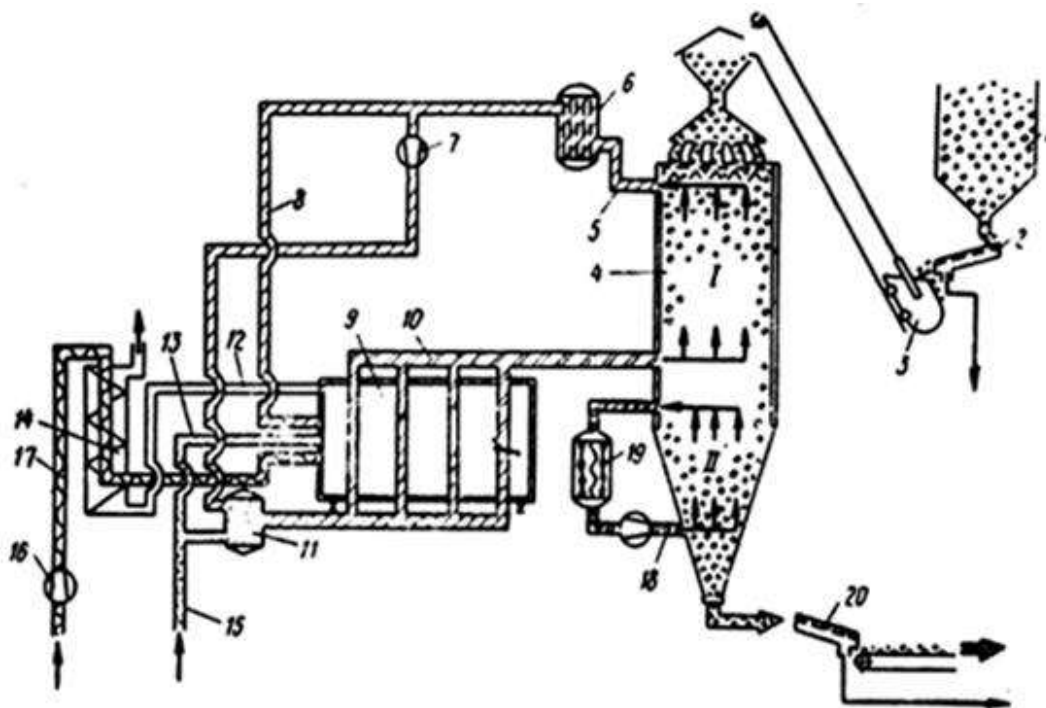


Рис. 24. Схема получения металлизированных окатышей в шахтной печи

Упрочненные и восстановленные окатыши в нижней половине печи (*зона II*) охлаждаются в противопотоке холодного газа, подаваемого в печь газодувкой 18. Охлаждающий газ циркулирует в замкнутом контуре, в состав которого входит скруббер 19. Выгружаемые из печи окатыши поступают на грохот 20. Надрешетный продукт направляют в доменный цех или на склад готовой продукции, а подрешетный идет на переработку. Производительность шахтных печей достигает 500 тыс. т окатышей в год.

Современные обжиговые машины оборудованы развитыми газоходными системами, состоящими из сборных коллекторов, газоходов, газоочистного и тягодутьевого оборудования, обеспечивающими температурно-фильтрационные режимы термообработки слоя окатышей в различных технологических зонах машины. В горнах высокотемпературных зон нагрева и обжига для обеспечения и регулирования температурного режима установлены горелочные устройства. Между технологическими зонами осуществляется рециркуляция горячих газов, нагретых при обжиге и охлаждении слоя окатышей, с целью вторичного использования тепла выходящих из слоя дымовых газов или теплоносителя и уменьшения количества сбросов дымовых газов в атмосферу.



Транспортировка технологических газов на обжиговых машинах осуществляется как с использованием тягодутьевых установок, так и безвентиляторным способом через переточный коллектор, соединяющий первую секцию зоны охлаждения с горнами технологических зон сушки, нагрева и обжига. В результате на современных машинах в атмосферу после очистки сбрасываются в основном газы из зоны сушки и нагрева, имеющие низкую температуру (обычно ниже 100°С) и высокое влагосодержание.

2.5. Безобжиговые методы упрочнения окатышей

Безобжиговые окатыши – это гранулы сферической формы, упрочненные без применения высокотемпературного обжига.

Современной тенденцией при окомковании следует считать переход от **обжиговых** методов упрочнения окатышей к **безобжиговым** (низкотемпературным). Применение методов безобжигового окатыwania руд и концентратов позволяет значительно снизить топливо- и энергзатраты на производство окатышей, уменьшить капитальные затраты, улучшить санитарно-гигиенические условия труда, значительно удешевить процесс.

Металлургические свойства безобжиговых окатышей сопоставимы со свойствами обжиговых окатышей, изготовление же их более выгодно экономически. Вопросы теоретических и технологических основ производства безобжиговых окатышей составляют в настоящее время предмет научных, опытно-промышленных и промышленных разработок как в России, так и за рубежом. Главным условием реализации процесса производства безобжиговых окатышей является научно обоснованный выбор связующего вещества, процесс твердения которого обеспечивает успех всей технологии.

Получение окускованных материалов путем безобжигового окатыwania является сложной технической задачей. Сложность ее вызвана следующими обстоятельствами:

1. Строго ограничивается химический состав перерабатываемых концентратов по содержанию второстепенных и примесных компонентов (S, P, Pb, As, Zn, Si). В последнее время к вредным примесям отнесли также Na и K, присутствие которых ведет в аномальному разбуханию окатышей в ходе восстановления. Эти ограничения не позволяют использовать в процессе производства для окускования целые классы высокоэффективных связующих, такие как фосфатные цементы и связки, щелочные связки, связующие на основе сульфатов и др.

2. Ограничивается количество вводимого связующего вещества, определяемое пределом разбавления рудного концентрата по содержанию основного элемента (Fe, Cr, Mn). Предел разбавления исходного концентрата называют «разубоживанием», оно приводит к уменьшению содержания ценного компонента в перерабатываемой смеси и снижению производительности доменной печи. С позиций выбора связующего вещества это тоже существенное ограничение, так как при низком содержании связующего труднее достигнуть требуемого уровня свойств окатышей, прежде всего прочности, а само вяжущее должно относиться к категории высокопрочных.

3. Необходимо получение окатышей с высоким уровнем двух категорий свойств: физико-механических, определяющих поведение окатышей при хранении и транспортировании, и металлургических, обуславливающих их поведение в доменной печи в ходе восстановительной плавки. Вклад того или иного связующего вещества в эти две категории свойств может быть различным: связующее, обеспечивающее высокие физико-механические характеристики окатышей, может оказаться неблагоприятным с точки зрения металлургических свойств и наоборот.

Общие требования к связующему веществу для окатывания концентратов могут быть сформулированы следующим образом. Вяжущее вещество должно: обеспечивать высокую прочность и хорошую атмосфероустойчивость окатышей, а также оптимальные технологические параметры процесса окатывания (технологичность процесса) и его экономичность; не быть химическим балластом (не «разубоживать» исходный концентрат); не ухудшать металлургические свойства окатышей, прежде всего восстановимость; не содержать вредные примеси; не быть дефицитным.

При производстве **безобжиговых окатышей** применяют следующие основные группы связующих: цементные, карбонатного твердения, гидротермального упрочнения, кристаллогидратного упрочнения.

При производстве безобжиговых окатышей применяют следующие основные группы связующих веществ: цементные, карбонатного твердения, гидротермального упрочнения, кристаллогидратного упрочнения.

Окомкование на цементной связке (способ Гренколд). Этот способ предложен в конце шестидесятых годов, запатентован и реализован в промышленном масштабе фирмой «Гренгесберг» (Швеция). Он основан на использовании в качестве связующего портландцемента или

шлакопортландцемента. Для регулирования схватывания и начальных этапов твердения кроме гипса применяют такие добавки, как, например, CaCl_2 , Na_2SO_4 , NaOH , Na_2CO_3 , FeSb и др.

Процесс упрочнения окатышей по этой технологии условно разбивают на три периода: индукционный (~10 ч), когда прочность окатыша незначительна; быстрое упрочнение (3—6 сут), при котором достигается 70% конечной прочности; окончательное упрочнение (длится несколько недель).

Процесс упрочнения окатышей определяется естественными процессами гидратации цемента при комнатной температуре (20 °С) и зависит от содержания цемента, тонкости его измельчения, относительной влажности окружающей среды и вида добавок. Средний расход портландцемента составляет 8—12% в составе твердеющей смеси. Температура окружающей среды по этой технологии не должна быть повышена, поскольку это может вызвать высыхание окатышей и удаление необходимой для гидратации цемента воды, а устройства для поддержания заданной высокой относительной влажности не предусмотрены.

Метод ускоренного твердения («Уралмеханобр», В. Е. Лотош.) Он основан на использовании в качестве связующего портландцемента, при этом ускорение твердения достигается термовлажной обработкой цементсодержащих окатышей (пропаривание окатышей насыщенным водяным паром при 70—100 °С) с последующей их сушкой.

В соответствии с предложенной технологической схемой рудный концентрат и портландцемент после дозирования подвергаются активации в шаровой или стержневой мельнице. Активация обеспечивает высокую степень смешивания компонентов шихты и повышение их химической активности. Можно предположить, что портландцемент при такой обработке несколько доизмельчается и обновляет свою реакционную поверхность. Предусмотрены два варианта сушки окатышей: естественная — в процессе их транспортирования и хранения в теплое время года при температуре выше 15 °С в течение нескольких суток и искусственная — теплоносителем при 200—300 °С. Прочность окатышей, полученных методом ускоренного твердения, соответствует месячной прочности окатышей, твердевших в естественных условиях при комнатной температуре.

Метод автоклавного упрочнения. Сущность метода состоит в образовании в гидротермальных условиях связки на основе гидросиликатов кальция из извести и кремнезема. Последний может вводиться в известково-рудную смесь специально (извне) или представлять собой кремнеземсодержащие остатки пустой породы, сохранившейся в руде после ее обогащения. Приготовленные окатыши загружают в вагонетки и запаривают в автоклаве.

Применение высокожелезистых цементов. Разработка и применение высокожелезистых цементов в наибольшей степени отвечает идее полного соответствия составов цемента и окатываемого концентрата, полностью исключая его «разубоживание».

Существенным фактором, определяющим гидравлические свойства высокожелезистого цемента, является температура обжига. Опыт применения такого цемента для окускования железорудных концентратов показал, что при содержании в шихте 10—15% цемента окатыши характеризуются приемлемым уровнем прочности и металлургических свойств (сопротивление истирающим и ударным воздействиям, интервал размягчения, усадочная деформация, восстановимость).

Применение магнезиальных вяжущих (цемент Сореля), в частности растворов хлорида магния в качестве жидкости затворения. Так, использование связки состава 6% MgO + 4% MgOC при сушке окатышей (200 °C) позволило получить прочность до 10 МПа/окатыш. Модификацией таких составов являются хлориднитратные композиции, содержащие в качестве жидкости затворения растворы хлоридов и нитратов магния. Каустический магнезит вводится в концентрат в виде порошков, а солевые растворы — распылением в процессе окатыwania. Путем окатыwania (в лабораторных условиях) магнетитового концентрата с использованием вяжущих систем MgO + раствор MgCl₂, Mg(NO₃)₂ при содержании 5% MgO были получены окатыши со свойствами требуемого уровня.

Применение жидкого стекла было реализовано для хромитовых концентратов с добавлением 2—5% связки. Окатыши высушивались при 300—600 °C, прочность их составила 8,0—9,5 МПа/окатыш. Жидкое стекло было применено также для окускования флюорита (CaF₂), используемого при выплавке ферромарганца.

Для ускорения твердения и упрочнения окатышей на жидком стекле предложено в состав вяжущей композиции вводить добавки, обеспечивающие коагуляцию стекла. Такими добавками являются, например, хлориды щелочно-земельных металлов, карбонаты и бикарбонаты щелочных металлов. Технология введения вяжущего при этом двухступенчатая: сначала вводится жидкое стекло и масса перемешивается, затем — добавка, вызывающая коагуляцию стекла. Вредное влияние щелочей на процесс доменной плавки ограничивает применение таких вяжущих композиций для окомкования железорудных материалов.

2.6. Качество окатышей

Сырые окатыши должны обладать достаточной прочностью во избежание деформации и разрушения при их доставке к обжиговому агрегату.

Факторы, влияющие на качество сырых окатышей:

- влажность поступающей шихты на окомкование;
- её гранулометрический состав, связанный с суммарной площадью поверхности частиц;
- качество смешивания компонентов шихты;
- постоянство шихты по влажности, крупности и нагрузке на окомкователь.

Сырые окатыши для контроля опробуют на гранулометрический состав, рассеивая на узкие классы (например, +16; -16+9; -9+5; -5+0 мм), на прочность раздавливанием (путем деформации окатышей до предела прочности на измерительном приборе, причем за истинный показатель прочности принимают среднее значение), на прочность при сбрасывании, характеризующую пластичность окатышей и определяемую как среднее число сбрасываний партии из 10 окатышей с определенной высоты (30 или 60 см) до их растрескивания и разрушения.

Целью обжига сырых окатышей является придание им прочности, обеспечивающей:

- минимальное разрушение и образование мелочи при транспортировке окатышей от фабрики до потребителя, при этом учитывается возможность складирования окатышей на открытом складе, что связано с дополнительными перегрузками и воздействием атмосферных осадков;
- минимальное разупрочнение и разрушение окатышей в условиях восстановительной плавки в доменной печи.

В процессе обжига сырых окатышей происходит ряд физико-химических превращений (на примере железорудных окатышей):

- удаление влаги (гидратной и гигроскопической);
- разложение карбонатов ($MgCO_3$; $CaCO_3$);
- окисление магнетита (Fe_3O_4);
- спекание (обжиг);
- диссоциация гематита.

В результате этих превращений окатыши приобретают необходимую прочность. Также при обжиге удаляется значительная часть сернистых загрязнений.

Обоженные окатыши, помимо гранулометрического состава и прочности на сжатие, испытывают на механическую прочность при истирании и ударе в стандартном барабане с последующим определением содержания классов +5 и -0,5 мм. Определяют также разрушаемость окатышей во время восстановления генераторным газом во вращающемся барабане с полками, нагреваемом до $1300^{\circ}C$ в течение 3-х часов.

Вопросы для самопроверки

1. Классификация процессов окускования полезных ископаемых. Основные понятия.
2. Чем отличаются окатыши от концентрата?
3. В чем суть процесса окомкования сырья?
4. Какие параметры влияют на процесс окомкования?
5. Подготовка шихты к окатыванию?
6. Состав неофлюсованной шихты?
7. Состав офлюсованной шихты?

8. Состав металлизированной шихты?
9. Роль крупности компонентов шихты при окомковании сырья?
10. Роль влаги при окомковании сырья?
11. Принцип работы барабанного окомкователя?
12. Принцип работы тарельчатого окомкователя?
13. Принцип работы обжиговой машины?
14. Какие вредные примеси удаляются при обжиге окатышей?
15. Связующие вещества, применяемые для окомкования сырья?
16. Технология производства железорудных окатышей?
17. Качество сырых и обожженных окатышей?
18. Особенности процесса окомкования перед другими процессами окускования?
19. Достоинства и недостатки процесса окомкования?
20. Современное состояние и развитие процесса окомкования в России и за рубежом?

3. БРИКЕТИРОВАНИЕ

Брикети́рование (от фран. *brique* – кирпич) – процесс прессования мелкого материала с целью получения брикетов, т.е. кусков правильной формы и одинаковой массы.

Брикёт — часть окускованного материала (руды, концентрата, материала, восстановителя и т. п. в смеси со связующим веществом), полученная в результате брикетирования. По сравнению с исходным материалом обычно обладает большей крупностью, что важно для некоторых металлургических процессов (например, в руднотермической электропечи при использовании брикетов вместо мелкого (пылевидного) сырья увеличивается газопроницаемость шихты, снижается пылевынос). Кроме того, брикет может содержать не только руду, но и восстановитель и флюс, тесный контакт этих материалов способствует более полному и быстрому их взаимодействию (рис. 25).

Брикети́рованию подвергаются торф, каменные и бурые угли, железные, марганцевые, хромовые, медные и другие руды и концентраты, отходы предприятий черной металлургии (окалина, стружка, шлаки, шламы), сырье для производства ферросплавов и пр.

Брикети́рование в черной металлургии — это наиболее ранний способ окускования. В начале 20 века брикетирование было вытеснено более высокопроизводительным процессом агломерации. Альтернативой агломерации стало окомкование, доля которого в общих объёмах окускования железорудного сырья с середины 20 века неуклонно растет. Кроме того, для отдельных видов железных руд брикетирование может оказаться предпочтительным процессом. Такими рудами являются богатые железные руды, содержащие 60 % и более железа в руде. В чёрной металлургии брикетирование применяется также для получения горячебрикетированного железа.

Одной из причин распространения **брикетирования в цветной металлургии** является то, что в силу особенностей руд цветных металлов альтернативные брикетированию методы окускования не дают существенных преимуществ. В частности, получение агломератов из руд цветных металлов нередко требует повышенных температур и затрат сырья (расходы топлива достигают 25 %), комкуемость и газопроницаемость не высокая, агломерат получается пылеватый и не таким прочным, как при окусковании железных руд. С другой стороны, прочность брикетов из руд цветных металлов вполне достаточная для переработки в плавильных печах.

Брикети́рование углей производится для повышения теплоты сгорания каменноугольной мелочи, антрацитовых штыбов, бурых углей, торфа, а также для повышения КПД сжигания, транспортабельности. При брикетировании упрощаются условия хранения и использования этих видов топливного сырья.

Кроме того, **брикетирование** создаёт дополнительные сырьевые ресурсы для производства малодымного и бездымного топлива, а также рудного и нерудного сырья благодаря утилизации отходов различных производств (колошниковая пыль, металлические стружка, окалина, шлаки, отходы промышленности нерудных строительных материалов, ряда химических производств и др.), расширяет сырьевую базу коксования за счёт использования в коксовых шихтах недефицитных марок каменных углей.

Интересный факт

Промышленное значение брикетирование приобрело в середине 19 в. в связи с разработкой российскими изобретателями способа получения прочных брикетов из древесного и каменного угля, названных «карболеином» (А. П. Вешняков, 1841), и метода брикетирования торфа (А. И. Шпаковский, 1873). Первая фабрика по производству брикетов из бурого угля пущена в Германии в 1858 г., из каменного угля – в 1860 г. В России Первая углебрикетная фабрика сооружена в Одессе в 1870 г. (фабрика перерабатывала антрацитовую мелочь, т. н. антрацитовый штыб, в брикеты для нужд торгового флота), торфобрикетная – близ Санкт-Петербурга в 1891 г. Брикетирование рудной мелочи впервые осуществлено в Швеции в 1880-х гг. (по патенту Г. Грёндаля), в России рудные брикетные фабрики появились в начале 20 в. при металлургических заводах (Керченском, Таганрогском и др.).

Брикеты в зависимости от особенностей их производства и использования бывают подушкообразной, прямоугольной, цилиндрической, конической форм весом от нескольких граммов до 5-10 кг (рис. 25).

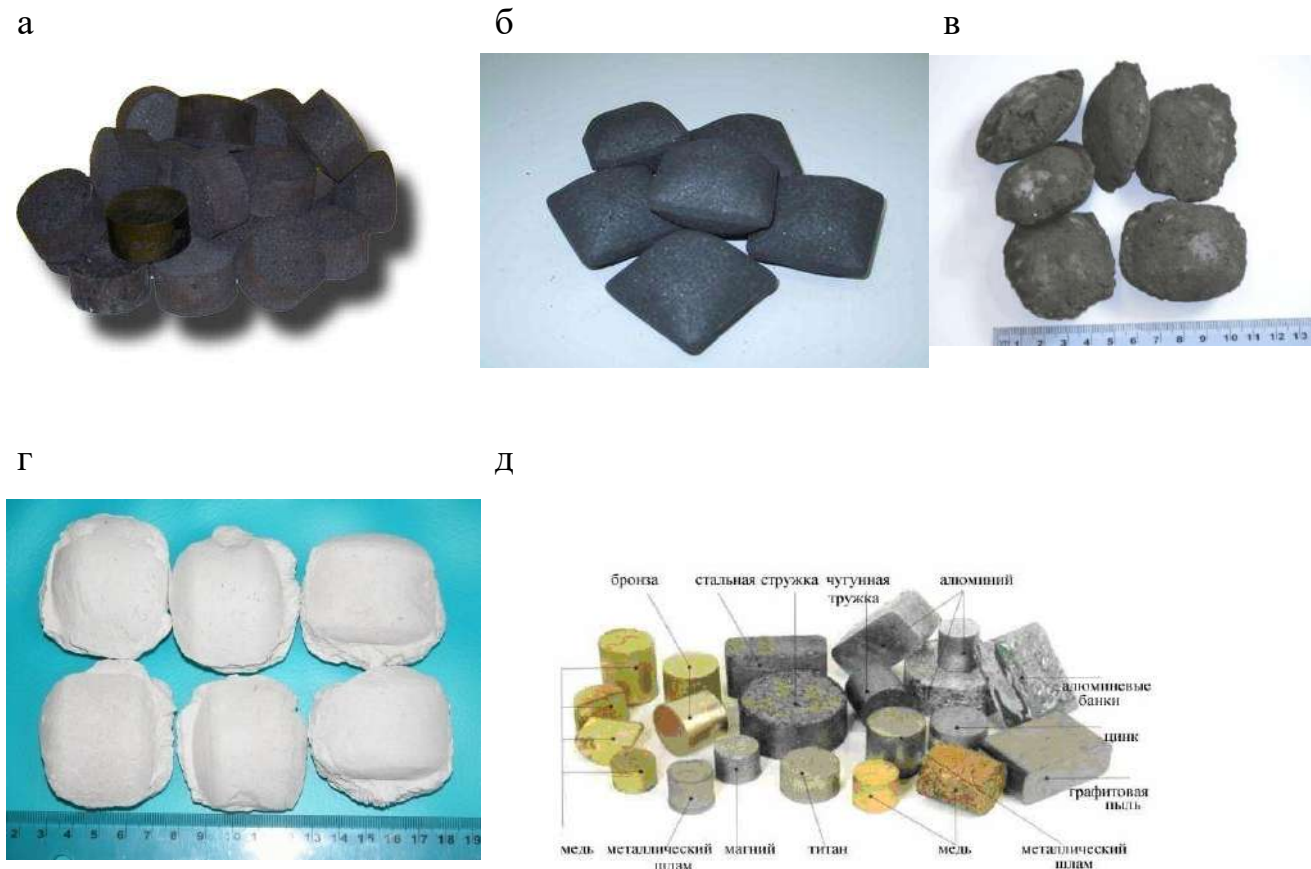


Рис. 25. Брикетты:

а, б – угольные; в – из медного концентрата; г – из обожженной извести;
д – металлизированные

3.1. Брикетная шихта, состав и свойства

По брикетировочной способности все полезные ископаемые и отходы производства делятся на две **основные группы** — **А и Б**:

Группа А представлена полезными ископаемыми и отходами, брикетизируемыми *без связующих веществ*.

Группа А имеет четыре подгруппы:

- *подгруппа А* — это материалы, содержащие в своем составе компоненты с цементирующими свойствами (глина, сульфиты металлов, восстановленное железо и др.). Сюда также входят мелкие, пылеватые и слабоструктурные материалы, в частности, железные руды, руды цветных металлов, бурые угли и др.;

- *подгруппа Б* охватывает материалы, обладающие коллоидными свойствами — в большинстве случаев пылеватые и слабоструктурные ископаемые (бурые угли молодые, торф, хромово-никелевые руды и др.);

- *подгруппа В* - рудные полезные ископаемые, требующие восстановительного обжига брикетов (магнетитовая мелочь, пиритные огарки);

- *подгруппа Г* - включает материалы, требующие высокого давления прессования (более 150 МПа) из-за отсутствия в них цементирующих компонентов (некоторые железные руды, старые бурые угли).

Группа Б – полезные ископаемые и отходы, брикетируемые с присадкой связующих веществ (большинство ископаемых неорганического происхождения и отходы производства, а также каменные угли всех марок, антрациты и топливные отходы).

Группа Б имеет две подгруппы:

- *подгруппа Д* представлена веществами, брикетируемыми с присадкой связующих минерального происхождения (руды, отходы производства);

- *подгруппа Е* состоит из материалов, брикетируемых с присадкой связующих органического происхождения (каменные угли, антрациты, коксовая мелочь и некоторые руды).

Брикетиrowание углей осуществляется двумя способами: со связующими (каменные и старые бурые угли, антрациты, коксовая мелочь) и без связующих (молодые бурые угли).

К основным свойствам, характеризующим **брикетируемость** материалов, относится **дисперсность** (измельченность) и **пластичность**. Для полидисперсных материалов характеристикой дисперсности является фракционный состав. По фракционному составу брикетируемые материалы подразделяют на:

- кусковые — 80–90% размером более 10 мм;
- крупнозернистые и зернистые — 40–60% размером 1–10 мм;
- мелкие — 60–80% размером 3,0–0,074 мм;
- пылевидные — 60–80% размером 0,5–0,01 мм;
- тонкие — более 50% размером менее 0,05 мм.

Пластичностью обладают материалы с природными цементирующими свойствами (наличие в них глины, окисленных минералов, органических смол и т.д.).

Подготовка шихты состоит в усреднении подлежащего брикетиrowанию материала и добавке в него, при необходимости, связующих веществ.

В состав **брикетной шихты** входят:

- мелкий или тонкоизмельченный материал без *связующих добавок*, влага;
- мелкий или тонкоизмельченный материал, *связующие вещества*, влага.

3.2. Связующие вещества для брикетиrowания

Связующими называются вещества, способные соединять разобщенные твердые тела и сохранять их прочный контакт в условиях значительных внешних воздействий).

Связующие вещества должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь высокую поверхностную активность, максимально смачивать твердую поверхность материала, обеспечивая прочную связь;
- быть устойчивыми к атмосферным осадкам, температуре, действию солнечных лучей, окислению и т.п.;
- не разрушать структуру субстрата в готовом брикете;
- иметь эластические и пластические свойства;
- обладать высокой прочностью, но не быть жестче склеиваемого материала В противном случае внешняя нагрузка может привести к разрушению соединения из-за неравномерной концентрации напряжений;
- не допускать возникновения в отвердевшем связующем высоких внутренних напряжений, способных к разрушению клеевого соединения;
- иметь высокую скорость отверждения;
- не содержать летучих соединений, токсично действующих на организм человека;
- содержать достаточную долю спекающихся компонентов, обеспечивающих термическую стойкость брикетов при горении;
- обеспечивать полную теплоустойчивость брикетов "при повышенных летних и низких зимних температурах;
- иметь высокую теплоту сгорания и малый выход летучих веществ;
- обладать низкой температурой воспламенения;
- быть недефицитными и дешевыми;
- отличаться стойкостью при хранении, хорошо транспортироваться.

Для брикетирования руд и углей применяют органические и неорганические связующие вещества.

Органические связующие вещества: каменноугольный пек, битум, смолы, гудрон, сульфитный щёлок, сульфит-спиртовая барда и др.

Неорганические связующие вещества: известь, магнезит и доломит, бентонит, цемент, жидкое стекло др..

Концентраты *сульфит-спиртовой барды* получают из сульфитных щелоков, являющихся отходами целлюлозно-бумажной промышленности, или как побочный продукт при переработке древесины на сульфитную целлюлозу. Щелоки используют для производства этилового спирта, при этом получают вторичный отход - сульфит-спиртовую барду (ССБ), которая после частичного или полного упаривания может быть использована в качестве жидкого или твердого связующего.

В настоящее время выпускают жидкие бардяные концентраты (КБЖ) из сульфит-дрожжевой бражки с содержанием сухих веществ до 55 % и твердые бардяные концентраты (КБТ) с содержанием сухих веществ до 83 %.

К недостаткам ССБ относится то, что при хороших адгезионных свойствах они обладают высокой гигроскопичностью и поэтому не

обеспечивают водоустойчивость рудных брикетов, кроме того, содержат значительные количества серы. ССБ используют для подготовки некоторых видов ферросплавного сырья, отдельных видов сырья в цветной металлургии и в небольшом количестве в составе комбинированных связующих. Для упрочнения рудных брикетов с ССБ применяют сушку при температурах 370-410 К или вылеживание на открытом воздухе при благоприятных атмосферных условиях (низкой относительной влажности).

Сульфитные щелоки (СЩ) состоят из сухого вещества лигносульфонового комплекса (60 - 65 %), сахара (около 20 %), золы и прочих веществ (до 15-20 %).

Жидкое стекло представляет собой натриевый ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) или калиевый ($\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) силикат различного состава.

Состав жидкого стекла колеблется в широких пределах и определяется отношением кремнезема (SiO_2) к оксид натрия или калия (Na_2O , K_2O), которое называется модулем основности жидкого стекла

$$M = 1,032\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O},$$

где 1,032 - отношение молекулярной массы оксида натрия к молекулярной массе оксида кремния.

Модуль основности жидкого стекла обуславливает пластические свойства испытуемых смесей: по мере его уменьшения повышается рН смеси жидкого стекла с железным концентратом, вследствие чего медленнее идет разложение силиката натрия при нагревании и дольше сохраняются пластические свойства сырой смеси. Применение жидкого стекла с высоким модулем приводит к очень быстрому затвердеванию сырой смеси и потере ею пластических свойств уже в первые часы изготовления брикетов без дополнительного нагрева. Для получения качественных рудных брикетов практически можно использовать жидкое стекло с любым модулем основности.

Гашеную или негашеную известь применяют одновременно и в качестве связующего, и в качестве флюса при производстве рудных брикетов. Качественную известь получают из известняков, содержащих менее 8 % глинистых примесей.

Для гашения извести применяют воду, и в зависимости от ее расхода образуется пушонка, известковое тесто или известковое молоко. Для ускорения процесса гашения извести в воду вводят активные добавки (гидрат оксида натрия, хлориды кальция, натрия и магния и др.).

Процесс естественного твердения извести, превращающий ее в цементирующий материал, включает в себя кристаллизацию гидрата окиси кальция и карбонизацию его атмосферной углекислотой с образованием карбоната кальция. Процессы естественной карбонизации (на воздухе) протекают медленно вследствие малой концентрации (0,04 %) углекислоты в воздухе и образования на твердеющем брикете корки карбоната кальция, препятствующей диффузии углекислоты в его внутреннюю часть. Для ускорения упрочнения брикетов с известью используют два процесса:

искусственную карбонизацию или гидротермальную обработку (автоклавирувание). Обычно процесс искусственной карбонизации брикетов сопровождается одновременно и процессом сушки, причем скорость процесса сушки-карбонизации следует строго регламентировать в зависимости от результатов испытаний на прочность партии брикетов. Быстрая сушка-карбонизация приводит к замедлению процесса цементации брикетов, так как для интенсивного процесса карбонизации необходимо определенное количество влаги в шихте.

При брикетировании с негашеной известью можно использовать концентраты с повышенной влажностью, так как при их смешивании известь гасится и отнимает у них избыточную влагу. Для успешного протекания процесса карбонизации рекомендуется подсушка брикетов теплым воздухом. Процесс карбонизации может быть ускорен и введением в шихту для брикетирования небольших количеств (обычно до 0,1 %) катализаторов: 0,1 Н раствора соляной кислоты и разбавленных до 0,01 % растворов технических гидролизатов, ССБ (0,1 %) и СЩ, растворимых хлоридов, сульфатов и карбонатов различных металлов и др.

Каменноугольные пеки, применяемые в основном за рубежом, являются остаточными продуктами перегонки каменноугольной смолы при 630 - 650 К. Пек является смесью высокомолекулярных органических соединений. В твердом состоянии он представляет собой аморфную массу черного цвета, в жидком – вязкую жидкость темного, почти черного цвета, со специфическим запахом. В состав пеков входят преимущественно углеводороды, фенолы и основания. Они представлены высокомолекулярными соединениями с конденсированными ядрами. Пеки содержат и значительные количества свободного аморфного углерода, который отличается от битумов своей полной нерастворимостью в органических растворителях.

Физико-химические свойства пека зависят от температуры перегонки смолы, которая определяет количество легких фракций, входящих в состав пека.

Каменноугольная смола при брикетировании ведет себя аналогично пеку. Специальных методов упрочнения рудных брикетов в этом случае не применяют, так как брикеты получаются достаточно прочными сразу после прессования.

Эмульсии используют в ограниченных количествах для уменьшения расхода дорогостоящих и дефицитных связующих веществ. Экономически использование эмульсий при брикетировании не всегда оправдано, поэтому их применяют только, если это дает значительную экономию основных связующих веществ. Лучшие результаты в промышленных условиях получены при брикетировании руд с битумными эмульсиями, в состав которых входят отработанные нефтяные асфальты (50 - 70%), вода (28 - 48%), эмульгатор (0.5 - 2%), синтетические жирные кислоты и отработанные сульфатные щелоки (продолжительность эмульгирования 1 -

3 мин). При температуре выше 268 К эти эмульсии представляют собой жидкости. Размеры измельченных частиц асфальта в эмульсии составляют 0,1 - 5 мкм. Решающее влияние на свойства эмульсии оказывает вид используемого эмульгатора. Для приготовления анионных эмульсий обычно в качестве эмульгатора используют натриевые и калиевые виды мыла, высшие жирные кислоты типа олеиновых и стеариновых, а в качестве поверхностно-активных веществ: сульфатное мыло, алкиларилсульфаты и др.

Катионными эмульгаторами являются длинноцепочечные алифатические четырехпорядковые аммониевые соединения и соли высших алифатических аминов. В анионных эмульсиях используются некоторые бентонитовые глины и синтетические материалы, чаще всего оксиэтиленовые алкилфенолы. Для упрочнения рудных брикетов с эмульсиями обычно применяют термическую обработку, естественную или искусственную сушку.

3.3. Оборудование для брикетирования

Современные брикетные предприятия и промышленные установки оснащаются оборудованием:

для подготовки сырья и связующих веществ (грохоты, дозировочные, смесительные и нагревательные устройства и др.);

для прессования, обработки и упрочнения брикетов (автоклавы, карбонизаторы, сушильные установки, печи для термообработки и др.);

системой пылеулавливания.

В зависимости от свойств исходного материала брикетирование может осуществляться с применением связующих веществ при давлении менее 80 МПа и без связующих веществ – при давлении более 80 МПа.

Роль давления прессования в процессах структурообразования брикетов велика. С приложением давления прессования рыхлая брикетная смесь превращается в прочный кусковой продукт - брикет. Деформируемость брикетной смеси в период прессования является функцией **пластичности**.

Под **пластичностью** понимают способность брикетной смеси изменять свою форму под влиянием внешних сил без образования трещин и сохранять полученную форму после прекращения действия этих сил. С увеличением температуры смеси пластичность возрастает. Обеспечивается высокая брикетирующая способность смеси при прессовании.

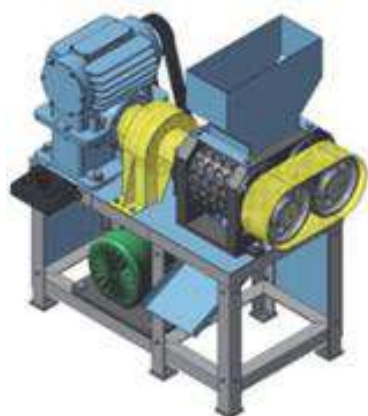
Основным оборудованием для прессования шихты являются различные модификации **вальцовых брикетных прессов** (рис.26).



Рис. 26. Современные вальцовые прессы для производства брикетов

Прессование в вальцовых прессах осуществляется непрерывно между вращающимися навстречу друг другу вальцами (рис. 27). Брикетная шихта поступает на прессующие вальцы из распределительной чаши, в дне которой имеются два прямоугольных отверстия над вальцами, куда шихта направляется вращающейся в чаше лопастью. В желобе, по которому поступает шихта на вальцы, установлен щиток, перемещающийся по вертикали, для регулирования подачи шихты.

а



б

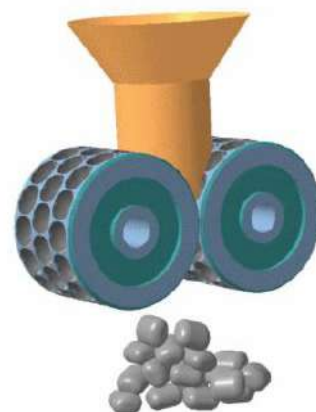


Рис. 27. Вальцовый пресс: а – общий вид, б – прессующие вальцы

На цилиндрической поверхности вальцов крепятся бандажы из твердой износо- и термостойкой стали. На бандаже имеются ячейки в виде различных симметричных полуформ брикетов (рис. 28).



Рис. 28. Бандажи для вальцовый пресс

Иногда у отдельных прессов ячейки фрезеруются только на одном бандаже, а второй остается гладким. Подготовленная шихта подается в пространство между вальцами, заполняя ячейки, которые при вращении вальцов совпадают друг с другом, производя, таким образом, прессование шихты. За линией центров (контактов между ячейками) ячейки расходятся, и готовые брикеты под действием оси упругого расширения и собственной силы тяжести выпадают из ячеек (рис. 27, б). В вальцовых прессах вальцы приводятся в движение от электродвигателя через ременную и зубчатую передачи (рис. 27, а). Формы и размеры ячеек в бандажах прессов изменяют в зависимости от требований потреби-теля. Они определяют конфигурацию и габариты брикетов и являются крите-рием степени уплотнения материала и физико-механических свойств брикетов.



Рис. 29. Вальцовый пресс с коническим шнеком-подпрессовщиком

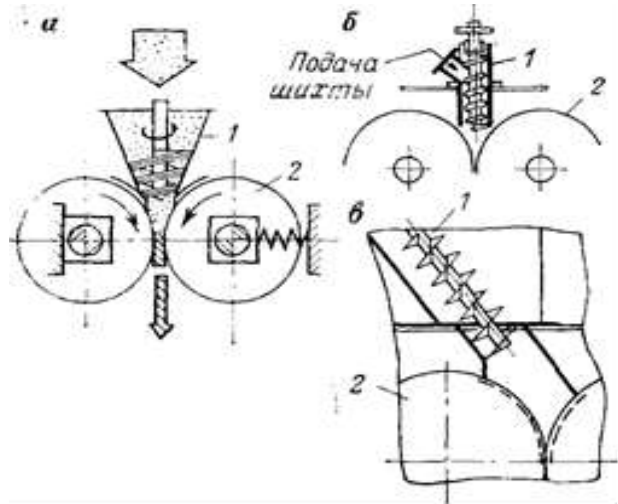


Рис. 30. Шнеки-подпрессовщики: а - с коническим шнеком; б - с цилиндрическим шнеком; в - с наклонным расположением шнеков; 1 – шнек; 2 – валки прессы

Брикетирование является сравнительно дешевым методом окускования полезных ископаемых и продуктов обогащения, и в ряде случаев, может являться альтернативой агломерации и окомкованию.

Обычные вальцовые прессы, предназначенные для брикетирования руд и каменных углей со связующими веществами, развивают давление до 20 - 25 МПа.

В целях максимального заполнения ячеек, сокращения расхода связующих материалов и получения улучшенных по физико-механическим свойствам рудных брикетов в вальцовых прессах применяют различные подпрессовочные агрегаты, которые позволяют довести давление до 80 - 100 МПа (рис. 29).

Наиболее широкое распространение получили различные шнеки-подпрессовщики, расположенные вертикально или под углом к линии центров прессы (рис. 30).

Производительность Q (т/ч) вальцового прессы определяется по формуле:

$$Q = 0,006DBn,$$

где D - масса брикета, г;

B - число ячеек на одном бандаже;

n - частота вращения вальцов, с-1.

В настоящее время по рудному сырью на вальцовых прессах достигнута производительность до 100 т/ч. Вальцовые прессы изготавливают отечественные и зарубежные производители разных типоразмеров (например табл.7)

Таблица 7

Технические характеристики вальцовых прессов

Габариты пресса, мм	1200x1000x150 0	1500x1200x150 0	1800x1500x165 0	2000x2000x180 0
Диаметр валка, мм	345	345	500	600
Ширина валка, мм	145	390	400	500
Усилие прессования, Мпа	100-150	100-150	100-150	100-150
Частота вращения, об/мин	18-20	18-20	12-15	12-15
Мощность двигателя, кВт/ч	5,5	11	15	22
Напряжение питающей сети, В	380	380	380	380
Вес установки, т	0,82	1,1	1,5	2,5
Размер брикета, мм	30x70x22	30x70x22	30x70x22	30x70x22
Плотность брикета, г/см ³	1,1-1,5	1,1-1,5	1,1-1,5	1,1-1,5
Производительность, кг/ч *	1000-2000	2000-4000	4000-6000	6000-10000

3.4. Технология производства брикетов

Процесс производства брикетов в промышленных масштабах состоит из

- подготовки сырья и шихты (дозировки, смешивания),

- прессования,
- упрочнения брикетов (термическое, автоклавное и др.).

Бурые угли и торф брикетируются *без добавки связующих веществ* вследствие наличия в них битумов - органических смол, размягчающихся при температуре 70-80°C и затвердевающих при охлаждении (согласно битумной гипотезе образования брикетов) и под действием молекулярных и капиллярных сил, обеспечивающих сцепление частиц (капиллярная гипотеза) (рис. 31).

Для объяснения процесса брикетирования углей без связующих веществ были предложены различные гипотезы – битумная, гуминово-кислотная, капиллярная, коллоидная, молекулярного прилипания, водородных связей, упругих и остаточных деформаций.

Битумная гипотеза объясняет образование брикетов за счет склеивания частиц битумами, находящимися в угле. При высоких температурах в матричном канале пресса битумы расплавляются, склеивая частицы угля, а затем застывают после охлаждения брикета. Содержание битума и влаги должно находиться в определенном соотношении; вода предохраняет битум от разложения. При недостатке влаги разложившийся битум теряет связующую способность и брикеты становятся хрупкими.

Гуминово-кислотная гипотеза. Гуминовые кислоты, имеющие полярный характер и обладающие коллоидными свойствами, способствуют возникновению молекулярных сил сцепления в брикете вследствие тесного контакта угольных частиц под действием давления.

Капиллярная гипотеза. Образование брикетов происходит под действием молекулярных сил сцепления и сил сцепления водяных пленок, находящихся на поверхности угольных частиц. В брикете имеется два типа капилляров: первичные – внутри угольных частиц и вторичные – образующиеся между отдельными частицами при их уплотнении. Под действием давления часть воды выжимается из внутренних капилляров и заполняет промежутки между угольными частицами, обуславливая появление сил поверхностного натяжения. Для вытеснения воды из капилляров необходимо, чтобы давление прессования было больше капиллярного давления в первичных капиллярах. После снятия давления и упругого расширения брикета в нем появляется отрицательное капиллярное давление, которое обеспечивает прочность.

Коллоидная гипотеза рассматривает молодой бурый уголь как органическую массу, состоящую из 2-х фаз: жидкой - воды и твердой - угольного вещества. Твердая фаза состоит из мельчайших коллоидных гумусовых частиц размером от 1 до 0,01 мкм. Коллоидные частицы обладают электрическими свойствами, а значит, молекулярные силы сцепления имеют электрическую природу. Величина сил сцепления обуславливает механическую прочность брикетов.

Содержание влаги в угле также оказывает большое влияние на прочность брикетов. При недостатке влаги затрудняется скольжение частиц, вследствие чего они не могут занять наиболее выгодного положения, необходимого для образования прочного брикета.

При повышенном содержании влаги увеличивается расстояние между частицами, что приводит к уменьшению сил сцепления между ними.

Гипотеза упругих и остаточных деформаций угля.

Упругие деформации возникают в материале в связи с преодолением химических и физических сил взаимодействия его частиц. Они могут исчезнуть при переходе в остаточные деформации или же накапливаться в брикете и проявляться после снятия давления в виде упругого расширения брикета. При переходе упругих деформаций в пластические происходит упрочнение структуры брикета, для чего требуется определенное время и величина давления прессования.

БРИКЕТИРОВАНИЕ УГЛЯ БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО

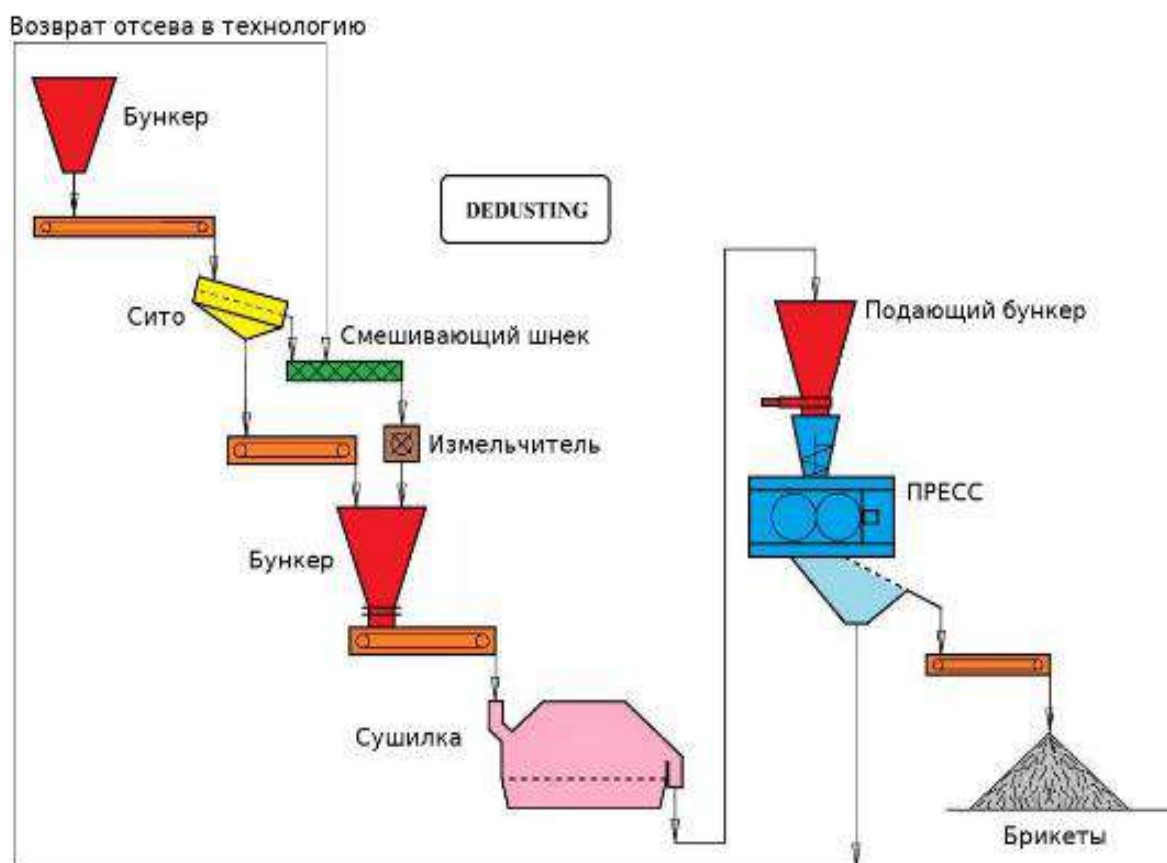


Рис. 31. Схема цепи аппаратов производства угольных брикетов без применения связующих веществ

Каменные угли и антрациты из-за низкого содержания природных битумов брикетируются с добавлением связующего вещества—нефтяных битумов или каменно-угольного пека (рис. 32).

При брикетировании каменных углей со связующими веществами, шихту можно рассматривать как трехфазную систему, состоящую из угля, связующего и влаги. Поверхность угольных частиц неоднородна. Участки поверхности, максимально адсорбирующие вещества, называются активными центрами. Активные центры адсорбируют связующее, которое образует пленку на поверхности. Прочность сцепления пленки с угольными частицами зависит от сил адгезии и когезии.

В процессе прессования происходит уплотнение шихты под действием давления, заполняются пустоты между угольными частицами, выравнивается толщина пленок связующего. В результате полимеризации молекул связующего происходит затвердевание брикетов. На скорость процесса полимеризации влияют как физико-химические свойства связующего вещества, так и влажность, гранулометрический состав угля, давление прессования, скорость охлаждения брикета и другие факторы.

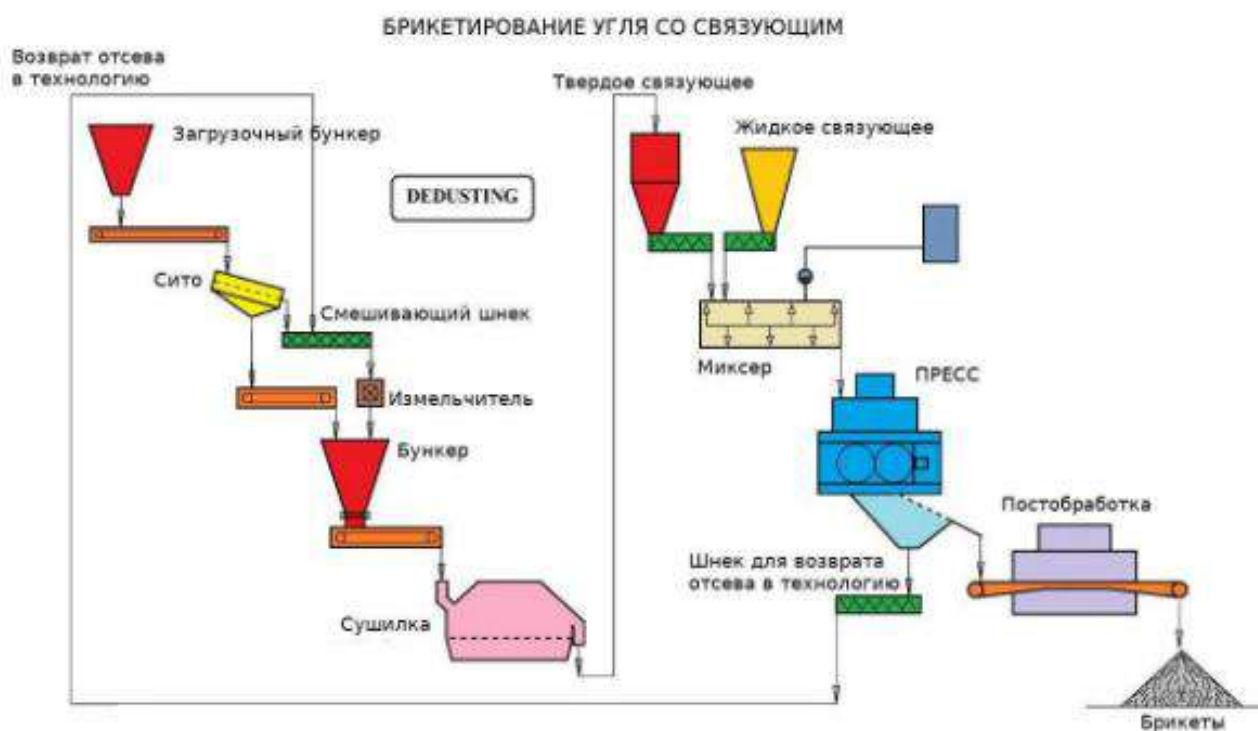


Рис. 32. Схема цепи аппаратов производства угольных брикетов с применением связующих веществ

Рудное сырье в промышленных условиях брикетируется с применением связующих веществ. В последнее время в практике брикетирования рудного сырья и отходов черной металлургии получает распространение

высокотемпературная (800 -1050°C) технология получения брикетов без добавки связующего вещества. Исходный материал в результате нагревания переходит в более мягкие структурные формы, частично спекается и брикетируется в нагретом состоянии. Данная технология в ряде случаев может осуществляться и с добавлением связующих веществ (рис. 33).

Упрочнение брикетов может осуществляться различными способами, из которых сушка вследствие своей высокой эффективности занимает преобладающее положение.

Отгрузка брикетов формально не относится к процессу брикетирования, однако правильная её организация способствует уменьшению потерь брикетов от разрушения при погрузочно-разгрузочных работах и транспортировке, поэтому данный этап подлежит регламентации.

Структурная прочность брикетов окончательно приобретает в процессе охлаждения. Выходящий из пресса брикет имеет температуру, близкую к температуре размягчения связующего.

Снижение температуры достигается пребыванием брикетов в атмосфере подаваемого принудительно или естественно воздуха. В этот период связующие восстанавливают свою структуру до значений максимальной когезии. Интенсивность охлаждения брикетов пропорциональна отношению объема к поверхности охлаждаемых брикетов. Чем выше это отношение, тем медленнее происходит охлаждение. Размеры брикетов и их число, приходящееся на единицу площади охлаждающего устройства, определяют конечный результат охлаждения.

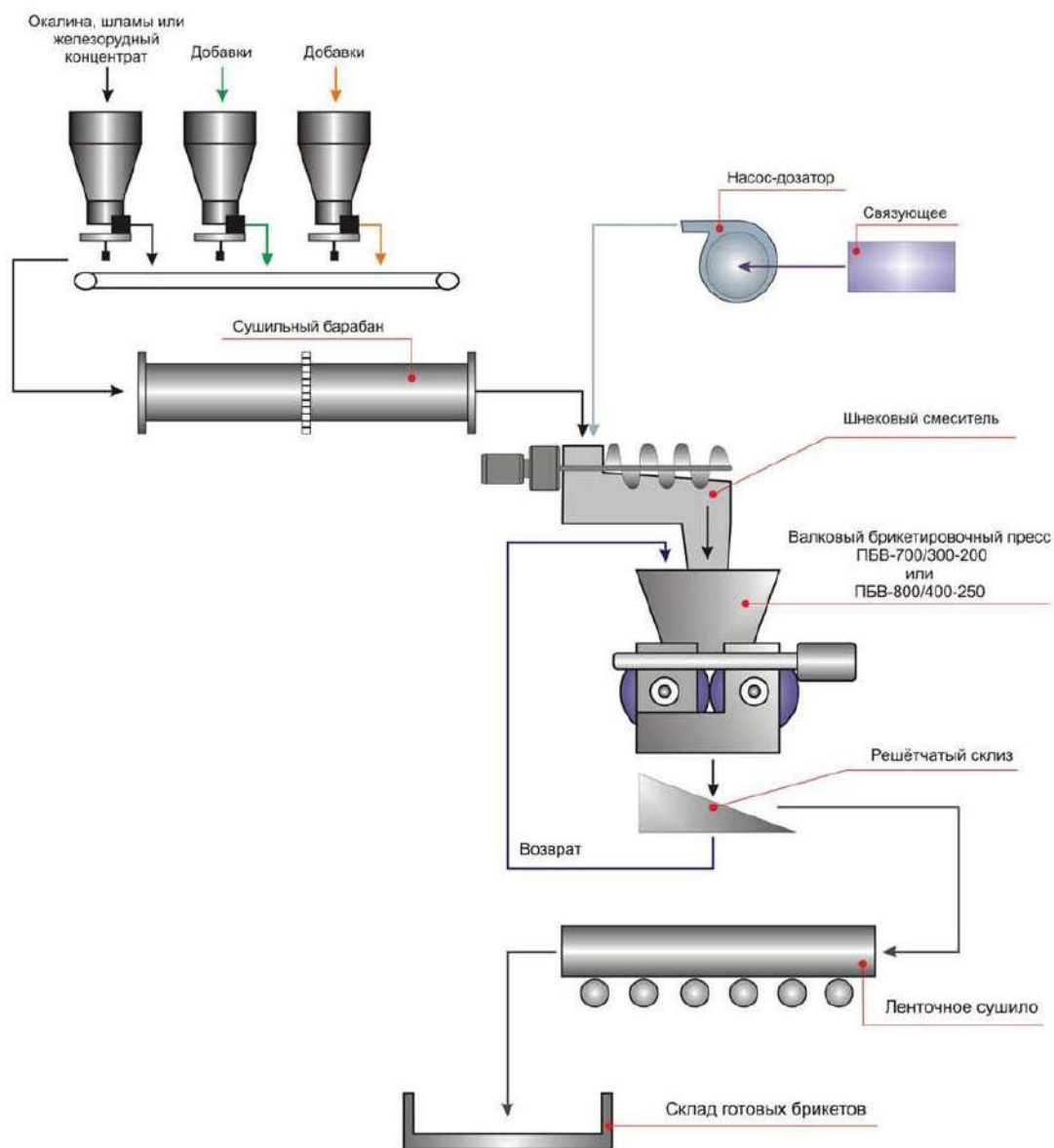


Рис. 33. Схема цепи аппаратов производства железорудных брикетов

На охлаждение влияют влажность и расход связующих веществ на брикеты. При высокой влажности в процессе охлаждения происходит интенсивное испарение. Возникающие трещины в брикетах вызывают падение их прочности.

В зависимости от места сосредоточения влаги трещины могут быть поверхностные или внутренние. Последние очень пагубно сказываются на прочности брикетов.

Скорость охлаждения находится в прямой зависимости от расхода связующего вещества. Если связующего в брикете мало, то охлаждение идет быстро.

Температура падает почти с одинаковой скоростью во всем объеме брикета. Если же содержание связующего высокое, температура снижается медленно и неравномерно.

Поверхностные слои брикета охлаждаются сравнительно быстро, а внутренние - длительное время.

3.5. Качество брикетов

Охлаждение и погрузка **готовых брикетов** - заключительные операции технологического процесса брикетирования. Охлаждение - это операция, обеспечивающая требуемую механическую прочность у готовых брикетов. В процессе охлаждения повышается вязкость связующего за счет снижения температуры брикетов от 60-65⁰С до 20-25⁰С. Для охлаждения брикетов требуется определенное время пребывания их в атмосфере принудительно подаваемого или естественно омываемого воздуха. Интенсивность охлаждения пропорциональна отношению объема брикета к его поверхности. Крупные брикеты охлаждаются медленней, чем мелкие. Ухудшается охлаждение при многослойной укладке брикетов на ленте конвейера. Оптимальной считается загрузка брикетов в один - два слоя.

Охлаждение брикетов идет тем быстрее, чем ниже расход связующего. При малых (6-7%) расходах связующего вещества достигается равномерное снижение температуры во всем объеме брикета. При более высоких расходах температура в брикете понижается медленно и неравномерно. Поверхностные слои охлаждаются значительно быстрее, чем глубинные, что вызывает их деформацию и слипание.

Брикеты с повышенным содержанием связующего требуют применения интенсивных мер охлаждения: обдув воздухом, орошение водой и др. Интенсивность охлаждения зависит от типа структуры связующих. Так, процесс твердения каменноугольного пека проходит в 2,5-3 раза быстрее, чем нефтесвязующего. Для охлаждения брикетов с нефтесвязующим требуются удлиненные тракты конвейеров с сетчатой металлической лентой вместо прорезиненной.

Одновременно применяется интенсивный обдув воздухом и орошение водой. Охлаждение брикетов осуществляется на специальных конвейерах, отличающихся от обычных своей конструкцией, длиной и шириной. Скорость движения такого конвейера не превышает 0,1-0,2 м/с.

Конструкция охладительного конвейера выполняется такой, чтобы брикеты располагались на ленте горизонтальным слоем. Для этого приводной барабан делается диаметром не менее 1500 мм, ширина ленты 1800-2200 мм, а длина в зависимости от производительности от 50 до 300 м. В конвейерах охлаждения используют обе ветви. Брикеты вначале загружаются на верхнюю ветвь и движутся по ней до приводного барабана. Затем, сбрасываются по желобам на нижнюю ветвь и направляются в противоположную сторону.

В большинстве случаев естественное охлаждение оказывается недостаточным. Применяется принудительный обдув брикетов воздухом. Для этого к нижним и верхним ветвям ленты конвейера подводят воздухопроводы от вентиляторов. Иногда на верхней ветви конвейера устанавливается ряд форсунок для орошения брикетов распыленной водой. Форсунки закрепляются в несколько рядов по длине и ширине ленты так, чтобы факел распыления охватывал всю поверхность охлаждаемых брикетов. Благодаря этому водяная пленка с поверхности брикетов мгновенно испаряется, не вызывая влагопоглощения. Для повышения эффекта охлаждения брикеты обдувают горячим воздухом, вызывая быстрое испарение влаги и отдачу тепла. Расход воды составляет около 100 л/ч, скорость обдуваемого воздуха 15- 25 м/с, время обдува 30-40 с.

Известен метод орошения брикетов водным раствором сульфит-спиртовой барды. Пленка барды после высыхания закрывает поры и трещины в брикетах, тем самым повышая их прочность и препятствуя слипанию. Брикеты приобретают гладкую блестящую поверхность, уменьшается пыление при погрузке.

К **готовым брикетам** предъявляется ряд требований по механической прочности, влагопоглощению, конечной влажности, содержанию мелочи и другим параметрам.

В зависимости от свойств полезных ископаемых и технологического назначения брикеты должны быть:

- атмосфероустойчивыми (не разрушаться от температурных воздействий и атмосферных осадков);
- механически прочными (выдерживать достаточно высокие сопротивления удару, истиранию и изгибу);
- достаточно пористыми, обеспечивающими хорошую проницаемость газов при высоких температурах горения и плавки;
- с минимальной долей влаги, наличие которой требует дополнительного расхода тепла на испарение и затрудняет газопроницаемость брикетов;
- температуроустойчивыми (не должны разрушаться от воздействия высоких температур горения и плавки).

Углебрикетное производство позволяет:

- получать высокосортное и транспортабельное топливо улучшенного качества;
- сокращать потери угля при хранении, перевозках и сжигании;
- предотвращать самовозгорание углей;
- привлекать для коксования дополнительные ресурсы неспекающихся марок углей;
- использовать низкокачественные местные виды топлива;
- повышать темпы добычи бурых углей с целью их использования для энергетики и технологической переработки.

В металлургическом производстве использование брикетов позволяет:

- повысить мощность металлургических печей за счет большей насыпной плотности брикетов по сравнению с шихтой;
- обеспечить более быстрое протекание восстановительных процессов;
- снизить расход электроэнергии в электросталеплавильном процессе и общее потребление тепла;
- повысить стабильность свойств выплавляемого металла с одновременным увеличением его извлечения;
- расширить сырьевые ресурсы металлургического передела за счет использования относительно бедных руд, недефицитных видов топлива и углесодержащих отходов производства;
- улучшить условия труда обслуживающего персонала.

Стандартные методики для определения физико-механических свойств рудных брикетов не разработаны. Обычно применяют методы испытаний, используемые для рудных окатышей или угольных брикетов. Рудные брикеты испытывают на все виды механической прочности (сопротивление сжатию, сбрасыванию – удару, истиранию) и термо-механическую прочность и определяют их основные физические свойства (насыпную плотность, пористость, газопроницаемость, термо- и водостойчивость и т. д.).

Обязательным условием получения достоверных данных о качественных характеристиках рудных брикетов является установление их химического состава и восстановимости.

Наиболее оперативным является испытание на сопротивление сжатию на единицу площади или на всю площадь брикета. Испытанию на сопротивление сжатию подвергают не менее 10 брикетов, а показатель прочности определяют как среднее арифметическое всех испытаний. Аналогично проводят испытания на термомеханическую прочность, только образцы брикетов испытывают в нагретом состоянии.

Рудные брикеты испытывают на истирание в барабанах различных диаметров и с различной частотой вращения. После 200 оборотов барабана производится рассев пробы, и выход (в процентах) класса +6,3 мм (по аналогии с обожженными окатышами) или, при больших размерах брикетов, класса +10 - 20 мм принимается за показатель прочности.

Остальные виды испытаний, как правило, соответствуют стандартным испытаниям рудных гранул. Общих браковочных пределов механической прочности рудных брикетов нет, однако для каждого предприятия, в зависимости от требований потребителя устанавливают постоянные или временные браковочные показатели физико-механических и химических свойств брикетов. Средний показатель сопротивления сжатию должен быть не менее 1 кН/см², истиранию – не менее 90 – 95 %, пористость – менее 10 – 15 % для доменных печей и более 20 – 25 % для других потребителей.

Вопросы для самопроверки

1. Классификация процессов окускования полезных ископаемых. Основные понятия.
2. Чем отличаются брикеты от концентрата?

3. В чем суть процесса брикетирования?
4. Подготовка шихты к брикетированию?
5. Состав и свойства брикетной шихты?
6. Роль дисперсности и пластичности брикетной шихты при прессовании?
7. Технологические типы и сорта сырья, применяемые для производства брикетов?
8. Связующие вещества, применяемые для брикетирования сырья?
9. Принцип работы вальцового пресса?
10. Технология производства железорудных брикетов?
11. Технология производства угольных брикетов?
12. Качество брикетов?
13. Особенности брикетирования перед другими процессами окускования?
14. Достоинства и недостатки процесса брикетирования?
15. Современное состояние и развитие брикетирования в России и за рубежом?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы окускования руд и продуктов обогащения, описаны теоретические основы агломерации, окомкования и брикетирования. Приведены достоинства и недостатки процессов, и их основные технологические параметры. Представлены технологические режимы и схемы с учетом современных требований к технологиям и технике окускования. Каждому процессу посвящена отдельная глава учебного пособия. В первой главе отражены основные понятия, технология производства, химизм процесса агломерации. Вторая глава посвящена вопросам окомкования сырья с применением обжиговой и безобжиговой технологий. Рассмотрены связующие и упрочняющие вещества, позволяющие повысить прочность окатышей. В третьей главе описан процесс брикетирования, возможность применения и регулирования давления и связующих добавок для получения прочных брикетов.

Каждая глава сопровождается вопросами для самоконтроля, интерактивными ссылками и интересными историческими фактами, что позволит обучающимся качественно освоить дисциплину «Переработка и использование продуктов обогащения».

Во многих отраслях промышленности существует потребность в окусковании сырьевых материалов, поэтому знания, полученные при изучении данных процессов будут необходимы для анализирования устойчивости технологических процессов и качества выпускаемой продукции горно-металлургического производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф. *Металлургия железа: учебник для вузов.* — Москва: Академкнига, 2007. — 464 с.
2. Маерчак Ш. *Производство окатышей.* — Москва: Metallurgia, 1982. — 232 с.
3. Вегман Е. Ф., Жеребин Б. Н., Похвиснев А. Н. и др. *Металлургия чугуна.* — Москва: Академкнига, 2004. — 774 с.
4. П. И. Черноусов. *Окусование.* Большая российская энциклопедия. Министерство культуры РФ (2005).
5. Коротич В. И. *Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке: Учебн. для вузов.* — Москва: Metallurgia, 1978. — 208 с.
6. Кокорин Л. К., Лелеко С. Н. *Производство окисленных окатышей. Технология, оборудование.* — Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. — 280 с.
7. Маерчак Ш. *Производство окатышей. Пер. со словац.* — М.: Metallurgia. 1982. 232с.:ил.
8. Целиков А.И. *Машины и агрегаты металлургических заводов I том: Учебн. для вузов.* — М.:Metallurgia. 1976. — 416 с.:ил.
9. Любимова, И.П. *Окусование продуктов обогащения рудного сырья: Учеб. пособие.* Магнитогорск: МГТУ, 2006 г.
10. Вегман, Е.Ф. *Окусование руд и концентратов.* - М.: Metallurgia, 1968.
11. Равич, Б.М. *Брикетирование руд.* — Москва : Недра, 1982 — 183 с.
12. Елишевич, А.Т. *Брикетирование полезных ископаемых. Учебн. пособие.* — Москва: Недра, 1989. — 299 с.
13. Коротич В. И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. *Агломерация рудных материалов.* Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. — 400 с.
14. Вегман, Е.Ф. *Металлургия чугуна [Текст]: учебник / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин.* — М.: Академкнига, 2004. - 774с. — ISBN: 5-94628-120-8.
15. Абрамов, А.А. *Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых [Текст]: учебник в 3-х т. Т.2: Технология обогащения полезных ископаемых: учебник для студ. вузов, обучающихся по направлению. «Горное дело» по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / А.А. Абрамов.* — М.: МГГУ, 2004. — 510с.: - (Учебник для вузов). — ISBN 5-7418-0242-7.
16. Беляев, С.В. *Основы металлургического и литейного производства [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.В. Беляев, И.О. Леушин.* — Электрон. дан. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2016. — 306 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/102277>. — Загл. с экрана.
17. Бигеев, В.А. *Основы металлургического производства [Электронный ресурс] : учебник / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев, В.М.*

Салганик. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 616 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/90165>. — Загл. с экрана.

18. Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П. Переработка полезных ископаемых [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.Ю. Дегодя, О.П. Шавакулева — Электрон. дан. — М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2017. № гос. рег. 0321701358.

Учебное текстовое электронное издание

**Дегодя Елена Юрьевна
Гмызина Наталья Викторовна**

ОКУСКОВАНИЕ СЫРЬЯ

Учебное пособие

Ответственность за содержание возлагается на авторов
Издается полностью в авторской редакции

2,57 Мб
1 электрон. опт. Диск
Тираж 20 экз.

г. Магнитогорск, 2023 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Библиотечно-информационный комплекс