

**А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, В.Г. Самойлик,
Л.И. Серафимова, Н.А. Звягинцева,
В.И. Симоненко, К.А. Холодов**



**ОКУСКОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
И ПРОДУКТОВ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ**



Донецк, 2019

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

*А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, В.Г. Самойлик,
Л.И. Серафимова, Н.А. Звягинцева,
В.И. Симоненко, К.А. Холодов*

**ОКУСКОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
И ПРОДУКТОВ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ**

МОНОГРАФИЯ

Донецк - 2019

УДК 622.7

ББК 33.4

О52

Рекомендовано Учёным Советом
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»
в качестве научно-практического издания - монографии
(Протокол № 3 от 26.04.2019 г.)

Рецензенты:

Петренко Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,

Бредихин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Цветная металлургия и конструкционные материалы» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

Авторы:

Корчевский А.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк),

Назимко Е.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология моря» ФГБОУ «Керченский государственный морской технологический университет» (г. Керчь),

Самойлик В.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк),

Серафимова Л.И., кандидат технических наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк),

Звягинцева Н.А., старший преподаватель кафедры «Обогащение полезных ископаемых» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк),

Симоненко В.И., старший научный сотрудник лаборатории «Электрошлакового переплава» кафедры «Металлургия стали и сплавов» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк),

Холодов К.А., начальник основного производства обогатительной фабрики «Вектор-Юг», г. Шахтинск, Ростовская обл., РФ.

А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, В.Г. Самойлик, Л.И. Серафимова, Н.А. Звягинцева, В.И. Симоненко, К.А. Холодов

О52 Окускование минерального сырья и продуктов его переработки : монография / А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, В.Г. Самойлик, Л.И. Серафимова, Н.А. Звягинцева, В.И. Симоненко, К.А. Холодов; ГОУВПО «ДОННТУ». – Донецк : ДОННТУ, 2019. – 338 с. : ил. 64, табл. 105.

В монографии рассмотрены и проанализированы основные понятия об утилизации тонкозернистых полезных ископаемых, возможность получения из них высококачественной продукции для бытового и промышленного потребления. Приведены теоретические основы физического воздействия горного и брикетного производства на различные элементы биосферы, позволяющие более обоснованно разрабатывать стратегию развития производства окускования и брикетирования.

Монография будет полезна для работы студентам, аспирантам и преподавателям технических и горных специальностей, работникам промышленных предприятий, инженерно-техническим работникам.

УДК 622.7

ББК 33.4

© А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, В.Г. Самойлик, Л.И. Серафимова, Н.А. Звягинцева, В.И. Симоненко, К.А. Холодов, 2019

© ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	10
1 ОКУСКОВАНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ...	12
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ	16
2.1 Общие сведения.....	16
2.2 Теоретические основы брикетирования как процесса окускования.....	19
2.3 Связующие вещества, применяемые при брикетировании....	28
2.4 Классификация полезных ископаемых по брикетирующей способности.....	35
2.5 Основные факторы, влияющие на процесс брикетирования со связующими.....	37
2.6 Брикетирование углей.....	39
2.7 Технология брикетирования руд.....	40
2.8 Брикетирование железосодержащих материалов.....	43
2.9 Брикетирование в цветной металлургии	56
3 АГЛОМЕРАЦИЯ	58
3.1 Общие сведения о процессе агломерации.....	58
3.2 Теоретические основы процесса агломерации.....	65
3.3 Удаление вредных примесей при агломерации.....	77
3.4 Технология производства агломерата.....	82
3.5 Оптимальная крупность компонентов шихты и ее приготовление.....	84
4 ОКОМКОВАНИЕ	88
4.1 Общие сведения о процессе окомкования.....	88
4.2 Теоретические основы процесса окомкования.....	91
4.3 Методы упрочнения окатышей.....	96
4.3.1 Применение обжига для упрочнения окатышей.....	96
4.3.2 Безобжиговые методы упрочнения окатышей.....	102
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ	109

5.1	Методика проведения лабораторных исследований.....	109
5.2	Исследование технологии брикетирования антрацитового штыба.....	112
5.2.1	Исследование режимов брикетирования шихты с цементом	113
5.2.2	Исследование режимов брикетирования антрацитовой шихты с лигносульфонатом.....	117
5.2.3	Исследование режимов брикетирования антрацитовой шихты с органическими связующими.....	122
5.3	Исследование технологии брикетирования смеси антрацитового штыба и концентрата угля марки Г.....	125
5.3.1	Свойства и гранулометрический состав компонентов.....	125
5.3.2	Исследование режимов брикетирования шихты А+Г со связующими.....	128
5.3.3	Исследование устойчивости брикетов к воздействию влаги.....	134
5.3.4	Предлагаемый технологический режим брикетирования и разработка технологической схемы брикетной установки	137
5.4	Исследование технических возможностей производства композиционных угольных брикетов, содержащих отходы.	144
5.4.1	Общий план проведения экспериментов. Характеристика горючих компонентов брикетирования.....	146
5.4.2	Определение базовых режимов прессования и термической обработки однокомпонентных угольных брикетов при различных связующих.....	148
5.4.3	Исследование технологии брикетирования композиционных брикетов, содержащих древесные отходы.....	159
5.4.3.1	Исследование технологии брикетирования композиционных брикетов с жидкими связующими.....	160
5.4.3.2	Экспериментальные исследования процесса брикетирования композиционной шихты с твердыми связующими.....	165
5.4.3.3	Исследование технологии брикетирования композиционной шихты с битумной эмульсией.....	170
5.4.3.4	Исследование влияния на свойства брикетов парафи-	

новой добавки.....	174
5.4.4 Выводы по результатам экспериментальных исследований технологии брикетирования композиционных брикетов.....	174
5.4.5 Регламент и технологические режимы процессов подготовки шихты, прессования и термообработки.....	176
5.4.5.1 Регламент и режимы процесса брикетирования шихты с водорастворимыми связующими.....	176
5.4.5.2 Регламент и режимы процесса брикетирования однокомпонентной шихты с водорастворимыми жидкими и сухими связующими.....	178
5.4.5.3 Регламент и режимы процесса брикетирования композиционной шихты с водорастворимыми жидкими и сухими связующими.....	185
5.4.5.4 Регламент и режимы процесса брикетирования композиционной шихты с битумной эмульсией.....	192
5.4.6 Определение удельной теплоты сгорания композиционных брикетов.....	195
5.4.7 Рекомендации по разработке технологической схемы брикетирования композиционных брикетов	197
5.4.8 Выводы по результатам экспериментальных исследований технической возможности производства композиционных брикетов, содержащих отходы.....	200
5.5 Выводы по результатам экспериментальных исследований технологии брикетирования углесодержащих материалов в лабораторных условиях.....	201
6 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ СО СВЯЗУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ.....	205
6.1 Современное состояние вопроса вторичного использования промышленных отходов.....	207
6.2 Современные способы и технологии брикетирования вторичных железосодержащих материалов.....	212

6.3	Характеристики используемого сырья и его качество. Требования к качеству брикетов.....	214
6.4	Методика исследования качества брикетов, полученных из железосодержащих материалов.....	225
6.5	Основные факторы, влияющие на процесс окускования, их особенности и оценка влияния на свойства брикетов.....	228
6.6	Особенности выбора параметров технологии брикетирования.....	233
6.6.1	Критерии выбора технологии и её параметров.....	234
6.6.2	Выбор способа получения прочных брикетов.....	235
6.6.3	Влияние масштабного эффекта.....	237
6.6.4	Определение основных параметров технологии брикетирования.....	237
6.7	Экспериментальные исследования и разработка технологий производства композиционных брикетов.....	241
6.7.1	Исследуемые материалы.....	242
6.7.2	Математическое моделирование оптимизации гранулометрического состава многокомпонентной брикетируемой шихты.....	244
7	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	249
7.1	Брикетиrowание шихты магнитной и слабомагнитной фракций с неорганическим комбинированным связующим (серия 1).....	249
7.2	Брикетиrowание шихты магнитной и слабомагнитной фракций с портландцементом в качестве связующего (серия 2).....	254
7.3	Брикетиrowание шихты магнитной и слабомагнитной фракций с полимерным органическим двухкомпонентным связующим (серия 3).....	260
7.3.1	Схема проведения эксперимента, исходные данные и параметры эксперимента.....	260
7.3.2	Математическое моделирование процесса брикетирования.....	

ния с двухкомпонентным органическим полимерным связующим.....	262
7.3.3 Результаты проведенных экспериментальных исследований.....	268
7.4 Разработка технологических схем и рекомендаций по промышленному применению разработанных технологий.....	273
7.4.1 Разработка варианта технологической схемы процесса брикетирования.....	274
7.4.2 Рекомендации по промышленному применению разработанной технологии и внедрению её на предприятии.....	277
7.5 Выводы по результатам исследования процесса брикетирования железосодержащих материалов.....	277
8 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ДОМЕННОМ И СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	280
8.1 Опыт Новолипецкого меткомбината в решении проблемы утилизации железосодержащих отходов.....	283
8.2 Опыт Челябинского металлургического комбината в решении проблемы подготовки железосодержащих отходов к утилизации.....	285
8.3 Разработки фирмы «ЭкоМашГео» по утилизации железосодержащих отходов.....	285
8.4 Разработки Института черных металлов (ИЧМ) НАН Украины.....	291
8.5 Разработки Приазовского государственного технического университета.....	292
8.6 Опыт Первоуральского Новотрубного завода по утилизации промасленной окалины.....	293
8.7 Разработки НП «Экологический региональный центр» по утилизации железосодержащих отходов.....	295
8.8 Опыт других организаций, занимающихся производством оборудования для утилизации железосодержащих отходов...	296

9 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДОНЕЦКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА К УТИЛИЗАЦИИ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	298
9.1 Исследование процесса брикетирования железосодержащих отходов Донецкого металлургического завода.....	299
9.1.1 Исследование применения различных связок для брикетирования шихты базового состава (смесь 1).....	301
9.1.2 Исследование применения связующего СБ для брикетирования шихты базового состава (смесь 1), режима термообработки брикетов.....	305
9.1.3 Высокотемпературные испытания на размягчение и восстанавливаемость.....	308
9.2 Опытно-промышленное опробование технологии брикетирования на технологической базе КП Коммунакоресурсы.....	310
9.3 Требования к составу и техническим характеристикам оборудования для линии по производству железосодержащего брикета.....	312
9.4 Расчет эффективности замены в шихте ДП окатышей ЛебГОКа и СевГОКа на брикеты из отходов ДМЗ.....	313
9.5 Выводы по результатам исследований процесса брикетирования железосодержащих отходов Донецкого металлургического завода.....	322
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	324
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	326
Приложение 1.....	335
Приложение 2.....	338

ВВЕДЕНИЕ

При обогащении полезных ископаемых в соответствии с используемыми технологиями чаще всего конечными являются два продукта – концентрат и отходы. Современные технологии не позволяют получать концентраты, пригодные для непосредственного использования при последующей переработке, это может быть технически невозможно или нецелесообразно. Поэтому широко распространены способы окускования разнообразных концентратов полезных ископаемых и методы термической переработки топлива.

Необходимость окускования мелкозернистых руд и концентратов рассмотрена на примере железных руд, при добыче которых образуется много мелочи. Так, в Кривбассе при подземной добыче богатой железной руды выход класса +25 мм не превышает 30%. Еще более мелким является концентрат обогащения руды, имеющий крупность -74 мкм. Непосредственная загрузка рудной мелочи, а тем более концентрата в доменные печи невозможна из-за высоких потерь материала при его выносе печными газами.

Шихта загружается в доменную печь сверху на колошник печи и, непрерывно опускаясь, проходит всю высоту рабочего пространства домны (28-30 м) за 5-6 часов, постепенно превращаясь в шлак, чугун и газ в ходе доменного процесса. Навстречу шихте движутся печные газы – продукты горения кокса у фурм доменной печи, а также газообразные продукты этих и ряда других сложных реакций, которые протекают в нижних слоях печи. Скорость газа столь высока, что они проходят печь при обычном давлении газа на колошнике в 1,1 атм за 3-5 с. При этом из печи газами выносятся частицы размером 5-6 мм. При повышенном давлении в рабочем пространстве печи (до 2,5 атм) скорость газов изменится до 5-6 м/с, и из печи будут выноситься частицы размером 3-4 мм.

Таким образом, при загрузке пылеватых руд значительная их часть выносится газами и оседает в пылеуловителях. Полная плавка пылеватой руды возможна только при условии ее окускования. Тем

более окускование важно для концентрата, имеющего гораздо меньшие размеры частиц. Несмотря на большой вынос, часть пылеватых частиц руды все же усваивается печью, т.к. они попадают в пустоты между крупными кусками руды и не выносятся газом.

Сопротивление любого канала проходу газа тем больше, чем меньше его диаметр и чем больше его кривизна. Поэтому газопроницаемость пылеватых руд особенно низкая, а потери напора достигают максимальных значений. В смеси с относительно крупной рудой мелкие частицы располагаются в зазорах между крупными и затрудняют проход газов. Создаются условия, при которых значительная часть пылеватой шихты слабо обрабатывается газами. Это связано с тем, что газ стремится проходить через столб шихты на участках с малым сопротивлением, где преобладают относительно большие куски руды и кокса. В этом случае степень использования химической и тепловой энергии газа оказывается неудовлетворительной, что ведет к замедлению опускания шихты (тугой ход печи) или к полной остановке движения шихты в печи (подвисание шихты).

Во многих случаях при работе на пылеватых рудах газ прорывает столб шихты в одном или нескольких местах и в образовавшиеся каналы устремляется весь поток печного газа. Ясно, что это нарушает нормальную эксплуатацию доменных печей.

Все эти трудности заметили еще в середине XIX века, когда начали использовать бедные мелковкрапленные руды. Для того, чтобы получить хороший продукт для плавки, руду надо было обогатить, а перед этим еще и раскрыть в ней ценные компоненты, что привело к снижению крупности готового концентрата. В связи с этим возник вопрос окускования концентратов. В настоящее время используют три метода окускования полезных ископаемых: брикетирование, агломерацию и окомкование.

Значительные капитальные затраты на строительство и эксплуатацию фабрик окускования рудного сырья сравнительно быстро компенсируются экономией кокса и увеличением производительности доменных печей при выплавке металла.

1 ОКУСКОВАНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время известны три принципиально разных способа окускования материалов: прессование или брикетирование, спекание или агломерация, окомкование или производство окатышей.

Первоначально окускование вели исключительно путем брикетирования. Данный тип окускования был разработан в 1880 г. шведским инженером Грендалем и широко использовался в начале XX века для всех типов руд, как цветных, так и черных металлов. В качестве примеров можно привести Керченский металлургический завод (1915 г.), Александровский завод (в настоящее время завод им. Петровского, г. Днепропетровск), Юзовский (Донецкий) металлургический завод, Таганрогский металлургический завод и ряд других.

Брикетирование руд и концентратов основано на их прессовании, при котором получают брикеты одинаковой формы. В 20-х годах брикетные фабрики были вытеснены гораздо более производительным процессом – агломерацией. В настоящее время брикетированию подвергается угольная мелочь и незначительное количество руд цветных металлов (окисленные никелевые руды, сульфидные медные концентраты, цинковые концентраты и ряд других).

Агломерация – процесс окускования полезных ископаемых, который основан на горении твердого топлива в слое частиц полезного ископаемого. Это термический способ окускования мелких руд, концентратов и колошниковой пыли путем их спекания при нагревании. За счет выделяемого при горении тепла полезные ископаемые расплавляются с последующей кристаллизацией расплава при остывании. Получаемый продукт называют агломератом.

Процесс агломерации также 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 на колосниковую решетку загружалась сульфидная руда и через пустотелую цапфу под решетку подавался воздух под давлением. Вначале горячим воздухом руда зажигалась, а затем шла подача холодного воздуха. Характерной чертой нового процесса было полойное 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, которая при сгорании выделяет необходимое тепло, достаточное для полного окискования руды. В таком виде данный процесс получил название агломерация.

Однако агломерация обладает рядом недостатков, основными из которых являются: содержание в отходящих газах значительного количества окиси углерода; невозможность ведения процесса агломерации тонкоизмельченных концентратов без их предварительного окомкования; относительно низкая прочность агломерата. Из-за невозможности транспортировать агломерат на большие расстояния аглофабрики сооружаются вблизи или на территории металлургических заводов.

Возить влажный концентрат на аглофабрики не выгодно из-за издержек, связанных с перевозкой воды, кроме того, в зимнее время он смерзается. Предварительная сушка концентрата требует дополнительных энергозатрат. Так постепенно пришли к необходимости окомкования концентратов. Производство окатышей – это процесс окомкования увлажненных тонкоизмельченных частиц руды, при котором образуются шарообразные гранулы разных размеров с последующим упрочнением.

Первое упоминание об этом процессе относится к 1912 г. в работах шведского инженера Андерсона. Позже было опубликовано несколько работ в Германии и 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 в США, и ученые 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 штате Миннесота введена в строй первая опытно-промышленная установка. Позже аналогичные установки сооружаются в Англии, Германии и Швеции. В 1955 г. при освоении железорудных месторождений в районе Верхних Озер помимо обогатительных фабрик пущена фабрика по производству окатышей.

В последнее время процесс окускования в железорудной промышленности имеет интенсивное развитие по нескольким причинам: высокая прочность окатышей, которая дает возможность транспортировать их на большие расстояния при наличии большого количества перегрузочных операций; равномерная крупность окатышей и невысокое содержание в них мелочи, что обуславливает высокую газопроницаемость шихты; более экономичный тепловой баланс, нежели при агломерации (расход тепла сокращен более чем в два раза); отсутствие в отходящих газах окиси углерода; относительно низкая производительность агломашин при спекании тонкоизмельченных концентратов.

На Украине первая опытная установка появилась в 1955 г. на Южном горно-обогатительном комбинате (ЮГОК), затем сооружаются окомковательные фабрики на Центральном, Северном и Полтавском горно-обогатительных комбинатах.

Агломерация и производство окатышей, в отличие от брикетирования, получили большее распространение, так как эти техноло-

гии имели достаточно высокую производительность. Общее количество окомкованного сырья в мировой металлургии представлено до 50% агломератом, до 20% окатышами, остальные кусковые богатые руды и брикеты. Брикетов производится почти столько же, сколько и окатышей в металлургии, но это брикеты главным образом из молодого бурого угля (более 50%) и из шихты, составленной слабоспекающимся и неспекающимся каменным углем для расширения базы коксования и получения бездымного топлива (около 10-15%) [1].

Все рассмотренные способы окускования имеют ряд одинаковых технологических особенностей. Условно технологический процесс окускования полезного ископаемого можно разбить на несколько этапов, включающих одну или несколько операций:

- подготовка сырья к окускованию (дробление, грохочение, сушка, усреднение, дозировка компонентов и приготовление шихты, нагрев или охлаждение перед окускованием);
- окускование полезного ископаемого (брикетирование, агломерация, окомкование);
- обработка полученного окускованного материала (дробление, сушка, обжиг, охлаждение);
- отгрузка и складирование.

Эти операции отличаются применяемым оборудованием или параметрами режимов его работы, но как технологические операции они присущи всем этим способам. Принципиальная разница между технологиями окускования находится в основной технологической операции, которой считается та, где образуются куски из пылевидного материала необходимой прочности.

В настоящее время появилось еще одно направление применения процессов окускования – для окускования железосодержащих отходов доменного и коксохимического производств, которые могут быть вторичным сырьем внутри собственного производства. Это позволяет использовать их в виде относительно дешевого сырья, которое содействует значительному снижению затрат на шихту, повышению качества и конкурентоспособности продукции, а главное, уменьшению себестоимости готовой продукции.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ

2.1 Общие сведения

Одним из прогрессивных методов сокращения потерь, повышения качества и улучшения эффективности использования материальных ресурсов является брикетирование.

Брикетирование – процесс механической переработки тонкозернистых и порошкообразных полезных ископаемых, их концентратов и отходов производства. Технология позволяет получить механически и термически прочный сортовой продукт – брикет, имеющий определенную геометрическую форму, размеры и массу.

Брикетирование, как способ окомкования, появилось раньше агломерации и окомкования. В 20-х годах брикетные фабрики были вытеснены гораздо более производительным процессом – агломерацией. Это было связано с ростом объемов производства, увеличением производительности и совершенствованием конструкции оборудования для получения агломерата и окатышей. Однако, в ряде малотоннажных технологий, особенно в цветной металлургии, брикетирование получило дальнейшее развитие. В настоящее время брикетированию подвергается угольная мелочь и незначительное количество руд цветных металлов (окисленные никелевые руды, сульфидные медные концентраты, цинковые концентраты и ряд других).

Политехнический словарь [2] определяет брикетирование как производный термин от французского слова «brique» (брикет), которое переводится как небольшой кирпич. Брикетирование обозначает процесс переработки мелкого материала в куски геометрически правильной и однообразной в каждом случае формы, практически одинаковой массы – брикеты. Близким по звучанию словом, имеющим общий корень, является французский термин «briquet», то есть огниво, что предполагает высокотемпературное состояние. То есть пер-

воначальный смысл брикетирования заключался в получении кирпича путем формования исходного материала уплотнением с последующей температурной обработкой.

Целью брикетирования является формирование, окускование мелких, пылеватых, слабоструктурных материалов в куски относительно больших размеров и термическая их обработка для придания свойств, пригодных по механической прочности к дальнейшей металлургической переработке [3].

Основной задачей брикетирования как метода окускования измельченных материалов является получение прочных брикетов заданной плотности и пористости. Проблема недостаточной прочности брикетов должна решаться комплексно по нескольким направлениям: получение высокопрочных связующих; разработка различных технологических приемов, позволяющих повысить прочность брикетов; а также применение технологий потребления, не требующих высоких нагрузок на брикеты.

Брикетирование имеет существенные отличия от других методов окускования – сплавления, спекания, агломерации и окатывания. При брикетировании первоначальное связывание частиц осуществляется за счет сил адгезии и когезии, а окончательное скрепление частиц в единое целое происходит в результате реакций цементации, протекающих в местах контакта. При этом состав частиц не меняется, а материал брикета представляет собой механическое соединение различных частиц в одно целое, при котором они сохраняют свои свойства, являясь, по сути, конгломератом.

Количественной оценкой брикетирования может служить плотность, пористость и прочность брикетов [3].

Брикеты используются в угольной, коксохимической, металлургической, химической и других отраслях промышленности, а также как бытовое топливо.

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

– атмосферостойкими (не разрушаться от температурных воздействий и атмосферных осадков);

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

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

Брикетирование, как обособленный технологический процесс окускования полезных ископаемых, складывается из следующих производственных операций:

- подготовка сырья к прессованию: дробление, грохочение, измельчение и сушка; подготовка связующих веществ; дозировка компонентов брикетной шихты, их смешение, нагрев и охлаждение брикетной шихты перед прессованием;
- прессование брикетной шихты с приложением требуемых усилий, определяемых в зависимости от физико-химических свойств, петрографического и минерального состава брикетируемого материала;
- обработка «сырых» брикетов с целью ускорения их затвердевания (охлаждение, пропарка, карбонизация, сушка, восстановительный обжиг и др.);
- складирование и погрузка готовых брикетов.

Разнообразие технологических приемов и специфичность отдельных видов брикетируемых материалов не позволяют создать единой теории брикетирования полезных ископаемых. В данной работе рассматриваются лишь основные принципы механизма структурообразования брикетов со связующими и без них.

2.2 Теоретические основы брикетирования как процесса окускования

Брикетирование полезных ископаемых представляет собой сложный физико-химический процесс взаимодействия разобщенных твердых частиц. Сущность прессования брикетов состоит в сближении частиц материала на расстояния, обеспечивающие контакт частиц между собой или через прослойки связующих и воды за счет усилий прессования. При этом проявляются силы сцепления. Эти силы обеспечивают прочность куска за счет слипания частиц под действием сил межмолекулярного притяжения и образования комплексных соединений в местах контакта частиц.

Соединение частиц во влажно прессованных брикетах происходит в результате выпадения в осадок и кристаллизации в местах контакта частиц растворенных в воде веществ при удалении влаги при сушке. Отсюда следует, что для получения прочных брикетов необходимы следующие условия:

1. Обеспечение плотной упаковки частиц в брикетах, что дает максимальную площадь контакта частиц. Это достигается оптимально-высокими давлениями прессования, соответствующим гранулометрическим составом, прочностью, формой и подвижностью частиц. Поскольку на поверхности частиц находятся воздух и масла, препятствующие сближению, должны быть предусмотрены условия, обеспечивающие удаление этих веществ.

2. Применение различных упрочняющих материалов – связующих.

3. Использование различных способов упрочнения брикетов. Упрочнение брикетов является обязательной стадией брикетирования для полусухого и влажного прессования. В настоящее время получили популярность различные способы упрочнения свежеприготовленных брикетов. Это – сушка (вылѐживание на воздухе), карбонизация, автоклавирование, пропарка, а также спекание.

Процесс образования брикета из сыпучего материала

происходит в такой последовательности. Материал, засыпанный в прессформу, имеет между частицами большое количество пустот, заполненных воздухом. Величина отдельных пустот и их общий объем зависят от крупности частиц и гранулометрического состава материала. При наложении давления на штемпель частицы материала сближаются и пустоты уменьшаются, а воздух выдавливается наружу через зазор между штемпелем и стенкой прессформы.

Энергия давления при этом расходуется на преодоление сил трения между частицами при их перемещении относительно друг друга, на трение о стенку прессформы, а также частично на разрушение некоторой доли частиц. Поэтому уплотнение материала по высоте засыпки происходит не одинаково. Вначале уплотняется слой материала у самого штампея, а затем давление передается на нижний слой. При этом величина давления и степень уплотнения с глубиной уменьшаются. Таким образом, давление, испытываемое материалом, и его плотность по высоте засыпки будут уменьшаться. Сближение частиц в каждом слое и уплотнение материала будут возрастать с увеличением усилия на штемпель, называемого давлением прессования. Разница в давлении, испытываемая материалом, и его уплотнение вверху и внизу засыпки будет уменьшаться с увеличением давления на штемпель и уменьшением первоначальной высоты засыпки. По мере сближения частиц между их поверхностями возникают силы сцепления. Проявление сил сцепления будет тем сильнее, чем больше поверхность соприкосновения частиц, т. е. чем больше будут сближены частицы. Под влиянием давления в результате возникновения сил сцепления между частицами происходит деформация прессуемого материала и образование куска – монолита.

Происходящая при сжатии деформация материала может быть: необратимой, остаточной или частично обратимой, или упругой. Величина возникающей необратимой и обратимой деформации и их соотношение зависит от пластических свойств материала и характеризует его способность изменять свою форму и объем под

влиянием прикладываемого давления. Упругая деформация восстанавливает систему в прежнее состояние после снятия давления и приводит к нарушению структуры полученного брикета и ослаблению связи между частицами. Упругие деформации могут ослабевать и со временем переходить в остаточные. Это происходит, например, если увеличить время пребывания получаемого брикета под давлением.

Таким образом, формирование брикета является результатом последовательно протекающих процессов уплотнения и упрочнения сыпучего материала под влиянием приложенного давления и ослабления структуры брикета после снятия давления.

При перемещении штампея в прессформе по мере сжатия и уплотнения материала давление на штампель со стороны материала растет (рис. 2.1).

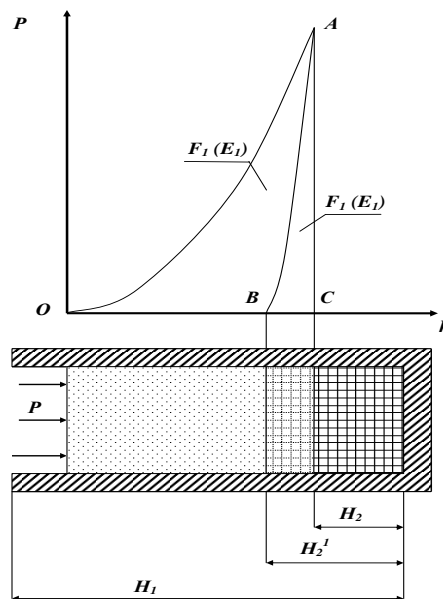


Рисунок 2.1 – Диаграмма прессования

По оси ординат отложено давление на штампель, или давление прессования, по оси абсцисс – ход штампея. Изменение давления на штампель будет происходить по кривой OA , которая характеризует свойство материала уплотняться при сжатии. Работа, затраченная на процесс сжатия, будет эквивалентна площади F_1 фигуры OAC .

При снятии давления со штампея под влиянием расширяющегося материала он будет перемещаться в обратную сторону. Изменение давления на штампель от упругого расширения сжатого материала будет происходить по кривой AB . Площадь фигуры BAC эквивалентна работе, совершаемой сжатым материалом при его упругом расширении.

Величина кривой AB и площадь F_2 фигуры BAC характеризуют упругие свойства материала, т. е. способность его к расширению после сжатия. При быстром, неравномерном или одностороннем снятии давления в брикете возникает перепад напряжений, который вызывает снижение прочности.

Отношение первоначальной высоты материала H_1 в прессформе к высоте его под давлением H_2 называется коэффициентом уплотнения и определяется по формуле:

$$K_y = H_1 / H_2 .$$

Отношение высоты брикета H'_2 после упругого расширения к высоте его под давлением H_1 называется коэффициентом упругого расширения:

$$K_y = H'_2 / H_1 .$$

По величине K_c и K_{yp} можно судить о брикетированности материала. Чем больше коэффициент K_y и меньше K_{yp} , тем материал более склонен к брикетированию.

Каждый материал характеризуется своей диаграммой прессования. Кроме характера изменения объема материала при брикетировании диаграмма прессования говорит о количественном соотношении между полезной энергией E_1 , затрачиваемой на пластические деформации, в результате которых материал уплотняется и упрочняется, и энергией упругих деформаций E_2 сжатого материала при снятии давления, ослабляющих структуру брикета. Поэтому более полно о брикетированности материала можно

судить по показателю пластичности:

$$K = F_1 / F_2 = E_1 / E_2.$$

Так для высокопластичных молодых мягких бурых углей Украины хорошей брикетируемости показатель пластичности составляет 14-19 и затем снижается с увеличением твердости угля.

Для получения брикетов с необходимыми свойствами в шихту добавляют различные связующие вещества. Формирование структуры брикетов со связующим следует рассматривать как один из видов склеивания разобщенных твердых материалов с помощью клеев (адгезивов). Одним из основных технологических параметров брикетирования композиционной шихты является тип применяемого связующего. Связующими (клеями, адгезивами) называются вещества, способные соединять разобщенные твердые тела и сохранять их прочный контакт в условиях значительных внешних воздействий.

Технология брикетирования мелких материалов должна учитывать физико-химические свойства компонентов шихты, заданные свойства готовых брикетов и взаимодействия частиц между собой и со связующим.

Главное требование к связующему – его универсальность, т.е. высокая адгезионная способность ко всем компонентам брикета. Тип и расход применяемого связующего оказывает наибольшее влияние на показатели брикетов и на себестоимость их производства.

При брикетировании многих видов измельченного сырья, обладающих недостаточными адгезионными свойствами, даже при высоких давлениях (180 МПа и более) обычным холодным прессованием получать прочные брикеты без их спекания не представляется возможным. В таких случаях используют связующие – вспомогательные материалы, улучшающие слипание частиц и повышающие прочность брикетов до заданного уровня [3].

Основу структурообразования составляют процессы взаимного расположения и взаимосвязи отдельных контактирующих элементов

системы. Агрегирование определяют прилипание и склеивание. Прилипание как начальная ступень процесса склеивания связана с образованием упорядоченной клеевой пленки на поверхности твердого тела (субстрата).

Для прилипания характерно вязкотекучее (иногда жидкое) состояние связующего. Следующие процессы приводят к структурированию (восстановлению) клея до его максимальной прочности. В результате твердые частицы, покрытые связующим, объединяются в брикет. Брикет из любых полезных ископаемых со связующим можно рассматривать как дисперсную систему, где дисперсная среда – связующее, а дисперсная фаза – полезное ископаемое.

Прочность любой многофазной системы, образованной в результате прилипания и склеивания адгезива и субстрата, характеризуется адгезией, аутогезией и когезией. Адгезия характеризует молекулярные взаимодействия, возникающие между поверхностями двух разнородных жидких или твердых тел, приведенных в контакт. Она определяется силами сцепления молекул, находящихся в поверхностном слое соприкасающихся тел (фаз). Эти силы называются силами адгезии. На первом этапе адгезионные взаимодействия связаны с эффективным растеканием жидкого клея по поверхности твердого тела, т.е. со смачиванием. Без смачивания склеивание невозможно.

Смачивание представляет собой процесс растекания жидкого адгезива по твердой поверхности за счет действия сил притяжения между молекулами жидкой и твердой фаз. Смачивание связано с адсорбцией жидкого тела на твердой поверхности, т.е. с самопроизвольным исчезновением последней и появлением поверхности раздела фаз.

Для практического количественного определения смачиваемости жидкостью твердого тела пользуются значением поверхностного натяжения и краевого угла смачивания.

Поверхностное натяжение – это мера напряженности нескомпенсированных молекулярных сил в межфазном поверхностном слое, направленная по касательной к поверхности жидкости.

Поверхностное натяжение зависит от ряда физических и химических факторов. С увеличением температуры жидкости поверхностное натяжение падает, а при критической температуре равно нулю. Увеличение температуры выполняет роль ускорителя перемещения поверхностных молекул в объем жидкости, препятствуя их обратному перемещению в газообразную фазу.

Краевой угол смачивания определяет энергию на поверхности раздела, т.е. энергию адгезива. Адгезив, находящийся на поверхности твердого тела, образует каплю. Касательная к поверхности капли, проведенная через точку, лежащую на линии раздела жидкости и твердого тела, образует с ней угол, называемый краевым углом смачивания. При этом, если краевой угол смачивания равен нулю, то смачивание полное, если он более 90° , то смачивание – очень трудное. Если угол смачивания равен 180° , смачивание полностью отсутствует. Однако смачивание не дает основания судить о прочности взаимодействия клея и субстрата. Важно знать интенсивность связей на поверхности раздела двух фаз, где происходит смачивание.

Рассмотрим два взаимодействующих вещества, у одного из которых молекулярное поле сил интенсивней, чем у другого. Очевидно, молекулы первого вещества будут покидать поверхность с большей статической скоростью. Его концентрация в поверхностном слое станет ниже, чем в объеме, свободная поверхностная энергия уменьшится. Концентрация первого вещества на поверхности другого компонента повысится. Процесс концентрации (сгущения) одного компонента на поверхности другого, сопровождающийся понижением поверхностного натяжения последнего, называется адсорбцией.

Адсорбция зависит от содержания в адгезиве соединений, которые даже при небольших концентрациях способны понижать поверхностное натяжение на границе раздела фаз. Они называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). Они выступают как главная сила адсорбционных взаимодействий. От их содержания зависит интенсивность адсорбционных процессов.

На адсорбцию влияет также активность субстрата. Энергия твердого вещества во многом зависит от расположения молекуляр-

ных цепей в поверхностном слое. Наиболее высокий энергетический эффект достигается при расположении цепной молекулы перпендикулярно к твердой поверхности по так называемому типу «часток-кол». Такая ориентация отвечает наименьшему запасу свободной энергии.

Силы адсорбционных притяжений могут быть обусловлены ковалентными, ионными, поляризационными и дисперсионными связями. Возможно одновременное существование нескольких типов адсорбционных связей. Усилению хемосорбции способствуют добавки ПАВ. Высокая интенсивность адсорбционных взаимодействий присуща электрическим силам.

Наряду с указанными видами адсорбционных связей существуют межмолекулярные (дисперсионные) связи. Они свойственны всем молекулам и действуют между любыми атомами независимо от наличия электрического заряда. Особое место принадлежит водородной связи, которая занимает промежуточное положение между межмолекулярными и химическими связями. Водородная связь оказывает влияние на структуру и свойства адгезивов.

Особой категорией для оценки адгезии между связующим и твердым телом служит липкость адгезивов. Термин «липкость» характеризует способность связующих к адгезии при незначительном давлении прилипания. Максимальная липкость у связующих проявляется при переходе из стеклообразного в высокоэластичное состояние.

В качестве связующих можно использовать самые разные вещества, обладающие «клеящим» (адгезионным) действием и способные твердеть при нормальных условиях, или при изменении условий (нагревании, охлаждении, изменении рН среды, взаимодействии с отвердителем и др.) Однако, на практике к связующим предъявляется целый ряд дополнительных требований, в частности, они должны быть не токсичными, не дефицитными, достаточно дешевыми, быть устойчивыми к атмосферным воздействиям и т.д. Связующее является определяющим условием прочности и, в значительной мере, восстанавливаемости брикетов. Увеличение расходов

связующего повышает прочность брикетов. Однако, это приводит не только к снижению содержания полезных компонентов в брикетах, но и к значительному их удорожанию.

Для окускования связующие могут применяться как в жидком, так и в твердом виде, однако, наибольшее распространение получили связующие, используемые в жидком виде. Это связано с тем, что связующее в жидком виде имеет ряд преимуществ по сравнению с твердым связующим: жидкофазное связующее легко диспергируется и легко перемешивается с материалом. Твердые связующие, в основном, применяются при высокой влажности брикетируемых материалов: при этом снижаются расходы на обезвоживание.

Поскольку добавки таких материалов могут составлять от нескольких единиц до 10% и более, они должны отвечать следующим требованиям [3]:

- 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, иначе 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 отвердения;
- 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;
- отличаться стойкостью при хранении, хорошо транспортироваться.

Кроме того, связующие вещества должны:

- обладать высокими аутогезионными свойствами, то есть обеспечивать высокую холодную и горячую прочность при минимальном расходе связующего;
- обеспечивать быструю схватываемость;
- вносить минимальное количество вредных, балластных и других примесей, которые опасны для обслуживающего персонала и снижают качество конечного продукта;
- не ухудшать условий плавки брикетов;
- быть распространенными и иметь невысокую стоимость;
- не требовать сложных приемов и операций по их использованию;
- обеспечивать минимальную влагостойкость.

2.3 Связующие вещества, применяемые при брикетировании

Связующие вещества, применяемые при брикетировании, подразделяют на три типа: минеральные (неорганические), органические и комбинированные [3].

Неорганические связующие обеспечивают достаточную прочность и водостойкость брикетов без термообработки, но требуют оптимального ситового состава шихты и длительного времени набора оптимальной прочности. Основной недостаток – существенное повышение зольности брикета.

К распространенным неорганическим связующим следует отнести гашеную известь, жидкое стекло, глиноземистый и портландский цементы. Однако, многие из них имеют существенные недостатки. Так, гашеная известь и портландцемент при нагревании отдают гидратную влагу и теряют прочность, жидкое стекло содержит значительное количество щелочей и двуокись кремния, а глиноземистый цемент, к тому же, чрезвычайно дорогой. При этом лучшие вяжущие свойства проявляет жидкое стекло и глиноземистый цемент.

Неорганические минеральные вяжущие (цемент, известь, тонкодисперсные шлаки), которые одновременно играют роль флюсовой составляющей во многих металлургических процессах, несмотря на все их достоинства, не могут обеспечить необходимое состояние брикетируемой массы для получения на выходе из пресса «сырых» брикетов необходимой прочности. Создание условий твердения вяжущего в брикетах, аналогичных тем, которые применяются при изготовлении строительных изделий (пропарки, сушки), аппаратурно и технологически усложняет процесс. Это не решает проблему обеспечения высокого выхода как «сырых», так и товарных брикетов (выход целых брикетов не превышает 55-60%). Поэтому в большинстве предлагаемых технологий и реализованных на практике процессов дополнительно к неорганическому минеральному вяжущему, обеспечивающему конечную прочность брикетов, вводят жидкие (компаундные) связующие, позволяющие получить достаточно высокий выход и прочность «сырых» брикетов. Однако, даже в этом случае для достижения удовлетворительной прочности и влагостойкости готовых брикетов необходима их длительная выдержка перед отправкой потребителям [4, 5].

Сульфитно-спиртовая барда (ССБ), несмотря на высокие вяжущие и клеящие свойства, представляет собой высокосернистый (3-6%), легкорастворимый и термически непрочный (разрушается при 350-500°C) продукт [6]. Поэтому использование ССБ в качестве связующего для брикетирования целесообразно только на предприятиях цветной металлургии (в производстве меди, никеля) в преде-

лах их территории с обеспечением условий транспортировки и хранения брикетов, исключая воздействие влаги.

Растворимое (жидкое) стекло представляет собой водный раствор силиката натрия (или калия), который после затвердевания обеспечивает как высокую влагостойкость, так и термическую прочность (до 900-950°C) брикетов.

Брикеты на жидком стекле из различных рудных, топливных и минеральных материалов были с положительным результатом испытаны в шахтных, мартеновских, ферросплавных и электросталеплавильных печах, а также при введении легирующих добавок сталей [6, 7]. Растворимое стекло не вносит примесей, так как оксид натрия и диоксид кремния содержатся практически во всех рудных материалах. Негативное влияние на работу доменной печи и условия плавки оксидов щелочных металлов (Na_2O , K_2O) и диоксида кремния, по мнению авторов работ [8, 11, 12], может быть нивелировано правильным подбором состава шлака по соотношению $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ для обеспечения его подвижности и хорошей поглощаемости щелочей.

Таким образом, растворимое стекло сочетает в себе практически все положительные качества как органических, так и минеральных вяжущих. Однако применение растворимого стекла в качестве связующего до настоящего времени не нашло достаточно широкого применения в промышленности. Основной причиной, ограничивающей широкое использование растворимого стекла, является проведение длительной (20-40 мин) операции по подготовке шихты к прессованию и необходимости проведения дополнительных мероприятий, обеспечивающих получение брикетов необходимой прочности. Практически все разработчики предусматривали введение в технологическую цепочку или дополнительные аппараты (сушка брикетов при температурах 150-250°C в течение 20-40 мин, или выдержку в автоклаве), или значительных площадей для хранения и накопления брикетов, где в результате длительного выдерживания (10-15 суток) происходило их естественное твердение до требуемой прочности [10-12].

Анализ изменений вязкостно-реологических и клеящих свойств жидкого стекла показал, что последние зависят от его концентрации, содержания кремнезема и температуры (табл. 2.1 и рис. 2.2).

Таблица 2.1 – Показатели качества жидкого стекла

Плотность, г/см ³	Модуль (SiO ₂ /Na ₂ O)	Консистенция	Содержание SiO ₂ , %	Содержание H ₂ O, %
1,27	3,6	Жидкая	21,0	70,4
1,34	3,3	Жидкая	26,5	65,6
1,41	3,3	Жидкая	29,0	62,1
1,53	2,6	Густая	35,0	51,5
1,71	2,1	Вязкая	37,0	45,0
1,92	1,6	Очень вязкая	37,0	40,0

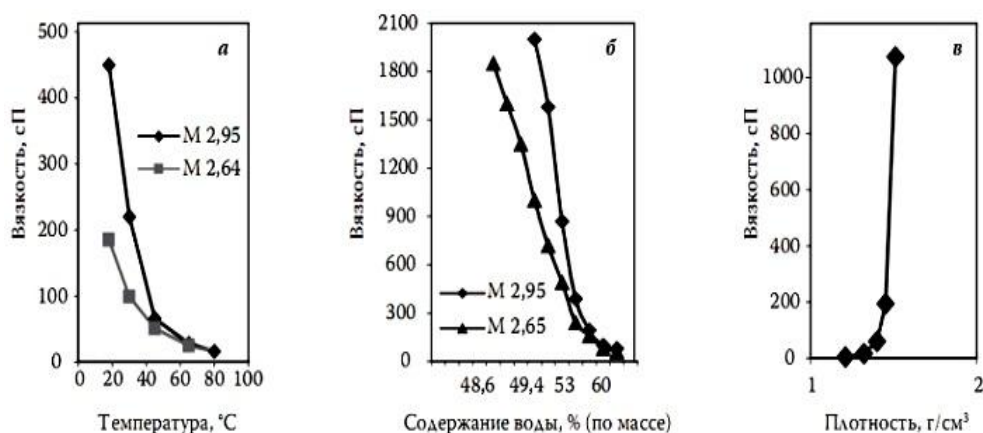


Рисунок 2.2 – Зависимость вязкости жидкого стекла от температуры (*а*), концентрации (*б*) и плотности (*в*)

При постоянном составе жидкого стекла тепловое воздействие не приводит к существенному изменению реологических свойств (рис. 2.2, *а*), в то время как вязкость неуклонно растет с повышением концентрации растворов (рис. 2.2, *б*, *в*). Выпариванием можно сконцентрировать раствор жидкого стекла до такого состояния, что он перестанет растекаться при обычной температуре, и добиться такой

вязкости, что при нагревании получаемая сгущенная масса полностью теряет текучесть. Существенную роль играет при этом содержание диоксида кремния: чем оно больше, тем выше вязкость и тем быстрее происходит «затвердевание» растворимого стекла [13, 14].

Органические связующие. К распространенным органическим связующим относят каменноугольные и нефтяные смолы, мелассу, отходы гидролизной и целлюлозной промышленности, и тому подобное. Они обеспечивают весьма прочные и водостойкие брикеты при расходах 6-7%. Но необходимость предварительной сушки материала, сложная технология подготовки шихты к брикетированию и значительные эксплуатационные затраты при брикетировании обуславливают низкую рентабельность производства при небольших производительностях установки брикетирования.

К водорастворимым связующим относятся отходы целлюлозной промышленности (лигносульфонаты, сульфатное мыло), сахарного производства (меласса), отходы мукомольной промышленности (крахмалосодержащие вещества). Основным недостатком данных связующих – слабая водостойкость получаемых брикетов, что требует применения гидрофобизирующих добавок и термической обработки брикетов. Всё это повышает эксплуатационные затраты.

Лигносульфонат технический (ЛСТ) является отходом целлюлозной промышленности и выпускается в порошкообразном и жидком виде. Анализ технических условий ТУ 13-0281036-05-89 показал, что в качестве связующих целесообразно использовать ЛСТ марок А, В, Е и Ж, содержание сухих веществ в которых составляет не менее 47%. Они представлены в основном солями лигносульфоновых кислот – натриевыми, кальциевыми, магниевыми или аммониевыми. Массовая доля золы в сухом веществе ЛСТ составляет 10-22%, а содержание серы достигает 5-10%. Жидкие лигносульфонаты имеют темно-коричневый цвет, плотность не менее 1230 кг/м³ и хорошо растворяются в воде. При их высушивании образуется твердый хрупкий продукт, который после измельчения может использоваться в качестве порошкообразного связующего. Предел прочности на растягивание высушенных образцов достигает 0,4-0,6 МПа.

Достоинством ЛСТ является пожаро- и взрывобезопасность, низкая токсичность. Следует отметить, что связующие свойства лигносульфонатов ухудшаются из-за изменений технологии варки целлюлозы. В настоящее время получают в большей степени натриевые и магниевые ЛСТ (вместо кальциевых), которые обладают пониженной эффективностью.

Отходы производства муки и крахмала, шлифовки риса и обработки ржи, испорченное зерно и т.п. являются крахмалосодержащими веществами. Данные продукты представляют собой экологически чистые вещества, не оказывающие вредные воздействия при переработке. Содержание крахмала в них достигает 80%. Связующие свойства крахмала основаны на том, что в присутствии влаги при повышенных температурах он клейстеризуется, образуя вязкие дисперсии (гели), которые при наложении давления связывают угольные частицы. Положительный момент – возможность дозирования связующего в сухом виде, что позволяет повысить влажность исходного сырья для брикетирования.

Меласса (патока) – продукт переработки сахарной свеклы, содержащий до 45-50% сахаров в виде фруктозы, глюкозы и сахарозы, сиропообразная жидкость тёмно-бурого цвета со специфическим запахом. В процессе сушки происходит разжижение мелассы, что может способствовать растеканию ее по поверхности частиц твердой фазы. Недостатком данного связующего является повышенная гигроскопичность. Патока (меласса), как и ССБ, не обеспечивает влагостойкость и термическую прочность брикетов.

Поэтому ее используют в основном с цементом или известью [15].

В последние годы в дорожном производстве при укладке асфальта нашла применение катионная битумная эмульсия. Эмульсия готовится путем интенсивного смешивания компонентов, приведенных в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Состав катионной битумной эмульсии

№ пп	Компонент	Содержание, %
1	Битум	67,0
2	Вода	31,45
3	Эмульгатор «Dinogam SL»	0,25
4	Соляная кислота	0,21
5	Бутанол NS 198	1,09

Преимущество данного связующего – водостойкость брикетов, отсутствие операции термообработки готовых брикетов. К недостаткам можно отнести необходимость нагрева брикетируемой шихты до 80-85°С, незначительное обводнение исходного материала.

Общим недостатком органических связующих является их пиролиз или выгорание при высоких температурах с потерей прочности, а также внесение в брикеты значительного количества серы [15].

Большинство органических связующих могут использоваться для получения брикетов с высокими показателями холодной прочности. При нагревании таких брикетов связка разрушается или сгорает, в результате чего они теряют большую часть прочности, рассыпаются под давлением верхних слоев материала и выносятся потоком газов из агрегата. Более устойчивые связующие при сгорании образуют спекшийся шлак, который скрепляет частицы брикетов, препятствуя их разрушению [15].

Комбинированные связующие состоят из смеси различных связующих. Они могут содержать несколько компонентов, улучшающих свойства основного связующего, или «организованных» по принципу – основное связующее активизирует добавки. Обычно это дает хорошие результаты. Эти смеси позволяют улучшить положительные и снизить отрицательные свойства. Например, смесь, содержащая жидкое стекло и лигносульфонат, вносит меньшее количество щелочей, кремнезема или серы, чем каждое связующее от-

дельно, при одновременном обеспечении высокой механической прочности брикетов [16].

Производство прочных брикетов без высокотемпературного упрочнения обычно связывают с разработкой новых типов связующих, не содержащих вредных примесей. За рубежом получены новые виды полимерных связующих, способных выдерживать температуры до 1200°C и выше.

2.4 Классификация полезных ископаемых по брикетирующей способности

Важным свойством материалов, обеспечивающим получение прочных брикетов, является прессуемость, под которой следует понимать способность материала под влиянием сжатия образовывать брикет определенной формы. Прессуемость характеризуется формованием и уплотненностью [21-24].

По брикетирующей способности все полезные ископаемые и отходы производства делятся на две основные группы – *А* и *Б* (рис. 2.3). Группа *А* представлена полезными ископаемыми и отходами, брикетируемыми без связующих веществ. Группа *А* имеет четыре подгруппы:

- *подгруппа а* – 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* – материалы, обладающие коллоидными свойствами, в большинстве случаев пылеватые и слабоструктурные ископаемые (бурые угли молодые, торф, хромоникелевые руды и др.);

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

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

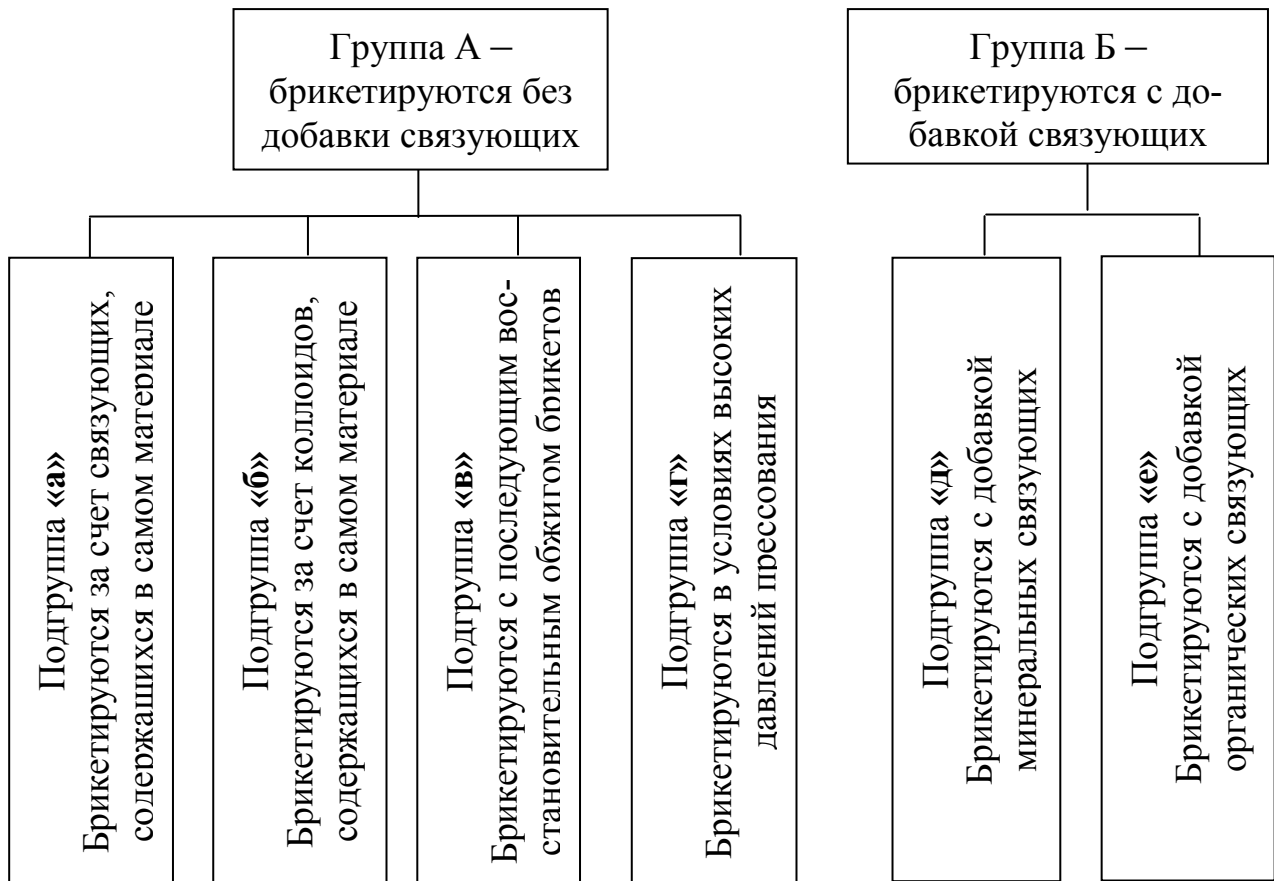


Рисунок 2.3 – Классификация полезных ископаемых и отходов производства по брикетирующей способности

К группе **Б** относятся 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* – вещества, брикетируемые с присадкой связующих минерального происхождения (руды, отходы производства);
- подгруппа *е* – материалы, брикетируемые с присадкой

связующих органического происхождения (каменные угли, антрациты, коксовая мелочь и некоторые руды).

2.5 Основные факторы, влияющие на процесс брикетирования со связующими

Основное влияние на процесс брикетирования оказывает гранулометрический состав твердой фазы. Оптимальное сочетание крупных и мелких частиц в шихте способствует плотной упаковке зерен при их брикетировании. Преобладание в шихте крупных зерен приводит к образованию пористой структуры. Количество и величина пор (пустот) оказывает отрицательное влияние на прочность брикетов.

Температурные воздействия благоприятно сказываются на адсорбционной активности твердых частиц. Усиливается колебательный процесс поверхностных молекул, что приводит к отщеплению некоторой их части. Образуется активные свободные радикалы, взаимодействующие между собой и связующим. В результате нагрева достигается тонкослоеобразование связующих по твердой поверхности и усиливаются связи в их адсорбционных слоях. Недостаточный нагрев приводит к повышенному расходу связующего.

Влага, находящаяся на поверхности минеральных зерен, создает гидратную пленку, толщина которой определяет прочность связи субстрата со связующим. Избыток влаги не позволяет связующим прочно прилипнуть к субстрату, смачивающая способность уменьшается, адгезия падает, механическая прочность брикетов падает. Для снижения вредного влияния поверхностной влаги применяют термическую сушку. Иногда полезно применение химической модификации поверхности частиц посредством ПАВ. В результате на твердой поверхности образуются нерастворимые соединения, способствующие прочному соединению субстрата со связующим.

Доминирующая роль в формировании структуры брикетов принадлежит связующим. Брикет из любых полезных ископаемых со

связующим можно рассматривать как дисперсную систему, где дисперсная среда – связующее, а дисперсная фаза – полезное ископаемое.

В процессах структурообразования брикетов велика роль давления прессования. С приложением давления рыхлая брикетная смесь превращается в прочный 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. Процесс уплотнения брикетной смеси можно представить следующим образом. Вначале происходит быстрая усадка. Затем она замедляется и по мере уплотнения смеси приближается к предельной величине. Первыми уплотняются верхние слои, находящиеся ближе к формообразующим поверхностям. Давление прессования распространяется волнообразно, уменьшаясь в глубину брикета. Плотность брикета определяется давлением и временем прессования.

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 связующее восстанавливает свою структуру до значений максимальной когезии. На охлаждение оказывают влияние влажность и количество связующих в брикетах. При высокой влажности в процессе охлаждения происходит интенсивное испарение. Возникающие при этом трещины вызывают падение прочности брикетов. Скорость охлаждения находится в прямой зависимости от расхода связующего. 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.

2.6 Брикетирование углей

Брикетирование углей – одно из направлений превращения мелких классов углей в бытовое топливо. По сравнению с обычным топливом брикеты обладают более высокими теплотехническими показателями: высокой теплотой и полнотой сгорания, лучшей транспортабельностью, большей устойчивостью при хранении.

По назначению угольные брикеты бывают бытовые и промышленные. Основным потребителем бытовых брикетов является население, которое получает их в насыпном виде или расфасованными в мешки небольшой массы. Для придания бытовым брикетам повышенной термической и механической прочности, а также бездымности, их подвергают термообработке.

Промышленные брикеты используют как сырье для полукоксования (бурые угли) и коксования (каменные и бурые угли). Каменноугольные брикеты могут выполнять функцию теплоизоляционного материала и основного сырья для получения различных видов электродов.

Основные качественные показатели брикетов сводятся к следующим параметрам:

- теплота сгорания (зольность);
- механическая прочность;
- водостойкость;
- термическая прочность.

Теплота сгорания брикетов определяется только качеством и составом брикетируемой шихты и может целенаправленно изменяться.

Показатели брикетного топлива зависят как от состава шихты, так и от ряда технологических параметров брикетирования, в том числе:

- гранулометрический состав брикетируемого угля;
- тип и расход связующего компонента;

- давление прессования, определяемое типом применяемых прессов;
- режим термообработки брикетов (при применении водорастворимых связующих).

Производство угольных брикетов 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.

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

2.7 Технология брикетирования руд

Брикетирование каждого вида руды имеет свою специфику, требует применения того или иного связующего, введения шихтовочных добавок. Режимные параметры окускования руд диктуются требованиями, предъявляемыми металлургическим процессом к брикетам.

Основными регламентирующими параметрами рудных брикетов являются механическая и термическая прочность, атмосферостойчивость, пористость и плотность. В то же время каждый металлургический процесс предъявляет дополнительные требования к брикетам. Для доменной плавки содержание железа в брикетах должно быть не менее 40%. Прочность на сжатие не должна быть ниже 15-25 МПа, на сбрасывание – 85-90%. Пористость и плотность

должны находиться соответственно в пределах 5-10% и 4200-4600 кг/м³.

Среди специфических параметров брикетов, обусловленных требованиями металлургического процесса, следует указать на восстановимость и газопроницаемость. Восстановимость брикетов – способность рудного сырья с определенной скоростью отдавать связанный с металлом кислород газу-восстановителю. Газопроницаемость тесно связана с пористостью самих брикетов и пористостью укладки брикетов в слое.

Приведенные данные характеризуют требования показателей качества брикетов лишь некоторых металлургических переделов и специфического сырья. Эти требования могут изменяться в зависимости от состава руды, использования отходов производства, вида связующего, условий брикетирования и характера металлургического процесса.

Подготовка компонентов шихты к брикетированию связана с обеспечением требуемых кондиций по крупности, влажности и содержанию металла в руде. Крупность руды зависит от ее твердости. Для малопрочных руд крупность должна быть не более 1 мм. Более крупные зерна в процессе приложения давления прессования растрескиваются. Происходит образование больших новых поверхностей, не покрытых связующими. Для руд средней и высокой прочности верхний предел крупности должен составлять 6 мм. Практикой установлено, что наиболее эффективно брикетируются железные руды при крупности 0-5 мм. Если эти руды окусковываются без связующих, то верхний предел крупности снижается до 1-2 мм. К этой категории сырья могут быть отнесены пыль и шламы металлургических заводов. По своему химическому составу названные продукты содержат от 40 до 70% чистого железа, кальций марганец, магний и др.

Особое значение в процессе подготовки руды, рудных концентратов и отходов производства к брикетированию имеет влажность. Наличие в брикетируемом материале 6-8% влаги отрицательно влияет на прочность брикетов. В каждом отдельном случае остаточ-

ное содержание влаги определяется в зависимости от свойств руды, величины и формы рудных зерен и гранулометрического состава.

Значительное место в технологии брикетирования руд занимает подготовка связующих, которая в зависимости от типа применяемого связующего существенно отличается.

Подготовка сульфит-спиртовой барды (ССБ) к брикетированию заключается в определении плотности и расхода связующего. Обычно эти параметры находятся в пределах соответственно 1100-1300 кг/м³ и 5-8%. Брикет на ССБ, как правило, изготавливаются небольших размеров (30-50 см). Иногда ССБ является добавкой к основному связующему. В этих случаях ее расход не превышает 1-2%.

Известь, как связующее, используется в виде пушонки, известкового молока, а также в комбинации с другими видами связующих. Известь является хорошим связующим при брикетировании железных, марганцевых, медных и других руд. Расход ее колеблется в пределах от 5 до 20%. Повышенные расходы обусловлены использованием извести в качестве флюса. Брикетную смесь с сухой известью пропаривают в смесительных барабанах. Брикеты с известью, выходя из пресса, легко разрушаются. Для их упрочнения применяется гидротермальная обработка – автоклавирование. Иногда удовлетворительные результаты получают путем естественного упрочнения за счет карбонизации атмосферной углекислотой в условиях естественного обдувания брикетов воздухом.

Довольно широко в качестве связующего используются цементы. Особенно хорошо зарекомендовали себя портландцемент и шлаковый цемент. В некоторых случаях используют комбинированные цементы, получаемые из железных, отвалных цементов и известняка. Брикеты с цементом из пресса удаляются тяжело, иногда даже вручную. Они отличаются низкой прочностью в сыром виде. Брикетирование с цементом сдерживается из-за нежелательной компоненты – кремнезема.

Натриевое растворимое стекло может применяться для брикетирования в жидком и твердом виде. Твердое вещество – силикат-глыба требует дробления и измельчения с последующим растворением в воде. Плотность раствора в зависимости от модуля основности колеблется от 1450 до 1250 кг/м³. Расход связующего составляет 3-6%. Он может быть сокращен добавкой к растворимому стеклу электролита в количестве до 0,5%.

Связующее для сыпучих материалов марки СБ (СБ-М) (ТУ У 24.6-00190443-145-2002) – продукт нефтехимического синтеза. Представляет собой вязкую жидкость с высокими адгезионными свойствами, с температурой размягчения 28-40°С, плотностью – 1,15-1,20 г/см³. В настоящее время применяется на ОАО «МК Азовсталь» в качестве связующего для изготовления леточной массы на доменных печах.

2.8 Брикетирование железосодержащих материалов

Все железорудные материалы – пылеватые руды, измельченные концентраты, колошниковая пыль, окалина, чугунная стружка и другие – можно окусковывать агломерацией и брикетированием, а после измельчения до необходимой крупности также и окомкованием в окатыши. Но при выборе способа окускования учитывают физико-химические свойства исходных материалов, наличие топлива, требования потребителей и даже географическое положение рудника или карьера и металлургического завода. Каждый из способов окускования имеет свои недостатки и преимущества, которые также влияют на их выбор [25].

Усиление в последние десятилетия тенденции к использованию в металлургическом производстве все большего количества мелкофракционных материалов – концентратов глубокого обогащения, а также шламов и пыли, приводит к ухудшению процессов агломерации, усложняет окатывание. В этих условиях традиционные методы окускования сырья агломерацией и окатыванием исчерпали свои ре-

зервы и возможности. Так, при существующем техническом уровне сложно получить металлизированный агломерат или прочные окатыши с высоким содержанием свободного углерода. В то же время подобные материалы изготавливают с помощью брикетирования. Однако брикетирование в черной металлургии пока еще не получило должного признания. Доля сырья, окомкованного брикетированием, в настоящее время не превышает 2%, хотя потребность в таком методе окускования может быть на порядок выше. В основном это брикетированные металлизированные материалы, флюсы и ферросплавы для производства стали [25].

Технология производства металлизированного сырья или предварительно восстановленных материалов представляется как альтернатива доменному производству, и как вообще самостоятельный металлургический процесс, а не как способ окускования. Для металлизации также требуется окомкованное сырье, причем более прочное, чем для доменного производства. Восстановлению могут подлежать кусковые руды, агломераты, окатыши и брикеты.

Окускование брикетированием рудной мелочи, а впоследствии и концентратов, стало осуществляться с 1880 года. В основном брикетирование использовали в цветной металлургии при окусковании пылеватых руд. Но потом этот метод стали применять и при окусковании железорудной мелочи, образующейся в значительных количествах, и концентратов, которые нельзя было использовать непосредственно в доменных печах.

Брикетирование в металлургическом производстве применяется ограниченно, несмотря на то, что 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.

Более широкому применению и дальнейшему развитию брикетирования препятствуют повышенные требования по химическому составу полезных рудных компонентов, прежде всего, железа. Так, для доменных брикетов содержание железа установлено на уровне 55-60%, а для сталеплавильных – 62-64% и более [27]. Чтобы это требование выполнялось, количество оксидов железа должно достигать 80-90%. С учетом балластных, вредных и сопутствующих компонентов это составит все 100%. Добавка связующих материалов неизбежно снижает содержание железа в брикетах ниже необходимого уровня, а получение прочных брикетов из одного концентрата без включения других компонентов достаточно сложно. В то же время содержание железа в агломерате существенно ниже.

Требование по высокому содержанию железа в брикетах можно выполнить только с использованием глубоко обогащенных концентратов, окалины или частично восстановленных материалов, или применением восстановления или высокотемпературного спекания. На данном этапе развития металлургических технологий дефицит таких материалов и способов упрочнения делают брикетирование в целом чрезмерно сложным и избыточно затратным, а потому и мало используемым.

Другие способы упрочнения, такие как автоклавирование, карбонизация или применение специальных синтетических связующих при их высокой стоимости также не обеспечивают брикетам необходимых характеристик.

Альтернативой использованию связующих, которые вносят вредные компоненты, может явиться новый подход к формированию составов брикетов, то есть получать их не в виде моносырья, состоящего преимущественно из оксидов железа, а в качестве комплексного, поликомпонентного материала, имеющего сбалансиро-

ванный химический состав. Соответствующей компоновкой смесей можно достичь не только высокие металлургические свойства, но и получить заданную прочность.

Многие исследователи в союзе с промышленниками занимаются разработкой способов брикетирования вторичных железосодержащих материалов разного состава. Наибольшее применение получили технологии, представленные ниже.

Государственное предприятие «Институт по проектированию металлургических заводов» является крупнейшей проектной организацией, осуществляющей проектные работы в странах СНГ и ряде зарубежных стран. Одним из основных направлений деятельности института является разработка мероприятий по комплексной утилизации мелкофракционных железосодержащих отходов металлургического процесса. Разработки института защищены рядом патентов. Последние разработки касаются комплексной утилизации отходов Енакиевского металлургического завода (г. Енакиево, Донецкой обл.) [35].

В Украине и России подобные опыты успешно проводили в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова, ДонНИИЧермете, Харьковском химико-технологическом институте, ФУГП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» и др. [37, 38]. Полученные брикеты обладают исключительной прочностью на сжатие (до 15 кН/брикет) и сохраняют эту прочность в доменной печи.

Преимуществом «горячего» брикетирования является возможность получения брикетов из более крупного материала, чем при получении окатышей, для которых требуется материал, содержащий 70-80% класса -0,043 мм или 90% класса -0,074 мм [40, 41]. Имеет место также экономия тепла по сравнению с агломерацией и производством окатышей. Несмотря на удовлетворительные показатели производства и использования брикетов, способ не получил широкого распространения из-за низкой устойчивости валков прессов, работающих в тяжелых температурных условиях.

Для решения проблемы температурной обработки рассматривается ряд возможностей промышленного использования органиче-

ских связующих, которые использовались преимущественно при производстве углебрикетов. В качестве таковых на сегодняшний день используют отходы и высокомолекулярные компоненты, полученные при фракционной перегонке и различных крекингах нефти, а также основные и побочные продукты сланцевой переработки. Особенностью таких материалов является высокая вязкость, текучесть и низкая температура обработки. Органические связующие, частично заменяя восстановитель, обычно вносят нежелательные примеси, в т.ч. серу. Наряду с этим некоторые виды связующих при нагревании могут способствовать образованию легкоподвижных фаз, например, фаялита, что желательнее для усадки восстанавливаемых брикетов. Чаще всего органические связующие не обеспечивают должного уровня прочности брикетов, которые при нагревании в металлургических агрегатах рассыпаются в порошок и выносятся из агрегата потоком газов [42].

Поэтому при брикетировании железорудного сырья чаще всего используют минеральные связующие, к числу которых относят известковое молоко или гашеную известь, жидкое стекло, разные цементы или смеси, которые дают прочные соединения.

Связующие неорганического происхождения, располагаясь между частицами оксидов железа и восстановителя, ухудшают возобновляемость. Введение в шихту известкового связующего является достаточно распространенным. Оно позволяет развивать высокое давление прессования и получать удовлетворительную прочность брикетов уже при добавках до 10% (масс.). При их выдержке на воздухе имеет место упрочнение брикетов за счет карбонизации извести.

В мировой практике разработан ряд способов получения брикетов из железосодержащих материалов. По способу Вейса руду увлажняют известковым молоком и брикетируют, брикеты обрабатывают в две стадии: холодным углекислым газом и нагретым до 90-100°C под давлением 1 МПа. Продолжительность карбонизации 5-6 часов [42].

По способу Шумахера влажные руды или концентрат смешивают с 3-10% негашеной извести и 1-5% кварцевой муки. Полученные при давлении 30-40 МПа брикеты в течение 2-4 часов автоклавируют при 174°C и давлении 1 МПа. Прочность брикетов составляет 10-13 МПа [42].

К подобным способам следует отнести и способ Юзбашева, который предложил в качестве связующего использовать 3-6% портландцемента [42]. Для повышения пористости брикетов в них добавляют пылевидный уголь или деревянные опилки, выгорающие в доменной печи. Преимуществом способа является то, что вместо цемента можно использовать шлакопортландцемент. Упрочнение брикетов осуществляют вылёживанием в течение более 7 суток.

Недостатком данного способа является наличие в связке силикатного компонента, из-за чего брикеты разрушаются при нагревании в доменной печи. Другая проблема – недостаточно высокая прочность брикетов, это требует увеличения добавок цемента до 15%, что снижает содержание полезных компонентов.

По способу Н.Д. Аверкиева и Н.В. Удовенко получение прочных брикетов осуществляют путем использования жидкого стекла. Упрочнение брикетов выполняется вылёживанием в естественных условиях в течение 7 дней [42].

Объединение идей этих способов и современных технических достижений позволило разработать эффективные технологии брикетирования. За рубежом с начала XX века широко используют брикетирование, которое считают достаточно эффективным способом окускования отходов. Наибольшее распространение брикетирования получило в Германии, США и Японии.

Германия занимает лидирующие позиции в сфере брикетирования. Так, брикетирования бурого угля впервые освоено в Германии в конце XIX века. Поэтому вполне естественно, что и брикетирование железосодержащих материалов там же получило широкое распространение. Одно из первых предприятий по утилизации металлургических отходов было запущено в начале 60-х годов XX века. Его производительность – 200 т брикетов в сутки. Брикеты из ко-

лошниковой пыли и других железосодержащих отходов формировали на вальцевых прессах. В качестве связующего использовали 50%-ную сульфитную щелочь. Брикетты подвергали обжигу при температуре 600-900°C в атмосфере состава $\text{CO} : \text{CO}_2 = 3 : 1$. Готовые брикетты имели прочность на сжатие более 25 МПа, их использовали в доменном производстве [43].

Фирма «Аугуст Тиссен Хютте АГ» (ФРГ) также предложила и реализовала в промышленном масштабе брикетирование колошниковой и конвертерной пыли, а также других отходов в смеси с угольной пылью и связующим. Брикетты используются в металлургическом переделе.

Фирма «Крупп» по согласованию с фирмой «Хеккет инжиниринг» в США эксплуатирует современное промышленное предприятие мощностью 400 тыс. тонн в год по брикетированию различных рудных отходов – от мелочи рудных окатышей до влажных шламов мокрой газоочистки (рис. 2.4). Металлизированные брикетты из отходов используют в сталеплавильном и литейном производствах [54].

Фирмами «Кепперн» и «Макс Хютте» предложен способ изготовления брикеттов из отходов металлургического производства, включая брикетирование окалины прокатных цехов и установок непрерывного литья заготовок, пыли и шламов доменных и сталеплавильных цехов вместе с нефтяным коксом, колошниковой пылью, коксовой мелочью, полученной при коксовании каменного и бурого угля. Количество добавок, содержащих углерод, способствует полному восстановлению железа в брикетах при загрузке их в сталеплавильные печи и вагранки. В качестве пластификатора при брикетировании в шихту добавляют 1-4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 2-7% мелассы и 1-4% сульфитной щелочи [58].

Способ фирм «Тиссен-Лурги» позволяет использовать брикеттированную пыль в конвертерном процессе. Крупная пыль содержит 72% металлического железа и 85% железа общего; мелкая пыль – 20% металлического железа и 70% железа общего. Брикетты получают способом «горячего» брикетирования, при котором высокая сте-

пень металлизации сохраняется. Брикетты являются вполне пригодными заменителями руды и скрапа [63].

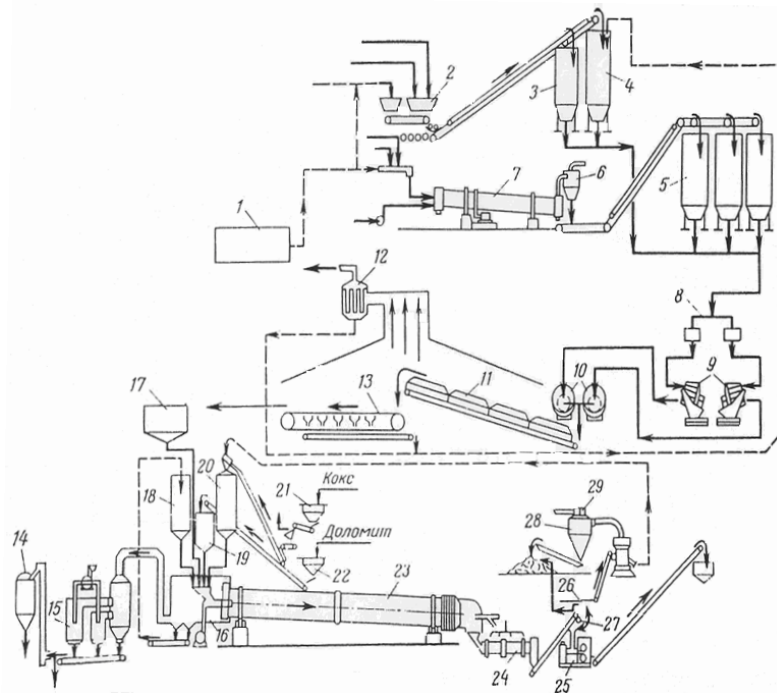


Рисунок 2.4 – Схема цепи аппаратов промышленного предприятия по утилизации отходов фирмы «Крупп»:

1 – склад пыли и шлама; 2 – загрузочные бункера; 3 – бункера пыли с высоким содержанием цинка; 4 – бункера пыли со средним содержанием цинка; 5 – бункера пыли с низким содержанием цинка; 6, 12, 15 – пылеуловители; 7 – барабанная сушилка; 8 – ленточные весы; 9 – барабан для смешивания и увлажнения пыли; 10 – окомкователи; 11 – конвейерная сушилка; 13 – конвейер; 14 – бункер для пыли оксида цинка; 16 – радиационный охладитель; 17 – бункер окатышей; 18 – бункер возврата; 19 – бункер доломита; 20 – бункер кокса; 21 – приемный бункер кокса; 22 – приемный бункер доломита; 23 – обжиговая вращающаяся печь; 24 – барабанный охладитель сырья; 25 – брикетная установка; 26 – грохот; 27 – весы; 28 – циклон

Фирмы «Мидрекс» и «Kobe Steel Ltd» разработали процесс под названием Fastmelt. Это процесс восстановления железосодержащих отходов (пыли и шламов) в печи с вращающимся подом, с добавлением угля и коксика в качестве восстановителя. Полученный про-

дукт в виде брикетов или окатышей со степенью металлизации 85-92% и содержанием 2-4% углерода используют в шихте конвертеров, в доменных и дуговых печах [64].

Процесс «Ферро-краб», разработанный в США, может обеспечить утилизацию всей железо- и углеродсодержащей пыли с низким содержанием цинка путем изготовления брикетов для доменного производства. Пыль, шлам и другие отходы не должны иметь крупность частиц более 4,76 мм и содержание влаги выше 8%; допустимое содержание масел в прокатной окалине, шламе – не выше 6%. Если в шихте на контрольном грохоте появляются более крупные материалы, их измельчают, а более влажные – подсушивают.

Процесс состоит из четырех основных стадий: сухое смешивание пыли практически в любом соотношении; нагрев шихты с введением расплавленного или нагретого углеводородного связующего и перемешивание; брикетирование и нагрев брикетов в окислительной среде. Брикетирование осуществляют на вальцевых прессах под давлением от 30-40 до 80-90 МПа, что требует меньшего расхода связующего. Сырые брикеты имеют механическую прочность 0,35-0,50 кН/брикет и подвергаются термообработке в окислительной среде для дегидратации и полимеризации связующего.

Прочность термообработанных брикетов составляет 0,9-5,0 кН/брикет и зависит от состава шихты (крупность исходной шихты – менее 3,36 мм), расходов связующего и продолжительности термообработки. Брикеты устойчивы при хранении на открытом воздухе, имеют необходимую водо- и термостойкость при тепловом ударе (погружение в расплавленный чугун с температурой выше 1500°C), хорошей восстановимостью (94,7-99% по сравнению с 42-66,4% для обожженных окатышей), которая определяется по способу Линдера. Способ связан со значительно меньшими капитальными и текущими затратами по сравнению с другими способами окускования [64].

Одним из эффективных направлений окускования металлизированной мелочи и пыли, образующихся при прямом восстановлении железа, является брикетирование. В процессе «Мидрекс» выход мелочи фракции -3 мм составляет 4%, а количество улавливаемой

пыли 3%. Выбор брикетирования как метода окускования объясняется тем, что металлизированная мелочь состоит из относительно крупных частиц со степенью металлизации до 92,5%, окускование которых другими способами не эффективно вследствие их повторного окисления.

Промышленная технология холодного брикетирования металлизированной мелочи и пыли с комбинированным связующим разработана фирмой «Мидрекс». По этой технологии в 1975 г. на металлургическом заводе в Джорджтауне (США) запущена первая большая установка. Оптимальный состав связующего, при котором брикеты обладают высокими механическими свойствами, следующий (%): 15-20 смолы; 15-20 гашеной извести в виде порошка крупностью менее 0,149 мм; 30-35 жидкого силиката натрия и 30-35 воды.

Наиболее экономичное производство брикетов при их кондиционной прочности обеспечивается при использовании связующего следующего состава (%): 3-5 смолы, 30-35 гашеной извести, 15-20 жидкого силиката натрия и до 50 воды. Вместо гашеной извести может быть использована влажная прокатная окалина. Брикеты отличаются высокими физико-механическими свойствами, высокой водостойкостью, что позволяет сохранять их в открытых складских помещениях. Разработанное связующее не вносит в состав брикетов вредных примесей. Брикеты почти не склонны к вторичному окислению. Физические и химические свойства брикетированного металлизированного материала приближаются к свойствам компактного металла [65].

С середины 90-х годов прошлого века, в связи с началом интеграции Украины в мировые и европейские экономические структуры, ростом конкуренции и повышением экологических требований к черной металлургии начал проявляться повышенный интерес к брикетированию как экологически чистому методу окускования.

На Ново-Краматорском машиностроительном заводе (НКМЗ) освоено производство брикетных прессов и установок производительностью до 30 т/ч и более. В 1996 г. на Константиновском метал-

лургическом заводе успешно прошла испытания установка по брикетированию шламов и колошниковой пыли, изготовленная НКМЗ, производительностью 10 т/ч [66].

В начале 2007 г. ГП «УкрГИПРОмез» разработал и направил ОАО «Миттал Стил Кривой Рог» рабочую документацию на строительство установки брикетирования железосодержащих отходов производительностью 50 тыс. тонн брикетов в год [67].

Большие работы по утилизации отходов ведутся на Днепровском металлургическом заводе им. Петровского. В 2001 г. в кислородно-конвертерном цехе были проведены опыты по применению в составе шихты в качестве охладителя железосодержащих брикетов. Брикеты из прокатной окалины и шлама на связующем, являющемся «ноу-хау» фирмы-производителя, имели размеры 60×70×90 мм, прочность на сжатие 6 МПа.

Брикеты обеспечивают снижение расхода металлолома и жидкого чугуна, улучшают процессы шлакообразования, что способствует повышению стойкости футеровки конвертеров на 20%, сокращению продолжительности продувки на 0,53 минуты и расхода кислорода на 90-100 м³ на плавку. С июня 2003 г. конвертерный цех ОАО «ДМЗ им. Петровского» перешел к промышленному использованию железосодержащих брикетов [68].

На кафедре технологии материалов Волгоградского государственного технического университета разработан брикетированный шихтовой материал – оксидоугольный брикет (ОУБ), получаемый из отходов металлургического производства: прокатной и термической окалины, пыли системы газоочистки и т.п. ОУБ изготавливают с применением многокомпонентного связующего, которое предотвращает разрушение брикета на начальном этапе плавки и обладает свойствами, благоприятными для максимального восстановления железа из оксидов и науглероживания расплава. Связывающими компонентами служат жидкое стекло и смесь оксидов на силикатной основе. Жидкое стекло играет роль первичной связки, что придает брикетам после сушки прочность, достаточную для их хранения, транспортировки и заваливания в печь. Вторичная связка – это сис-

тема на силикатной основе $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaO-K}_2\text{O}$, которая сохраняет прочность брикета при температурах 1300-1450°C, придавая ему вязкость, и препятствует преждевременному разрушению при плавке. Связующее также способствует максимизации действия углерода при восстановительном процессе и процессах науглероживания. Развитая реакционная поверхность компонентов ОУБ обеспечивает высокую скорость восстановления железа из оксидов.

ООО «ЭкоМашГео» (г. Тула) разработана оригинальная технология изготовления металлургических брикетов из железосодержащих отходов на цементном связующем и опробована на металлургических предприятиях ОАО «Тулачермет», РУП «Белорусский металлургический завод» и ОАО «Лиепаяс Металургс». Особенностью процесса прессования является использование вибропрессов с небольшим удельным давлением до 0,1 МПа с одновременным воздействием на смесь вибрацией с частотой 30-70 Гц и амплитудой колебания 0,2-0,6 мм. Разработаны типовые технологические линии по производству вибробрикетов производительностью 80-5000 т/сутки [71]. Схема технологической линии производительностью до 2000 т брикетов в сутки приведена на рис. 2.5.

В тесном сотрудничестве с машиностроительными фирмами Германии и Польши специалисты «ЭкоМашГео» подобрали такое дозирующее и смесительное оборудование, которое обеспечивает точность дозирования связующих материалов в пределах 1% и позволяет проводить их смешивание, регулируя интенсивность перемешивания, тем самым обеспечивая максимально возможную степень гомогенизации шихтовой смеси. Высокая степень гомогенизации способствует снижению расхода связующего не менее чем на 1,5% по сравнению с аналогичным расходом при использовании традиционных типов смесительного оборудования.

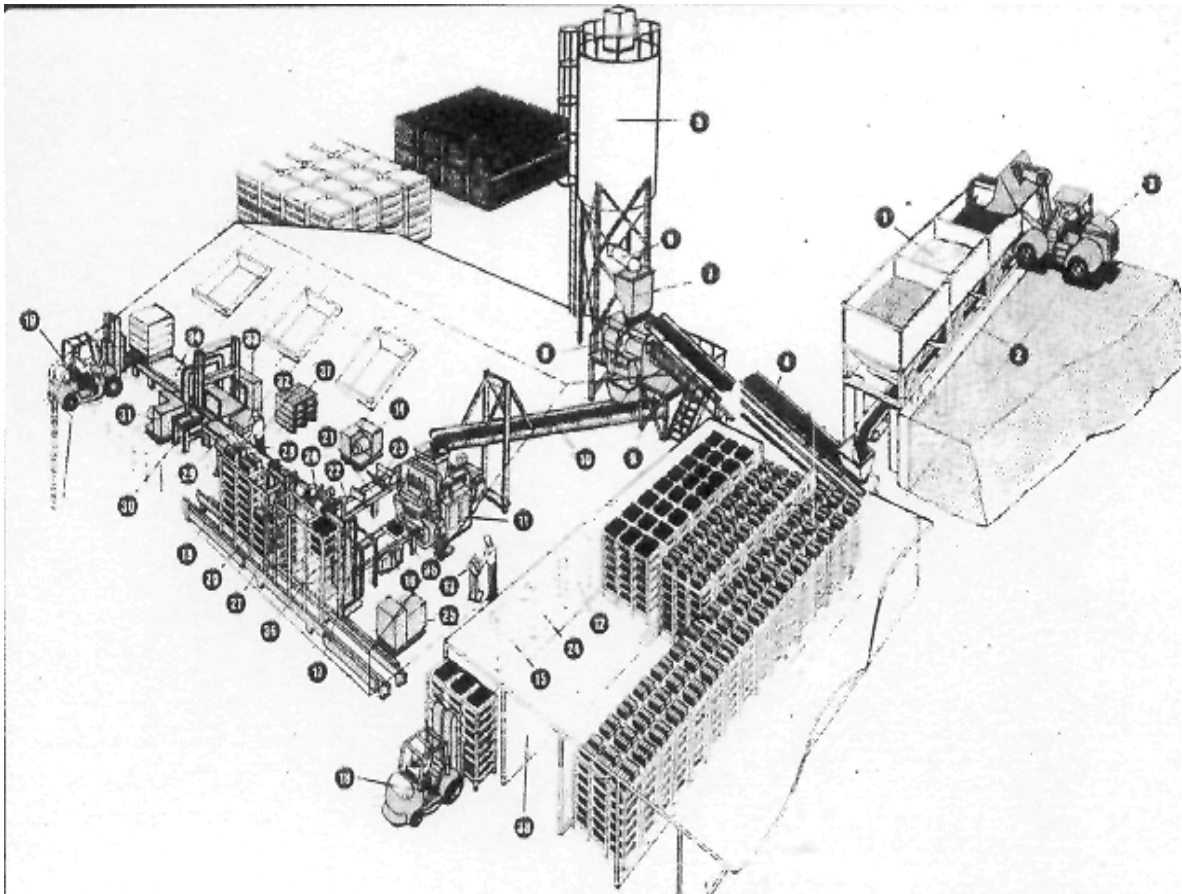


Рисунок 2.5 – Автоматическая линия по производству металлургических брикетов производительностью 2000 т/сутки:

1 – бункер исходного сырья; 2 – сборный лотковый конвейер; 3 – ковшовый погрузчик; 4 – наклонный ленточный конвейер; 5 – бункер для связующего; 6 – винтовой конвейер для связующего; 7 – весовой бункер связующего; 8 – трансмиссионная мешалка; 9 – вспомогательная опора для смесителя; 10 – ленточный транспортер для смеси; 11 – вибропресс; 12 – электрическая панель управления; 13 – пульт управления; 14 – основной насосный агрегат; 15 – конвейер полуготовой продукции; 16 – загрузочный накопитель; 17 – конвейер для готовых брикетов; 18 – вильчатый погрузчик; 19 – разгрузочный накопитель для готовых брикетов; 20 – конвейер возврата поддонов; 21 – линия выталкивания продукции; 22 – устройство для переворота поддонов; 23 – электронная панель управления системы погрузки-разгрузки; 24 – насосный агрегат; 25 – зажимное устройство для пакетирования готовых изделий; 26 – промежуточные валики; 27 – компоновочный стол; 28 – подающий ленточный транспортер; 29 – подающий толкатель; 30 – насосный пакетирующий агрегат; 31 – направляющие деревянных паллет; 32 – панель управления пакетировщиком; 33 – валики пакетировщика; 34 – стальной паллет продукции; 35 – стальные стеллажи; 36 – деревянные паллеты

2.9 Брикетирование в цветной металлургии

В цветной металлургии брикетирование нередко применяют в качестве основного метода окускования сырья в тех случаях, когда другие методы окускования не дают желаемого результата: сырье плохо окомковывается и спекается, а при спекании удаляются нужные компоненты (углерод, сера и др.). В частности, брикетированием окусковывают никелевые руды (Рижский завод и Уфалейский комбинат в России, заводы «Фолкенбридж-Майн» в Канаде и в Сисикаме, Япония). Медные пиритовые руды брикетировали на Медногорском комбинате, руды, содержащие концентрат цинка, – на Белевском цинковом заводе и др. [72]. В Украине брикетирование применяют на Днепровском титаномагниево и Днепровском алюминиевом заводах.

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 агломерата из руд цветных металлов нередко требует повышенных температур и расхода сырья (расходы топлива достигают 25%), комкуемость и газопроницаемость невысокая, агломерат выходит пылеватым 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.

Новый, современный этап повышения интереса к брикетированию связан с обострением экологических проблем, которые пришлось на последнюю треть XX века, а также с ростом цен на энерго-ресурсы. В качестве эффективного метода окускования активнее начали привлекать брикетирование. При этом при разработке комплексных систем утилизации железосодержащих отходов на металлургических предприятиях брикетирование все шире используют в качестве ведущего метода окускования [74].

Опытом многих металлургических компаний установлено, что процесс брикетирования наиболее полно реализуется совместно с

другими методами окускования – агломерацией и грануляцией с обжигом. Они не конкурируют между собой, а экономически выгодно дополняют друг друга.

Развитие брикетного производства связано с совершенствованием процесса, нахождения простого и эффективного способа повышения качества брикетов. Брикетирование руд и концентратов позволяет значительно расширить ресурсы сырья для цветной и черной металлургии. Особенное значение брикетирования имеет в электрометаллургии, где окускование позволяет не только повысить качество металла, но и значительно сокращает расходы электроэнергии.

Таким образом, брикетирование – это одно из направлений окускования, которое может обеспечить высокий потенциал топливно-энергетического комплекса, металлургии черных и цветных металлов.

3 АГЛОМЕРАЦИЯ

3.1 Общие сведения о процессе агломерации

Агломерация или спекание (сплавнение) – способ окускования полезных минералов, при котором в результате нагрева из компонентов шихты образуется расплав. В расплаве растворяется или поглощается им почти все твердое вещество исходных материалов. Остывая, расплав твердеет, образуя куски, которые затем дробят до необходимого размера.

Сплавнение обеспечивает соединение частиц в куски за счет перевода материала в жидкое или пластическое состояние с последующим охлаждением и образованием прочной кристаллической или аморфной структуры. При твердофазном спекании сцепление частиц осуществляется за счет миграции атомов в местах контакта и образования различных соединений.

Схема агломерационного процесса показана на рис. 3.1.

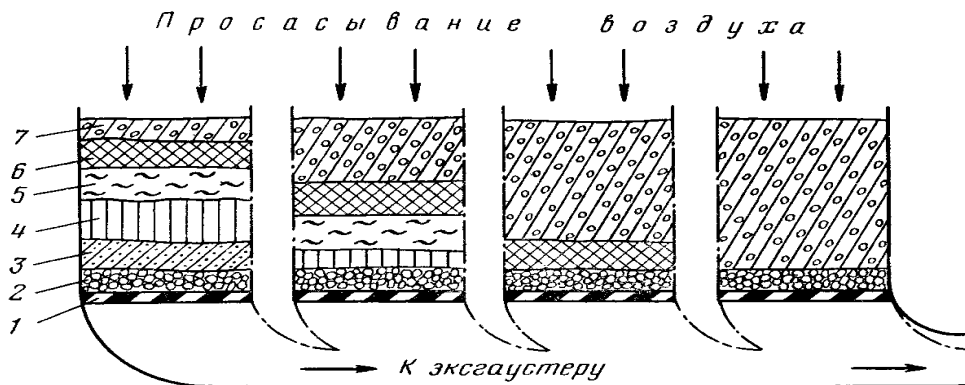


Рисунок 3.1 – Схема агломерационного процесса:

1 – колосниковая решетка, 2 – постель, 3 – зона переувлажнения, 4 – зона сушки, 5 – зона нагрева шихты, 6 – зона горения, 7 – готовый агломерат

На колосниковую решетку 1 установки (например, на тележку агломерационной машины) загружают постель 2. После загрузки постели загружают шихту слоем 250-300 мм.

Под колосниковой решеткой эксгаустером (вентилятором) создается разрежение около 7-10 кПа, в результате чего с поверхности в пласт материала засасывается наружный воздух. После включения эксгаустера зажигают верхний слой шихты. Это осуществляется просасыванием раскаленных до 1200-1240°C продуктов горения, образующихся при сгорании смеси доменного и коксового газов в горелке (или зажигательном горне). Продукты горения газа отдают тепло верхнему слою шихты, удаляя из него влагу и создают условия для начала горения топлива шихты. Горение поддерживается воздухом, который просасывается из атмосферы.

Зона горения 6 постепенно перемещается сверху вниз (до колосников) со скоростью 10-40 мм/мин. При перемещении зоны горения к постели процесс спекания заканчивается. Процесс продолжается 7-15 мин. Особенностью агломерационного процесса является то, что в каждый момент времени горение происходит только в узком слое шихты (не более 40 мм). Ниже зоны горения находится шихта, в которой частицы горючего не могут гореть из-за низкой температуры, недостаточной для зажигания (менее 700°C), и малого содержания кислорода в газе.

В зоне горения 6 протекают процессы перекристаллизации минералов. Физико-химические свойства агломерата определяются температурой в этой зоне. Выше зоны горения 6 находится готовый агломерат 7, через который просасывается воздух. Охлаждая агломерат, воздух нагревается. Тепло воздуха используется в ниже лежащей зоне горения топлива, где температура достигает 1473-1673°C. Зона готового агломерата 7 характеризуется законченным термическим процессом. В этой зоне имеет место частичное окисление кислородом воздуха железорудных материалов готового агломерата – переход части магнетита в гематит.

За зоной горения следует зона нагрева шихты 5, в которой протекают процессы разложения карбонатов, гидратов, а также восстановительные процессы. Хотя в целом агломерационный процесс проводится с избытком воздуха, для микрообъемов, содержащих горящие частицы топлива, характерна восстановительная атмосфера. В

зоне сушки 4 испаряется гигроскопическая влага шихты. При высушивании комочки шихты, частично рассыпаясь, уплотняют её. По этой причине зона сушки представляет наибольшее сопротивление прохождению газов через шихту.

Зона переувлажнения 3, лежащая над зоной постели, характеризуется повышенной влажностью. Переувлажнение происходит вследствие конденсации водяного пара и газов, отходящих при их столкновении с более холодной частью шихты. Постель прямого участия в процессе агломерации не принимает. Она предохраняет колосниковую решетку от воздействия высоких температур, предотвращает просыпание шихты через зазоры, облегчает сход агломерата с решетки после окончания процесса.

Разделение процесса спекания на зоны принято условно, так как в действительности он протекает непрерывно. Температура газов, которые отсасываются эксгаустером в течение длительного времени, составляет 50-60°C и только в последние минуты процесса повышается до 200-300°C.

Для производства агломерата пригодно различное оборудование. Сначала это были периодически действующие чаши Ф. Геберлейна и Т. Хантигтона, которые работали при подаче сжатого воздуха снизу вверх через слой шихты. Затем появились прямоугольные чаши Дж. Гриневольта, в которых воздух просасывается через слой шихты сверху вниз. Процесс агломерации в чашах был прерывным и малопродуктивным.

Бурное развитие процесса агломерации произошло после изобретения в 1906 г. Дуайтом и Ллойдом ленточной (конвейерной) агломерационной машины с просасыванием воздуха через слой аглошихты, сверху вниз [76].

Быстрый рост объемов производства агломерата в XX веке способствовал интенсивному развитию конструкций ленточных агломашин и обслуживающего их оборудования – эксгаустеров, грохотов, дробилок и др.

Процесс агломерации различается:

- по направлению фильтрации воздуха через слой шихты (сверху вниз или снизу вверх);
- прососом воздуха под действием разрежения или продувом при положительном давлении;
- по аппаратному оформлению: в аппаратах периодического действия (агломерационные чаши) или в непрерывно действующих аппаратах (ленточные, кольцевые или шахтные печи).

Наиболее распространена в мире агломерация шихты, с добавочным топливом или с таким, в котором находится сера, сгорающая после зажигания в потоке воздуха, фильтруемого через слой равномерно уложенной шихты.

Фильтрация воздуха через агломерируемую шихту организуется путем создания перепада давления на ее слое. Это может осуществляться за счет образования разрежения воздуха при его отсосе, или путем повышенного давления воздуха (более атмосферного) при его нагнетании [76].

Агломерационная шихта состоит из следующих основных компонентов: концентрат 40-50%, известняк 12-20%; оборот (мелкий агломерат) 20-30%, коксовая мелочь 4-6%; влага 6-9%. В ряде случаев в шихту дополнительно вводят колошниковую пыль и окалину. Известняк и коксовую мелочь до смешивания с другими компонентами шихты измельчают до крупности менее 3 мм. Крупность шихты влияет на процесс агломерации. Максимальный размер частиц руды в шихте не должен быть более 8-10 мм. Крупную руду спекать нецелесообразно, так как она может быть использована в доменном производстве без окомкования. При спекании тонкоизмельченных концентратов (75% класса -0,074 мм) в шихту рекомендуется вводить 20-25% руды крупностью 6-8 мм.

Шихту перед спеканием подвергают тщательному перемешиванию, увлажнению и окомкованию. Окомкование ведется во вращающихся барабанах. Окомкованию способствует добавка извести. Топливом для агломерационного процесса в большинстве случаев служит коксовая мелочь крупностью 2-3 мм. Она должна быть малоугольной (9-10%) и характеризоваться незначительным выходом ле-

тучих веществ (2-3%).оборотом называется мелочь, полученная при дроблении и грохочении агломерата.оборот крупностью 8-15 мм используется как постель, а класс 0-8 мм в виде циркулирующей нагрузки возвращается на повторное спекание.

Наибольшее распространение для агломерации железных руд и концентратов получили агломерационные машины конвейерного типа, которые представляют собой конвейер, состоящий из отдельных тележек, перемещающихся по замкнутым направляющим и формирующих аглоленту (рис. 3.2).

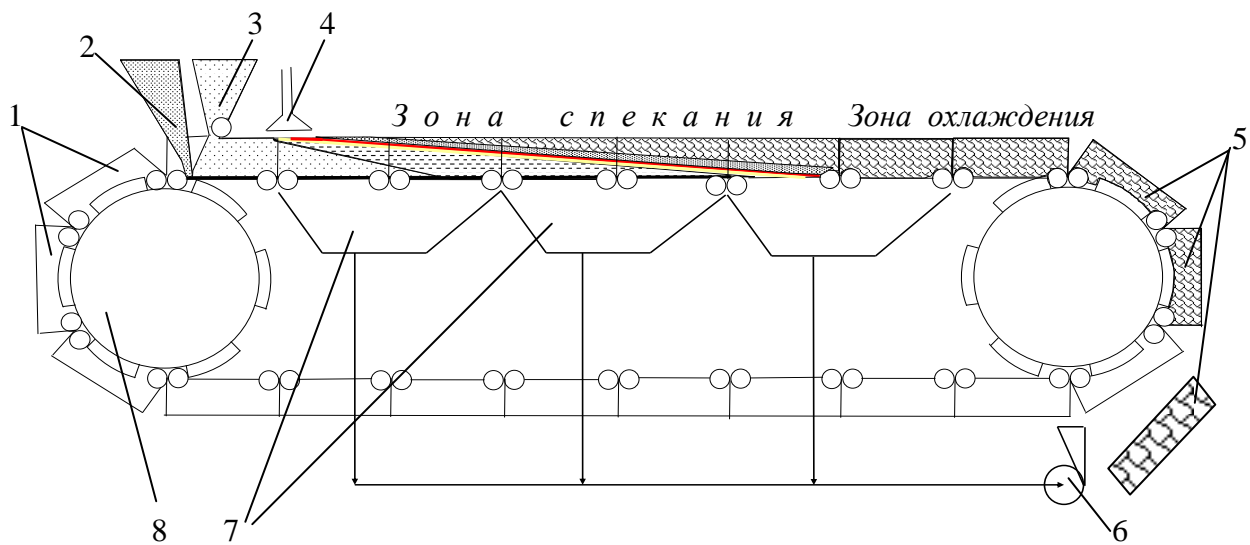


Рисунок 3.2 – Ленточная агломерационная машина:

1 – спекательные тележки (паллеты) с колосниковыми решетками; 2 – укладчик постели; 3 – укладчик шихты; 4 – зажигающий горн; 5 – готовый агломерат; 6 – эксгаустер (вытяжной вентилятор-дымосос); 7 – вакуум-камеры; 8 – ведущая звездочка привода аглоленты

Каркас с направляющими служит основой, на нем монтируются тележки (паллеты), число которых зависит от размеров машины. Перемещение тележек 1 осуществляется приводом, расположенным в головной части машины. Движение тележек в обратном направлении в сторону привода происходит самоходом вследствие уклона нижней ветви машины. На горизонтальном (рабочем) участке те-

лежки проходят по рельсовому пути над вакуум-камерами, соединенными с газовым коллектором «эксгаустером».

Непрерывный ряд движущихся тележек (паллет) 1 имеет колосниковые решетки, на которые вначале укладчиком 2 помещается тонкий слой постели. Постель формируется из готового агломерата крупностью 8-15 мм или из крупных частиц шихты без добавления топлива. Постель предохраняет колосниковую решетку от воздействия высоких температур, предотвращает просыпание шихты через зазоры колосниковой решетки и облегчает сход пирога готового агломерата.

На слой постели укладчиком 3 загружается основной слой шихты – смесь частиц руды с частицами топлива. При производстве офлюсованного агломерата дополнительно добавляются необходимые флюсовые компоненты в виде твердых частиц.

Частицы топлива, находящиеся в верхнем слое шихты, проходя под зажигательным горном 4, воспламеняются. Зажигание шихты при прохождении ее под горном происходит горючими продуктами горения смеси коксового или доменного газов.

Ввиду того, что через слой шихты постоянно просасывается воздух при помощи вытяжного вентилятора 6, зона горения твердого топлива постепенно перемещается от верхнего слоя к колосниковой решетке.

К моменту окончания процесса агломерации по мере продвижения тележки к разгрузочному концу машины (хвостовая часть) шихта превращается в спёк (агломерационный пирог). Паллета достигает разгрузочной части машины, где опрокидывается и из нее выгружается готовый агломерат 5.

В дальнейшем тележки, разгрузив агломерат на охладитель, возвращаются по нижнему наклонному участку пути в главную часть машины, и затем снова поднимаются на горизонтальный участок.

Для дробления агломерационного спёка применяют одновалковые зубчатые дробилки. Для отделения горячего оборота применяют

самобалансные грохоты. Охлаждение агломерата производят в специальных охладителях.

При агломерации руд цветных металлов наибольшее распространение получила шахтная агломашина (рис. 3.3).

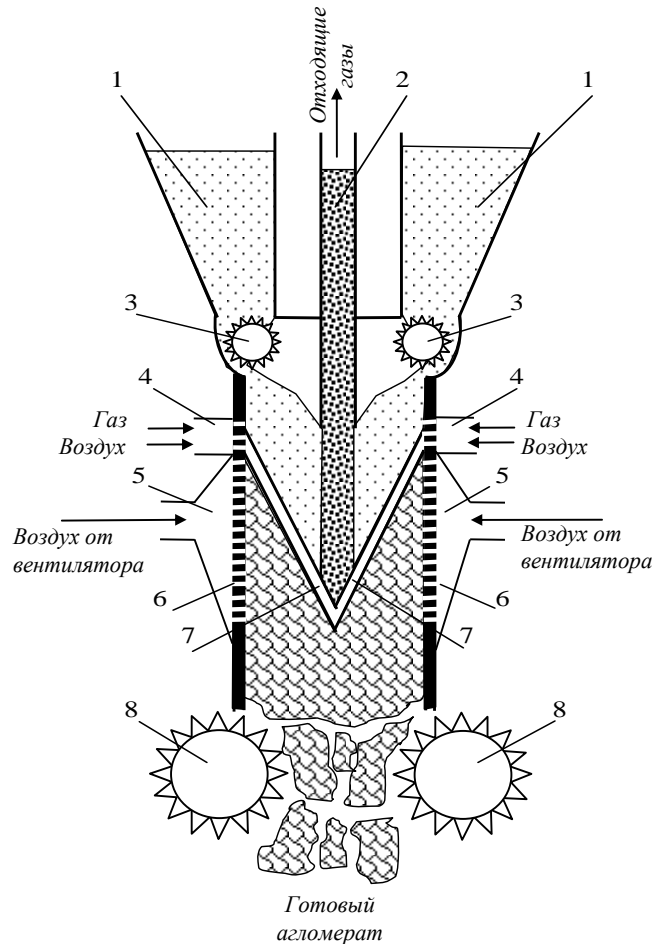


Рисунок 3.3 – Шахтная агломерационная машина:

1 – бункер пылеватой руды; 2 – центральная шахта для загрузки более крупной шихты и отвода продуктов горения; 3 – барабанные питатели пылеватой шихты; 4 – зажигательный горн; 5 – воздушные камеры; 6 – перфорированные стенки шахты; 7 – зона горения; 8 – барабаны с рифленой поверхностью для выдачи агломерата

Сверху к стенкам шахты непрерывно загружается пылеватая аглошихта 1, а по оси – более крупный материал 2 (например, возврат или кусочки руды). Опускаясь в шахте, шихта вначале проходит мимо зажигательных горнов 4, а затем мимо двух воздушных

камер 5. Воздух под давлением подается через отверстия 6 в стенках шахты.

Скорость опускания шихты подбирается таким образом, чтобы две зоны горения твердого топлива 7 занимали постоянное положение в рабочем пространстве машины. Продукты горения твердого топлива отводятся вверх по центральному столбу материала.

Машина не имеет движущихся частей, работает без эксгаустера и обеспечивает спекание слоя шихты до 1 м.

3.2 Теоретические основы процесса агломерации

Вне зависимости от типа применяемого оборудования агломерация носит ярко выраженный зональный характер процесса горения твердого топлива. В зоне горения шихта проходит стадию плавления, что сопровождается усадкой и образованием пористой макроструктуры агломерата. По мере перемещения зоны горения вниз происходит кристаллизация и охлаждение расплава. Воздух, проходящий через слой готового агломерата, охлаждает его, нагреваясь до высоких температур, и поступает в зону горения твердого топлива.

Отходящие газы из зоны горения отдают свое тепло на очень коротком расстоянии, подогревая последующий слой до температуры воспламенения, а в зоне сушки происходит интенсивное удаление влаги из шихты и ее подогрев. В дальнейшем в результате резкого снижения температуры отходящих газов, из них конденсируется влага и оседает на последующий слой холодной шихты, образуя зону переувлажнения. Таким образом, зона горения постепенно перемещается к колосникам, проходя всю высоту слоя шихты за относительно короткий промежуток времени (15-20 мин).

Вследствие завершенности теплообмена около 70% времени (от общего периода спекания) температура отходящих газов составляет 50-60°C и лишь при подходе к колосниковой решетке повышается до максимальных температур (1200-1500°C), средняя температура отходящих газов составляет 100-150°C.

Необходимое количество топлива в шихте составляет 3-7% по весу или 7-12% по объему.

Сильно развитая удельная поверхность мелких частиц в шихте, незначительное их тепловое сопротивление и относительно большая теплоемкость шихты создают благоприятные условия теплообмена между газом и твердым материалом. Вследствие малых размеров частиц топлива и интенсивного теплообмена высота зоны горения в слое шихты имеет небольшую протяженность и составляет, по экспериментальным данным, 20-30 мм. Высоту зоны горения h можно определить из уравнения:

$$h = \tau_2 \cdot v_g ,$$

где τ_2 – средняя продолжительность горения одной частицы топлива, с; v_g – скорость продвижения зоны воспламенения, м/с.

Скорость движения фронта воспламенения можно определить из выражения:

$$v_g = 1,35 w_2 c_2 / \rho_{ш} c_{ш} ,$$

где w_2 – скорость фильтрации газа, м/с; c_2 и $c_{ш}$ – теплоемкость, соответственно газа и материала шихты, кДж/(кг·град); $\rho_{ш}$ – насыпная плотность шихты, кг/м³.

Скорость спекания шихты v_c равна отношению толщины слоя исходной шихты к общей продолжительности процесса агломерации.

$$v_c = h_{ш} / t_a .$$

За окончание процесса агломерации принимают время достижения максимального значения температуры отходящих газов.

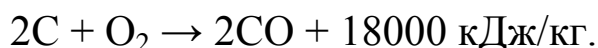
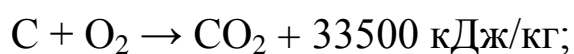
Несмотря на относительно низкое содержание топлива в слое шихты температура в зоне воспламенения достигает в верхнем слое 1100-1200°С и в последующих – 1400-1600°С.

По данным многочисленных исследований в реакции кислорода с углеродом различают два этапа:

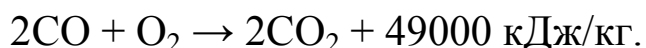
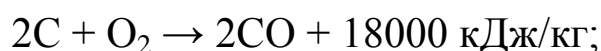
– окислительный этап, температура не превышает 700°C, до воспламенения топлива;

– этап горения топлива, протекает при температуре выше 700°C.

На первом этапе (окисления) углерод, взаимодействуя с кислородом, образует смесь двух газов – окиси и двуокиси углерода (СО и СО₂):



В период горения образуется лишь окись углерода, которая в дальнейшем при избытке кислорода догорает в двуокись, согласно реакции:



Состав отходящих газов при агломерации характеризуется следующими показателями: отношением СО₂/СО, которое в среднем равно 4-5, или показателем Мишара:

$$CO / (CO + CO_2) \sim 0,22-0,26.$$

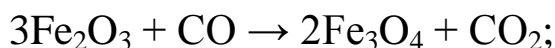
Данные показатели определяют степень использования тепло-творной способности топлива и фактические затраты кислорода на его сжигание.

После зажигания шихты и до момента окончания процесса агломерации состав отходящих газов меняется незначительно и содержит СО ~ 4,0% и СО₂ ~ 10-11%. Наряду с недогоревшей окисью

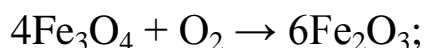
углерода в состав продуктов горения входит и свободный кислород O_2 около 6-7%. Это говорит о том, что около горящих частиц топлива в слое шихты образуются локальные зоны с нехваткой свободного кислорода. При увеличении расхода топлива на спекание усиливается "кислородное голодание" в зоне горения и соответственно показатель Мишара растет.

Сумма кислорода в продуктах горения топлива при агломерации:

– окисленных железных руд всегда больше 21% (22-23%) вследствие восстановления гематита (Fe_2O_3) окисью углерода (CO) до магнетита (Fe_3O_4), согласно реакции:



– магнетитовых руд меньше 21% (19,5-20%) вследствие частичного окисления магнетита (Fe_3O_4) до гематита (Fe_2O_3):



– офлюсованных шихт больше 21% вследствие дополнительного выделения CO_2 от разложения флюса ($MgCO_3$, $CaCO_3$).

В процессе агломерации происходит переувлажнение и сушка шихты. Скорость распространения зоны переувлажнения в несколько раз выше скорости продвижения всех остальных зон. Уже через 2-4 минуты после начала агломерации слой шихты оказывается переувлажненным до уровня постели и подогретым до температуры точки росы ($\sim 52^\circ C$).

С этого момента конденсация пара в слое шихты прекращается, и вся испарившаяся влага в зоне сушки уходит с отходящими газами. Шихта не может подогреваться до более высокой температуры, нежели $52^\circ C$, соответствующей точке росы. Это происходит потому, что обратное явление конденсации – испарение влаги шихты, сопровождается затратой тепла и шихта начинает охлаждаться (температура шихты снижается менее $52^\circ C$). Такой процесс приводит к кон-

денсации паров на охлажденном участке шихты, за счет чего температура шихты вновь поднимается до точки росы.

В зоне сушки, находящейся над зоной переувлажнения, основное количество влаги испаряется при равновесной температуре, равной температуре точки росы, с постоянной скоростью, зависящей от скорости фильтрации газов.

Начиная с определенного критического влагосодержания, скорость сушки непрерывно падает при одновременном повышении температуры материала. Высота зоны сушки составляет 20-26 мм.

Удельный объемный расход газа на испарение воды определяется из уравнения:

$$v = I / (x''_2 + x'_2), \text{ м}^3/\text{кг влаги},$$

где x'' и x' – влагосодержание газа соответственно на входе и выходе из зоны сушки, кг/кг газа.

В пересчете на сухую шихту удельный расход газа равен:

$$q = b \cdot v_2,$$

где b – влагосодержание шихты, кг/кг сухой шихты.

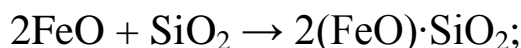
При относительно невысоком содержании топлива в шихте скорость спекания определяется скоростью сушки.

Переувлажнение шихты против оптимального его значения – одно из вредных явлений процесса агломерации, так как резко снижает газопроницаемость шихты. Подогрев шихты до температуры точки росы перед укладкой на спекательные тележки позволяет частично нейтрализовать данное явление и повысить производительность агломашин примерно на 15%.

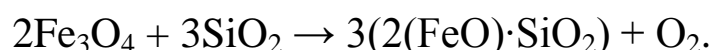
В зоне подогрева и горения твердого топлива значительное развитие получили реакции между частицами шихты, происходящие в твердой фазе. В твердой фазе идут только экзотермические реакции, т.е. с выделением тепла.

Полученный на первом этапе процесса агломерации магнетит и твердый раствор магнетита в закиси железа служат начальной основой для дальнейших процессов.

Закись железа или магнетит в соединении с кремнеземом (двуокись кремния SiO_2) образуют фаялит:

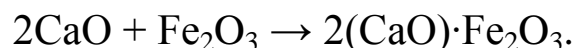


или



Начальная температура появления фаялита равна 990°C , а его температура плавления равна 1205°C . Фаялит дает две эвтектики с температурой плавления 1170 и 1140°C (температура плавления кварца равна 1700°C).

Если в шихте имеется окись кальция или карбонаты кальция, то при температуре 600°C , вступая в реакцию с гематитом, они образуют твердые растворы ферритов кальция $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ с температурой плавления 1200°C :



При образовании тройных сплавов температура плавления шихты еще понижается. Твердый раствор $\text{CaO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ имеет температуру плавления 1080°C (по некоторым данным 1050°C) при 10% содержании CaO .

Хотя реакция $2(\text{CaO})\cdot\text{SiO}_2$ ближе по химическим свойствам, но по количеству контактов и скорости протекания идет преимущественное образование ферритов кальция.

Среди компонентов шихты есть минералы, которые не вступают в реакцию между собой при сколь угодно продолжительной выдержке:

- гематит не реагирует с кремнеземом;
- магнетит не вступает во взаимодействие с известью.

Схема взаимодействия компонентов шихты показана на рис. 3.4.

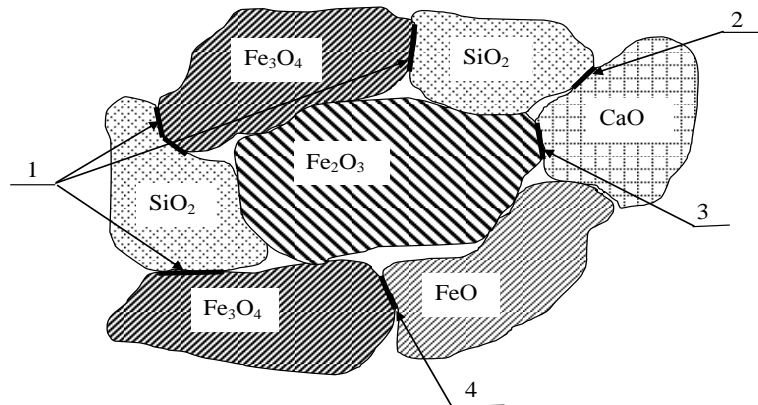


Рисунок 3.4 – Схема взаимодействия частиц шихты в твердой фазе:
 1 – фаялит ($2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2$); 2 – кальцит кремния ($2(\text{CaO})\cdot\text{SiO}_2$);
 3 – феррит кальция ($2(\text{CaO})\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$); 4 – вюстит (Fe_xO или $\text{Fe}_3\text{O}_4\cdot\text{FeO}$)

Наиболее распространенные легкоплавкие соединения, которые образуются в процессе агломерации, приведены в табл. 3.1.

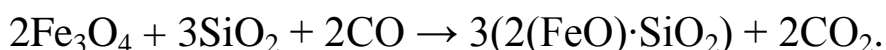
Таблица 3.1 – Легкоплавкие соединения, образующиеся в процессе агломерации

№, п/п	Наименование продукта	Температура плавления, °С	Температура появления, °С
1	2	3	4
При агломерации нефлюсованных шихт			
1	Фаялит ($2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2$)	1205	990
2	Эвтектические смеси: фаялит – кремнезем $2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2$; фаялит – магнетит $2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2 - \text{Fe}_3\text{O}_4$; фаялит – вюстит $2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2 - \text{Fe}_x\text{O}$	1170 1140 1170	
3	Вюстит (Fe_xO)	1200	700
При агломерации офлюсованных шихт			
1	Однокальциевый феррит $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	1200	600

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4
2	Эвтектические смеси: однокальциевый феррит – полукальциевый феррит $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}\cdot 2(\text{Fe}_2\text{O}_3)$; однокальциевый феррит – двухкальциевый феррит – магнетит $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2(\text{CaO})\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$; двухкальциевый силикат – вюстит $2(\text{CaO})\cdot\text{SiO}_2 - \text{Fe}_x\text{O}$	1200 1180 1280	

Таким образом, при спекании неофлюсованной шихты основную роль играет реакция образования фаялита. В восстановительной среде она идет по схеме:



Окислительная атмосфера не способствует протеканию данной реакции, т.к. окисляет магнетит до гематита, который не реагирует с кремнеземом. При спекании офлюсованных шихт окислительная атмосфера способствует появлению гематита и образованию ферритов кальция в твердой фазе. Скорость образования ферритов кальция в равных условиях выше скорости образования ферритов кремния.

Плавление шихты происходит в зоне горения твердого топлива. К этому моменту завершена сушка, дегидратация, декарбонизация шихты. В ходе окислительно-восстановительных реакций между твердыми фазами образовались вещества, температура плавления которых гораздо ниже температуры плавления минералов шихты. Данные вещества плавятся первыми (а именно: фаялит; одно-, двухкальциевый феррит; вюстит) растворяя в себе остальную массу шихты.

Плавление шихты затруднено, если она имеет мало свободного кремнезема (SiO_2) или окиси кальция (CaO). При температуре 1500°C 1 кг фаялита способен растворить в себе 13 кг магнетита, в

результате чего образуется 14 кг железистого силикатного расплава. Если спекается офлюсованная шихта, то 1 кг извести, вошедшей в состав феррита кальция, дает около 5 кг расплава.

Диаграмма состояния магнетит – фаялит ($\text{Fe}_3\text{O}_4 - 2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2$) имеет вид, показанный на рис. 3.5.

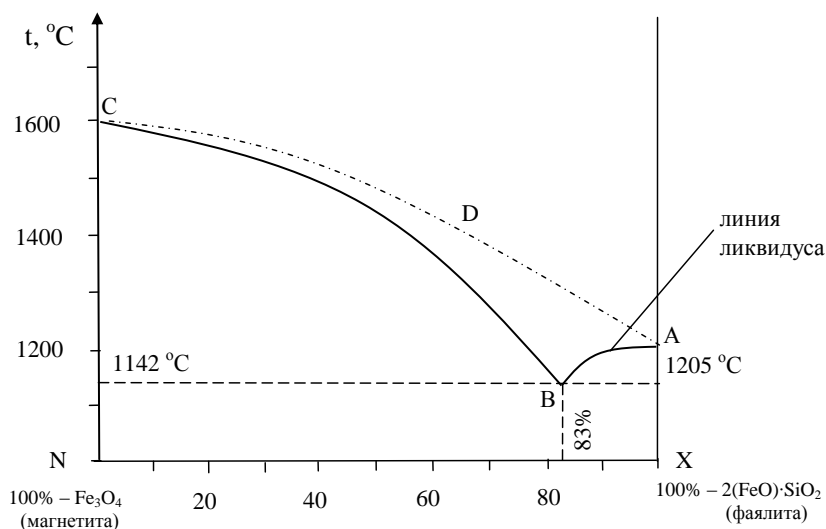


Рисунок 3.5 – Диаграмма состояния магнетит – фаялит ($\text{Fe}_3\text{O}_4 - 2(\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2$)

На оси абсцисс приведенной диаграммы точка N отвечает чистому магнетиту (Fe_3O_4), а X – чистому фаялиту ($2(\text{FeO})\text{SiO}_2$). На оси ординат указано значение температуры твердой смеси или расплава.

Линия ABC называется линией ликвидуса и представляет собой кривую изменения температуры начала кристаллизации жидкого расплава (или кривую температуры плавления твердой фазы) в зависимости от состава смеси фаялита с магнетитом. Ниже линии ликвидуса расположено поле твердой фазы, а выше – поле расплава. Чистый магнетит начинает плавиться при температуре, значение которой отвечает точке C (1597°C), фаялит – при температуре, соответствующей точке A (1205°C). Эвтектическая смесь магнетита с фаялитом в точке B , содержащая 83% фаялита и 17% магнетита, плавится при наименьшей температуре, значение которой составляет 1142°C .

Фаялит, образовавшийся в твердой фазе, быстро нагревается возле пылающих частиц топлива. Нагревание фаялита отвечает перемещению от точки X к точке A . В точке A он начинает плавиться при температуре 1205°C . Жидкий фаялит растворяет в себе магнетит и расплав, который продолжает нагреваться, перемещается по кривой ADC . Концентрация фаялита в конечном расплаве обычно составляет 15-20%, соответственно магнетита – 85-80%.

Охлаждение расплава происходит следующим образом. Расплав охлаждается к линии ликвидуса. При охлаждении к температуре, которая отвечает значению линии ликвидуса, из расплава выделяются кристаллы магнетита. Содержание магнетита в расплаве снижается. При последующем охлаждении расплава (движение к точке B) его состав изменяется. Когда состав расплава отвечает точке B , масса кристаллов магнетита составляет 75-83% от всей массы расплава. При снижении температуры расплава меньше, чем в точке B , он застывает в виде эвтектики, то есть тонкой механической смеси магнетита с фаялитом.

Специфическая особенность условий кристаллизации железистого силикатного расплава состоит в том, что скорость его охлаждения очень большая (до 500°C за минуту). Для роста кристаллов нужно время, даже когда их размеры сравнительно небольшие. При значительной скорости охлаждения расплава атомы (ионы) не успевают занять свои соответствующие места в кристаллической решетке. Расплав застывает в виде аморфного железистого стекла. В большинстве случаев времени для кристаллизации магнетита на участке CB достаточно. При остывании остатков железистого расплава в точке B времени недостаточно. Кристаллизационное свойство магнетита выше, чем фаялита, поэтому в последний момент при охлаждении эвтектического расплава магнетит лишь частично успевает кристаллизироваться, и остаток расплава застывает в виде стекла.

Если спекается офлюсованная шихта, то в твердой фазе образуется много ферритов кальция. Так, как он легкоплавок, то плавится первым и в нем расплавляется вся масса твердой шихты.

Однако, между этими двумя механизмами есть некоторая разница. Если силикат железа фаялит ($2(\text{FeO}) \text{SiO}_2$) и силикат кальция ($2(\text{CaO}) \text{SiO}_2$) при плавлении не распадается, оставаясь в расплаве в виде сложных соединений атомов, то ферриты кальция при плавлении полностью распадаются. Поэтому конечный минералогический состав агломерата зависит лишь от основности расплава, которая определяется как отношение щелочных минералов шихты к кислым $[(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)]$, или сокращенно CaO/SiO_2 . Она называется основностью агломерата и не связана с минералогическим составом шихты перед плавлением.

При увеличенном расходе топлива кроме магнетита в агломерате имеются вюстит и частично металлизированное железо. При оптимальном расходе топлива агломерат содержит фаялит, вторичный гематит и стекло. При пониженном расходе топлива прочность агломерата падает вследствие уменьшения фаялитовой связки и увеличения доли стекла.

В офлюсованных агломератах основностью до 1,0-1,2 связкой является оливин, часть которого, иногда значительная, остается нераскристаллизованной в виде стекла. Количество стекла снижается по мере повышения основности. Агломерат содержит феррит кальция и незначительное количество силикатов кальция.

При основности выше 2 резко увеличивается содержание силикатов кальция. Оптимальная основность высокоосновного агломерата соответствует добавке в шихту такого количества известняка, которое необходимо для преобразования всей двуокиси кремния в силикаты кальция и для связывания подавляющей части железа в виде гематита в ферриты кальция.

Кусок агломерата при нормальном расходе топлива не является монолитом. Он состоит из многочисленных сгустков вещества размером 3-30 мм, которые касаются друг друга и в местах контакта срослись (рис. 3.6).

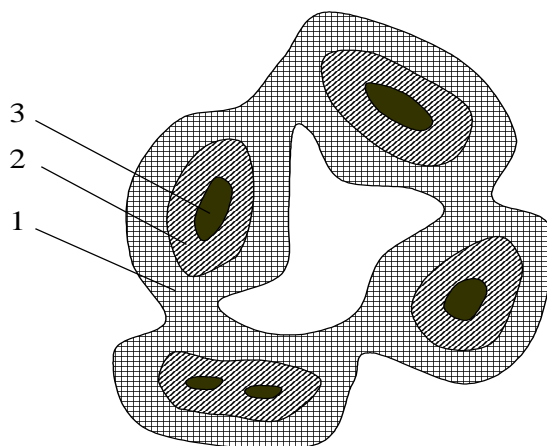


Рисунок 3.6 – Схема блочной структуры агломерата:

- 1 – периферийная зона; 2 – промежуточная зона;
3 – центральная зона (силикатное “озеро”)

Между сгустками расположены большие поры неправильной формы. Эти сгустки были названы блоками. Каждый блок независимо от его размеров имеет концентрически-зональное строение. На периферии блока в агломерате количество силикатной связки небольшое и составляет 5-10%. Основная масса вещества состоит из магнетита, но встречаются также остатки шихты в виде гематита, кварца, извести и т.п. По мере приближения к центральной области количество силикатной связки монотонно растет. В промежуточной зоне блоков агломерат содержит 10-20% силикатной связки и 80-90% магнетита.

В центральной области количество силикатной связки резко растет и составляет 60-80% и более. Здесь находится одно или несколько силикатных “озер”, в которых кристаллизуется эвтектика магнетита с кальциевым оливином или фаялитом. Силикатные “озера” никогда не подходят к периферии блока, а остатки шихты никогда не присутствуют в центральных областях.

Такое строение агломерата объясняется тем, что в начале горения частиц твердого топлива, вокруг них образуется капля расплава, размеры которой постепенно увеличиваются. Подвод и отвод газообразных продуктов к горячей частице топлива и от нее осуществляется по капиллярным каналам, или отдельными пузырьками через

расплав. При кристаллизации эти каналы и пузырьки фиксируются в структуре блока, создавая микропористость агломерата. Диаметр капилляров в среднем составляет 100-150 нм. Микропористость увеличивается от периферии блока к его центральной области и составляет 30-50%.

Так как, объем расплава на 30-40% меньше объема начальной шихты, из которой он образуется, то параллельно с образованием капель расплава вокруг горящих частиц топлива, между ними появляются усадочные раковины неправильной формы, которые увеличиваются по мере плавления шихты. Размер капли расплава увеличивается до тех пор, пока приход тепла от горячей частицы топлива превышает его расход по многочисленным реакциям, происходящими на периферии капли. При догорании частицы топлива капля расплава начинает кристаллизоваться от более холодной периферийной зоны. Здесь из расплава выделяются кристаллы тугоплавкого магнетита, которые вытесняют остаточный обогащенный силикатами расплав в центральную зону, где заканчивается горение частицы топлива.

В промежуточной зоне кристаллизация магнетита продолжается, а состав расплава все больше приближается к эвтектическому. В последний момент остаточный силикатный расплав кристаллизуется в центральной области в виде стекла (силикатные “озера”).

При падении и ударе в первую очередь агломерат разрушается по связям между блоками. Сами блоки имеют высокую прочность и разрушаются в последнюю очередь.

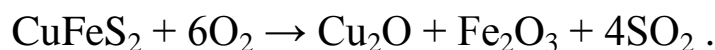
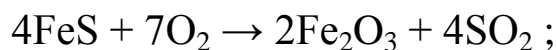
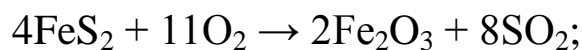
3.3 Удаление вредных примесей при агломерации

В большинстве случаев материалы, входящие в состав шихты, содержат некоторое количество вредных или нежелательных для условий переработки элементов (примесей). Основными вредными примесями являются минералы, которые содержат серу, мышьяк, фосфор, цинк и свинец.

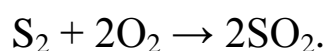
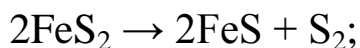
Повышенное содержание серы в стали вызывает явление краснотомкости металла и значительно ухудшает ее качество. Использование доменных и мартеновских печей как десульфураторных аппаратов для уменьшения содержания серы значительно снижает производительность печей и ухудшает технико-экономические показатели плавки. Поэтому очень важно процесс десульфурации проводить при агломерации, получая готовый агломерат с минимально возможным содержанием серы. Содержание ее в чугунах не должно превышать 0,07%, поэтому и в агломерате ее содержание не должно превышать сотых долей процента.

Различают сульфидную и сульфатную серу. Чаще всего сульфидная сера содержится в виде пирита (FeS_2), реже пирротина (FeS) и халькопирита (CuFeS_2). Удаление серы из этих соединений происходит по трем схемам.

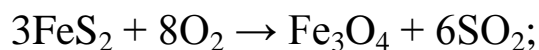
До начала термической диссоциации пирита при окислении воздухом при температуре от 300 до 500°C происходят следующие превращения:



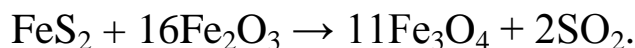
Начиная с 500°C, окисление и термическая диссоциация пирита идут рядом:



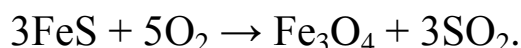
При более высоких температурах продуктом окисления пирита является магнетит:



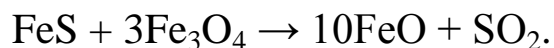
или



Кроме этого идет преобразование халькопирита и пирротина по реакциям:



Иногда образуется закись железа:



Как видим, основным условием удаления сульфидной серы является избыток кислорода, который имеется при сгорании шихты с пониженным расходом топлива. Нехватка кислорода ограничивает развитие всех без исключения реакций выгорания сульфидной серы, которые приведены выше.

При окислении серы до SO_2 выделяется много тепла. Если исходить из реакции горения серы, то получаем, что 1 кг пирита по теплотворной способности заменяет 0,3 кг коксовой мелочи.

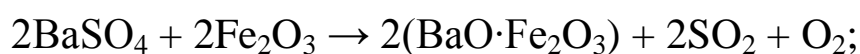
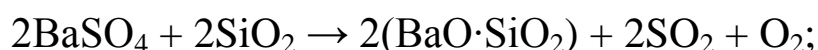
При недостаточном количестве топлива не образуется высокая температура, необходимая для удаления серы.

При повышенном расходе топлива в шихте увеличивается количество зон с недостатком кислорода, и реакция окисления пирротина затормаживается. В это время образуется способный растворять пирротин железистый раствор. Увеличение основности шихты также затрудняет десульфурацию вследствие образования соединений CaS , растворимость которых в железном шлаке так же велика.

Таким образом, степень удаления сульфидной серы носит экстремальный характер, и процесс ведут при нижнем пределе опти-

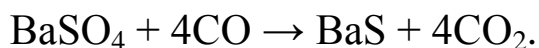
мального расхода топлива. Степень десульфуризации при этом составляет 95-97%.

Механизм удаления сульфатной серы иной. Основными сульфатосодержащими минералами являются сульфаты бария и кальция (BaSO_4 , CaSO_4). Удаление серы происходит преимущественно в результате термической диссоциации сульфатов по реакциям с образованием силикатов или ферритов бария (кальция):



Аналогичны реакции и для сульфатов кальция.

Термическая диссоциация по указанным реакциям начинается при 1000°C и увеличивается с ростом температуры и развитием жидкой фазы. Поэтому, в отличие от окисления сульфидной серы, удаление сульфатной серы ведут при верхнем пределе оптимального расхода топлива. Дальнейшее увеличение расхода топлива ведет к восстановлению сульфатов бария и кальция до BaS и CaS , которые обладают повышенной растворимостью в железистом расплаве. Восстановление идет по реакции:



Обычно степень удаления сульфатной серы составляет 70-80%.

Мышьяк (As) понижает свариваемость металла и негативно влияет на весь комплекс его физико-механических свойств. В доменных и мартеновских печах весь мышьяк переходит в металл, т.к. его удаление связано с большими трудностями. Поэтому его стараются максимально удалить из руд при агломерации. В рудах мышьяк содержится преимущественно в виде арсенопирита (FeAsS), реальгара (AsS), леллингита (FeAs_2).

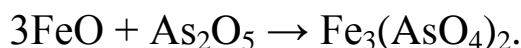
При температуре выше 500°C в окислительной атмосфере при спекании с небольшим расходом топлива идет активное окисление этих сульфидов и солей:



При температуре 800-900°C трехокись мышьяка легко переходит в пятиокись:

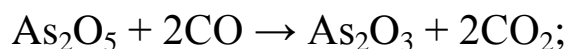


Это относительно устойчивое соединение, разлагающееся при высоких температурах. Реагируя с окислами, пятиокись дает соли мышьяковой кислоты – арсенаты:

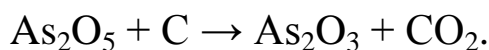


Арсенаты также прочны и не возгоняются до очень высоких температур. Таким образом, удаление мышьяка в окислительной атмосфере невозможно.

При увеличенном расходе топлива пятиокись мышьяка, присутствующая в руде, восстанавливается до трехоксида:



или



Трехокись кипит при температуре 460°C, переходя в газовую фазу. Она реагирует также с водородом газа, образуя арсин AsH_3 – газ, который также удаляется. При особенно высоком расходе топлива (10-11%) возможно получение металлического мышьяка, который кипит при 620°C и легко переходит в газовую фазу.

Степень удаления мышьяка составляет 20-30%. Это обусловлено тем, что трехокись мышьяка вновь охлаждается в зоне холодной

шихты, прилегающей к колосниковой решетке, и удаляется в последние минуты, когда зона горения подходит к постели.

При спекании офлюсованной шихты весь мышьяк остается в агломерате.

Добавление в шихту 3-5% хлористой извести (CaCl_2) позволяет удалять до 60% мышьяка при нормальном расходе топлива. Хлорид мышьяка (AsCl_3) кипит при температуре 130°C .

Такие примеси как цинк (Zn) и свинец (Pb), присутствующие в рудах преимущественно в виде сульфидов PbS – свинцового блеска и ZnS – цинковой обманки, в восстановительной атмосфере и большом количестве топлива (10-11%) удаляются лишь на 20%.

Относительно низкие температуры кипения хлоридов цинка ZnCl_2 (732°C) и свинца PbCl_2 (954°C) позволяют их эффективно удалять при оптимальном расходе топлива, но при условии добавления в шихту 3% хлористой извести (CaCl_2). Соединение цинка удаляется на 65%, свинца – на 90%.

При агломерации фосфор, к сожалению, не удаляется и переходит полностью в агломерат.

3.4 Технология производства агломерата

Технологическая схема производства агломерата имеет вид, показанный на рис. 3.7.

На агломерационную фабрику для приготовления шихты поступают рудные компоненты, колосниковая пыль и топливо. При производстве офлюсованного агломерата добавляется флюс в виде известняка, доломита или магнезита.

Обычно рудные компоненты и шихта имеют требуемую крупность. Топливо и флюс имеют повышенную крупность, поэтому для их доведения до необходимой крупности применяют дробление, грохочение и измельчение.

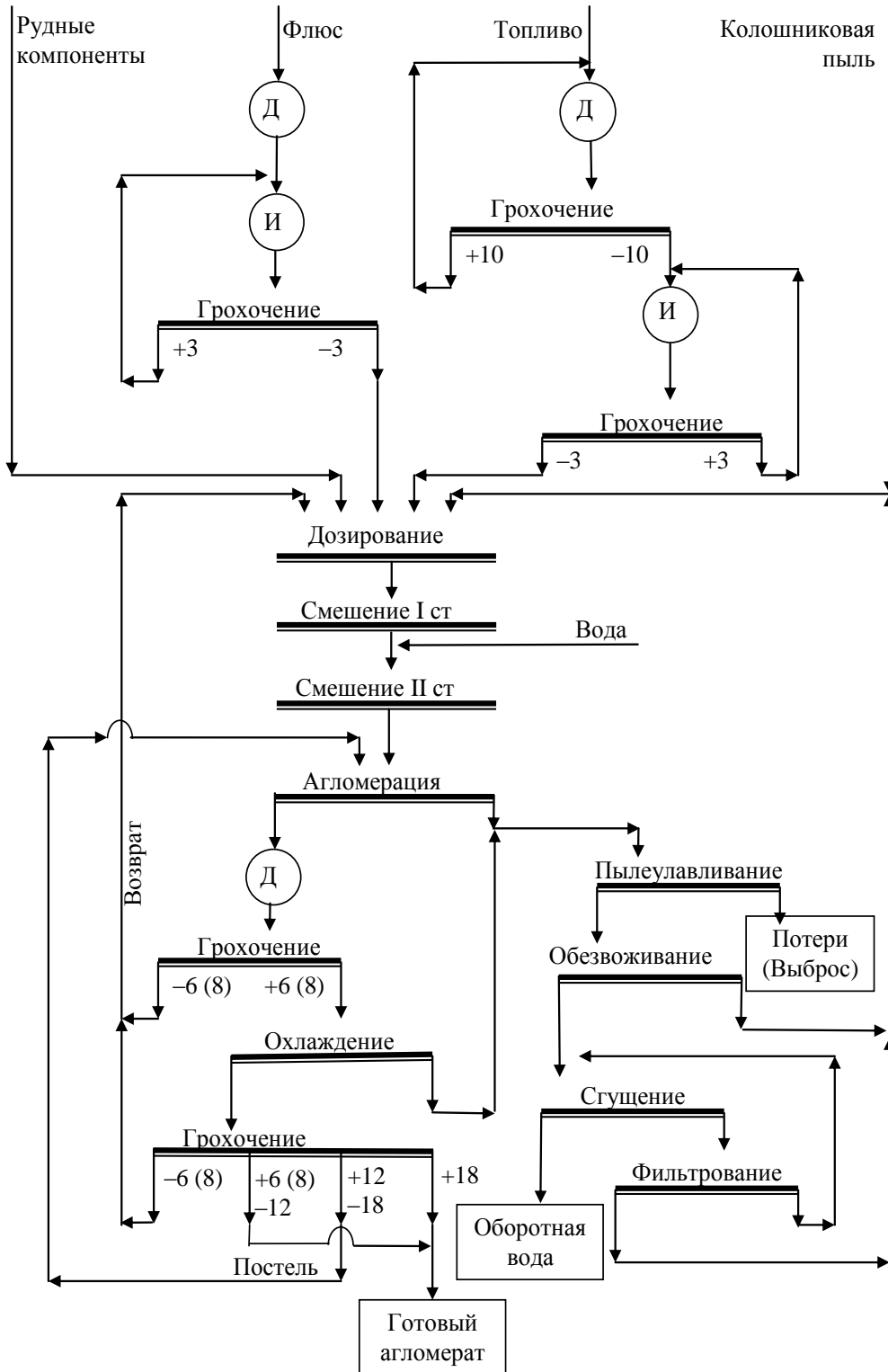


Рисунок 3.7 – Технологическая схема производства агломерата

Подготовленные до необходимой крупности компоненты поступают в специальные бункеры – силоса, откуда дозируются в заданном соотношении для приготовления шихты. Смешение проис-

ходит в зависимости от крупности компонентов в одну или две стадии. После этого полученная шихта направляется на агломерацию.

Готовый агломерат подвергается дроблению и грохочению. Горячий возврат для интенсификации процесса (подогрева шихты) направляется в операцию смешения. Готовый по крупности агломерат охлаждается, повторно классифицируется, где из него выделяется постель, направляемая на агломерацию, и вновь образованный мелкий продукт. Охлажденный кондиционный по крупности агломерат направляется на склад готовой продукции или непосредственно в металлургический цех на плавку.

3.5 Оптимальная крупность компонентов шихты и ее приготовление

Для получения качественного агломерата верхний предел крупности для окисленных руд составляет 8 мм, для магнетитовых – 6 мм. Крупность возврата также ограничивается указанными пределами.

Многочисленными исследованиями установлено, что крупность известняка не должна превышать 3 мм. Имеются данные о положительном влиянии дальнейшего снижения крупности известняка до 2 мм.

Увеличение крупности топлива свыше 3 мм вызывает резко выраженный очаговый характер горения топлива, что приводит к образованию крупнопористой структуры с низкой прочностью и восстановимостью. Отрицательно сказывается и наличие частиц с размером менее 0,5 мм. Данные частицы обладают большой подвижностью и выносятся в нижний слой шихты, вызывая прилипание агломерата к колосникам, или уносятся с дымовыми газами. Кроме этого такие частицы при окомковании шихты попадают внутрь комков, снижая скорость выгорания топлива. Содержание фракции крупностью 0,5-2,0 мм в твердом топливе должно быть не менее 70%. На аглофабрику обычно поступает топливо крупностью менее

40 мм. Для его дробления используют четырехвалковую дробилку, а для измельчения – стержневую мельницу.

Известняк обычно поступает с крупностью менее 25 мм. Его измельчение производят в молотковых мельницах, работающих в замкнутом цикле с вибрационным грохотом. При поступлении известняка крупностью более 25 мм дополнительно используются короткоконусные дробилки, которые доводят крупность материала до необходимой (менее 15-20 мм).

Измельченные и усредненные шихтовые материалы отдельно, каждый по своему тракту, направляются в свой бункер-накопитель или силосный бункер. Из них через весовые питатели (тарельчатые, роторные, вибрационные и т.д.) шихтовые материалы дозируются в строго заданном соотношении. Точность дозировки компонентов составляет 2,5-3%.

На аглофабриках в зависимости от крупности руды применяется одноступенчатая или двухступенчатая система смешивания. Двухступенчатая система применяется в том случае, если руда мелкоизмельченная.

Первая ступень смешивания производится роторными или барабанными смесителями без добавления воды. Оптимальная степень заполнения смесителей равна 10%. В зависимости от скорости вращения барабана смесителя различают каскадный, водопадный и циклический режимы смешивания (рис 3.8).

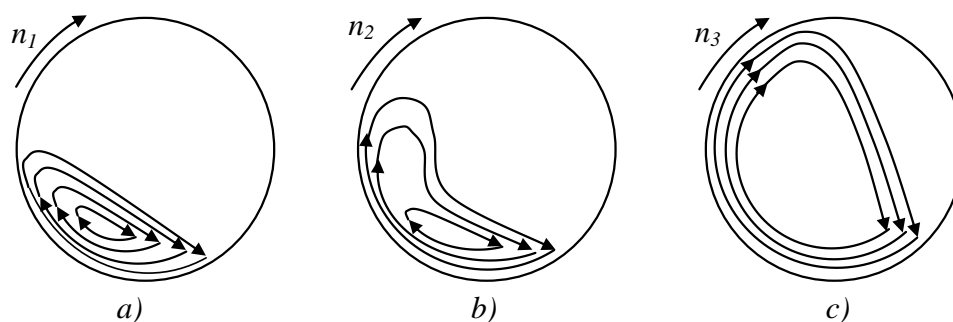


Рисунок 3.8 – Схемы движения материала при смешивании:
a) каскадный; *b)* водопадный; *c)* циклический

Каскадный режим возникает при небольшой частоте вращения барабана – материал поднимается на некоторую высоту, а затем пересыпается по поверхности материала, который лежит под ним (рис. 3.8, *a*).

При большой частоте вращения барабана формируется циклический режим смешивания – материал поднимается поверхностью барабана, отрывается от нее, а затем по параболической траектории движется до столкновения с поверхностью барабана (рис. 3.8, *c*).

При водопадном режиме, который возникает при условии $n_1 < n_2 < n_3$, материал часть своей траектории проходит, как и при циклическом режиме, но точка отрыва его от поверхности барабана расположена значительно ниже, и он ссыпается на материал, поднимаемый барабаном, и остаток траектории движения проходит в каскадном режиме (рис. 3.8, *b*).

Лучшие результаты при смешивании достигаются при водопадном режиме, который обеспечивает наиболее интенсивное перемешивание за счет пересечения траекторий движения частиц шихты различной крупности. За критерий движения материала в барабанном смесителе принят параметр B , равный:

$$B = n^2 R / 900;$$

где n – частота вращения барабана; R – радиус барабана.

Для каскадного режима параметр B имеет значение менее 0,1, для водопадного – изменяется в пределах 0,17-0,24, для циклического – более 0,3.

Характер поверхности смесительного барабана зависит от его назначения. В первичных смесительных барабанах к внутренней поверхности прикрепляют изогнутые стальные полосы, уголки и т.п., или устанавливают в нижней части шнеки, которые разбивают комки и способствуют лучшему перемешиванию. В барабанах для окомкования (вторичное смешивание) создают на поверхности стенки специальный слой материала определенной толщины, называемый гарнисажем. Важной характеристикой данных барабанов явля-

ется длина пути, который проходит материал за время пребывания в барабане:

$$L = \pi D n \tau ,$$

где D – внутренний диаметр барабана, м; n – частота вращения барабана, об/мин; τ – время пребывания частиц в барабане, мин (более подробно данный показатель рассматривается при изучении окомкования полезных ископаемых).

Для увлажнения шихты и обеспечения оптимальных условий окомкования вода в смесительный барабан подается на расстоянии $1/3$ от начала загрузки через форсунки. Чем тоньше распыление воды, тем лучше работает барабан.

Увлажнение шихты при перемешивании приводит к сцеплению частиц в более или менее прочные гранулы под действием капиллярных сил, что повышает газопроницаемость шихты. Зависимость газопроницаемости от влажности носит экстремальный характер. Оптимальная влажность, при которой достигается максимальная скорость спекания, на 2-3% ниже влажности, соответствующей максимальной газопроницаемости. При таком значении компенсируется вредное влияние переувлажнения шихты. Для магнетитовых концентратов оптимальная влажность составляет 5-8%, для бурых железняков – 14-24%.

Агломерационный процесс является высокоэкономичным, поскольку обеспечивается почти полное использование тепла отходящих газов и значительной части тепла готового продукта. В результате спекания получают спёк. Предварительно охлажденный спёк дробят и направляют на грохочение для отделения горячего оборота (класс крупности 0-8 мм). Агломерат крупностью более 8 мм поступает на охлаждение и далее на грохочение. После грохочения агломерат классов +50 и 13-50 мм направляется в доменный цех, а класс 8-13 мм – для использования в качестве постели на агломерационной машине.

4 ОКОМКОВАНИЕ

4.1 Общие сведения о процессе окомкования

Окомкование – это процесс окускования полезных ископаемых, основанный на способности тонкоизмельченных увлажненных материалов, содержащих 70-80% класса 0-0,043 мм или 90% класса 0-0,074 мм, при перекачивании образовывать гранулы сферической формы (окатыши) без применения непосредственного давления [80].

Развитие технологии окомкования началось в начале XX века. Рост добычи и переработки тонковкрапленных железных руд и бедных железистых кварцитов привел к увеличению производства тонкоизмельченных концентратов. Окускование таких концентратов агломерацией неэффективно вследствие снижения производительности агломерационных машин. В связи с этим, в последние 10-20 лет для окускования тонких концентратов широко применяют окомкование исходной шихты и дальнейший упрочняющий обжиг полученных окатышей. Упрочненные окатыши легко транспортируются и обладают ценными металлургическими свойствами.

Процесс получения окатышей из концентрата состоит из трех основных стадий: подготовка компонентов шихты для окомкования; получение сырых окатышей; упрочняющий обжиг.

Шихта для производства окатышей состоит из железорудной части, флюсующих, упрочняющих добавок и, иногда, твердого топлива.

Формирование окатышей происходит за счет сил взаимодействия между увлажненными частицами шихты, тесный контакт между которыми обусловлен уплотнительными усилиями, возникающими при перекачивании окатышей в окускователях. При этом капиллярные силы, возникающие при образовании водных менисков в тонких порах на поверхности окатышей, являются наиболее существенными в сумме сил, определяющих прочность сырых окатышей.

Способность концентрата образовывать окатыши определяется его физическими свойствами, и в первую очередь, удельной поверхностью и гранулометрическим составом, а также склонностью к смачиванию. Обычно удельная поверхность и крупность концентратов, используемых для производства окатышей, составляют соответственно 1500-2500 см²/г и 75-90% класса 0-0,044 мм [77].

В качестве флюс-добавки применяются известняк и бентонит. Влажность шихты перед окомкованием должна быть на 2-3% ниже оптимальной. Недостающий объем воды добавляется при окомковании. Сырые окатыши должны быть достаточно прочными для возможности их транспортировки от окускователей до выжигающих агрегатов. Окатыши считаются пригодными, если они не разрушаются после 5-6 сбросов с высоты 300 мм.

Окатыши не должны растрескиваться в процессе упрочняющего обжига. Для улучшения свойств сырых окатышей в концентрат вводят добавки: бентонит, который повышает сопротивление раздавливанию и растрескиванию при быстром подсушивании; известняк, который служит флюсом и увеличивает сопротивление окатышей ударам при перегрузках и раздавливанию при подсушивании.

Бентонит представляет собой высокодисперсную глину, способную образовывать гели с очень развитой поверхностью. Лучшими считаются щелочные бентониты, в обменном комплексе которых преобладают щелочные ионы Na⁺ и K⁺ с высокой гидратирующей способностью. Наличие ионов щелочноземельных металлов в обменном комплексе, гидратирующая способность которых меньше щелочных, снижает качество бентонита. Бентонит применяется обычно крупностью 85-87% класса 0-0,074 мм, влажностью 5-8%. Расход его составляет 0,7-1,5% шихты [78].

Для окомкования концентратов используют барабанные и чашевые окомкователи. Чашевый (тарельчатый) окомкователь (рис. 4.1) представляет собой вращающуюся чашу 1 в виде диска с бортом по окружности, установленную под углом 40-60° к горизонту. Окомкование материала происходит на днище чаши. Вследствие сил слипания материал комкуется, и образованные окатыши поднима-

ются на некоторую высоту, а затем скатываются вниз по траекториям 2. При этом происходит увеличение размера окатышей и возникновение мелких комочков – новых центров окомкования. Конечная крупность окатышей составляет 10-16 мм.

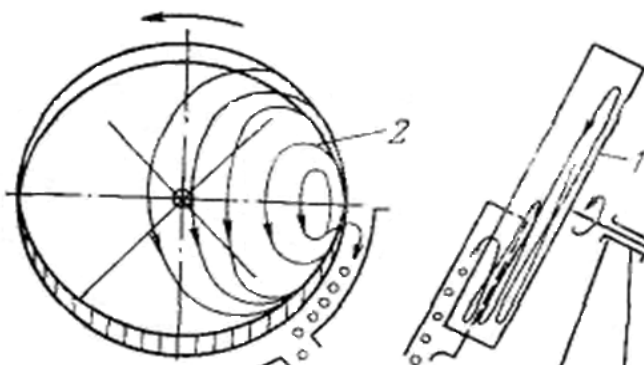


Рисунок 4.1 – Схема чашевого окомкователя

Сырые окатыши подвергают сушке, нагреванию и обжигу на колосниковой конвейерной машине или во вращающейся трубчатой печи.

Металлизация окатышей осуществляется с целью частичного восстановления оксидов железа до металла. Это способствует повышению технико-экономических показателей при использовании в доменном производстве. Получение металлизированных окатышей с применением в качестве восстановителя твердого топлива осуществляется двумя способами:

- измельченное топливо смешивается с железорудным концентратом и флюсами и из такой смеси получают рудно-топливные окатыши, подвергающиеся восстановлению;
- окомкование шихты без топлива, после чего окатыши восстанавливаются в слое твердого топлива.

Сырые рудно-топливные окатыши производятся по обычной технологии. Их обжиг и восстановление проводят при температуре 1273-1350°С.

4.2 Теоретические основы процесса окомкования

При окомковании первоначальное связывание частиц осуществляется за счет сил адгезии и когезии, а также сил поверхностного натяжения воды, которых оказывается недостаточно для получения прочных окатышей. Для повышения прочности окатыши подвергаются спеканию. Исключение составляют необожженные окатыши, упрочнение которых осуществляется подобно брикетам.

Большинство руд, подвергаемых окомкованию, имеют хорошую смачиваемость – краевой угол смачивания их поверхности близок к нулю. При взаимодействии с водой тонкие частицы минералов слипаются в комочки под действием капиллярных сил. В начальный период они имеют низкую прочность и высокую пористость. За счет многочисленного столкновения происходит перемещение частиц шихты на тех участках, где прочность наименьшая. То есть там, где между частицами находилась избыточная влага, которая при их сближении выдавливается на поверхность окатышей. При этом прочность окатышей увеличивается. Вода на поверхности окатыша создает условия следующего прилипания частиц шихты, что позволяет окатышам постепенно увеличиваться до необходимых размеров.

Рассмотрим более детально теоретические основы взаимодействия капиллярных сил [78].

В точках контакта отдельных частиц материала и при наличии влаги образуются прослойки воды двойной кривизны. Величина стягивающего капиллярного давления согласно уравнению Лапласа равна:

$$P_k = \sigma (1/r_1 + 1/r_2),$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; r_1 – радиус кривизны кольца водной манжеты; r_2 – радиус кривизны мениска водной манжеты (рис. 4.2).

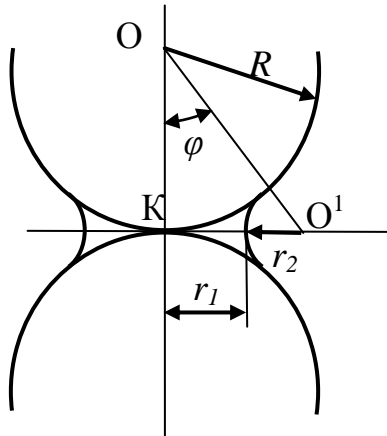


Рисунок 4.2 – Схема образования тонких пленок воды между частицами твердого материала:

R – радиус частиц; r_1 – радиус кривизны кольца; r_2 – радиус кривизны мениска

Так как центр кольца манжеты находится внутри манжеты, то радиус r_1 берут со знаком “–”, и уравнение Лапласа имеет вид

$$P_k = \sigma (1/r_2 - 1/r_1).$$

Из приведенного выражения видно, что с увеличением количества влаги увеличиваются одновременно радиусы r_1 и r_2 , действующие обратно пропорционально.

Из треугольника $ОКО^1$ можно определить r_1 и r_2 .

$$ОО^1 = R + r_2,$$

$$O^1K = r_1 + r_2.$$

Тогда

$$r_1 + r_2 = R \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (4.1)$$

$$R + r_2 = R / \cos \varphi. \quad (4.2)$$

Из уравнения (4.2) имеем

$$r_2 = R (1 - \cos \varphi) / \cos \varphi.$$

Подставив это выражение в уравнение (4.1) получим:

$$r_1 = R [(tg \varphi + 1) - (1 / \cos \varphi)].$$

Тогда выражение для капиллярного давления можно представить в виде:

$$P_k = \sigma \left(\frac{1}{R \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right)} - \frac{1}{R \cdot \left(tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)} \right) = \frac{\sigma}{R} \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \varphi} - 1} - \frac{1}{tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}} \right).$$

Капиллярная сила равна произведению величины капиллярного давления на площадь контакта:

$$F_k = P_k \cdot S;$$

$$S = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot R^2 \cdot \left(tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2.$$

Тогда:

$$F_k = \pi \cdot R^2 \frac{\sigma}{R} \left(\frac{1}{\frac{1}{\cos \varphi} - 1} - \frac{1}{tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}} \right) \cdot \left(tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2;$$

$$F_k = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \left(tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 \left(\frac{tg \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}}{\frac{1}{\cos \varphi} - 1} - 1 \right).$$

Но, кроме силы F_k необходимо учитывать силу поверхностного натяжения жидкой фазы:

$$F_n = 2\pi \cdot r_1 \cdot \sigma;$$

или

$$F_n = 2\pi \cdot \sigma \cdot R \cdot \left(\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right).$$

Тогда общая действующая сила будет равна сумме:

$$F_o = F_n + F_k.$$

После подстановки выражений для этих сил получим:

$$F_o = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \left[\left(\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}}{\frac{1}{\cos \varphi} - 1} - 1 \right) + 2 \left(\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) \right];$$

или после приведения подобных:

$$F_o = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \left(\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}}{\frac{1}{\cos \varphi} - 1} + 1 \right). \quad (4.3)$$

В данном выражении для его упрощения введена замена:

$$K_1 = \operatorname{tg} \varphi + 1 - \frac{1}{\cos \varphi}; \quad K_2 = \frac{1}{\cos \varphi} - 1.$$

Тогда

$$F_o = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot K_1 \cdot \left(\frac{K_1}{K_2} + 1 \right).$$

Из анализа данного выражения следует, что при $\varphi = 0^\circ$ получается неопределенность:

$$\operatorname{tg}\varphi = 0, \cos\varphi = 1,$$

и тогда

$$F_o = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot 0 \cdot \left(\frac{0}{0} + 1 \right).$$

Максимальное значение общей силы сжатия двух частиц за счет водной манжеты наблюдается при $\varphi = 2^\circ$, что указывает на оптимальное количество воды (рис. 4.3).

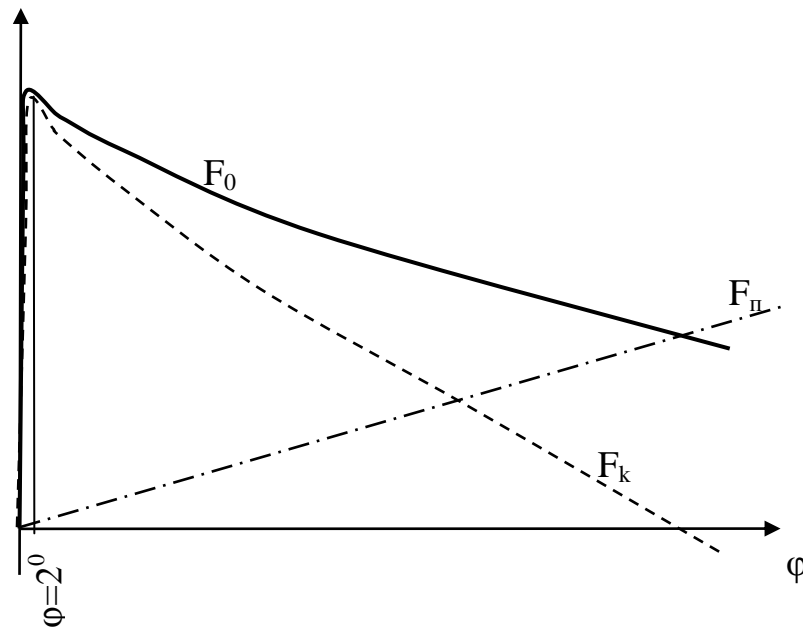


Рисунок 4.3 – Относительное значение капиллярной (F_k), поверхностной (F_n) и общей (F_o) силы в зависимости от угла φ

4.3 Методы упрочнения окатышей

Полученные сырые окатыши имеют низкую прочность. Для их упрочнения применяют различные методы: обжиг, химико-каталитический метод, водотепловой (автоклавный) метод, метод гидратации.

4.3.1 Применение обжига для упрочнения окатышей

Для обжига окатышей применяется оборудование однотипное с агломерационным, то есть конвейерная колосниковая машина, трубная печь, кольцевой охладитель, комбинированное оборудование.

Отличительной чертой шахтных печей от агломерационных установок является то, что горение идет не в слое окатышей, а в дополнительно установленных камерах горения по обеим сторонам шахтной печи. Печи работают по принципу противотока – вниз движутся окатыши, вверх сквозь слой окатышей поднимаются газы, передающие тепло. Для горения используют жидкое или газообразное топливо. В верхней части печи происходит сушка, затем подогрев и обжиг окатышей. В нижней части протекает процесс замедленного охлаждения окатышей холодным воздухом до температуры 100-150°C. Отходящие газы имеют температуру порядка 150°C.

Преимуществом шахтных печей являются: низкие эксплуатационные расходы, в связи с завершенностью процесса теплообмена; исключается применение высокотемпературных дымососов, сложных в изготовлении и обслуживании. К недостаткам следует отнести: чувствительность к явлениям местного оплавления окатышей и образованию настывей на стенках шахты, что приводит к нарушению движения газового потока; относительно низкую производительность (не превышает 0,5 млн. т/год).

Поэтому шахтные печи используют при изготовлении неофлюсованных окатышей, когда допустим большой интервал колебаний

температуры 100-200°C без размягчения и оплавления окатышей (для офлюсованных окатышей интервал составляет 40-80°C).

Обжиговая конвейерная машина по своему принципу аналогична агломерационным лентам, но приспособлена для работы при более высоких температурах. Состоит из следующих секций: сушки (обычно две), подогрева, обжига (от одной до трех), рекуперации и охлаждения.

Колосники и тележки машины изготавливаются из жаропрочных сталей. Зона сушки занимает 15-20% площади машины, а охлаждения – 30-35%.

Преимуществом являются: возможность точно регулировать тепловой процесс обжига; в процессе обжига окатыши находятся в состоянии покоя, а поэтому снижены требования к прочности сырых окатышей; высокая производительность (до 3 млн. т/год). Недостаток – необходимость применения жаропрочных сталей и высокотемпературных дымососов; повышенный расход тепла.

В настоящее время применяется в основном комбинированный обжиговый агрегат, в котором сушка и подогрев окатышей производят на облегченной конвейерной машине, обжиг – во вращающейся трубчатой печи, офутерованной огнеупорным кирпичом, охлаждение – в кольцевом охладителе. Производительность агрегатов составляет до 3 млн. т/год, расход тепла сопоставим с расходом тепла в шахтных печах, число применяемых высокотемпературных дымососов сокращается в два раза в сравнении с конвейерными машинами.

Сушка окатышей является первой стадией термоупрочняющей обработки, во многом определяющей качество готовой продукции и производительность обжигового агрегата. На всех фабриках окомкования сушка окатышей производится в плотном слое, через который просасываются горячие газы.

При обжиге окатышей в шахтных печах и на конвейерных машинах их сушка производится в этих же агрегатах. При обжиге окатышей во вращающихся печах их сушка осуществляется на конвейерных решетках, устанавливаемых перед печами.

Температура газа-теплоносителя на входе в слой влажных окатышей обычно находится в пределах 250-400°C, а скорость фильтрации газа, приведенная к нормальным условиям (0°C; 1 кгс/см²) составляет 0,9-1,3 м/сек. Для конкретных железорудных материалов эти параметры выбираются такими, чтобы не происходило разрушения окатышей в процессе сушки.

Различают два явления разрушения структуры окатышей: трещинообразование и полное взрывообразное разрушение («шок»). Трещинообразование – локальное разрушение поверхности окатышей, наступающее обычно в начальный период сушки. «Шок» – полное взрывообразное разрушение окатышей, наступающее при испарении влаги внутри их объема, когда возникающие объемные напряжения, вследствие давления водяных паров, превышают структурно-механическую прочность окатышей.

Для сохранения структуры окатышей скорость их сушки не должна превышать критического значения, определяемого при прочих равных условиях температурой и скоростью газа-теплоносителя. Поэтому параметры газа-теплоносителя обычно определяются экспериментально, при этом добиваются условий, при которых не наступает разрушения окатышей.

Как и при агломерационном процессе, в нижних горизонтах слоя окатышей при сушке наблюдается конденсация влаги. При этом в результате переувлажнения снижается прочность окатышей, что приводит к их смятию и образованию трещин под действием давления вышележащих слоев. Поэтому, как правило, сушку окатышей производят с реверсом газового потока. Вначале газы подаются в слой снизу, а затем сверху. Период продува газом слоя окатышей снизу вверх обычно составляет 60-70% общей продолжительности сушки. На конвейерных машинах в зоне сушки удаляется до 85-90% влаги. Продолжительность сушки окатышей в слое зависит от параметров газа-теплоносителя и водно-физических свойств самих окатышей.

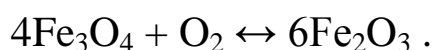
Упрочняющий обжиг окатышей начинается после сушки и заключается в постепенном разогреве их горновыми газами до темпе-

ратуры 1250-1300°C. При этом скорость нагрева зависит от свойств железорудного сырья и определяется экспериментально. Конечная температура нагрева окатышей определяется содержанием железа в концентрате и составом пустой породы. Чем богаче окатыши по железу, тем выше должна быть температура их обжига. Офлюсованные окатыши при прочих равных условиях имеют температуру обжига на 50-100°C ниже, но процесс требует более точного ее регулирования и поддержания на заданном уровне.

Упрочнение окатышей из магнетитовых концентратов происходит благодаря окислению магнетита в гематит и последующей рекристаллизации частиц гематита, твердофазного спекания отдельных зерен концентрата и частичного образования шлаковой связи при размягчении пустой породы. Так как обжиг окатышей из магнетитовых концентратов связан с реакцией окисления, то атмосфера, в которой проводится обжиг, должна быть окислительной. Как правило, содержание кислорода в газах при обжиге магнетитовых окатышей составляет 8-12%.

Обжиг окатышей из гематитовых концентратов не связан с окислением. Окатыши из гематитовых концентратов упрочняются только благодаря рекристаллизации зерен гематита, их твердофазному спеканию и образованию шлаковых связей. Прочность обожженных окатышей из концентратов различных типов обычно находится в пределах 200-350 кг/окатыш. В результате обжига окатыши не разрушаются при перегрузках в холодном состоянии, при нагреве и восстановлении в доменных печах.

Окисление магнетита при обжиге магнетитовых окатышей является одним из основных процессов и протекает по реакции:



Эта реакция экзотермическая, ее тепловой эффект при нормальных условиях составляет 3500 ккал/кг присоединенного кислорода. В практических условиях обжига реакция, как правило, протекает только в сторону образования Fe_2O_3 .

Механизм окисления окатышей в общем случае можно формулировать следующим образом. Кислород, находящийся в газе-теплоносителе, в результате конвективной диффузии переносится к поверхности окатыша. Далее молекулярным и молярным переносами (диффузией и эффузией) кислород транспортируется к поверхности окисления, где он вступает в химическую реакцию с магнетитом.

Анализ шлифов окатышей показал, что при низких температурах (300-500°C) на поверхности магнетитовых зерен получается гематит в форме $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, образуя плотный покровный слой, через который слабо проникают атомы кислорода.

При температуре примерно 573°C $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ переходит в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Этот переход связан с образованием микротрещин и дефектов в кристаллической решетке. Разрушение покровной тонкой пленки на поверхности зерен магнетита заметно интенсифицирует скорость их окисления. Поэтому при температуре 600-1000°C на видимую скорость реакции все большее влияние начинает оказывать скорость диффузии кислорода в пространстве пор окатышей. При этом окисление идет уже не по всему объему окатыша, а в пределах шаровой зоны конечной толщины, перемещающейся от периферии к центру.

С увеличением температуры, толщина зоны окисления в окатыше уменьшается. При температуре выше 1000-1100°C (в зависимости от содержания железа в концентрате и состава пустой породы) реакционная зона в окатыше сужается настолько, что становится соизмеримой с размерами отдельных частиц, и окатыши, по существу, можно рассматривать состоящими из периферийной гематитовой оболочки и центрального магнетитового ядра. Процесс окисления при высоких температурах заключается в перемещении границы раздела фаз от периферии к центру окатыша.

Наилучшими металлургическими свойствами обладают достаточно полно окисленные окатыши (конечное содержание закиси железа до 3-4%) с рекристаллизованными округлыми зернами гематита, частично сцементированными шлаковой связкой. Такие окатыши в производственных условиях получают в том случае, когда их окисление проводится при температуре ниже температуры размяг-

чения шихтовых материалов (примерно при 1000-1150°C в зависимости от содержания железа в концентрате и состава пустой породы). После окисления окатыши нагревают до температуры 1300-1350°C, при которой происходит рекристаллизация зерен гематита и частичное размягчение шихтовых материалов с образованием шлаковой связки.

Разложение карбонатов при обжиге офлюсованных окатышей определяется разностью между упругостью диссоциации и парциальным давлением углекислоты в газовом потоке. Обычно в газовом потоке содержание CO_2 составляет 10-12%. При этом условии термодинамическая температура начала разложения известняка равна примерно 780°C. Наибольшая скорость разложения известняка наблюдается при температуре примерно 900°C, когда упругость диссоциации достигает величины, равной атмосферному давлению [81]. Поэтому при обжиге в практических условиях скорость разложения карбонатов определяется только скоростью подвода тепла к окатышам. Как правило, при обжиге офлюсованных окатышей наблюдается практически полное разложение флюсов – известняка и доломита.

Десульфурация окатышей из сернистых концентратов при обжиге обычно составляет при отсутствии флюсов 90-92%, а при обжиге офлюсованных окатышей уменьшается в промышленных условиях до 70-80%. В железорудных концентратах сера представлена главным образом в виде пирита FeS_2 и пирротина FeS . На начальном этапе обжига в окислительной атмосфере сера удаляется благодаря диссоциации FeS_2 до FeS (при температуре выше 300-500°C) и окислению пирротина с образованием гематита и сернистого ангидрида [78].

При наличии в окатышах свободной окиси кальция, образовавшейся при разложении известняка, пары элементарной серы и сернистый ангидрид активно взаимодействуют с окисью кальция с образованием трудно разлагающегося сульфата кальция CaSO_4 . Для разложения сульфата кальция необходимо выдерживать 5-7 мин. при температуре выше 1250°C. Осуществить это на конвейерных машинах трудно. Благоприятное влияние на десульфурацию офлю-

сованных окатышей оказывает замена известняка доломитом, так как диссоциация сульфата магния начинается при более низкой температуре, чем сульфата кальция.

При удалении сульфатной серы состав газовой фазы существенного значения не имеет. Большое влияние на десульфурацию окатышей оказывают крупность известняка и размер окатышей. Наилучшие условия для удаления серы создаются, когда известняк представлен частичками крупностью 0,04-0,05 мм.

Размер окатышей оказывает большое влияние на технологию обжига и качество обожженных окатышей. Например, продолжительность окисления окатышей в диффузионном режиме прямо пропорциональна квадрату их диаметра. С уменьшением крупности окатышей возрастает также их прочность при восстановлении.

Охлаждение окатышей является заключительной операцией термоупрочняющего обжига. При обжиге окатышей в шахтных печах и на конвейерных машинах окатыши охлаждаются, как правило, в этих же агрегатах. При обжиге во вращающихся печах применяются отдельные охладители – чаще всего кольцевого типа. На конвейерных машинах площадь зоны охлаждения должна составлять не менее 40% общей площади. Действительный расход воздуха на охлаждение, который меньше подаваемого вентиляторами на величину вредных утечек, должен быть не менее 2000-2200 м³/т. При этом получают температуру окатышей на сходе с машин 150-200°С, что позволяет транспортировать их жаростойкими резиновыми конвейерами.

4.3.2 Безобжиговые методы упрочнения окатышей

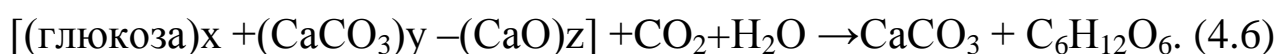
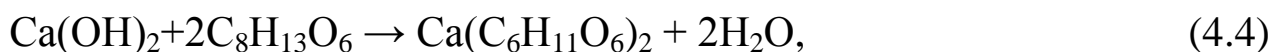
Кроме упрочнения окатышей с помощью обжига разработаны другие методы упрочнения, называемые безобжиговыми. Безобжиговые методы укрепления окатышей: на связке из жидкого стекла или цемента, путем автоклавной обработки с образованием гидросиликатной связки или путем каталитической карбонизации гашеной

известки с образованием известковой связки. Безобжиговые окатыши в отношении физической сути изготовления и укрепления аналогичны брикетам: при скатывании шихты за счет постепенного добавления новых слоев частиц и многократных ударов образуются достаточно твердые плотные шарики – окатыши [78].

Химико-каталитический метод упрочнения окатышей заключается в образовании прочного скелета кальцита, играющего роль связующего. Он образуется в результате химической реакции карбонизации гидроокиси кальция углекислотой в присутствии катализатора.

На воздухе карбонизация протекает медленно при низкой концентрации CO_2 (до 0,03%). В атмосфере дымовых газов реакция карбонизации известки также протекает медленно вследствие образования в начальный период реакции на поверхности окатыша плотного слоя CaCO_3 , препятствующего поступлению углекислоты внутрь окатыша. Применение мелассы в качестве катализатора позволило интенсифицировать реакцию карбонизации и распространить ее на всю глубину окатыша.

Значительное ускорение естественной карбонизации известки под влиянием малых добавок сахаров было описано еще Д.И. Менделеевым и используется в строительной практике. Реакция катализа в растворе сахара, входящего в состав мелассы, может быть выражена на следующем образом:



Механизм реакции образования прочной кристаллической структуры CaCO_3 заключается в повышении растворимости гидрата окиси кальция в растворе сахарата кальция по реакции (4.4) и в образовании промежуточного коллоидного комплекса по реакции (4.5).

Последующие порции углекислоты делают эти комплексы неустойчивыми, в результате чего коллоидный раствор превращается в гель CaCO_3 , также связанный с адсорбированным сахаратом кальция, но с меньшим его количеством. Таким образом, идет постепенное обеднение глюкозой промежуточных коллоидных углекальциевых сахаратов и превращение геля CaCO_3 в кристаллическую структуру. Процесс заканчивается по реакции (4.6) с образованием прочной кристаллической связки. При этом глюкоза многократно используется для протекания описанных превращений.

Добавка поверхностно-активного вещества (мелассы) в небольших количествах (до 0,001%) приводит к торможению роста зародышей кристаллов кальцита в начальной стадии образования. Это обуславливает возникновение новых зародышей и способствует получению мелкокристаллической очень прочной структуры.

Для успешного протекания реакции карбонизации необходима активация окатышей путем раскрытия макропор подсушкой теплым воздухом (100-105°C). Содержание влаги в окатышах при подсушке не должно уменьшаться ниже определенного значения, так как основной процесс осуществляется в водной среде. Карбонизация слегка подсушенных окатышей ведется при 40-60°C дымовыми газами, содержащими до 25% CO_2 и имеющими относительную влажность 80-90%. Увлажнение газов необходимо потому, что реакция между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CO_2 идет со значительным выделением тепла, а это может привести к высыханию материала и прекращению реакции карбонизации.

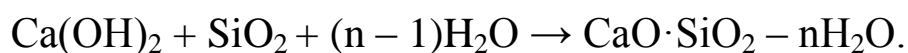
Кристаллическая структура кальцита обеспечивает окатышам прочность при нагреве только до температуры начала его диссоциации (900-950°C). Поэтому предусматривается создание высокотемпературной связки взамен распадающегося кальцита в процессе самой металлургической переработки рудно-топливных окатышей.

Большая удельная поверхность тщательно перемешанных между собой тонкоизмельченных концентрата и угля способствует интенсификации процесса восстановления окислов железа при нагреве окатышей. При упрочнении окатышей химико-каталитическим ме-

тодом сохраняется высокоактивная поверхность концентрата и исключено образование трудновосстановимых соединений.

В атмосфере восстановительного газа доменной печи на поверхности окатышей образуется корка металлического железа, препятствующая их разрушению вплоть до расплавления. Количество восстановителя (антрацита, тощего угля, кокса из газовых и бурых углей, торфа и др.) в окатышах должно обеспечивать только восстановление окислов железа. Избыточный мелкодисперсный углерод при попадании в шлак может привести к ухудшению физических свойств шлака и хода доменной печи.

Водотепловой (автоклавный) метод упрочнения окатышей предусматривает воздействие на них насыщенного высоконагретого водяного пара под давлением. В окатышах связкой является силикат типа $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, получающийся по реакции



При автоклавном методе упрочнения окатышей шихта должна содержать достаточное количество тонкомолотого кремнезема и гашеной извести (не менее 5%). Гашение извести необходимо производить для предотвращения разрушения окатышей во время пропарки. С повышением содержания извести и кремнезема прочность готового продукта увеличивается.

Основная технологическая операция – обработка сырых окатышей паром – осуществляется в цилиндрических сосудах (автоклавах) диаметром 2 м и более, способных выдерживать давление пара до 10 атм. Длина автоклавов может быть до 50 м.

Перед загрузкой в автоклав окатыши необходимо подсушить для снижения влажности с 8-10% (оптимальной при окомковании) до 6-7%, так как в начале обработки в автоклаве при поступлении в него пара происходит конденсация влаги на окатышах, что может привести к их разрушению от переувлажнения. Окатыши загружаются на специальные контейнеры-тележки, которые устанавливаются в автоклав. Степень заполнения автоклава – не более 50%.

После загрузки и герметизации в автоклав подают под давлением пар, который охлаждается и конденсируется на холодном материале, нагревая его. При низком давлении пара в автоклаве конденсат образуется преимущественно на поверхности материала, но с постепенным подъемом давления, пар проникает в мельчайшие поры, конденсируется в них и нагревает имеющуюся там воду. Горячая вода растворяет гидрат окиси кальция, в который попадают частицы кремнезема.

Химическое взаимодействие извести с кремнеземом в автоклаве идет только по поверхности частичек, где образуются гидросиликаты, прочно сросшиеся с зернами кварца. По содержанию растворимой кремниевой кислоты (обычно оно колеблется в пределах 4,5-10%) можно судить о количестве образовавшегося гидросиликата кальция. Известь, не вошедшая в состав силикатов, переходит в процессе автоклавной обработки из аморфного состояния в кристаллическое, что также упрочняет окатыши.

Длительность впуска и выпуска пара примерно одинакова и в основном зависит от пористости и крупности обрабатываемых материалов. Длительность обработки также зависит от этих параметров. Если запаривание силикатного кирпича в автоклаве длится до 7 часов, то на обработку паром окатышей диаметром 15-20 мм достаточно 1 час. При этом цикл работы автоклава распределяется следующим образом: 1 ч – выгрузка и загрузка, 1 ч – впуск пара, подъем температуры до 175°С и давления до 8 атм, 1 ч – пропаривание, 1 ч – выпуск пара. Прочность окатышей, полученных при таком режиме работы автоклава, составляет 100-120 кг/окатыш.

Окатыши, упрочненные водотепловой обработкой, непригодны для плавки в доменных печах, так как основная связка – гидросиликаты кальция – при нагреве обезвоживается и разрушается раньше, чем образуется связка за счет металлического железа. После медленного нагрева в восстановительной атмосфере в течение 1 ч до 1000°С и выдержки при этой температуре в течение 20 мин прочность на раздавливание окатышей, охлажденных в слое кокса, снижается с 100-120 до 15-19 кг/окатыш.

Применение же брикетов, полученных методом водотепловой обработки, дало положительные результаты в сталеплавильном производстве.

Гидратационный метод упрочнения окатышей заключается в применении молотой негашеной извести. Способ предложен И.В. Смирновым и детально исследован Б.В. Осиним.

При получении извести-пушонки в негашеную известь добавляется около 70% воды. Интенсивное парообразование разрыхляет гасящуюся массу. При гашении свежей обожженной извести в тесто добавляется примерно 250% воды, при этом схватывания и твердения не происходит в связи с разобшением частиц пленками воды. При добавлении к молотой негашеной извести воды в количестве 100-150% и при определенной температуре среды гашение протекает спокойно, получающаяся пластичная масса быстро схватывается и твердеет, не обнаруживая неравномерности изменения объема (трещины не появляются).

Молотая негашеная известь после затворения водой выделяет много тепла. Если из твердеющего материала быстро не отвести тепло, то возникающие высокие температурные напряжения могут разрушить структуру изделия. Поэтому, применяя молотую негашеную известь, можно получить прочные изделия лишь обеспечивая интенсивное потребление тепла, например, разбавляя гасящуюся известь инертным наполнителем (железорудным материалом).

Резкий подъем температуры соответствует началу схватывания массы, а максимальная температура – концу схватывания. При быстром и сильном пересыщении раствора образуется большое количество коллоидного гидрата окиси кальция, быстро коагулирующего в гидрогель извести. Гидрогель склеивает частицы наполнителя и твердеет по мере уменьшения содержания в нем воды, испаряющейся и расходуемой на гашение. Кристаллизация гидрата окиси кальция придает окончательную прочность изделию.

Другим видом упрочнения гидратацией является твердение цемента. Цемент для упрочнения окатышей, в отличие от строительного цемента, должен содержать значительно меньше серы и повы-

шенное количество окиси кальция, связанной в трехкальциевый силикат.

Технология промышленного производства окатышей на цементной связке, разработанная в Швеции, включает измельчение цементного клинкера, приготовление и смешивание в стержневой мельнице шихты и приготовление из нее окатышей. Сырые окатыши, перемешанные с влажным концентратом, загружаются в цилиндрические силосы большой емкости. Концентрат служит для предотвращения сминания сырых окатышей, создает необходимые условия по влажности для твердения цемента в окатышах.

В силосах окатыши, выдержанные около 5 суток, приобретают прочность около 60 кг/окатыш, после чего разгружаются из силосов на вибрационные грохоты для отделения от концентрата. Окатыши направляются на склад, а концентрат – на изготовление сырых окатышей. После твердения примерно в течение 20 суток окатыши имеют прочность свыше 100-120 кг/окатыш и являются пригодными для металлургического передела.

По указанной технологии в Швеции строится предприятие по производству 1,5 млн. т/год железорудных окатышей. Согласно произведенным подсчетам капитальные и эксплуатационные затраты на производство окатышей на цементной связке примерно на 20-30% ниже, чем при производстве обожженных окатышей.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Для разработки рекомендаций по технологии брикетирования различных материалов с целью дальнейшего внедрения в промышленности на кафедре «Обогащение полезных ископаемых» Донецкого национального технического университета проводился цикл исследований.

5.1 Методика проведения лабораторных исследований

Экспериментальные исследования были проведены в лабораторных условиях с использованием лабораторного оборудования и приборов.

Для брикетирования применялся гидравлический автоматизированный пресс ИП-100, развивающий усилие прессования до 100 кН. Пресс снабжен блоком автоматического управления, который позволяет производить автоматический сброс давления при достижении заданного усилия прессования. Измерительная система прессы СИ-2-100-УХЛ4.2 обеспечивает точность 1% при стандартном давлении (16,0 МПа) при изготовлении брикетов диаметром 32 мм, температурно-временной обработке и испытании на сжатие.

Прессование осуществляется в замкнутых цилиндрических матрицах различного диаметра (от 20 до 50 мм).

Пресс снабжен шнековым подпрессовщиком. Это позволяет предварительно уплотнять разрыхленный материал перед прессованием, что обеспечивает меньшую пористость полученных брикетов.

Дозировка количества загружаемой шихты обеспечивала получение брикетов равной высоты (около 25 мм). Перед опытами по брикетированию для стабилизации условий экспериментов производился контроль влажности компонентов шихты. При необходимости шихта подсушивалась.

Для перемешивания шихты перед брикетированием использовался шнековый смеситель. Имеется возможность поддержания и контроля температуры для обеспечения определенных параметров шихты и связующего, которые регламентируются принятым технологическим режимом и планом проведения исследования. Время перемешивания также регулируется.

При проведении экспериментов расчетное количество компонентов брикетирования в определенной последовательности смешивалось до получения однородной массы и брикетировалось, в основном, при давлении прессования 25 МПа, что соответствует развиваемому давлению в промышленных вальцевых прессах. В некоторых сериях испытывалось и повышенное давление.

Для принятого к исследованию связующего определялись интервалы варьирования его расхода в % к массе сухой шихты. Расходы связующих веществ принимались по рекомендациям фирм-производителей и с учетом опыта предприятий, на которых эти технологии уже внедрены и опробованы.

По каждой серии экспериментов готовились брикеты в количестве 50 шт., используемые в дальнейшем для определения режимов термообработки, оценки прочности и влагостойкости. Из них отбирались произвольно по три брикета для дальнейшей оценки их прочности. Конечные показатели брикетов определялись как средние из трех-четырех испытаний.

В ряде исследуемых режимов производилась подсушка полученных брикетов при температуре 80-90°C. Термическая обработка брикетов осуществлялась в шкафах СНОЛ-3,5 с регулируемой температурой в пределах 50-600°C. При термообработке брикетов варьировалось два фактора – температура и продолжительность процесса термообработки.

Определение водопоглощения выполнялось в соответствии с ГОСТ 21290-75. Для этого отделялась партия в 10 брикетов. Испытания проводились в металлическом сосуде высотой 150-200 мм с площадью дна, достаточной для размещения 10 брикетов. Сосуд снабжен проволочной сетчатой подставкой, укладываемой на дно. В

качестве смачивающей жидкости применяют воду или конденсат технического пара. Испытываемые брикеты взвешивались, укладывались на сетчатую подставку и помещались на дно сосуда с водой. Образцы должны быть покрыты слоем жидкости не менее 30 мм. Брикеты выдерживались в жидкости 24 часа, после чего их вынимали и в течение 2 минут давали воде стечь. Затем выполнялось взвешивание брикетов.

Водопоглощение рассчитывалось по формуле:

$$X_{\text{водопогл}} = \frac{M_{\text{после}} - M_{\text{до}}}{M_{\text{до}}} \times 100\% , \quad (5.1)$$

где $M_{\text{до}}$ – масса брикетов до испытания, кг; $M_{\text{после}}$ – масса брикетов после испытаний, кг.

Определение прочностных характеристик производилось после остывания брикетов до комнатной температуры.

Прочность брикетов оценивалась методом раздавливания плоским индентером на прессе ИП-100 с контролем максимального усилия, которое выдерживает брикет. Пробы для определения механической прочности отбирались в соответствии с ГОСТ 10742.

Прочность на раздавливание (сжатие) определялась согласно ГОСТ 28840-90. Испытания на раздавливание проводились на прессе с гидравлическим приводом, снабженном манометрическим силоизмерителем и двумя цилиндрическими вставками диаметром 30 мм, совмещенными по одной оси. Для определения три внешне целых брикета подвергались сжатию на прессе, и по полученным данным определялась механическая прочность на сжатие. После помещения образца в пресс его включали и равномерно повышали давление, доводя образец до разрушения. Силоизмерителем фиксировалось разрушающее давление. Механическая прочность образца на сжатие определялась по формуле:

$$\sigma_{\text{сжатие}} = \frac{P_{\text{max}} \times D^2}{d^2} , \text{ кг/см}^2 ,$$

где D – диаметр рабочего поршня пресса, мм; d – диаметр торцовой поверхности цилиндрической вставки, мм; P_{max} – давление, зафиксированное силоизмерителем, кг/см².

Прочность на истирание определялась в соответствии с ГОСТ 15137. Испытание на истирание производилось в стальном цилиндрическом закрытом барабане диаметром и длиной 500 мм с толщиной стенок 3-4 мм с электроприводом. Частота вращения барабана – 25±2 об/мин. Порция образцов 10 кг помещалась в барабан, закрывалась крышка люка. Включали привод вращения барабана на 4 минуты. После 100 полных оборотов привод выключали и высыпали содержимое в ящик. Подвергнутые истиранию образцы рассеивали на сите с отверстиями 25 мм.

Механическая прочность на истирание определялась по формуле:

$$P_{ист} = \frac{\Phi p > 25 \text{ мм}}{\text{Масса (до испытания)}} \times 100\% .$$

5.2 Исследование технологии брикетирования антрацитового штыба

Целью исследования являлось установление факторов, влияющих на качество получаемых брикетов, в том числе влияние гранулометрического состава шихты, определение рационального режима брикетирования смеси углей со связующими и термообработки брикетов с водорастворимыми связующими, оценка водостойкости брикетов и других параметров.

В качестве связующих исследовались цемент, лигносульфонат, отходы мукомольной промышленности, меласса.

Гранулометрический состав компонентов брикетирования представлен в табл. 5.1.

Таблица. 5.1 – Гранулометрический состав антрацитового штыба «Ременский» (АШ № 1) и «Фоменко» (АШ № 2)

Класс, мм	Штыб АШ № 1		Штыб АШ № 2	
	выход, %	зольность, %	выход, %	зольность, %
> 3	19,60	12,52	20,50	19,97
3 - 1	35,80	8,39	37,70	14,32
1 – 0,5	18,60	11,13	15,60	13,34
0,5 – 0,1	18,30	14,01	20,10	21,15
< 0,1	7,70	16,34	6,10	24,54
Итого	100,00	11,35	100,00	17,32

Результаты анализов свидетельствуют о том, что гранулометрический состав обоих компонентов не является рациональным для целей брикетирования. Малое содержание класса 0,1-0,5 мм и особенно <0,1 мм обуславливает наличие пустот в брикете и, как следствие, ослабление его прочности. Кроме того, материал представлен преимущественно «пластушками», что также является негативным моментом при брикетировании.

Водостойкость брикетов оценивалась по остаточной прочности после выдерживания в воде в течение двух часов.

5.2.1 Исследование режимов брикетирования шихты с цементом

На первом этапе брикетирование осуществлялось в матрице диаметром 25 мм. Наличие класса крупности более 3 мм в сырье для малых диаметров брикетов нежелательно. Поэтому для проведения исследований из исходного сырья выделялся класс крупности 0-3 мм. В табл. 5.2 и 5.3 представлены исходные условия проведения экспериментов и результаты по сериям 1-4.

Таблица 5.2 – Условия исследования брикетирования антрацитового штыба с цементом

Условия исследования	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	Примечания
Угольная составляющая шихты, %	АШ № 1: АШ № 2 = 50 : 50		АШ № 1др.: АШ № 2др. = 50 : 50		В сериях 3 и 4 с целью улучшения гранулометрического состава шихта измельчалась на валковой дробилке
Влажность шихты, %	5,5		5,0		
Связующее – цемент, марка ПЦ-500-Д20, расход, %	10,0	15,0	10	20	
Вода, %	5,0	7,5	10,0	10,0	
Усилие прессования, кН	12,0; 22,0; 50,0		12,0; 20,0	12,0; 20,0	

Таблица 5.3 – Прочность брикетов по результатам исследований в условиях серий 1-4

Усилие прессования, кН	Прочность после 1 суток, кН				Прочность после 2 суток, кН			
	серия 1	серия 2	серия 3	серия 4	серия 1	серия 2	серия 3	серия 4
12,0	0,4- 0,45	0,43- 0,47	0,6- 0,66	0,7- 0,74	0,43- 0,45	0,48- 0,50	0,66- 0,68	0,75- 0,80
20,0			0,65- 0,75	0,85- 0,9			0,75- 0,88	0,85- 0,95
22,0	0,45- 0,50	0,42- 0,47			0,45- 0,50	0,47- 0,52		
50,0	0,45- 0,50	0,45- 0,47			0,48- 0,50	0,50- 0,54		

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при брикетировании смеси антрацитового штыба № 1 и № 2 при разных расходах цементного связующего и усилия прессования существенного роста прочности брикетов не выявлено. При выдерживании в течение 2 суток прочность брикетов несколько повышалась, но в целом была недостаточной.

Для усиления связи в структуре брикетов необходимы тонкие классы (<0,1 мм). В следующей серии опытов в шихту добавлялись тонкие высокозольные шламы (илонакопитель ЦОФ «Селидовская»). Исходные условия для серии 5 приведены в табл. 5.4, а результаты исследования прочности брикетов – в табл. 5.5.

Данные исследований свидетельствуют о том, что прочность брикетов из антрацитового штыба значительно повышается при добавлении илистых шламов.

Таблица 5.4 – Условия исследования брикетирования смеси антрацитового штыба с илистыми шламами

Условия исследования	Серия 5
Угольная составляющая шихты – антрацит АШ крупностью (0-2) мм, %	75
Количество шлама зольностью 51,5%, %	25
Влажность шихты, %	9,0
Связующее – цемент, марка ПЦ-500-Д20, расход, %	10
Вода, %	0
Усилие прессования, кН	12,0; 20,0

Таблица 5.5 – Прочность брикетов по результатам исследований в условиях серии 5

Усилие прессования, кН	Прочность после 1 суток, кН	Прочность после 2 суток, кН
12,0	1,25-1,35	1,42-1,48
20,0	1,30-1,45	1,46-1,48

Последующие серии опытов проводились на антрацитовом сырье крупностью 0-6 мм с добавлением шламов. Прессование осуществлялось в матрице диаметром 50 мм. Исходные условия для серии 6 приведены в табл. 5.6, а результаты исследования прочности брикетов – в табл. 5.7.

Таблица 5.6 – Условия исследования брикетирования смеси антрацитового штыба с илистыми шламами

Условия исследования	Серия 6	Серия 7	Серия 8
Угольная составляющая шихты – антрацит АШ крупностью (0-6) мм, %	63,5	74,5	80,0
Количество шлама зольностью 51,5% и влажностью 34%, %	29,5	17,5	11,0
Связующее – цемент марка ПЦ-500-Д20, расход, %	5		
Вода, %	2,0	3,0	4,0
Усилие прессования, кН	27		

Таблица 5.7 – Прочность брикетов по результатам исследований в условиях серий 6-8

Серия	Зольность брикета, %	Прочность после 2 суток, кН	Водопоглощение, %	Остаточная прочность (после водопоглощения), %
6	26,31	3,8-4,4	5,8	3,8-4,1
7	23,35	3,6-4,3	5,2	3,7-4,1
8	20,25	2,6-3,0	5,3	2,2-2,7

Анализ данных табл. 5.7 позволяет заключить, что добавление илистых шламов в шихту значительно повышает прочность брикетов. При этом имеется возможность снизить расход цемента. Таким образом, рекомендуемый режим брикетирования следующий:

- количество антрацита крупностью 0-6 мм в шихте – 74-75%;

- количество дисперсного шлама в шихте –17-17,5%;
- расход цемента – 5,0%;
- количество добавляемой воды зависит от влажности компонентов шихты;
- выдерживание (для упрочнения) брикетов – до двух суток.

5.2.2 Исследование режимов брикетирования антрацитовой шихты с лигносульфонатом

При исследовании использовался сухой лигносульфонат двух марок, условно названных «Светлый» ЛСН-С и «Бурый» ЛСН-Б. Для сравнения эффективности действия указанных марок связующего проведены 12 серий опытов. Брикетирование исследовалось для антрацитовой шихты АШ, измельченной до крупности 0-2 мм, в матрице диаметром 25 мм. Время термообработки поддерживалось постоянным и составляло 20 мин. Исходные условия для серий 9-20 приведены в табл. 5.8, а результаты исследования прочности брикетов – в табл. 5.9.

Таблица 5.8 – Условия исследования брикетирования антрацитового штыба крупностью 0-2 мм с применением лигносульфоната

Условия исследования	Расход связующего, %		Влажность шихты, %	Температура термообработки, °С
	ЛСН-С	ЛСН-Б		
1	2	3	4	5
Серия 9	5	-	12	150
Серия 10				175
Серия 11			14	150
Серия 12				175
Серия 13	7	-	12	150
Серия 14				175

Окончание таблицы 5.8

1	2	3	4	5
Серия 15	7	-	14	150
Серия 16				175
Серия 17	-	7	12	150
Серия 18				175
Серия 19			14	150
Серия 20				175

Таблица 5.9 – Прочность брикетов по результатам исследований в условиях серий 9-20

Условия для серии	Прочность брикетов, кН
9	1,60-1,75
10	1,20-1,45
11	1,20-1,40
12	1,15-1,20
13	2,50-2,54
14	1,95-2,35
15	2,25-2,50
16	1,84-1,92
17	1,30-1,45
18	0,95-1,10
19	1,20-1,40
20	1,15-1,25

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при брикетировании антрацитовых шламов более эффективным является связующее лигносульфонат светлый (ЛСН-С). При его расходе 7,0% от массы шихты обеспечивается достаточно высокая механическая прочность брикетов на раздавливание – до 2,5 кН. При температуре термообработки, равной 150°С, прочность брикетов выше. Однако, исследование на водостойкость обоих связующих дали отрицательный результат. После 10 мин нахождения в воде брикеты размокали.

Далее были выполнены исследования по уточнению рационального режима брикетирования измельченной шихты АШ крупностью 0-2 мм с применением лигносульфоната ЛСН-С в количестве 7% от массы шихты. Для прессования использовалась матрица диаметром 25 мм, усилие прессования составляло 12 кН. Термообработка выполнялась при температуре 150°C. Переменными параметрами являлись влажность шихты и продолжительность термообработки. Исходные условия для серий 21-23 и результаты исследований прочности брикетов приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10 – Условия по уточнению рационального режима брикетирования по влажности шихты и продолжительности термообработки и результаты исследований

Условия исследования	Влажность шихты, %	Время термообработки, мин	Прочность брикетов, кН
Серия 21	12,0	15	1,45-1,58
		20	2,55-2,60
		25	2,60-2,70
Серия 22	13,0	15	1,65-1,70
		20	2,65-2,80
		25	2,85-3,0
Серия 23	14,0	15	1,20-1,35
		20	2,20-2,40
		25	2,30-2,65

По средним данным был построен график зависимости прочности брикетов от времени термообработки при разной влажности шихты, приведенный на рис. 5.1.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что рекомендуемая продолжительность термообработки находится в пределах 20-25 минут. Рациональная влажность шихты составляет 13%. Испытание брикетов на водостойкость показало их неудовлетвори-

тельные характеристики. В связи с этим были проведены исследования по определению способа повышения водостойкости брикетов.

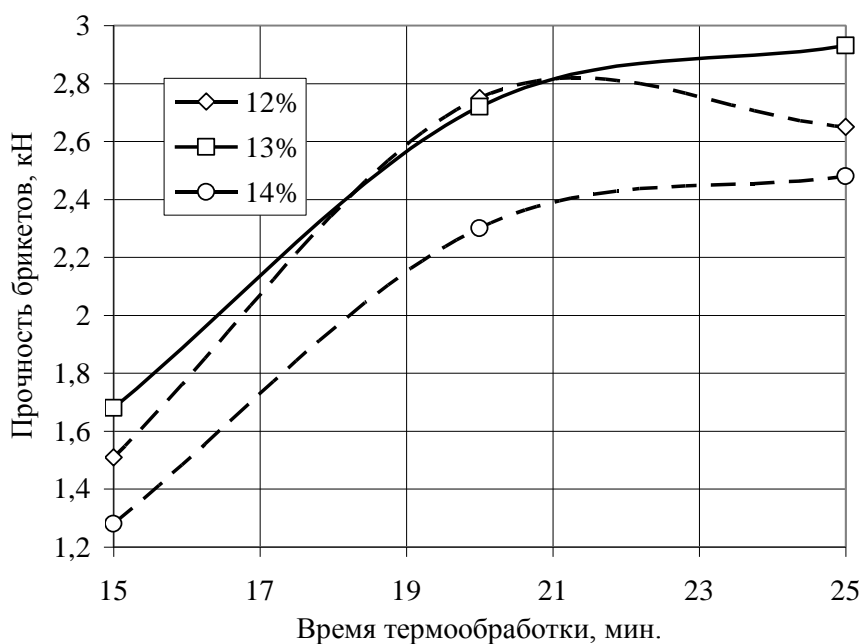


Рисунок 5.1 – Влияние продолжительности термообработки на прочность брикетов

Известно несколько способов обеспечения водостойкости брикетов. К ним относятся:

- 1) пакетирование продукции;
- 2) покрытие брикетов водоустойчивой пленкой (углеводороды, парафины);
- 3) добавка гидрофобизирующего компонента в шихту.

В данном исследовании был принят третий способ – добавка в шихту брикетирования гидрофобизирующего компонента, в качестве которого выбран технический парафин.

Последовательность дозирования компонентов в шихту показана на рис. 5.2.

Брикетирование проводилось на антрацитовой шихте АШ, измельченной до крупности 0-2 мм в матрице диаметром 25 мм при усилии прессования 12,0 кН. Время термообработки и температура поддерживались постоянными и составляли 20 мин и 150°C,

соответственно. Расход связующего лигносульфоната ЛСН-С составлял 7% от массы шихты.

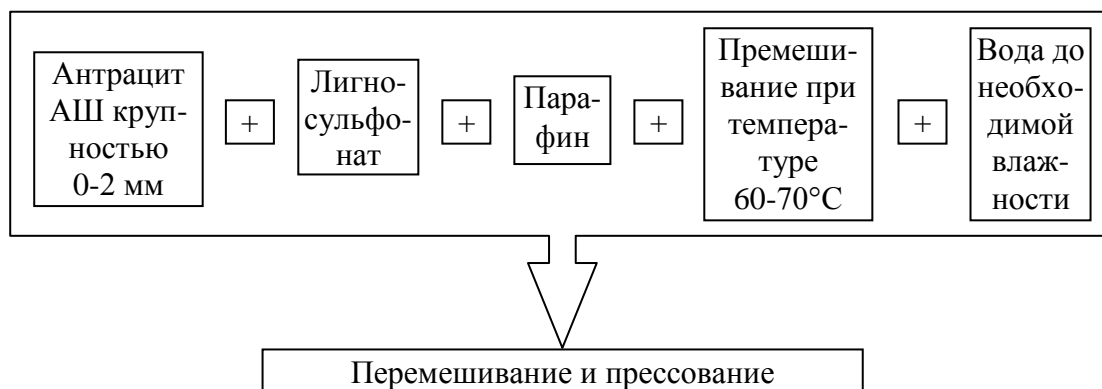


Рисунок 5.2 – Последовательность операций при исследовании повышения водостойкости брикетов

В качестве переменных факторов были приняты расход парафина и влажность шихты. Исходные условия для серий 24-26 и результаты исследований прочности брикетов приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11 – Исследование прочности брикетов при добавке в шихту технического парафина

Условия исследования	Влажность шихты, %	Расход парафина, %	Прочность брикетов, кН	Водопоглощение, %	Прочность после водопоглощения, кН
Серия 24	12,0	0,5	2,55-2,65	4,85	1,15-1,25
	13,0		2,30-2,50	4,75	1,15-1,25
Серия 25	12,0	0,75	2,65-2,75	3,80	1,70-1,80
	13,0		2,60-2,70	3,85	1,70-1,80
Серия 26	12,0	1,0	2,85-2,95	0,95	2,70-2,80
	13,0		2,60-2,70	0,95	2,50-2,60

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Включение в состав шихты технического парафина обеспечивает высокую водостойкость брикетов, не снижая их механическую прочность.

2. Рекомендуемый расход парафина находится в пределах 0,75-1,0%.

5.2.3 Исследование режимов брикетирования антрацитовой шихты с органическими связующими

В ходе исследований была проведена серия экспериментов с использованием в качестве связующего крахмалосодержащих отходов. В целом получены положительные результаты – прочность брикетов при расходе связующего в пределах 6-7% достигает 3,5-3,8 кН. Добавление парафина в количестве 0,75% от массы шихты обеспечивает и водостойкость брикетов. К сожалению, исследованное связующее имеет высокую стоимость и отсутствует на рынке по доступным ценам. Поэтому подробные результаты исследований не приводятся.

Далее осуществлялось исследование режимов брикетирования измельченной антрацитовой шихты с мелассой. Влажность шихты составила 12,5%. Для прессования использовалась матрица диаметром 25 мм, усилие прессования составляло 12 кН. Переменными параметрами являлись расход мелассы, температура и продолжительность термообработки. Исходные условия для серий 27-28 и результаты исследований прочности брикетов приведены в табл. 5.12.

Проверка брикетов на водопоглощение показала, что наиболее водостойкими являются брикеты, полученные при следующем режиме: расход мелассы – 8,0%; температура и продолжительность термообработки – 250°C и 15 мин, соответственно. Однако после пребывания в водной среде в течение 1 часа брикеты, полученные в этом режиме, резко снижали прочность до 0,8-0,9 кН.

Таблица 5.12 – Исследование прочности брикетов при использовании водорастворимого связующего (мелассы)

Условия исследования	Расход мелассы, %	Условия термообработки		Прочность брикетов, кН		
		температура, °С	время, мин	через 1 час	через 1 сутки	через 2 суток
Серия 27	6,0	100,0	20,0	0,29-0,40	0,25-0,22	0,20
		200,0	10,0	1,10-1,95	0,70-0,85	0,60
		200,0	20,0	2,45-2,65	2,15-2,20	2,10-2,15
		250,0	15,0	3,60-3,70	2,90-2,95	2,80-2,90
		250,0	20,0	2,70-2,90	2,40-2,10	1,95-2,0
Серия 28	8,0	200,0	10,0	2,20-2,45	1,20-1,45	0,85
		200,0	20,0	4,20-4,40	2,45-2,55	1,20-1,45
		250,0	15,0	5,70-5,12	3,15-3,45	1,55-1,80
		250,0	25,0	3,64-3,15	3,10-3,20	2,10-2,25

Исследования, проведенные по режимам серий 27-28, позволяют сделать следующие выводы:

1. При расходе мелассы в пределах 7-8% по сухой массе обеспечивается достаточная первичная прочность брикетов.
2. В процессе вылеживания (хранения) прочность брикетов снижается в связи с гигроскопичностью мелассы.

3. Водостойкость брикетов низкая, необходимы мероприятия по ее повышению.

В связи с полученными выводами были проведены исследования по повышению водостойкости брикетов. С этой целью были исследованы режимы с покрытием брикетов водостойкой пленкой из технического парафина. Использовать примененный выше способ дозирования парафина в шихту (серии 24-26) не представляется возможным из-за его выгорания в процессе термообработки при температурах 200-250°C, которые соответствуют рациональному значению при брикетировании с мелассой.

В данном случае технология покрытия брикета гидрофобизирующей пленкой включала погружение брикетов после термообработки в разогретый до 70-80°C парафин с последующим их охлаждением. Расход парафина при этом составляет 0,2-0,5% к массе брикета, в зависимости от размера его поверхности. Прочность брикетов не снижается, обеспечивается достаточная водостойкость, поверхностный гидрофобный слой прочный в связи с проникновением парафина вглубь брикета.

В целом, проведенный цикл исследований по брикетированию антрацитовых штыбов позволяет заключить следующее:

1. Гранулометрический состав антрацитовых компонентов брикетирования не соответствует оптимальному для процесса.

2. Применение в качестве связующего вещества цемента требует включения в шихту илистых шламов и отсева класса крупности >6 мм.

3. Рациональный режим брикетирования при использовании цемента представлен в табл. 5.6 (серия 7). При таком режиме обеспечивается достаточная прочность и водостойкость брикетов.

4. Применение водорастворимых связующих (лигносульфонат, меласса) требует мероприятий по повышению водостойкости брикетов (включение в шихту технического парафина или покрытие брикетов пленкой парафина). Рациональные режимы брикетирования и термообработки показаны в табл. 5.10-5.12.

5.3 Исследование технологии брикетирования смеси антрацитового штыба и концентрата угля марки Г

Целью исследования являлось установление факторов, влияющих на качество получаемых брикетов, в том числе влияние гранулометрического состава исходной шихты; определение рационального режимной карты брикетирования смеси углей со связующими и термообработки брикетов с водорастворимыми связующими; оценка водостойкости брикетов и разработка технологии ее повышения. Кроме того, ставилась задача разработки вариантов технологических схем установки брикетирования шихты и рассмотрения основных параметров оборудования для реализации схемы.

5.3.1 Свойства и гранулометрический состав компонентов

Исходная шихта была представлена смесью антрацитового штыба в количестве 60% и концентрата угля марки Г в количестве 40%.

Антрациты относятся к углям высшей степени метаморфизма. Их отличает высокая конденсированность ароматических ядер и низкое содержание летучих веществ – менее 9%. Это определяет максимальную для углей температуру воспламенения, что влияет на потребительские свойства брикетов.

На взаимодействие со связующими благоприятное влияние оказывает пористость антрацитов, которая связана с возрастом угольного вещества. В результате старения и изменения химического состава в нем произошло уплотнение внутримолекулярных фрагментов макромолекул (аналогично усыханию коллоида), что способствовало появлению крупных трещин и увеличению внутренней поверхности. Влага в порах и трещинах закрепляется слабо, в основном за счет капиллярных сил. Это способствует взаимодействию как

с растворимыми в воде, так и нерастворимыми углеводородными связующими.

Угли марки Г находятся в начале ряда каменных углей в классификации по степени метаморфизма. Для них характерно наличие в макромолекулах длинных цепей, что определяет пористость и большую внутреннюю поверхность. В сочетании с наличием в макромолекулах большого количества функциональных групп это способствует удержанию влаги и накладывает определенные требования к связующему при брикетировании. Вместе с тем, значительный выход летучих веществ (более 35%) определяет низкую температуру воспламенения.

Следует учитывать влияние на процесс брикетирования прочностных свойств компонентов шихты. Наиболее важным свойством является хрупкость, которая определяет поведение относительно крупных кусков угля в процессе брикетирования. Резко выраженной зависимости данного параметра от степени метаморфизма углей не наблюдается. В основном хрупкость зависит от петрографического состава: наиболее хрупкие – фюзен и витрен, наименее – дюрен и кларен. В связи с тем, что угли марки Г содержат большое количество фюзенита, а антрациты – витренита, хрупкость компонентов шихты близка, и их поведение при воздействии давления прессования практически не отличается.

Таким образом, принятое соотношение компонентов шихты следует считать достаточно обоснованным с точки зрения использования брикетов в качестве топлива.

Результаты анализа гранулометрического состава компонентов брикетирования представлены в табл. 5.13 и на рис. 5.3.

Результаты анализов свидетельствуют о том, что гранулометрический состав компонентов различен. Средний размер частиц антрацитового штыба и концентрата газового угля составляет 1,9 и 2,7 мм, соответственно. Следует отметить, что гранулометрический состав концентрата не является рациональным для целей брикетирования.

Таблица 5.13 – Гранулометрический состав антрацитового штыба и концентрата угля марки Г

Крупность, мм	Антрацит, %		Концентрат марки Г, %	
	ВЫХОД	ЗОЛЬНОСТЬ	ВЫХОД	ЗОЛЬНОСТЬ
> 6	4,50	11,42	25,50	6,98
3 - 6	20,40		21,70	
1 – 3	54,20		27,40	
< 1	20,90		25,40	
Итого:	100,00		100,00	

Присутствие в шихте частиц крупнее 6 мм нежелательно, т.к. в процессе брикетирования под действием давления из-за хрупкости они разрушаются и образуют новые поверхности, не покрытые связующим. Это является одной из причин снижения прочности брикетов.

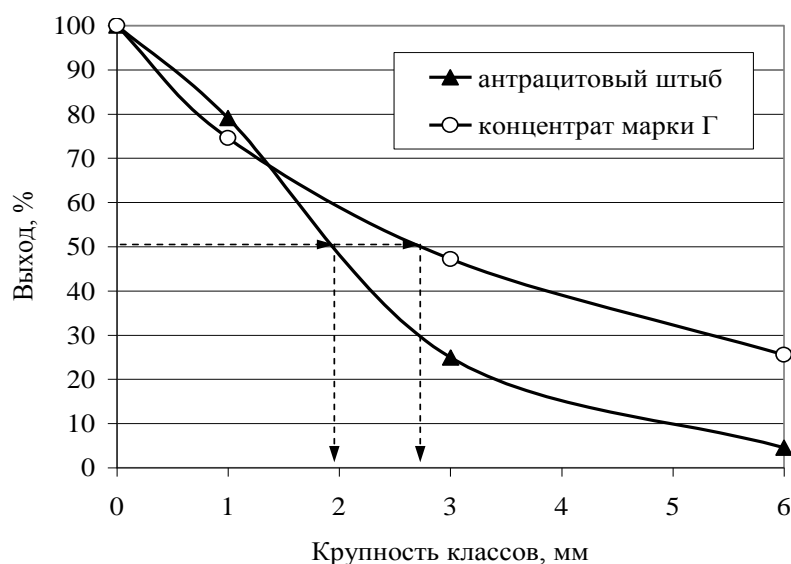


Рисунок 5.3 – Гранулометрический состав компонентов ШИХТЫ

Содержание крупных зерен в антраците невелико, однако, из-за нестабильности работы сортировок, поставляемый на брикетную установку штыб может содержать зерна с размером до 13-15 мм.

Следовательно, технология подготовки сырья к брикетированию должна включать операции классификации и дробления крупных классов.

На первой стадии исследований, когда производилось брикетирование в матрице малого диаметра, использовался материал крупностью 0-3 мм. Для получения брикетов размером, сопоставимым с рекомендованными для промышленного производства характеристиками, готовилась смесь крупностью 0-6 мм. Получение требуемой крупности материала достигалось разделением соответствующих компонентов по крупности с последующим смешиванием их в необходимой пропорции.

5.3.2 Исследование режимов брикетирования шихты А+Г со связующими

В качестве связующих применялись твердый и жидкий лигносульфонат и отходы мукомольной промышленности.

При проведении исследований с сухим лигносульфонатом брикетирование выполнялось при следующих условиях:

- угольная шихта крупностью 0-3 мм;
- усилие прессования 12,0 кН;
- диаметр матрицы 25 мм.

Проведенные эксперименты при различных расходах связующего (от 6 до 10%) и влажности шихты в пределах 12-15% показали возможность получения относительно прочных «сырых» брикетов.

При термообработке брикетов варьировалось два фактора – температура и продолжительность процесса. В ряде исследуемых режимов производилась подсушка полученных брикетов при температуре 80-90°C.

Результаты измерений прочности брикетов после термообработки приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14 – Результаты брикетирования шихты с лигносульфонатом

Расход связующего, %	Влажность шихты, %	Условия термообработки		Прочность, кН
		время, мин	температура, °С	
6	12	10	150	0,23
6	12	10	200	0,37
6	12	20	150	0,32
6	12	20	200	0,28
6	15	10	150	0,31
6	15	10	200	0,22
6	15	20	150	0,27
6	15	20	200	0,35
8	12	10	150	0,46
8	12	10	200	0,43
8	12	20	150	0,39
8	12	20	200	0,51
8	15	10	150	0,32
8	15	10	200	0,59
8	15	20	150	0,73
8	15	20	200	0,46
10	12	10	150	0,62
10	12	10	200	0,58
10	12	20	150	0,66
10	12	20	200	0,48
10	15	10	150	0,77
10	15	10	200	0,68
10	15	20	150	0,61
10	15	20	200	0,55

Варьирование условий брикетирования и термообработки не позволило достичь требуемых прочностных характеристик. Как показывают результаты исследования прочности брикетов, данный

параметр не взаимосвязан с параметрами процесса. Основной причиной снижения прочности является образование в результате нагрева продольных трещин в брикетах и деформация их поверхности.

Для объяснения данного явления были проведены следующие эксперименты:

- по брикетированию антрацитового штыба без концентрата угля марки Г;
- с заменой операции термообработки термической сушкой при температуре 80-90°C;
- с использованием естественной сушки брикетов;
- с применением другого типа лигносульфоната.

В процессе исследований установлено:

- изменение состава шихты не улучшило результатов брикетирования;
- при термической сушке образование трещин происходит через 10 минут после начала сушки, что недостаточно для получения прочных брикетов;
- естественная сушка позволяет получить не деформированные брикеты, однако, прочность их не превысила 0,69 кН;
- использование лигносульфоната другой марки позволило достичь приемлемой прочности брикетов (до 2,2 кН) при расходе 8% и термообработке в течение 20 мин при температуре 150-170°C.

В связи с отсутствием возможности приобретения высокоэффективной марки лигносульфоната и не технологичностью естественной сушки, проведены исследования с использованием крахмалосодержащих связующих. В качестве крахмалосодержащего связующего использовалась мука.

Эксперименты проводились при условиях, аналогичных предыдущей серии опытов. Влажность шихты поддерживалась на уровне 15%.

Результаты исследований приведены в табл. 5.15 и на рис. 5.4.

Таблица 5.15 – Результаты брикетирования с мукой

Расход связующего, %	Условия термообработки		Прочность, кН
	время, мин	температура, °С	
6	10	150	0,63
6	10	175	0,77
6	10	200	0,82
6	20	150	0,81
6	20	175	0,98
6	20	200	1,07
8	10	150	0,96
8	10	175	1,23
8	10	200	1,39
8	20	150	1,11
8	20	175	1,42
8	20	200	1,64
10	10	150	1,02
10	10	175	1,48
10	10	200	1,62
10	20	150	1,28
10	20	175	1,67
10	20	200	1,78

Полученные данные свидетельствуют о возможности получения высокопрочных брикетов при использовании крахмалосодержащего связующего. Увеличение расхода связующего свыше 8% не рационально, т.к. рост прочности незначителен, а затраты на производство брикетов существенно увеличиваются.

Прочность брикетов в значительной степени растет с повышением температуры, однако при высокотемпературном нагреве есть вероятность выгорания связующего.

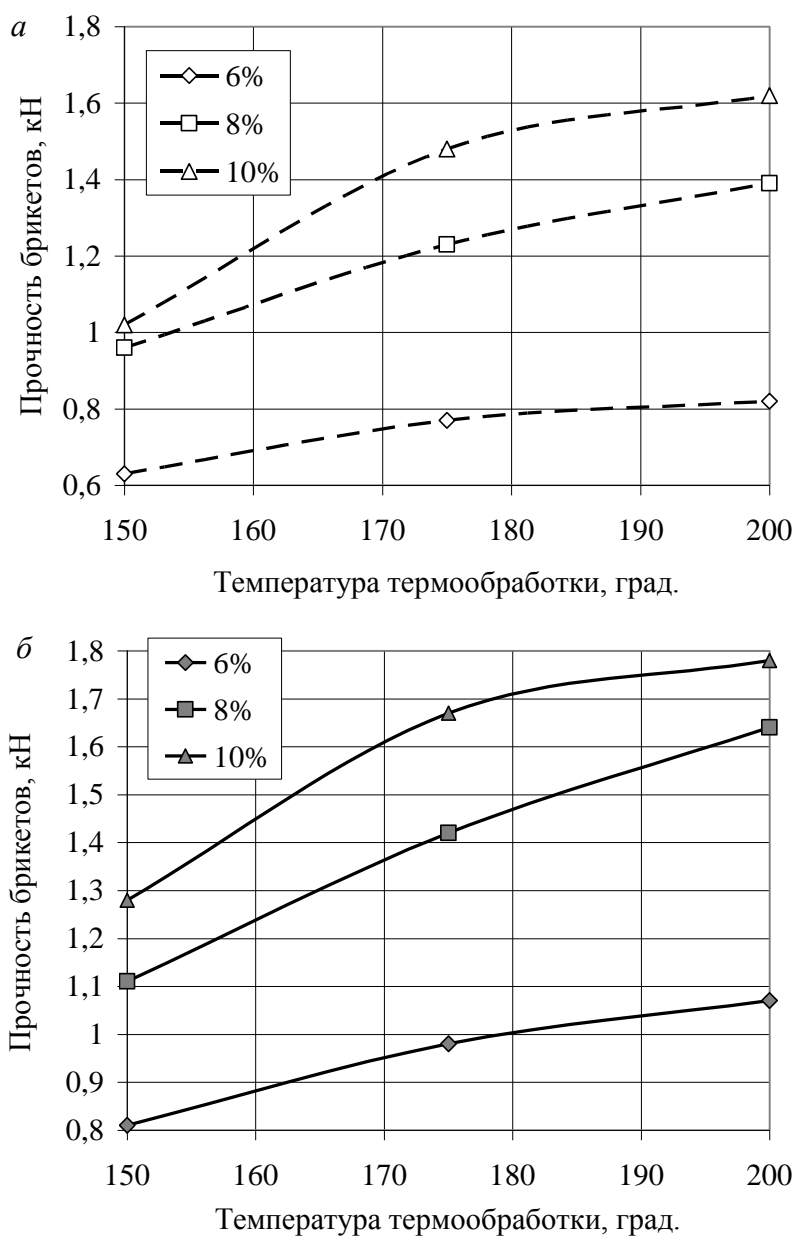


Рисунок 5.4 – Зависимость прочности брикетов от температуры при разных расходах муки и времени термообработки:

a – 10 мин, *б* – 20 мин

Интенсифицировать термообработку готовых брикетов целесообразно путем увеличения времени термообработки, о чем свидетельствуют данные табл. 5.16.

Таблица 5.16 – Прочность брикетов при различном времени термообработки при температуре 175°С

Время термообработки, мин	Прочность, кН	Условия брикетирования
10	1,23	Угольная шихта крупностью 0-3 мм; усилие прессования 12,0 кН; диаметр матрицы 25 мм; расход муки 8%
20	1,42	
30	1,60	

Проведенные дополнительные исследования с предварительной сушкой брикетов при 90°С (10 мин) с последующей термообработкой при температуре 175°С (20 мин) показали, что прочность полученных брикетов практически равна их прочности после термообработки в течение 30 мин. Таким образом, в практических условиях термообработка может быть проведена путем постепенного нагрева в установках с противоточной подачей теплоносителя.

Для определения прочности брикетов с размерами, близкими к получаемым на промышленных прессах, проведены эксперименты по брикетированию материала крупностью 0-6 мм в матрицах диаметром 50 мм. Условия получения брикетов: расход муки – 8%, усилие прессование – 12 кН (для матрицы диаметром 25 мм) и 50 кН (для матрицы диаметром 50 мм), термообработка при температуре 200°С в течение 30 мин. В табл. 5.17 приведены результаты измерений прочности брикетов.

Таблица 5.17 – Прочность брикетов из угля различной крупности

Диаметр матрицы, мм	Крупность материала, мм	Прочность, кН
25	0-3	1,65
50	0-6	12,72

Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанный режим позволяет получить высокопрочные брикеты.

5.3.3 Исследование устойчивости брикетов к воздействию влаги

Важным свойством брикетов является их устойчивость к воздействию влаги. Это обеспечивает транспортировку продукции и ее хранение в различных погодных условиях.

В связи с использованием растворимых в воде связующих необходимо предпринимать меры для повышения водостойкости брикетов. Для этой цели применялись гидрофобизаторы:

- парафин технический;
- мазут марки М-100.

С целью определения минимально необходимого количества добавок для снижения затрат на производство товарной продукции изучались различные варианты повышения водостойкости брикетов:

- введение гидрофобизирующего компонента в шихту перед брикетированием (вариант № 1);
- создание защитной пленки после термообработки полученных брикетов (вариант № 2).

В последнем случае рассматривались варианты погружения горячих брикетов в объем нагретых гидрофобизаторов и покрытие поверхности брикетов, имитирующее обработку аэрозолем.

Первый способ (вариант № 1) реализовывался в следующей последовательности: перемешивание антрацита и концентрата со связующим, добавка гидрофобизатора, нагрев смеси до температуры 60-70°C, перемешивание нагретой смеси с водой для придания пластичности, прессование, термообработка.

Второй способ осуществлялся путем погружения термообработанных брикетов в подогретые (для снижения вязкости) гидрофобизирующие вещества (вариант № 2) или нанесением данных веществ контактным способом (вариант № 3). Последний вариант реализовался путем кратковременного контакта поверхности брикетов с подушкой, пропитанной разогретым гидрофобизатором.

Результаты экспериментов приведены в табл. 5.18 и 5.19. Режим брикетирования: крупность угля 0-3 мм; расход муки – 8%,

усилие прессования – 12 кН, матрица диаметром 25 мм, термообработка при температуре 200°С в течение 30 мин.

Таблица 5.18 – Результаты исследования водостойкости брикетов

Варианты гидрофобизации	Гидрофобизатор		Прочность, кН	
	наименование	расход, %	до водопоглощения	после водопоглощения
Отсутствует	Отсутствует	0	1,8	0,6
№ 1	Парафин	1,0	1,7	1,5
	Мазут	1,0	0,6	-
№ 2	Парафин	6,5	1,5	1,4
	Мазут	9,4	1,4	1,2
№ 3	Парафин	1,3	1,6	1,5
	Мазут	1,1	1,6	1,3

Таблица 5.19 – Результаты исследования степени водонасыщения брикетов

Варианты гидрофобизации	Гидрофобизатор		Водонасыщение, %
	наименование	расход, %	
Отсутствует	Отсутствует	0	27,6
№ 1	Парафин	1,0	5,8
	Мазут	1,0	11,4
№ 2	Парафин	6,5	0,5
	Мазут	9,4	0,7
№ 3	Парафин	1,3	4,9
	Мазут	1,1	5,3

Проведенные исследования показали, что предложенные варианты повышения устойчивости брикетов к воздействию воды

позволяют обеспечить приемлемую остаточную прочность продукции и достаточную влагостойкость.

Выбор способа придания брикетам водостойкости следует произвести с учетом затрат на гидрофобизатор и простоты осуществления технологии.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что вариант № 1 может быть использован при введении в шихту парафина. Использование мазута не целесообразно, т.к. это отрицательно сказывается на прочности брикетов и ведет к загрязнению атмосферы парами низкокипящих фракций мазута при термообработке.

Технология, предусматривающая введение парафина в шихту до прессования, может быть осуществлена при минимальном количестве операций в схеме брикетной установки. В реальных условиях при брикетировании угля крупностью 0-6 мм можно ожидать снижение расхода дорогостоящего продукта – парафина.

Наименее приемлемой технологией следует считать вариант № 2, связанный с погружением брикетов в объем гидрофобизатора. В этом случае резко возрастает расход гидрофобизирующих жидкостей, что связано с их впитыванием в поры брикета, образовавшиеся в результате испарения воды. Данное объяснение подтверждают результаты экспериментов с получением брикетов из шихты с пониженной влажностью (до 10%) и при повышенном вдвое давлении. В этом случае количество впитываемых жидкостей снижается на 17-19% относительных. Следует отметить, что такой режим прессования трудно реализовать на вальцевых прессах.

В случае применения мазута целесообразно рассмотреть последний вариант технологии, который на практике может быть реализован путем обработки аэрозолем нагретого мазута брикетов, транспортируемых после термообработки. При этом высокая температура брикетов будет способствовать нагреву гидрофобизирующей жидкости и созданию достаточно тонкого покрытия на их поверхности.

5.3.4 Предлагаемый технологический режим брикетирования и разработка технологической схемы брикетной установки

На основании проведенных исследований предлагается технологический режим брикетирования и термической обработки сырых брикетов, приведенный в табл. 5.20.

Таблица 5.20 – Рациональный технологический режим брикетирования и термообработки брикетов

Параметр	Значение, наименование	Примечание
1. Крупность шихты, мм	0-6	
2. Влажность исходной шихты, %	до 13-14	
3. Давление прессования, МПа	25-30	вальцевый пресс
4. Расход связующего (мука), %	7-8	
5. Гидрофобизатор	Мазут М100 (парафин)	аэрозольная обработка; дозирование в шихту или аэрозольная обработка
6. Расход гидрофобизатора, %	1,0	при любом способе использования
7. Температура обработки брикетов в термопечи, °С	200-250	
8. Продолжительность термообработки, мин	25-30	
9. Параметры брикета, мм	50x50x25	рис. 5.5

Примечание. В качестве гидрофобизатора рекомендуется применять мазут марки М100, способ покрытия брикетов мазутом – аэрозольный.

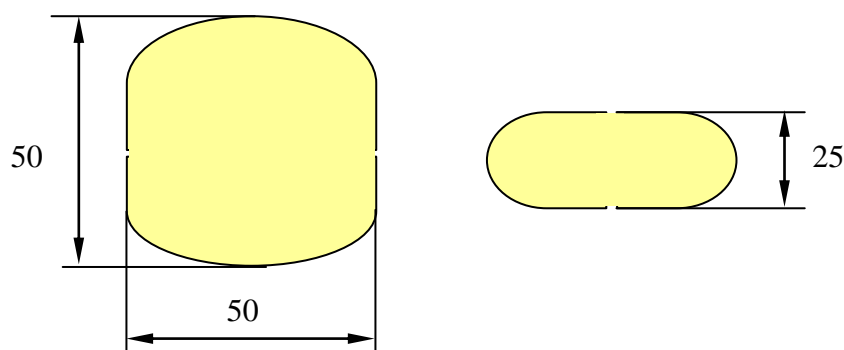


Рисунок 5.5 – Форма брикета с ориентировочным объемом 50 см^3

Рекомендуемые параметры пресса:

- | | | |
|----|-----------------------------|--|
| 1. | Давление прессования | 25-30 МПа |
| 2. | Усилие прессования | 50-60 кН (для указанных параметров брикета и давления прессования) |
| 3. | Диаметр валков | 800 мм |
| 4. | Ширина рабочей части валков | 400 мм |
| 5. | Частота вращения | $6-7 \text{ мин}^{-1}$ |
| 6. | Объем брикета | 50 см^3 (ориентировочно) |

Технологическая схема брикетирования и применяемое оборудование зависит от многих факторов, основными из которых являются:

1. Гранулометрический состав исходных компонентов шихты.
2. Влажность исходных компонентов шихты.
3. Используемое связующее (твердое – жидкое).
4. Тип применяемого гидрофобизатора.
5. Способ повышения водостойкости брикетов.

При разработке вариантов схем брикетирования приняты следующие исходные данные, полученные в результате проведенных исследований:

1. Наличие в исходных угольных компонентах брикетирования класса крупности более 6 мм.
2. Необходимое давление прессования составляет 20-30 МПа, что соответствует давлению, развиваемому в вальцевых прессах.

3. Влажность исходной шихты – до 13% (с учетом долевого участия компонентов).

4. Связующее – крахмалосодержащие вещества (мука).

5. Гидрофобизатор – технический парафин, мазут М100.

6. Способ гидрофобизации.

7. Необходимость термообработки брикетов.

На рис. 5.6-5.9 приведены варианты технологических схем брикетирования.

Первый вариант (рис. 5.6) предусматривает использование в качестве гидрофобизатора гранулированного технического парафина, который дозируется в шихту. Установка грохота (поз. 6) для классификации всей шихты по крупности 6 мм позволяет получить рациональный гранулометрический состав шихты и способствует распределению связующего и гидрофобизатора в массе шихты.

Использование в данном случае малаксера с подачей в него пара (поз. 9) необходимо для разогрева шихты, что создает условия для распределения парафина по поверхности угольных зерен.

Подача воды в шнековый смеситель – при необходимости, в случае низкой влажности исходной шихты.

Статические (колосниковые) грохоты (поз. 12) служат для отсева возможного боя брикетов и возврата его в процесс. На первом этапе строительства установки грохот после термопечи можно не устанавливать, вероятнее всего боя брикетов здесь не будет.

Второй вариант (рис. 5.7) отличается от выше рассмотренного способом гидрофобизации брикетов. Здесь предусмотрена обработка горячих брикетов мазутной аэрозолью. Применение в данном варианте малаксера так же желательно, т.к. паровая обработка шихты повышает адгезионную способность муки, что в итоге приводит к увеличению прочности брикетов.

Варианты схем 3 и 4 (рис. 5.8 и 5.9) не нуждаются в комментариях, отличия здесь незначительны.

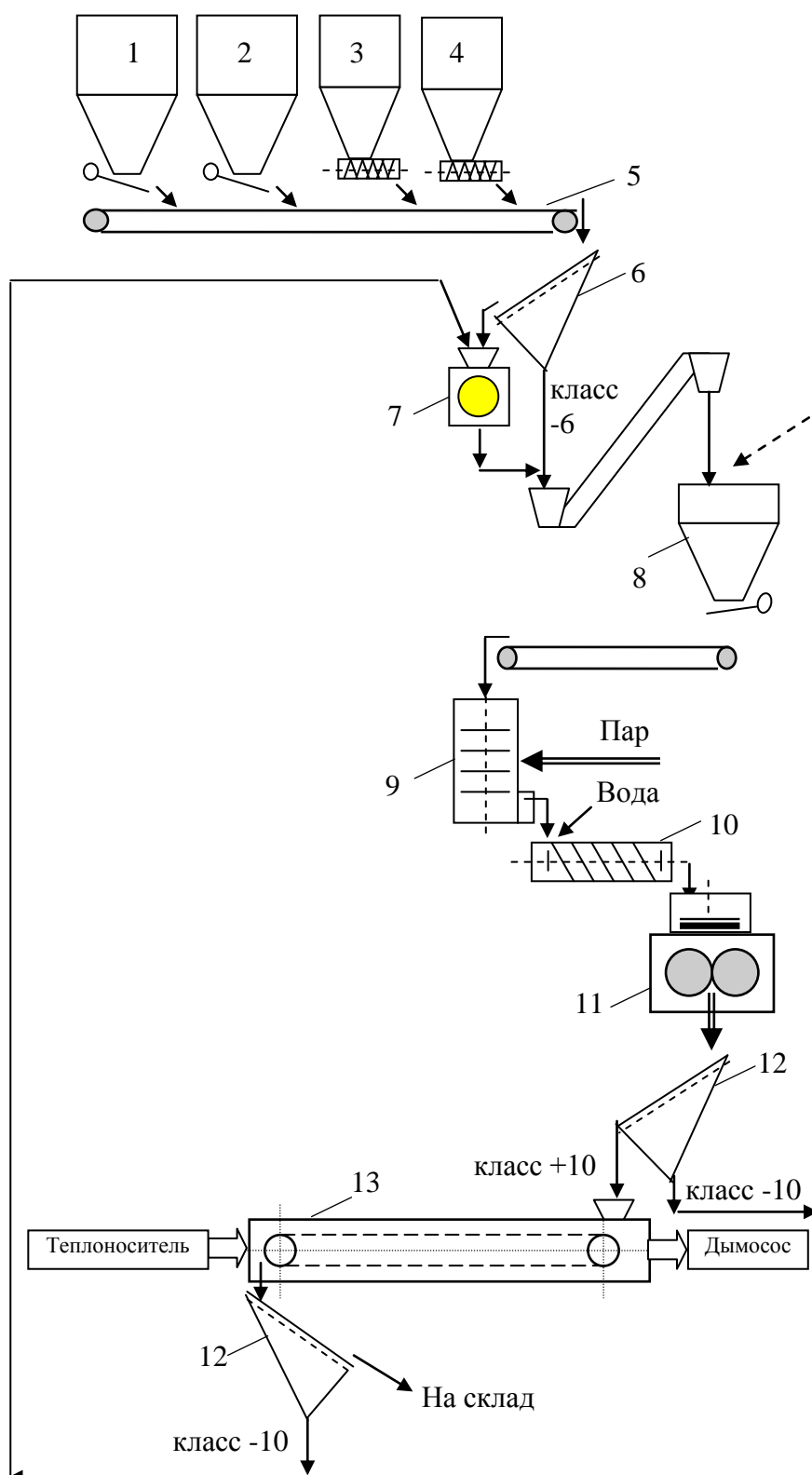


Рисунок 5.6 – Технологическая схема брикетирования (вариант № 1):
 1, 2, 3, 4 – бункера с питателями антрацита, газовых углей, связующего, парафина соответственно; 5 – сборный конвейер; 6 – грохот; 7 – дробилка; 8 – бункер с питателем; 9 – малаксер; 10 – смеситель шнековый; 11 – пресс; 12 – грохот статический; 13 – печь термообработки

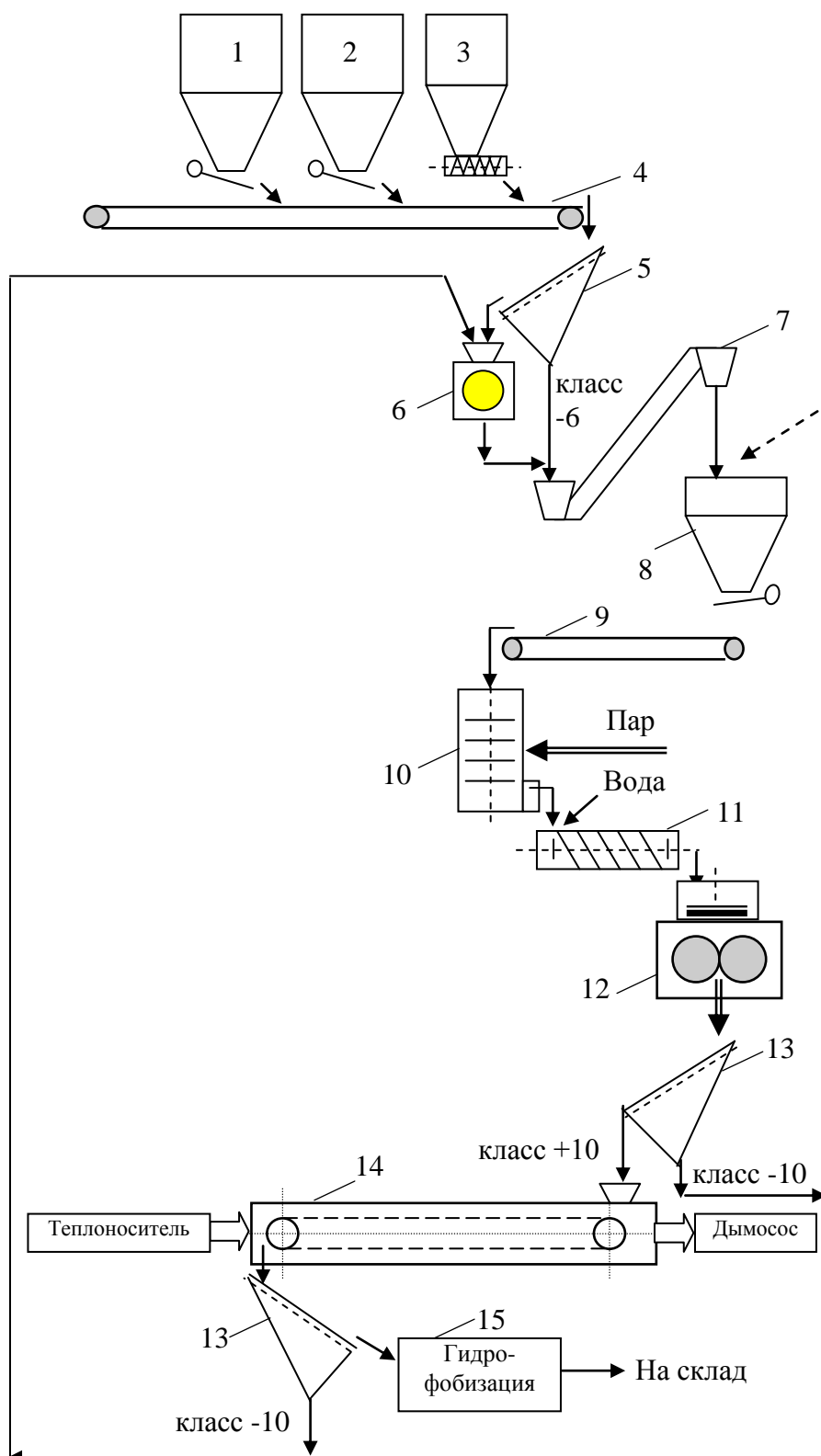


Рисунок 5.7 – Технологическая схема брикетирования (вариант № 2): 1, 2, 3 – бункера с питателями антрацита, газовых углей и связующего, соответственно; 4 – сборный конвейер; 5 – грохот; 6 – дробилка; 7 – элеватор; 8 – бункер с питателем; 9 – конвейер; 10 – малаксер; 11 – смеситель шнековый; 12 – пресс; 13 – грохот статический; 14 – печь термообработки; 15 – камера гидрофобизации

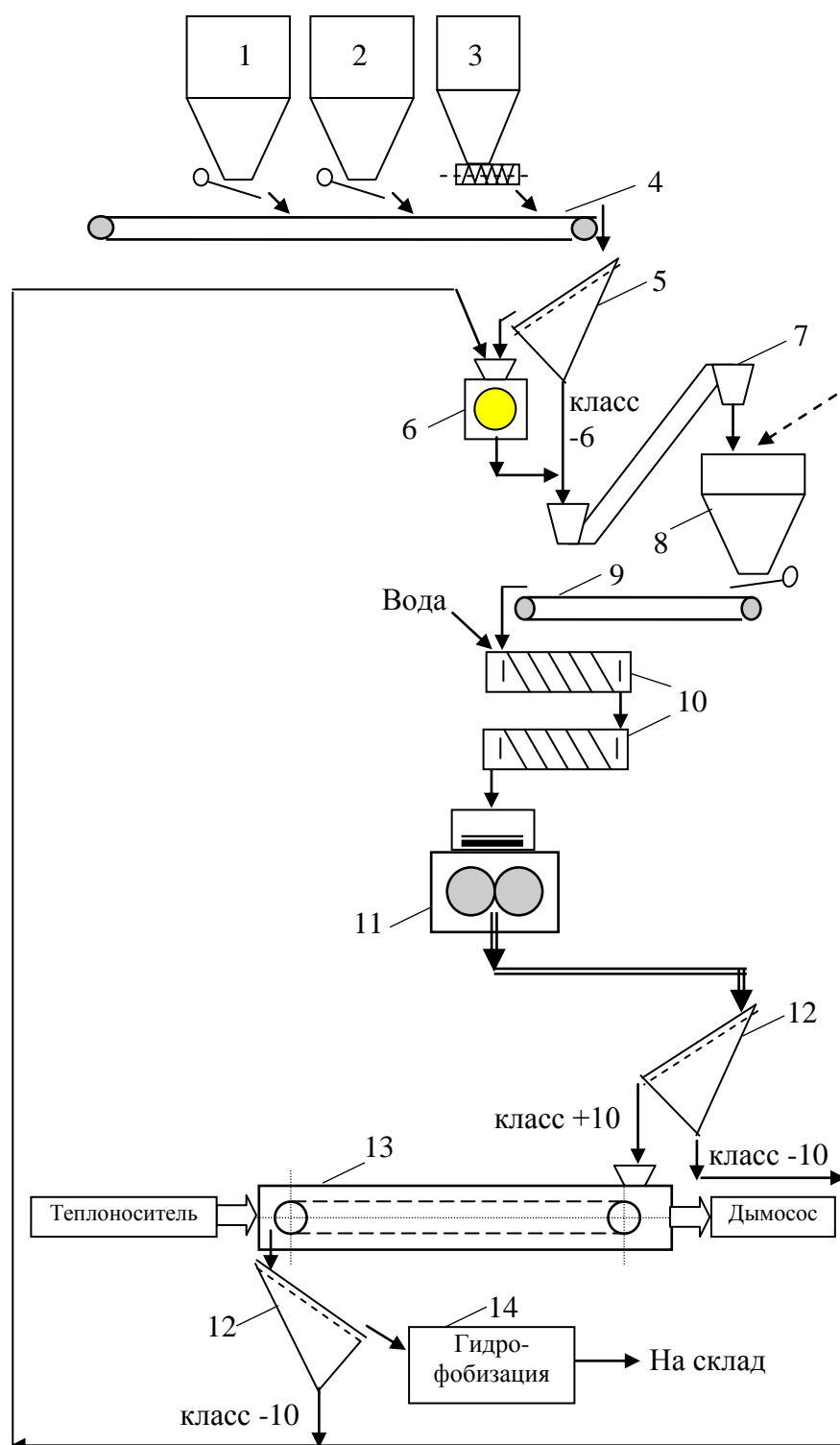


Рисунок 5.8 – Технологическая схема брикетирования (вариант № 3): 1, 2, 3 – бункера с питателями антрацита, газовых углей и связующего, соответственно; 4 – сборный конвейер; 5 – грохот; 6 – дробилка; 7 – элеватор; 8 – бункер с питателем; 9 – конвейер; 10 – смесители шнековые; 11 – пресс; 12 – грохот статический; 13 – печь термообработки; 14 – камера гидрофобизации

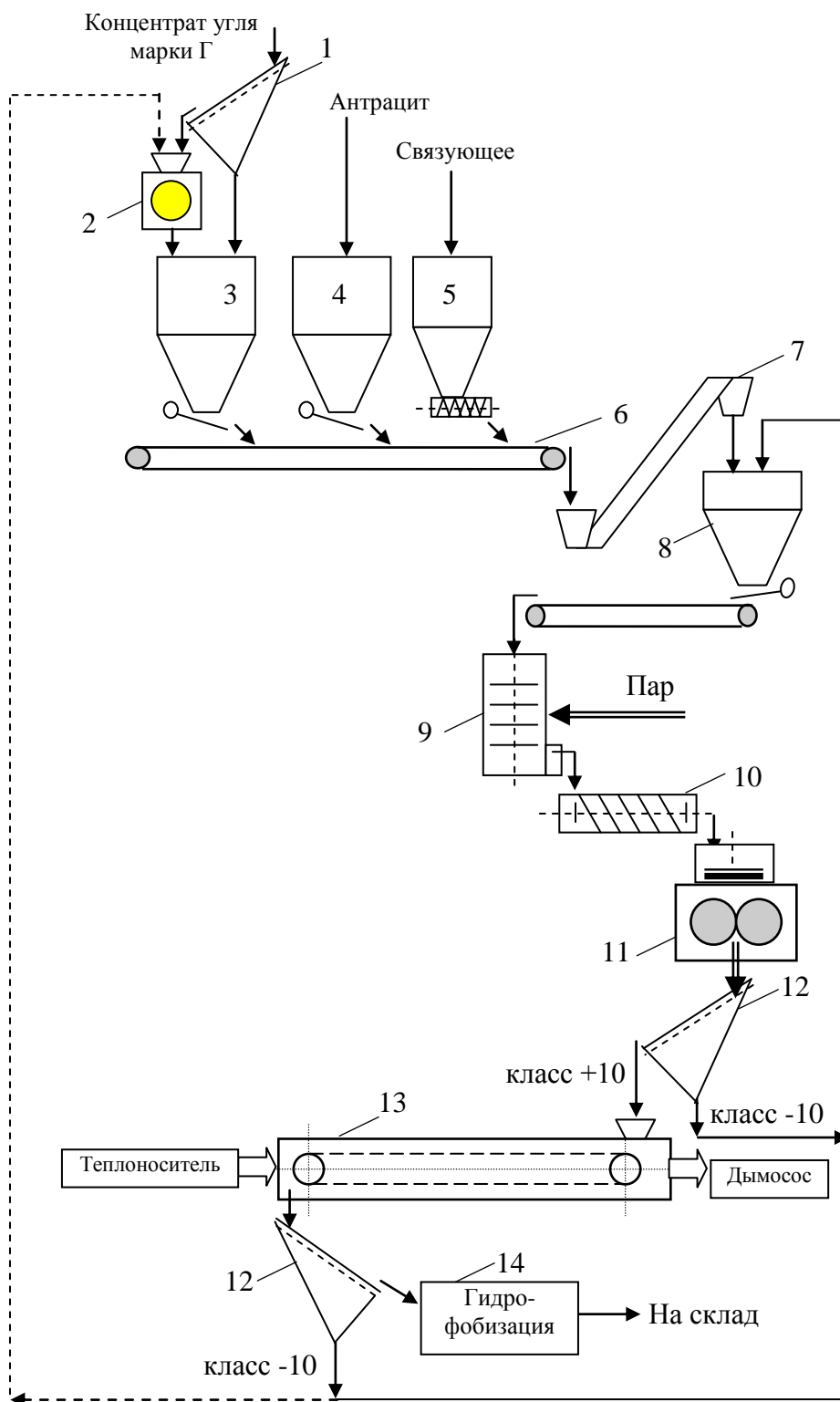


Рисунок 5.9 – Технологическая схема брикетирования (вариант № 4)
 1 – грохот; 2 – дробилка; 3, 4, 5 – бункера с питателями антрацита, газовых углей и связующего, соответственно; 6 – сборный конвейер; 7 – элеватор; 8 – бункер с питателем; 9 – малаксер; 10 – смеситель шнековый; 11 – пресс; 12 – грохот статический; 13 – печь термообработки; 14 – камера аэрозольной гидрофобизации

Схема № 2 (рис. 5.7), с нашей точки зрения, наиболее рациональна и рекомендуется к реализации.

В целом, проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Гранулометрический состав концентрата марки Г не соответствует оптимальному для процесса брикетирования. Схема подготовки шихты к брикетированию должна содержать операции классификации и дробления класса > 6 мм.

2. Применение в качестве связующего твердого лигносульфоната, принятого к исследованию, не обеспечило требуемую прочность брикетов.

3. Наиболее рациональное связующее для применения в данном случае – отходы мукомольной промышленности. Режимная карта брикетирования, термической обработки и гидрофобизации показана в табл. 5.20.

4. Рекомендуемая для реализации технологическая схема получения топливных брикетов представлена на рис. 5.7 (вариант № 2).

5. Рекомендуемый способ повышения влагостойкости брикетов – обработка горячих брикетов мазутной аэрозолью.

5.4 Исследование технических возможностей производства композиционных угольных брикетов, содержащих отходы

Вся продукция, производимая человечеством для обеспечения жизнедеятельности и удовлетворения своих потребностей, в конечном итоге переходит в категорию отходов.

Уже несколько десятилетий известно, что отходы различных отраслей производства и потребления поступают в окружающую среду в больших количествах, загрязняя ее. Например, в Российской Федерации в среднем на каждого жителя накапливается до 15 т твердых бытовых отходов в год. На Украине цифра имеет тот же

порядок. Отходы в значительных количествах образуются не только в быту, но и во всех отраслях промышленности (сельское хозяйство, энергетика, металлургия, строительство, транспорт, горнодобывающее производство). При этом часть продуктов, на производство которых затрачено много энергии и человеческого труда, становится отходами уже после разового использования (например, упаковка различных видов, макулатура и др.).

Отходы часто представляют собой ценные продукты, потенциально пригодные для переработки и вторичного использования. Во всем мире одной из актуальных задач является рациональное управление отходами. Стратегия такого управления основана на сведении к возможному минимуму количества образующихся отходов; изыскании экологически безопасных методов переработки отходов; вовлечении отходов в хозяйственный оборот и их материально-энергетическая утилизация как техногенного сырья.

Такая сложная проблема должна решаться на государственном уровне, так как современные технологии, связанные с переработкой отходов требуют материальных вложений и координации со стороны государства. Во многих странах приняты законодательные меры, в которых сформулированы основные принципы политики государства в сфере охраны окружающей среды, предусматривающие поддержание или восстановление благоприятного состояния окружающей природной среды и сохранение биологического разнообразия в природе; сочетание экологических и экономических интересов общества; внедрение малоотходных технологий и методов экономического регулирования деятельности в области обращения с отходами для уменьшения их количества и вовлечения в хозяйственный оборот; международное сотрудничество государств в этой сфере.

Основной целью проведенных исследований являлась разработка технологических режимов производства композиционных брикетов, содержащих каменный уголь и отходы растительного происхождения, с применением различных связующих веществ.

5.4.1 Общий план проведения экспериментов. Характеристика горючих компонентов брикетирования

Экспериментальные исследования проводились сериями, отличающимися составом шихты и режимами брикетирования.

Предварительно были выполнены базовые эксперименты, направленные на определение рациональных параметров прессования (влажность шихты) и термообработки готовых брикетов (температура и продолжительность термообработки), состоящих из одного угольного компонента (серии № 1-4). В качестве связующих использовались лигносульфонат жидкий и твердый, меласса, и дополнительно – отходы мукомольной промышленности и битумная эмульсия.

Выходным показателем процесса брикетирования, определяющим качество полученных брикетов, принята структурная прочность брикета на раздавливание плоским индентором. Определение прочностных характеристик производилось после остывания брикетов до комнатной температуры. Образцы полученных брикетов представлены на рис. 5.10.

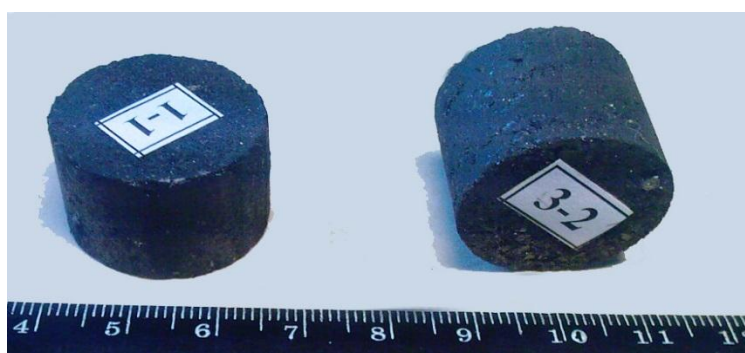


Рисунок 5.10 – Образцы брикетов для исследований на структурную прочность

Найденные параметры, соответствующие максимальной прочности однокомпонентного угольного брикета, были приняты затем как базовые при прессовании и термической обработке композиционных брикетов. Это обусловлено тем, что влажность шихты и режим термообработки влияет на процесс структурирования брикета и

упрочнения адгезионных связей в брикете при его термообработке, которые зависят в большей мере от типа связующего, чем от брикетированного компонента.

В последующих сериях экспериментов определялись рациональные режимы процесса подготовки шихты и прессования при получении композиционных брикетов.

Контроль теплотехнических показателей брикета и компонентов шихты, их зольность и влажность осуществлялись в соответствии с действующими Стандартами РФ.

Для исследований были приняты следующие составляющие брикетов:

- антрацит крупностью (0-3) мм;
- каменный уголь марки Д крупностью 0-3 мм;
- опилки древесные твердых пород;
- опилки древесные мягких пород (сосновые);
- стружка древесная;
- лузга подсолнечника;
- бумажные отходы;
- солома злаковых культур.

Характеристики исследуемых компонентов брикета приведены в табл. 5.21.

Таблица 5.21 – Характеристики составляющих шихты для брикетирования

Марка угля	Зольность, %	Теплота сгорания (высшая/низшая), МДж/кг	Содержание серы, %	Крупность, мм
1	2	3	4	5
Антрацит	25,44	32,7 / 22,4	0,8	0-3
Антрацитовый шлам	23,41	30,2 / 20,4	0,8	0-1
Каменный уголь	18,12	31,1 / 21,3	0,95	0-3

Окончание таблицы 5.21

1	2	3	4	5
Опилки сосновые	1,8	21,4 / 17,9	0,07	0-1
Опилки твердых пород	1,3	21,8 / 18,2	0,04	0-1
Стружка древесная	1,5	21,6 / 18,1	0,05	0-1
Лузга	0,4	20,4 / 16,6	0,02	0-1
Бумага	3,8	14,3 / 13,4	0,07	0-1
Солома пшеничная	3,3	17,1 / 16,0	0,04	0-1

5.4.2 Определение базовых режимов прессования и термической обработки однокомпонентных угольных брикетов при различных связующих

Прежде, чем проводить исследования с композиционными брикетами, были проведены серии экспериментов по определению базовых режимов прессования и термической обработки однокомпонентных угольных брикетов при различных связующих.

Серия № 1. Связующее – лигносульфонат технический, жидкий, содержание воды – 40%.

Целью экспериментов для серии № 1 являлось определение рациональной влажности брикетируемой шихты, обеспечивающей максимальную прочность брикета.

Исходные данные и параметры эксперимента:

- уголь каменный (марка Д), крупность 0-3 мм, влажность 2,6%;
- расход связующего 8% сухого по массе к сухой шихте;
- давление прессования 25 МПа;
- термическая сушка брикетов в течение 25 мин при температуре 100°C.

Подготовка угля к прессованию заключалась в тщательном перемешивании угля и связующего в лопастном смесителе при температуре 85°C. Повышенная температура благоприятствует растеканию вязкого связующего по поверхности угольных частиц. Шихта разделялась на 6 проб и в каждую добавлялась вода в количестве, обеспечивающем получение пробы с конечной влажностью 11,0; 11,5; 12,0; 12,5; 13,0 и 14,0%.

Из каждой пробы прессовалось 3-4 брикета в матрице диаметром 25 мм, которые сушились в течение 25 мин при температуре 100°C. После остывания все брикеты подвергались испытаниям на раздавливание. Результаты испытаний приведены в табл. 5.22 и на рис. 5.11.

Таблица 5.22 – Прочность брикетов при различной влажности шихты

Влажность шихты, %	Давление разрушения образца, МПа	Среднее давление разрушения, МПа
1	2	3
11,0	3,41	3,44
	3,48	
	3,35	
	3,43	
11,5	3,55	3,62
	3,69	
	3,64	
	3,61	
12,0	3,79	3,83
	3,87	
	3,82	
12,5	3,98	3,92
	3,91	
	3,88	

Окончание таблицы 5.22

1	2	3
13,0	3,80	3,84
	3,86	
	3,82	
14,0	3,58	3,54
	3,61	
	3,49	
	3,48	

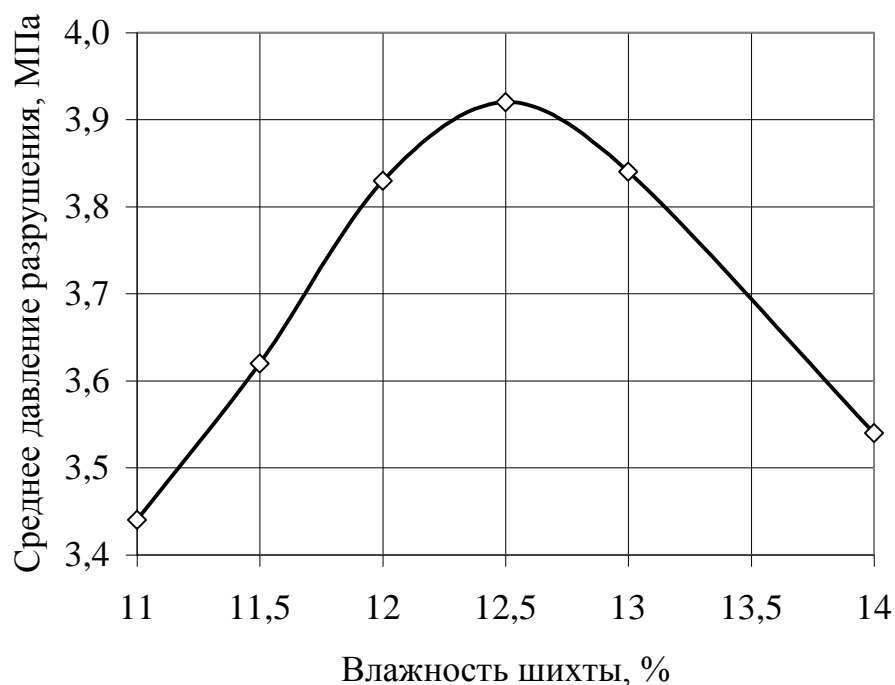


Рисунок 5.11 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от влажности исходной шихты

Результаты экспериментов серии № 1 свидетельствуют о том, что рациональное значение влажности шихты, обеспечивающей максимальную прочность брикета в указанных условиях термообработки, составляет 12,5%.

Следующие эксперименты были направлены на уточнение режима термической обработки брикетов. Для этой цели были подготовлены брикеты из шихты с влажностью 12,5%, которые

подвергались термической обработке. Режим термообработки указан в табл. 5.23.

Таблица 5.23 – Зависимость прочности брикетов от продолжительности и температуры термообработки

Температура термообработки, °С	Продолжительность термообработки, мин	Среднее давление разрушения, МПа
100	15	3,11
	20	3,65
	25	3,95
150	15	4,28
	20	4,95
	25	5,36
175	15	5,85
	20	6,26
	25	6,32
200	15	6,31
	20	6,44
	25	6,36
250	15	6,28
	20	6,11
	25	5,89

Состав шихты с зольностью 18,12%:

- уголь (сухая масса) 81,8%;
- лигносульфонат (сухая масса) 5,7%;
- вода 12,5%.

Анализ данных табл. 5.23 позволяет заключить, что при использовании в качестве связующего вещества лигносульфоната, рациональными режимами термообработки брикетов являются: температура 175-200°С; продолжительность процесса – 15-20 мин. Увеличение температурного режима свыше 200°С приводит к снижению прочности брикета из-за разрушения связующей пленки (выгорание).

Аналогичные результаты были получены при использовании в качестве горючей компоненты антрацита с зольностью 18,6%.

Рациональные условия процесса брикетирования однокомпонентной шихты с лигносульфонатом (серия № 1) представлены в табл. 5.24.

Таблица 5.24 – Рациональный режим брикетирования для условий серии № 1

Параметр	Единицы измерения	Значение
Влажность шихты	%	12,5
Расход лигносульфоната (сухая масса)	%	7
Давление прессования	МПа	25
Температура термообработки	°С	175-200
Продолжительность термообработки	мин	15-20
Прочность брикета	МПа	6,3-6,5

Серия № 2. Связующее – меласса, содержание воды – 40%.

По своим адгезионным свойствам меласса близка к свойствам жидкого лигносульфоната, поэтому в данной серии экспериментов определялись только рациональный расход связующего и режим термообработки.

Исходные данные и параметры эксперимента:

- уголь каменный (марка Д), крупность 0-3 мм, влажность 2,6%;
- влажность шихты брикетирования 12,4%;
- расход связующего варьировался в пределах 7-9% сухого по массе к сухой шихте;
- давление прессования 25 МПа;

– термическая сушка брикетов в течение 10-20 мин при температуре 100-250°C.

Режим проведения экспериментов данной серии выдерживался, как и в серии № 1. Результаты экспериментов приведены в табл. 5.25.

Таблица 5.25 – Результаты брикетирования угля с мелассой при ее расходе 8%

№	Условия термообработки		Среднее давление разрушения, МПа
	температура, °С	время, мин	
1	100	10	1,87
2		15	2,44
3		20	2,98
4	150	10	2,50
5		15	3,51
6		20	4,00
7	200	10	3,26
8		15	4,75
9		20	5,70
10	250	10	4,52
11		15	7,75
12		20	7,00

Зависимости прочности брикета от параметров термообработки представлены на рис. 5.12. Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о том, что при использовании мелассы наиболее прочные брикеты могут быть получены при термообработке в течение 15 мин при температуре 250°C.

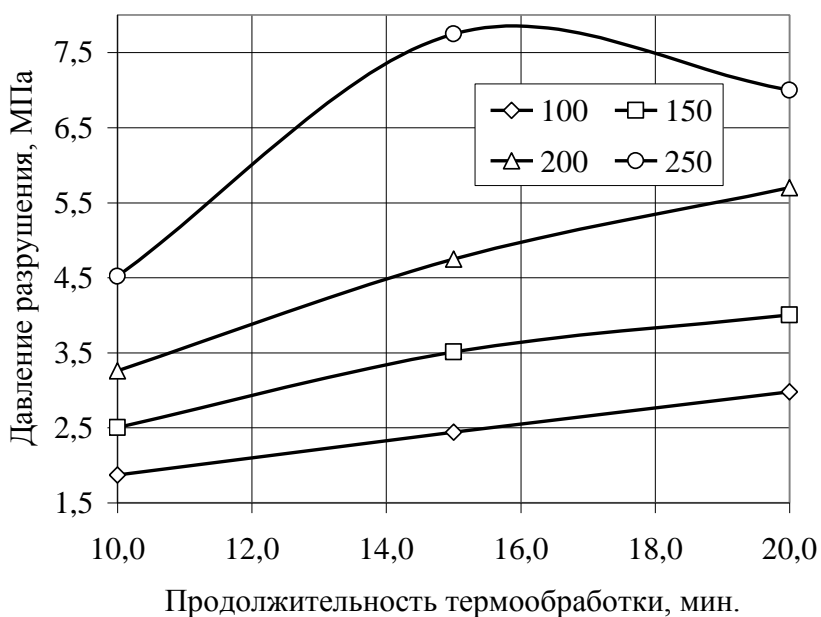


Рисунок 5.12 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

В табл. 5.26 показаны рациональные режимы брикетирования, полученные по результатам исследований серии № 2.

Таблица 5.26 – Рациональный режим брикетирования для условий серии № 2

Параметр	Единицы измерения	Значение
Влажность шихты	%	12,5
Расход мелассы (сухая масса)	%	8
Давление прессования	МПа	25
Температура термообработки	$^{\circ}\text{C}$	250
Продолжительность термообработки	мин	15
Прочность брикета	МПа	7,0-7,5

Кроме жидких связующих в ходе исследований были изучены возможности применения сухих связующих. Преимуществом использования данных связующих является более эффективное их смешивание с шихтой в сухом состоянии, транспортабельность в зимнее время года и пониженные требования к влажности исходных компонентов шихты.

Основная особенность в подготовке шихты к брикетированию с сухими водорастворимыми связующими – обеспечение возможности перехода связующего в водное гелеобразное состояние перед брикетированием, что будет способствовать повышению адгезионных свойств связующего при сушке брикета. Данная цель достигается следующей последовательностью операций (рис. 5.13).

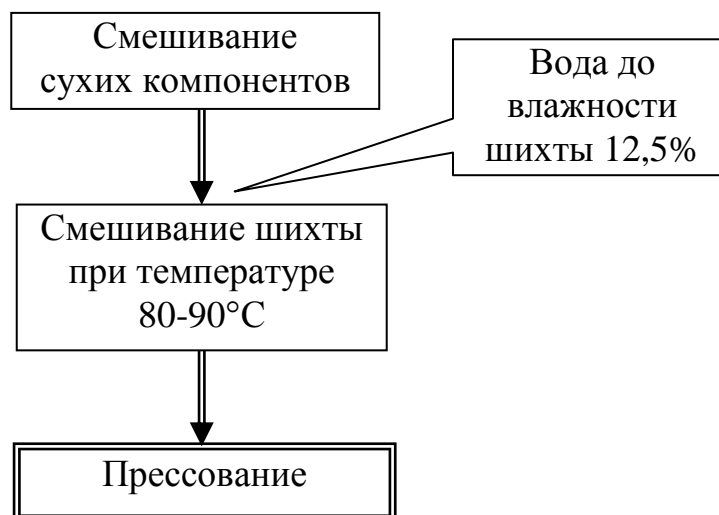


Рисунок 5.13 – Схема подготовки шихты к прессованию с сухими водорастворимыми связующими

В производственных условиях этот процесс легко реализуется в смешивающем аппарате (малаксере), представляющем собой вертикальный паровой смеситель.

Из возможных сухих связующих были испытаны сухой (твердый) лигносульфонат (марка ЛСН-Т) и крахмалосодержащие отходы мукомольного производства (мучка).

Серия № 3. Брикетирование угля с твердым лигносульфонатом.

Исходные данные и параметры эксперимента:

- антрацит, крупность 0-3 мм, влажность 2,4%;
- расход связующего 8% по массе к сухой шихте;
- влажность шихты 12,5%;
- перемешивание в течение 10 мин при температуре 75°C;
- давление прессования 25 МПа;
- термическая сушка брикетов в интервале 10-20 мин при температуре 175-225°C.

Результаты экспериментов представлены в табл. 5.27 и на рис. 5.14.

Таблица 5.27 – Результаты брикетирования угля с твердым лигносульфонатом при его расходе 8%

№	Условия термообработки		Среднее давление разрушения, МПа
	температура, °C	время, мин.	
1	175	10	2,30
2		15	3,12
3		20	3,20
4	200	10	3,11
5		15	5,82
6		20	6,20
7	225	10	5,78
8		15	7,88
9		20	7,52

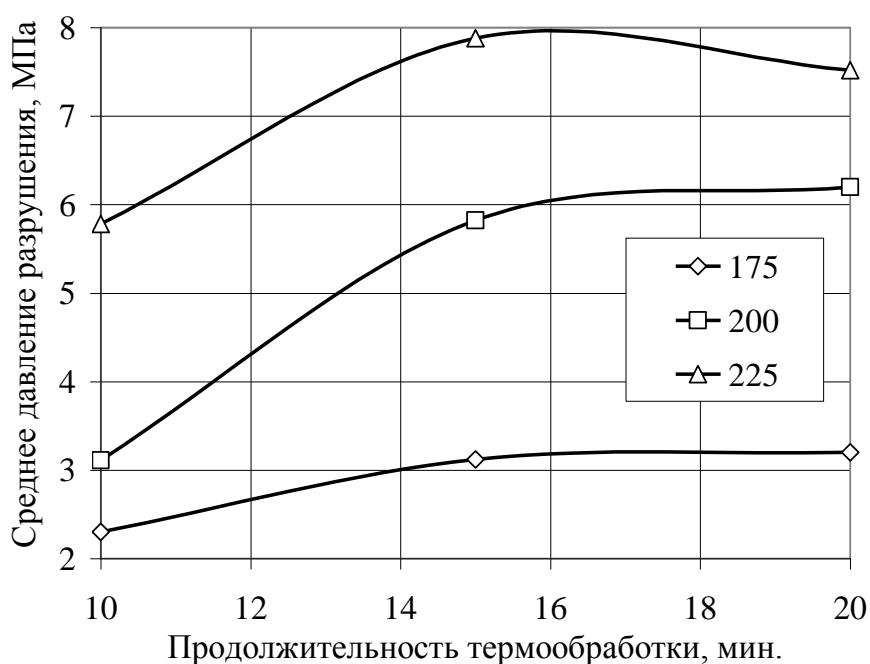


Рисунок 5.14 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

В табл. 5.28 показаны рациональные режимы брикетирования, полученные по результатам опытов серии № 3.

Таблица 5.28 – Рациональный режим брикетирования для условий опытов серии № 3

№ пп	Параметр	Единицы измерения	Значение
1	Влажность шихты	%	12,5
2	Расход лигносульфоната (сухая масса)	%	8
3	Перемешивание	мин / $^{\circ}\text{C}$	10 / 75
4	Давление прессования	МПа	25
5	Температура термообработки	$^{\circ}\text{C}$	225
6	Продолжительность термообработки	мин	16
7	Прочность брикета	МПа	7,9

Серия № 4. Брикетирование угля с крахмалосодержащим связующим (мучка).

Исходные данные и параметры эксперимента:

- антрацит, крупность 0-3 мм, влажность 2,6%;
- расход связующего 8% по массе к сухой шихте;
- влажность шихты 13%;
- перемешивание в течение 10 мин при температуре 80°C;
- давление прессования 25 МПа;
- термическая сушка брикетов в интервале 10-20 мин при температуре 175-250°C.

Результаты экспериментов представлены на рис. 5.15, а рациональный технологический режим для опытов серии № 4 приведен в табл. 5.29.

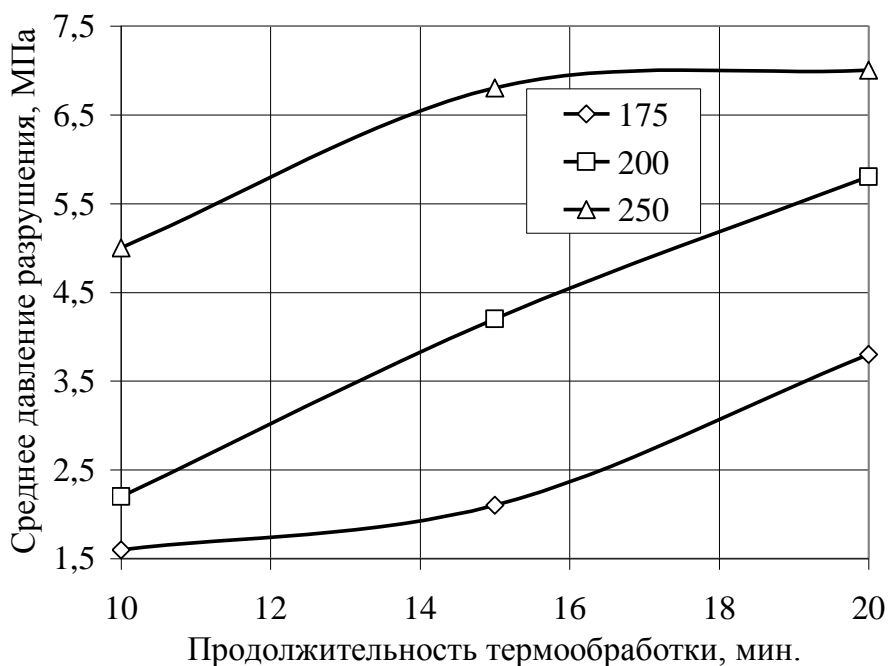


Рисунок 5.15 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах (°C)

Таблица 5.29 – Рациональный режим брикетирования для серии № 4

№	Параметр	Единицы измерения	Значения
1	Влажность шихты	%	13
2	Расход мучки (сухая масса)	%	8
3	Перемешивание	мин / °С	10 / 80
4	Давление прессования	МПа	25
5	Температура термообработки	°С	250
6	Продолжительность термообработки	мин	15-16
7	Прочность брикета	МПа	6,8-7,0

5.4.3 Исследование технологии брикетирования композиционных брикетов, содержащих древесные отходы

Брикетирование композиционной шихты имеет целый ряд особенностей. Производство сложных по составу брикетов, включающих угольную составляющую и растительные отходы, вызывает технические затруднения. Причинами этого являются различия в структурно-механических свойствах компонентов.

Различие в значениях модулей упругости углистого вещества и растительных отходов (древесные опилки, стружка и пр.) вызывает внутреннее перемещение частиц шихты после снятия давления прессования. Если адгезионные силы, определяемые связующим, меньше сил, вызванных релаксацией системы (брикетируемой массы) после выхода брикета из зоны давления, появляются внутренние трещины, снижающие конечную прочность брикета.

Снизить отрицательный эффект этого явления могут технологические операции, переводящие упругие деформации частиц растительных отходов в пластические. Одной из таких операций может быть пропаривание растительной составляющей шихты при повы-

шенной температуре. Снижению упругих деформаций в брикетированной шихте будет способствовать и измельчение растительных отходов до крупности менее 1 мм. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований процесса брикетирования композиционной шихты с жидкими и твердыми связующими.

5.4.3.1 Исследование технологии брикетирования композиционных брикетов с жидкими связующими

В качестве растительной добавки в основных экспериментах были приняты древесные опилки крупностью 0-1 мм. После определения рациональных режимов брикетирования с данной шихтой проводились контрольные опыты по прессованию шихты с другими растительными добавками – измельченной до 1 мм древесной стружкой, соломой, бумажными отходами и лузгой подсолнечника.

Серия № 5. Брикетирование угольной шихты с сосновыми опилками.

Серия № 5.1. Связующее – лигносульфонат жидкий, концентрация 60%.

Исходные данные и параметры экспериментов:

- антрацит, крупность 0-3 мм, зольность 19,5%, влажность 2,3%;
- опилки хвойные, влажность 4,2%;
- связующее – лигносульфонат, влажность 40%, расход 8% по сухой массе к сухой шихте;
- влажность шихты 12,5-12,6%;
- перемешивание шихты в течение 10 мин при температуре 90°C;
- давление прессования 25 МПа;
- термическая сушка брикетов в интервале 10-20 мин при температуре 175-225°C.

В данной серии опытов испытывалась шихта двух составов: № 1 с содержанием опилок 5% и № 2 – 10% (с рабочей влагой).

Составы шихты с влажностью 12,5-12,6%, полученные в пересчете на сухую массу, показаны в табл. 5.30.

Таблица 5.30 – Составы шихты для экспериментов серии № 5.1

Компонент	Содержание, %	
	Шихта № 1	Шихта № 2
Антрацит (сухая масса)	87,9	83,4
Опилки (сухая масса)	4,5	9,0
Лигносульфонат (сухая масса)	7,6	7,6
Итого	100,0	100,0
Вода до влажности, %	12,5	

Результаты экспериментов приведены в табл. 5.31 и на рис. 5.16 и 5.17.

Таблица 5.31 – Результаты брикетирования шихты с лигносульфонатом

№	Шихта № 1			Шихта № 2		
	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа
	Температура, °С	время, мин		Температура, °С	время, мин	
1		10	1,80		10	1,50
2	175	15	2,43	175	15	1,75
3		20	3,12		20	1,95
4		10	2,85		10	1,89
5	200	15	3,74	200	15	3,08
6		20	4,66		20	3,62
7		10	3,81		10	3,12
8	225	15	5,59	225	15	4,25
9		20	5,38		20	4,09

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что добавление в шихту брикетирования древесных опилок снижает прочность брикета. Увеличение содержания опилок свыше 10% сопровождается появлением трещин в брикете до термообработки.

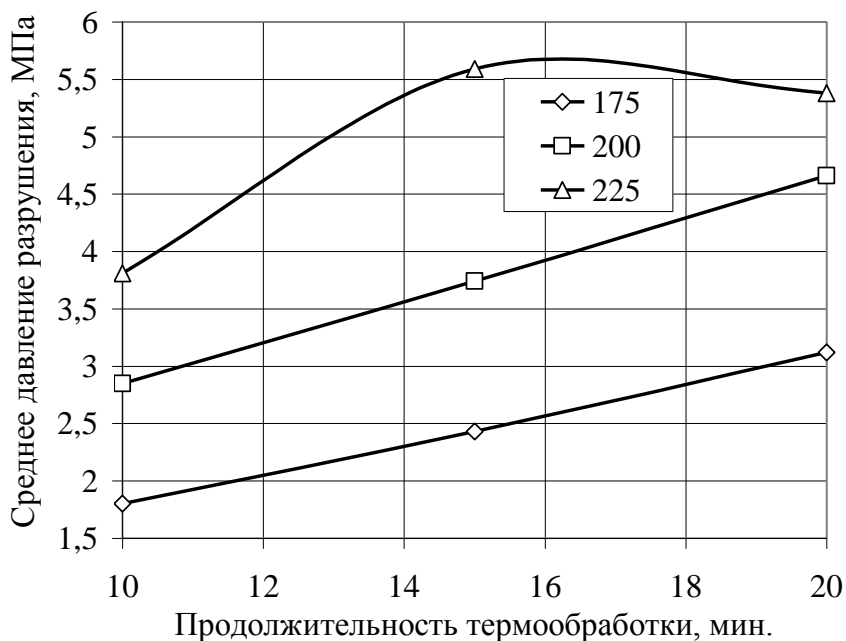


Рисунок 5.16 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) с содержанием опилок 5% от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

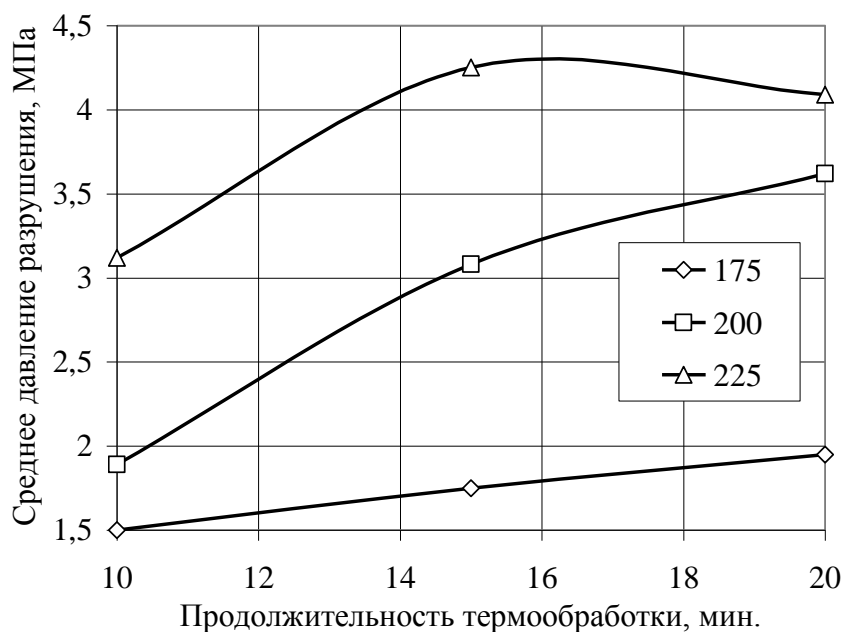


Рисунок 5.17 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) с содержанием опилок 10% от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

Серия № 5.2. Связующее – меласса, концентрация 60%.

Технология проведения экспериментов данной серии отличается от серии № 5.1 только видом связующего и режимом термообработки. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.18 и 5.19.

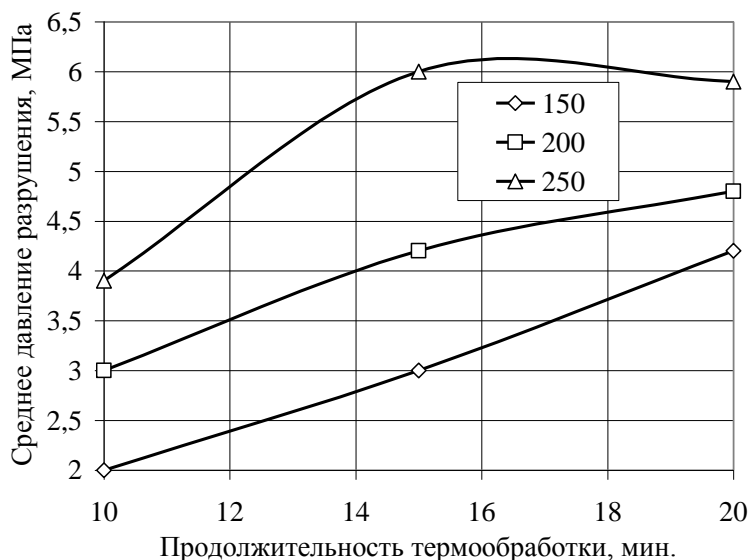


Рисунок 5.18 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) с содержанием опилок 5% от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

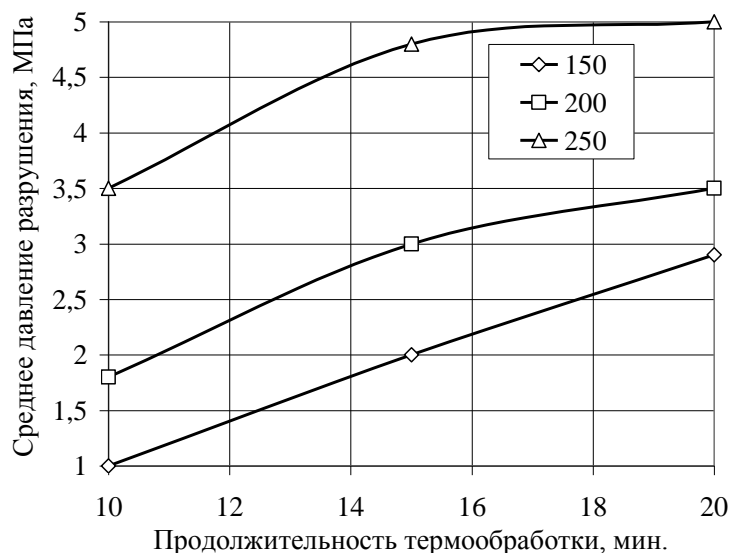


Рисунок 5.19 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) с содержанием опилок 10% от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$)

В табл. 5.32 показаны рациональные режимы брикетирования композиционной шихты с использованием мелассы в качестве связующего.

Таблица 5.32 – Рациональный режим брикетирования для условий опытов серии № 5.2

Параметр	Единицы измерения	Значение
Состав шихты:		
- содержание антрацита (сухая масса)	%	83,3
- содержание опилок (сухая масса)	%	9,1
- содержание мелассы (сухая масса)	%	7,6
Итого (сухая масса)	%	100
Влажность шихты	%	12,5
Расход мелассы (сухая масса к сухой)	%	8,0
Перемешивание	мин /°С	10 / 80
Давление прессования	МПа	25
Температура термообработки	°С	250
Продолжительность термообработки	мин	15-16
Прочность брикета	МПа	5,1-5,2

Сравнительный анализ результатов серий № 5.1 и № 5.2 показывает, что меласса обеспечивает более прочную структуру брикета, чем лигносульфонат типа ЛСН-Ж. Однако, увеличение содержания опилок в брикете свыше 10% сопровождается резким снижением прочности брикета даже при повышении расхода связующего до 9%.

Контрольные опыты с другими растительными отходами при найденных режимах брикетирования показали, что брикеты с их содержанием до 10% имеют аналогичную прочность, полученную в сериях № 5.1 и № 5.2. Исключение составляет лузга подсолнечника, для которой содержание в шихте более 5% резко снижает прочность брикета (до 2,5-3 МПа).

5.4.3.2 Экспериментальные исследования процесса брикетирования композиционной шихты с твердыми связующими

При использовании сухих связующих, как указывалось выше, необходимо осуществить пропаривание шихты по схеме, приведенной на рис. 5.13. При добавлении в шихту растительных отходов эта операция тем более полезна, так как снижает упругую деформацию растительных добавок.

Серия № 6.1. Связующее – твердый (сухой) лигносульфонат.

Режимы экспериментов соответствуют условиям, принятым в серии № 5.1. Исследовалось две шихты с содержанием хвойных опилок 5 и 10%.

Результаты экспериментов показаны в табл. 5.33 и на рис. 5.20.

Таблица 5.33 – Результаты брикетирования шихты с лигносульфонатом

№	Шихта № 1 (содержание опилок 5%)			Шихта № 2 (содержание опилок 10%)		
	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа
	температура, °С	время, мин		температура, °С	время, мин	
1	150	10	1,75	150	10	1,20
2		15	2,72		15	2,00
3		20	3,44		20	2,95
4	200	10	2,80	200	10	2,00
5		15	4,00		15	3,10
6		20	4,89		20	3,85
7	250	10	4,00	250	10	3,55
8		15	6,31		15	5,32
9		20	6,10		20	5,28

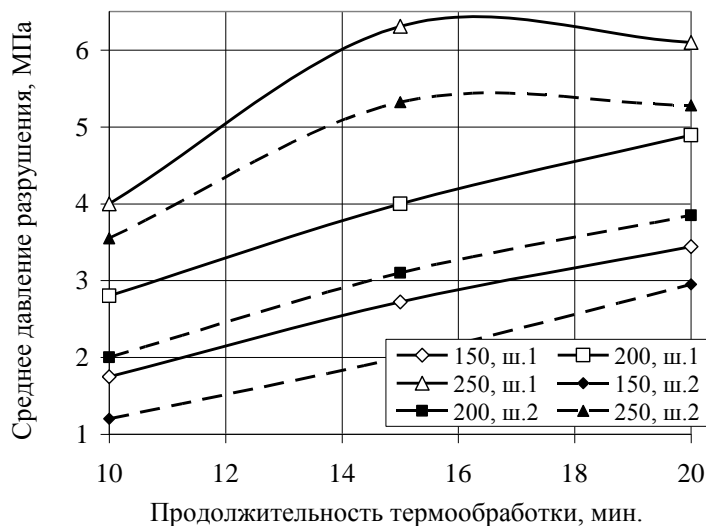


Рисунок 5.20 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$): сплошная линия – шихта 1 с содержанием опилок 5%, пунктирная линия – шихта 2 с содержанием опилок 10%

Зависимости, приведенные на рис. 5.20, показывают ту же тенденцию – снижение прочности брикетов при росте содержания в шихте растительных отходов. Отмечается незначительный рост прочности брикетов при использовании сухого лигносульфоната по сравнению с жидким (серия № 5.1).

Серия № 6.2. Связующее – крахмалосодержащее: отходы мучного производства (мучка).

Принято содержание опилок в шихте 10%, расход связующего 8,0 и 9,0%. Режимы термообработки исследовались в широких интервалах: температура 150-300 $^{\circ}\text{C}$, время обработки 10-30 мин. Составы шихты для исследований данной серии приведены в табл. 5.34.

Адгезионные свойства крахмалосодержащих веществ повышаются при росте температуры и наличии влаги. В этих условиях происходит частичный гидролиз крахмала с превращением его в декстрины, обладающие высокой склеивающей способностью. С учетом вышеизложенного, при подготовке шихты к брикетированию смешивание компонентов осуществлялось дифференцированно.

Таблица 5.34 – Составы шихты в пересчете на сухую массу для экспериментов серии № 6.2

Компонент	Содержание, %	
	Шихта № 1	Шихта № 2
Антрацит (90%) (сухая масса)	83,3	82,6
Опилки (10%) (сухая масса)	9,1	9,0
Мучка (8 и 9%) (сухая масса)	7,6	8,4
Итого	100,0	100,0
Вода до влажности	13%	

На первой стадии древесные опилки смешивались с сухой мучкой с добавлением воды при температуре 85-90°C. После перемешивания добавлялась угольная составляющая шихты и необходимое количество воды (до влажности шихты 13%), и смесь повторно перемешивалась при той же температуре. Полученная шихта прессовалась при давлении 25 МПа.

Результаты экспериментов представлены в табл. 5.35 и на рис. 5.21 и 5.22.

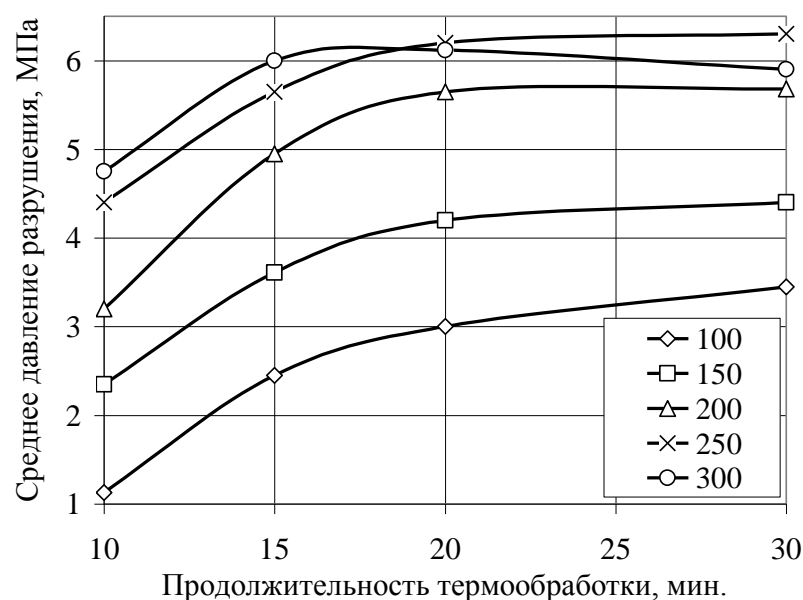


Рисунок 5.21 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах (°C) и расходе связующего (мучки) 8%

Таблица 5.35 – Результаты брикетирования угля с опилками и мучкой

№	Шихта № 1 (расход мучки 8%)			Шихта № 2 (расход мучки 9%)		
	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа	Условия термообработки		Давление разрушения, МПа
	температура, °С	время, мин		температура, °С	время, мин	
1	100	10	1,13	100	10	1,22
2		15	2,45		15	2,61
3		20	3,00		20	3,40
4		30	3,45		30	3,85
5	150	10	2,35	150	10	2,66
6		15	3,61		15	3,75
7		20	4,20		20	4,45
8		30	4,40		30	4,74
9	200	10	3,20	200	10	3,65
10		15	4,95		15	5,21
11		20	5,65		20	6,11
12		30	5,68		30	6,25
13	250	10	4,40	250	10	4,75
14		15	5,65		15	5,80
15		20	6,20		20	6,44
16		30	6,30		30	6,46
17	300	10	4,75	300	10	5,00
18		15	6,00		15	6,14
19		20	6,12		20	6,45
20		30	5,90		30	6,20

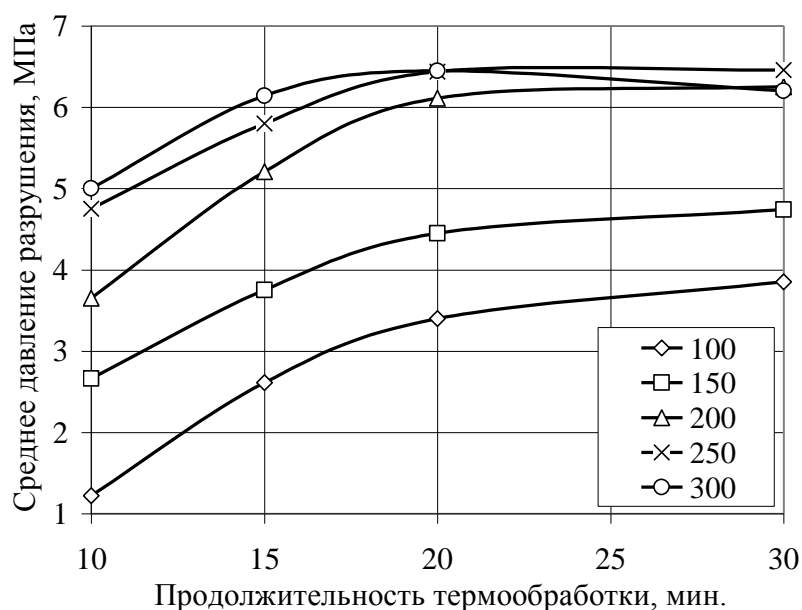


Рисунок 5.22 – Зависимость давления разрушения брикета ($P_{\text{разр}}$) от продолжительности термообработки при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$) и расходе связующего (мучки) 9%

Результаты экспериментов показывают, что крахмалосодержащие связующие обеспечивают более прочные композиционные брикеты (уголь + опилки), чем рассмотренные выше меласса и лигносульфонат. Увеличение расхода связующего до 9% приводит к незначительному повышению прочности брикета.

Обращает на себя внимание экстремальная зависимость прочности брикета от продолжительности термообработки при температуре 300°C . Это объясняется ослаблением связей при длительном воздействии относительно высокой температуры в связи с выгоранием связующего.

В табл. 5.36 приведен рациональный режим процесса брикетирования для условий опытов серии № 6.2.

Полученные рациональные режимы брикетирования композиционной шихты с хвойными опилками полностью соответствуют наилучшим режимам брикетирования с добавлением любых древесных отходов (опилки прочных пород, стружка, щепа, измельченная бумажная макулатура и солома). Единственное требование к этим добавкам – определенная крупность. Для лабораторных исследова-

ний она соответствует классу (0-1) мм. Для контрольного брикетирования шихты со щепой и стружкой добавки измельчались до указанной крупности.

Таблица 5.36 – Рациональный режим брикетирования шихты (уголь+опилки) с твердым связующим (серия № 6.2)

Параметр	Единицы измерения	Значение
Состав шихты:		
- содержание антрацита (сухая масса)	%	83,3
- содержание опилок (сухая масса)	%	9,1
- содержание мучки (сухая масса)	%	7,6
Итого	%	100
Влажность шихты	%	13,0
Расход мучки (сухая масса)	%	8,0
Перемешивание	мин /°С	15 / 90
Давление прессования	МПа	25
Температура термообработки	°С	250
Продолжительность термообработки	мин	16-18
Прочность брикетов	МПа	6,1-6,3

В промышленных условиях, где размер брикета в 3-4 раза больше, крупность древесных компонентов может быть увеличена. Это положение требует своей проверки на промышленных прессах.

5.4.3.3 Исследование технологии брикетирования композиционной шихты с битумной эмульсией

В экспериментальных работах исследовалась возможность использования в качестве компонента шихты лузги подсолнечника. Данный наполнитель по своим свойствам наименее приспособлен к брикетированию с водорастворимыми связующими. Это связано с весьма высокой гидрофобностью поверхности лузги, что предподре-

деляет низкую смачиваемость её водными связующими и, как следствие, – малую прочность брикета.

Эксперименты показали, что при содержании в шихте лузги подсолнечника более 4-5% после прессования с лигносульфонатом и мелассой брикеты растрескивались при выходе из матрицы. В этой связи было испытано углеводородное связующее – катионная битумная эмульсия. Битум, содержащийся в эмульсии, имеет высокую адгезионную способность к гидрофобным поверхностям, какими являются как поверхность лузги, так и поверхность угольных частиц. Катионная битумная эмульсия готовится перемешиванием водного раствора с битумом, разогретым до 120°C. Состав эмульсии представлен в табл. 2.2.

Серия № 7.1. Брикетирование шихты, содержащей лузгу подсолнечника, с битумной эмульсией.

В ходе исследований подготавливалась шихта с разным содержанием лузги: шихта № 1 – 0%, шихта № 2 – 5% и шихта № 3 – 10%. Составы шихты для экспериментов данной серии показаны в табл. 5.37.

Таблица 5.37 – Составы шихты в пересчете на сухую массу для экспериментов серии № 7.1

Компонент	Содержание, %		
	Шихта № 1	Шихта № 2	Шихта № 3
Антрацит (сухая масса)	92,5	87,9	83,4
Лузга (сухая масса)	0	4,5	9,0
Битумная эмульсия (сухая масса, битум)	7,5	7,6	7,6
Итого	100,0	100,0	100,0

Расход битумной эмульсии составил 8,0% (пересчет на битум).

Подготовка шихты к прессованию включала следующие этапы:

- измельчение лузги до 1 мм;

- смешивание угольной фракции с лузгой в обогреваемом смесителе при температуре 80°C;
- добавление эмульсии (концентрация 68%) и перемешивание в течение 10 мин при температуре 80-90°C.

Процесс смешивания шихты при повышенной температуре сопровождается удалением влаги, содержащейся в эмульсии, и переводом частиц битума в жидкотекучее состояние.

Брикеты после прессования подвергались естественному охлаждению. Контроль прочности осуществлялся после вылеживания брикетов в течение 1 часа. Результаты испытаний брикетов на прочность показаны в табл. 5.38.

Таблица 5.38 – Результаты экспериментов для серии № 7.1

№ эксперимента	Давление разрушения брикета, МПа		
	Шихта № 1	Шихта № 2	Шихта № 3
1	7,45	6,28	5,89
2	7,32	6,25	6,12
3	7,35	6,40	5,77
4	7,55	6,66	5,94
Среднее	7,42	6,40	5,93

Анализ результатов исследования свидетельствуют о том, что битумная эмульсия, как связующее, обеспечивает достаточно высокую прочность чисто угольных брикетов. С повышением содержания в шихте лузги прочность брикета снижается. Однако она выше, чем при прессовании композиционных брикетов лузга + уголь с другими водорастворимыми связующими.

Серия № 7.2. Брикетирование шихты, содержащей бумажные отходы, с битумной эмульсией.

В качестве добавки в шихту использовались измельченные утилизированные бумажные отходы в количестве 9%. Подготовка шихты к прессованию осуществлялась аналогично серии № 7.1. Расход эмульсии (концентрация битума 68%) принимался для шихты № 1 равным 8%, шихты № 2 – 9%.

Влажность исходных компонентов составляла:

- антрацит – 2,3%;
- бумага – 4,2%;
- эмульсия – 32%.

Общая влажность шихты перед смешиванием при расходе связующего 8% составляла 6,4%, при расходе 9% – 6,8%. При смешивании компонентов шихты при температуре 80°C влажность шихты снижалась до 2,5%.

Составы шихты по сухой массе для экспериментов данной серии показаны в табл. 5.39. Результаты испытаний брикетов на прочность представлены в табл. 5.40.

Таблица 5.39 – Составы шихты в пересчете на сухую массу для экспериментов серии № 7.2

Компонент	Содержание, %	
	Шихта № 1	Шихта № 2
Антрацит (сухая масса)	83,3	82,6
Бумага (сухая масса)	9,1	9,0
Битумная эмульсия (сухая масса, битум)	7,6	8,4
Итого	100,0	100,0

Таблица 5.40 – Результаты экспериментов для серии № 7.2

№ эксперимента	Давление разрушения брикета, МПа	
	Шихта № 1	Шихта № 2
1	7,05	7,48
2	7,24	7,12
3	7,11	7,39
4	6,89	7,54
Среднее	7,07	7,38

Полученные данные позволяют заключить, что битумная эмульсия обеспечивает достаточную прочность брикета, содержащего бумажные отходы (порядка 10%), при расходе сухого битума 8%.

5.4.3.4 Исследование влияния на свойства брикетов парафиновой добавки

Технический парафин, введенный в шихту брикетирования с водорастворимыми связующими, согласно ранее проведенным исследованиям, повышает влагостойкость готового брикета, но при этом значительно снижает его конечную прочность.

Для повышения влагостойкости брикета без снижения его прочности целесообразно подвергать готовые брикеты, выгружаемые из сушильной установки, аэрозольной обработке разогретым до жидкого состояния парафином. Последний, покрывая поверхность брикета, после охлаждения препятствует проникновению влаги внутрь брикета.

При пакетировании готовой продукции данная операция излишняя.

5.4.4 Выводы по результатам экспериментальных исследований технологии брикетирования композиционных брикетов

Проведенные экспериментальные исследования технологии брикетирования композиционных брикетов, содержащих древесные отходы, выполненные в лабораторных условиях, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Марка каменного угля (и его зольность), входящего в шихту для брикетирования, определяет только теплоту сгорания брикета и не влияет на рациональный технологический режим брикетирования.

2. Крупность угольной компоненты не должна превышать 6 мм (в промышленных условиях), но прочность брикета будет выше при крупности 0-3 мм.

3. Вид растительных отходов, включаемых в шихту, незначительно влияет на технологический режим прессования, но для получения требуемой прочности брикета, обеспечивающей его транспортабельность, необходимо подвергать растительные добавки измельчению до 1 мм.

4. Добавка в шихту прессования любых растительных отходов снижает прочность брикетов, а при превышении содержания в шихте добавки более 10-12% в структуре брикета появляются трещины уже на выходе из матрицы прессования. В производственных условиях, где размер брикета значительно превышает лабораторные образцы, критическое содержание растительных отходов должно быть уточнено.

5. Все исследуемые связующие могут быть использованы при брикетировании композиционной шихты, однако каждое из них требует определенной последовательности и режимов в подготовительных операциях к прессованию.

6. Наибольшую сложность при брикетировании представляет композиционная шихта, содержащая лузгу подсолнечника.

7. Использование водорастворимых связующих веществ требует термической обработки сырых брикетов при определенных теплотехнических параметрах.

8. При использовании в качестве связующего катионной битумной эмульсии отпадает необходимость в термической обработке брикета, но повышаются требования к влажности компонентов шихты. Приведенная влажность шихты перед прессованием в этом случае не должна превышать 2-3%.

9. Использование технического парафина при производстве брикетов целесообразно только при необходимости повышения водостойкости продукции.

5.4.5 Регламент и технологические режимы процессов подготовки шихты, прессования и термообработки

Процессы подготовки шихты к брикетированию предполагают выбор используемых топливных компонентов, их крупности и вида связующего, что определяет значение рациональной влажности шихтуемых материалов.

5.4.5.1 Регламент и режимы процесса брикетирования шихты с водорастворимыми связующими

Главная технологическая особенность брикетирования любой шихты с водорастворимыми связующими заключается в выдерживании рациональной влажности подготовленной к брикетированию шихты и требуемой продолжительности и температуры термической обработки брикетов после пресса. Весьма важно контролировать влажность готовой шихты (с водным связующим), которая должна быть в пределах 12-13%.

В табл. 5.41 приведены обозначения параметров составляющих компонентов шихты для расчета ее влажности.

Таблица 5.41 – Обозначения параметров для расчета влажности шихты

Компонент	Содержание в шихте с рабочей влагой, %	Влажность, %
Уголь	γ_y	W_y
Добавка	γ_d	W_d
Связующее	γ_c	W_c
Вода	γ_v	W_v
Итого	100,0	$W_{ш}$

С учетом этих обозначений расчетная влажность шихты определится как:

$$W_{\text{ш}} = \frac{\gamma_y \cdot W_y + \gamma_d \cdot W_d + \gamma_c \cdot W_c + \gamma_b \cdot W_b}{100}. \quad (5.2)$$

При однокомпонентной шихте принимается $\gamma_d = 0$.

Например, при использовании жидкого лигносульфоната с концентрацией 60% (влажность – 40%) при расходе 7% (по сухому) предельная влажность угля составляет 8,5%. При этих условиях параметры шихты имеют значения, показанные в табл. 5.42.

Таблица 5.42 – Состав шихты при расходе связующего 7%

Компонент	Содержание в шихте с рабочей влагой, %	Влажность, %
Уголь	89,6	8,5
Связующее	10,4	40,0
Вода	0	100,0
Итого	100,0	12,6

В общем случае обеспечивать требуемую влажность шихты в пределах 12-13% можно либо подсушиванием компонентов (при $W_{\text{ш}} > 13\%$), либо добавкой в шихту технической воды (при $W_{\text{ш}} < 12\%$).

Управление влажностью шихты можно осуществлять на основании следующих расчетов:

1. Определить влажность шихты ($W_{\text{ш}}$) по формуле (5.2) при $\gamma_b = 0$.

2. Если найденная влажность превосходит 13%, угольный компонент необходимо подсушить до влажности W_y , определяемой по формуле:

$$W_y = \frac{1300 - \gamma_d \cdot W_d - \gamma_c \cdot W_c}{\gamma_y}. \quad (5.3)$$

3. В случае, когда определенная по выражению (5.2) влажность шихты имеет значение менее 12%, количество добавляемой воды (до влажности шихты 12,5%) определяется по следующему выражению:

$$\gamma_{\text{в}} = \frac{1250 - \gamma_{\text{у}} \cdot W_{\text{у}} - \gamma_{\text{д}} \cdot W_{\text{д}} - \gamma_{\text{с}} \cdot W_{\text{с}}}{100} \quad (5.4)$$

Соответствующие предварительные расчеты необходимо выполнить при подготовке шихты к прессованию.

5.4.5.2 Регламент и режимы процесса брикетирования однокомпонентной шихты с водорастворимыми жидкими и сухими связующими

Технология подготовки шихты к брикетированию зависит от ее состава. Для однокомпонентной шихты обобщающая структурно-факторная схема процесса брикетирования с жидкими водорастворимыми связующими показана на рис. 5.23.

С учетом того, что жидкие связующие (лигносульфонат и меласса) имеют мало отличающуюся эффективность, регламент и режимы процессов, определенные в разделе 5.4.2, сведены в единые таблицы 5.43-5.45.

Таблица 5.43 – Состав и параметры шихты при расходе водорастворимого связующего 7% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
1	2	3	4	5
Уголь	100,0	7,0	85,6	93,0

Окончание таблицы 5.43

1	2	3	4	5
Связующее к углю	11,7	40,0	13,1	7,0
Вода добавочная	0,8	100,0	1,3	
Итого	112,5		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				11,4
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,5



Рисунок 5.23 – Структурная схема процесса подготовки однокомпонентной шихты, брикетирования и термообработки при использовании водорастворимых связующих

Таблица 5.44 – Состав и параметры шихты при расходе водорастворимого связующего 8% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь	100,0	7,0	84,6	92,1
Связующее к углю	13,3	40,0	14,8	7,9
Вода добавочная	0,4	100,0	0,6	
Итого	113,7		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				11,9
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,5

Таблица 5.45 – Регламент и режимы смешивания, брикетирования шихты и термообработки брикетов

Операция	Параметр	Значение	Примечание
1	2	3	4
Смешивание	Продолжительность, мин	10-15	Повышенная температура при смешивании компонентов снижает вязкость связующего, что улучшает процесс гомогенизации
	Температура, °С	50-70	
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25	

Окончание таблицы 5.45

1	2	3	4
Термообработка для брикетов с лигносульфонатом (7%)	Температура, °С Продолжительность, мин Прочность брикета, МПа	175-200 20-15 6,3-6,5	Время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
Термообработка для брикетов с мелассой (8%)	Температура, °С Продолжительность, мин Прочность брикета, МПа	250 15 7,0-7,5	Время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено

Внедрение разработанных в ходе лабораторных исследований режимов подготовки однокомпонентной шихты, ее брикетирования и термообработки полученных брикетов с водорастворимыми жидкими связующими в промышленности требует корректировки времени термообработки в сторону увеличения.

Для однокомпонентной шихты структурно-факторная схема процесса брикетирования с сухими связующими представлена на рис. 5.24.

В качестве сухих связующих рассмотрены, как и в разделе 5.2, твердый лигносульфонат (ЛСН-Т) и крахмалосодержащее связующее – мучка.

При использовании сухих связующих подготовку шихты к брикетированию рекомендуется производить в два приема. При этом пропаривание сухого связующего обязательно.

Состав, параметры шихты при расходе лигносульфоната и мучки, а также регламент и режимы смешивания, брикетирования

шихты и термообработки однокомпонентных брикетов с сухими связующими представлены в табл. 5.46-5.48.

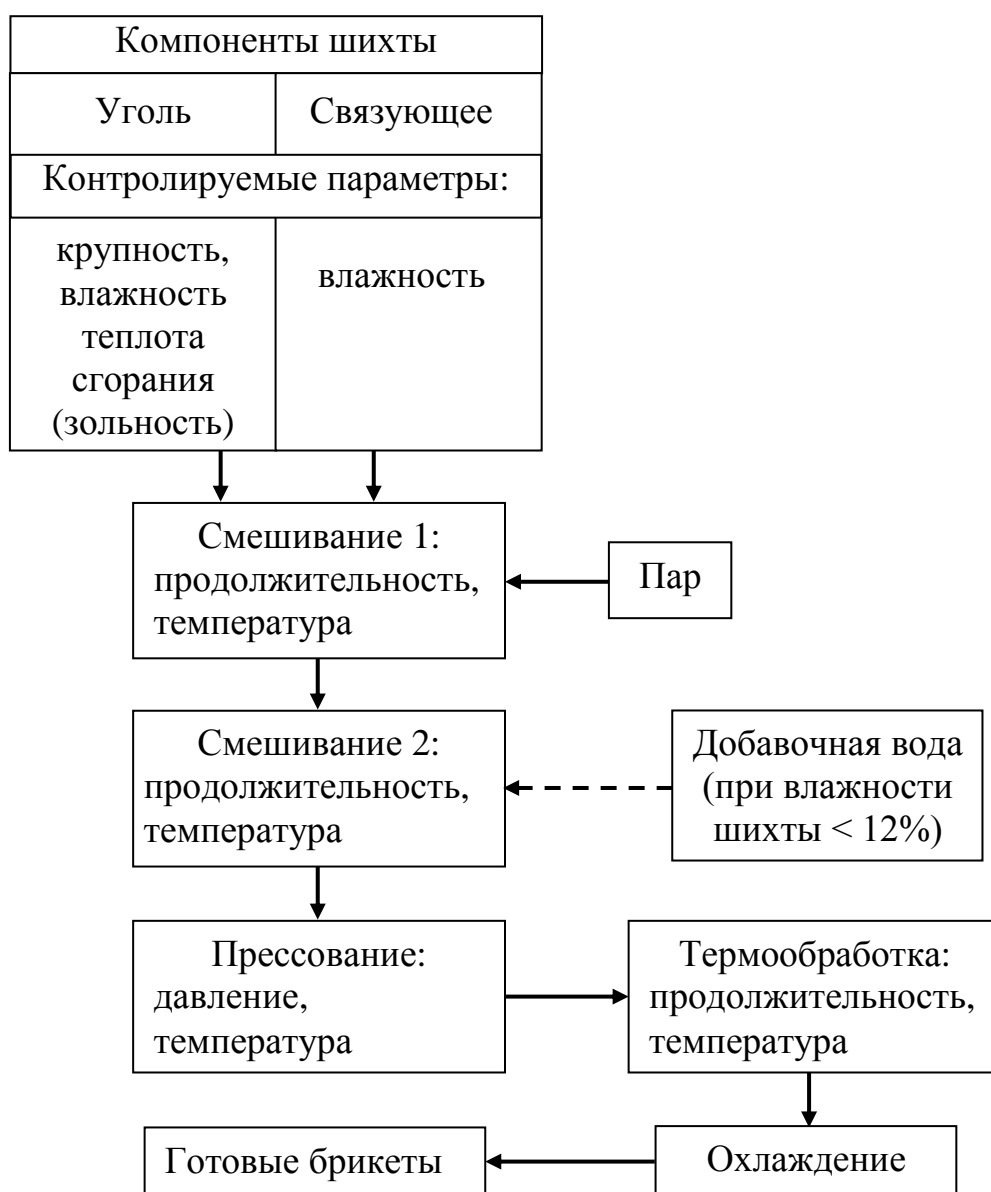


Рисунок 5.24 – Структурная схема процесса подготовки однокомпонентной шихты, брикетирования и термообработки при использовании сухих связующих

Таблица 5.46 – Состав и параметры шихты при расходе лигносульфоната 8% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь	100,0	7,0	87,0	92,1
Связующее к углю	8,2	2,0	6,8	7,9
Вода добавочная	3,8	100,0	6,2	
Итого	112,0		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				6,6
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,4

Таблица 5.47 – Состав и параметры шихты при расходе мучки 8% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь	100,0	7,0	86,8	92,1
Связующее к углю	8,3	4,0	7,0	7,9
Вода добавочная	3,8	100,0	6,2	
Итого	112,1		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				6,8
Влажность шихты с добавочной водой				12,5

Таблица 5.48 – Регламент и режимы смешивания, брикетирования шихты и термообработки однокомпонентных брикетов с сухими связующими

Операция	Параметр	Значение	Примечание
Смешение № 1 (Малаксер 1)	Продолжительность, мин Температура, °С	10 150-200	По результатам промышленных испытаний время смешивания может быть скорректировано
Смешение № 2 (Малаксер 2)	Продолжительность, мин Температура, °С	10 100-150	Добавление воды согласно табл. 5.10
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25,0	
Термообработка для брикетов с лигносульфонатом	Температура, °С	250-230	Необходимое время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
	Продолжительность, мин	20-15	
	Прочность брикетов, МПа	7,5-7,8	
Термообработка для брикетов с мучкой	Температура, °С	250-260	Необходимое время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
	Продолжительность, мин	16-15	
	Прочность брикетов, МПа	6,8–7,0	

При внедрении в промышленных условиях режимы подготовки однокомпонентной шихты, ее брикетирования и термообработки полученных брикетов с водорастворимыми сухими связующими, раз-

работанные в ходе лабораторных исследований, могут быть скорректированы.

5.4.5.3 Регламент и режимы процесса брикетирования композиционной шихты с водорастворимыми жидкими и сухими связующими

Для многокомпонентной шихты структурно-факторная схема процесса брикетирования с жидкими связующими показана на рис. 5.25.

Как показали проведенные эксперименты, получить прочные брикеты с содержанием растительных добавок (по массе) более 10% не удалось при использовании всех исследованных связующих. Поэтому при разработке регламента и режимов процессов во всех случаях принято содержание добавок в шихте 10%.

При использовании жидких связующих подготовку композиционной шихты к брикетированию рекомендуется производить в два приема. На первой стадии смешиваются в заданной пропорции твердые компоненты шихты (операция «Смешивание 1», см. рис. 5.25), а на второй стадии смешивается вся шихта со связующим (операция «Смешивание 2» рис. 5.25).

Как отмечалось в разделе 5.4.3, для улучшения структуры брикета, содержащего растительные отходы, шихту на стадии перемешивания необходимо подвергнуть пропариванию перегретым паром, например, в малаксер. Поэтому целесообразно операции «Смешивание 1» и «Смешивание 2» осуществить в двух малаксерах.

Для данного регламента в качестве добавки могут быть использованы любые древесные отходы, измельченные до крупности менее 1 мм.

При подготовке шихты по влажности следует руководствоваться положениями, изложенными в пунктах 5.2.2 и 5.4.5.1. В этом случае в формулах (5.2-5.4) следует учитывать содержание и влажность растительных добавок (γ_d и W_d). При

необходимости добавления в шихту воды, подавать ее следует во второй аппарат смешивания.

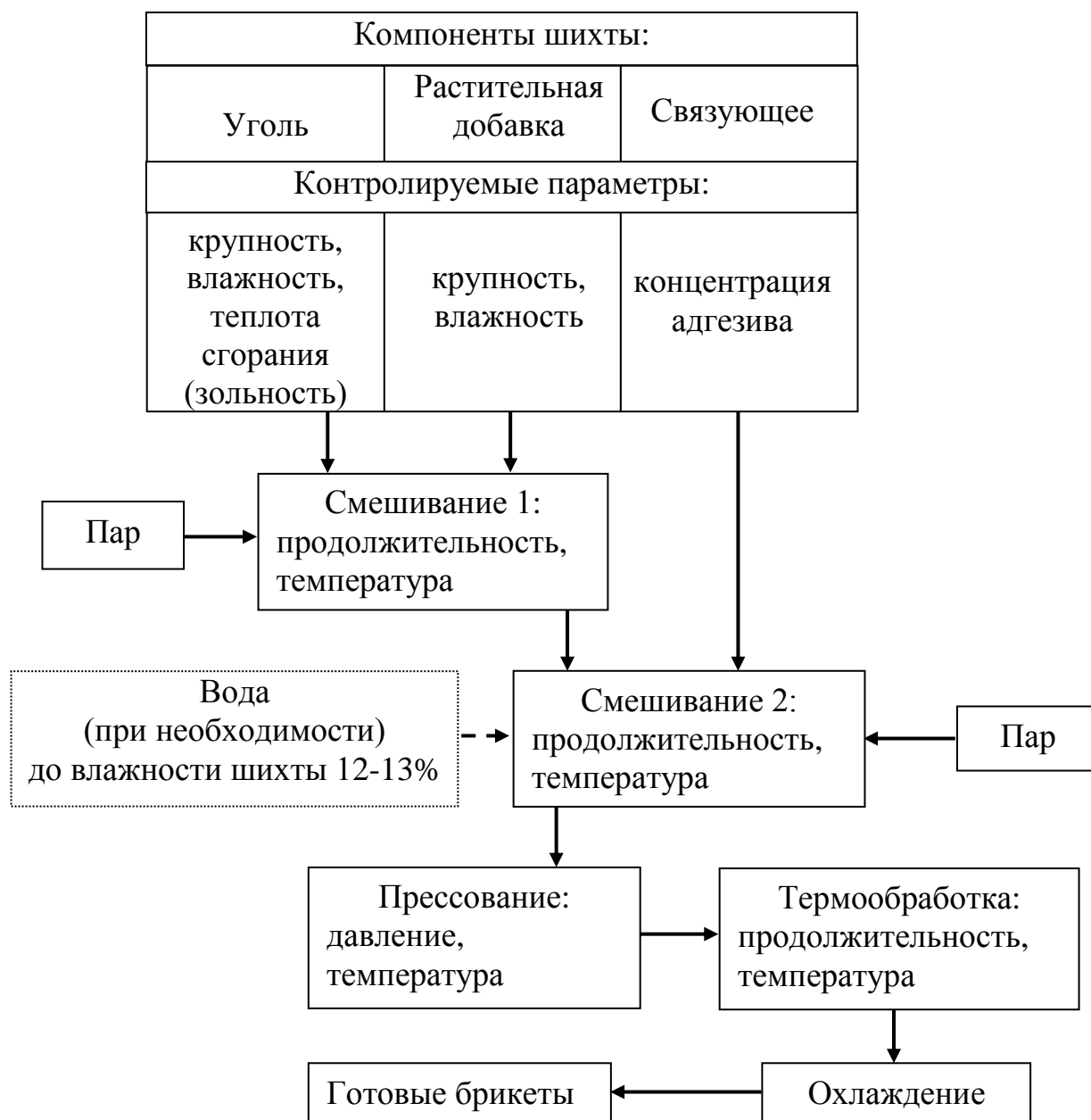


Рисунок 5.25 – Структурная схема процесса подготовки многокомпонентной шихты, брикетирования и термообработки при использовании водорастворимых связующих

Режимы и регламент брикетирования композиционной шихты с водорастворимыми связующими представлены в табл. 5.49-5.51.

Таблица 5.49 – Состав и параметры шихты при расходе лигносульфоната 8% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь (У)	90,0	7,0	76,1	83,2
Добавка (Д)	10,0	12,0	8,8	8,8
Связующее к (У+Д)	13,3	40,0	14,7	8,0
Вода добавочная	0,2	100,0	0,3	
Итого	113,5		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				12,3
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,6

Таблица 5.50 – Состав и параметры шихты при расходе мелассы 8% (сухого)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь (У)	90,0	6,0	74,8	83,2
Добавка (Д)	10,0	10,0	8,6	8,9
Связующее к (У+Д)	14,5	45,0	16,6	7,9
Вода добавочная	0	100,0	0,0	
Итого	114,5		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				12,8
Влажность шихты с добавочной водой, %				13,0

Таблица 5.51 – Регламент и режимы смешивания, брикетирования шихты и термообработки брикетов

Операция	Параметр	Значение	Примечание
Смешивание № 1 (Малаксер 1)	Продолжительность, мин	10	По результатам промышленных испытаний время смешивания может быть скорректировано
	Температура, °С	150-200	
Смешивание № 2 (Малаксер 2)	Продолжительность, мин	10	
	Температура, °С	100-150	
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25,0	
Термообработка для брикетов с лигносульфонатом	Температура, °С	200-250	Необходимое время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
	Продолжительность, мин	15-10	
	Прочность брикетов, МПа	4,0-4,3	
Термообработка для брикетов с мелассой	Температура, °С	250	Необходимое время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
	Продолжительность, мин	15	
	Прочность брикетов, МПа	5,1-5,2	

Следует обратить внимание на тот факт, что влажность связующего мелассы находится в районе 45%, а лигносульфоната – 40%. Поэтому для обеспечения требуемой влажности шихты влажность угольной составляющей должна находиться в пределах 5,8-6,4% (см. табл. 5.50).

Внедрение разработанных в ходе лабораторных исследований режимов подготовки композиционной шихты, ее брикетирования и термообработки полученных брикетов с водорастворимыми связующими в промышленности требует корректировки времени сме-

шивания. Время термообработки может изменяться в сторону увеличения.

Структурно-факторная схема процесса брикетирования композиционной шихты с сухими водорастворимыми связующими представлена на рис. 5.26.

Данная схема допускает высокую влажность исходного угля, что ликвидирует операцию его сушки.

В данных, приведенных в табл. 5.52 и 5.53, влажность угля принята равной 8%.

Таблица 5.52 – Состав и параметры шихты при расходе сухого лигносульфоната 8%

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь (У)	90,0	8,0	79,2	83,4
Добавка (Д)	10,0	15,0	9,4	8,6
Связующее к (У+Д)	8,2	2,0	6,8	8,0
Вода добавочная	2,8	100,0	4,6	
Итого	111,0		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				8,3
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,5

Схема подготовки шихты, содержащей три сухих компонента, имеет отличия от ранее рассмотренных схем. Два компонента шихты (растительные отходы и сухое связующее) требуют операции пропарки.

Поэтому на первой стадии смешения необходимо устанавливать аппарат типа малаксера, где смешиваются и пропариваются растительные добавки и сухое связующее, на второй – любой смеситель с обогревом для усреднения шихты с учетом

добавляемой воды. Допустимо и на второй стадии смешения использовать малаксер.



Рис. 5.26 – Структурная схема процесса подготовки многокомпонентной шихты, брикетирования и термообработки при использовании сухих водорастворимых связующих

Таблица 5.53 – Состав и параметры шихты при расходе мучки 9%

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь (У)	90,0	8,0	78,3	82,5
Добавка (Д)	10,0	15,0	9,3	8,5
Связующее к (У+Д)	9,4	4,0	7,9	9,0
Вода добавочная	2,8	100,0	4,5	
Итого	112,2		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				8,4
Влажность шихты с добавочной водой, %				12,5

Таблица 5.54 – Регламент и режимы смешивания, брикетирования шихты и термообработки композиционных брикетов с сухими связующими

Операция	Параметр	Значение	Примечание
1	2	3	4
Смешивание № 1 (Малаксер 1)	Продолжительность, мин Температура пара, °С	10 150-200	По результатам промышленных испытаний время смешивания может быть скорректировано
Смешивание № 2	Продолжительность, мин Температура, °С	10 100-150	Добавление воды
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25,0	

Окончание таблицы 5.54

1	2	3	4
Термообработка для брикетов с лигносульфонатом	Температура, °С Продолжительность, мин Прочность брикетов, МПа	250-230 20-15 5,3	Необходимое время термообработки промышленных брикетов может быть увеличено
Термообработка для брикетов с мучкой	Температура, °С Продолжительность, мин Прочность брикетов, МПа	300 15-18 6,4	

Внедрение разработанных в ходе лабораторных исследований режимов подготовки композиционной шихты, ее брикетирования и термообработки полученных брикетов с сухими водорастворимыми связующими в промышленности требует корректировки времени термообработки в сторону увеличения.

5.4.5.4 Регламент и режимы процесса брикетирования композиционной шихты с битумной эмульсией

Как указывалось в подпункте 5.4.3.3, при прессовании шихты, содержащей лузгу подсолнечника или бумажные отходы, лучшие результаты получены при использовании в качестве связующего катионной битумной эмульсии.

Важным требованием к шихте брикетирования является минимально возможная ее влажность, к операции подготовки шихты – температурный режим, который должен обеспечивать разрушение эмульсии, испарение влаги и жидкотекучее состояние битумных частиц.

Концентрация битума использованной эмульсии составляет 68%.

Структурная схема процесса показана на рис. 5.27, состав шихты и режимы процессов – в табл. 5.55-5.57.

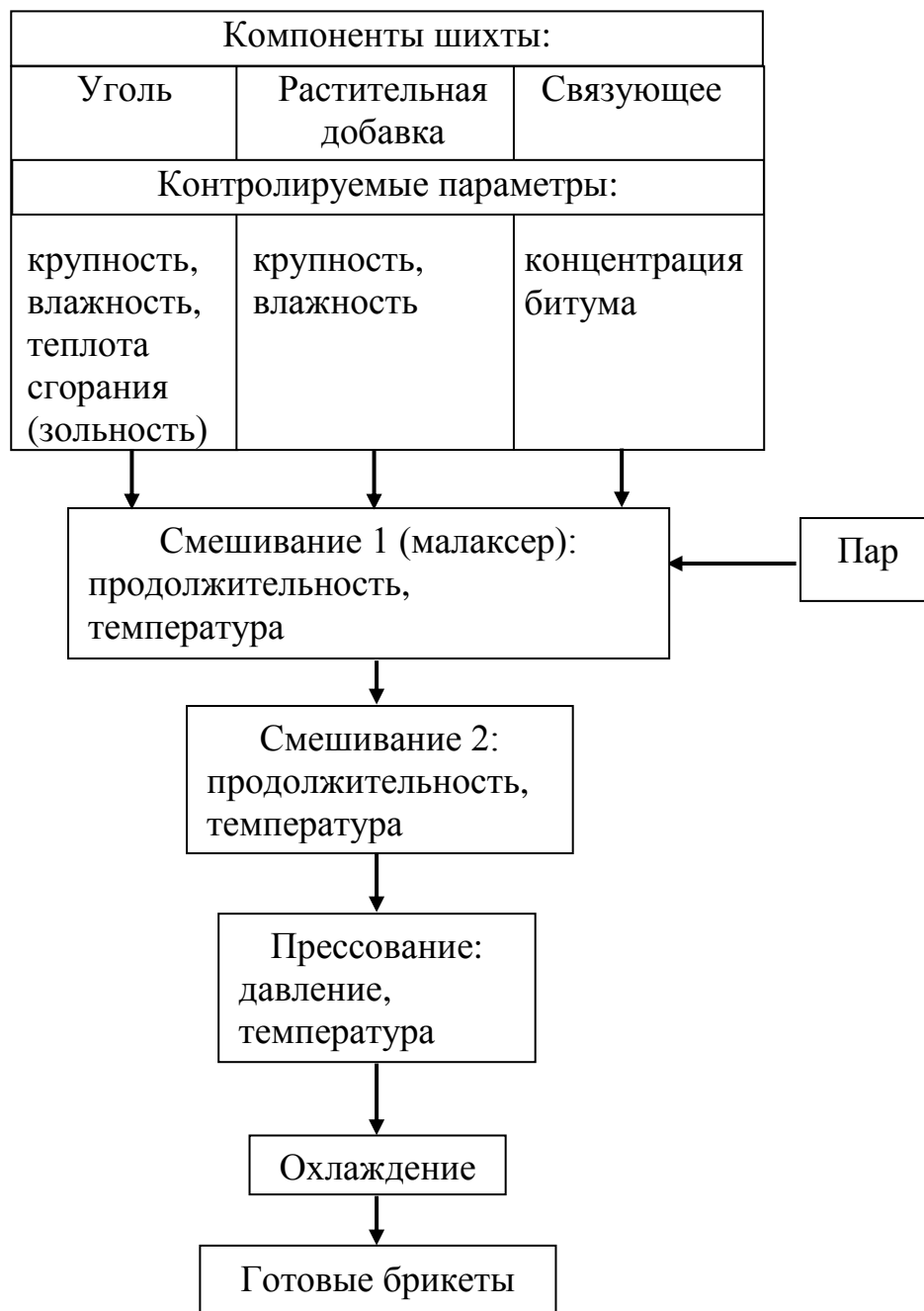


Рисунок 5.27 – Структурная схема процесса подготовки многокомпонентной шихты, брикетирования и термообработки при использовании катионной битумной эмульсии

Таблица 5.55 – Состав и параметры шихты с лузгой при расходе битумной эмульсии 8% (сухого битума)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь	90,0	4,0	78,3	83,1
Лузга (добавка)	10,0	4,0	8,7	9,2
Битумная эмульсия (концентрация 68%)	11,8	32,0	13,0	7,7
Итого	111,8		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				7,6

Таблица 5.56 – Состав и параметры шихты с бумажными отходами при расходе битумной эмульсии 9% (битума)

Компонент	Дозировка с рабочей влагой, %	Влажность компонентов, %	Состав шихты (с влагой), %	Содержание сухого в шихте, %
Уголь (У)	90	4	77,2	82,1
Бумага (добавка)	10	2	8,4	9,3
Битумная эмульсия (концентрация 68%)	13,2	32	14,4	8,6
Итого	113,2		100,0	100,0
Влажность шихты без добавочной воды, %				7,9

Таблица 5.57 – Регламент и режимы смешивания и брикетирования шихты композиционных брикетов с битумной эмульсией

Операция	Параметр	Значение	Примечание
Смешивание № 1 (Малаксер 1)	Продолжительность, мин	10-12	По результатам промышленных испытаний время смешивания может быть скорректировано
	Температура пара, °С	150-200	
Смешивание № 2	Продолжительность, мин	10-15	Температурный режим обеспечи- вает удаление влаги из шихты
	Температура, °С	80-90	
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25,0	
	Температура, °С	60-80	
Естественное охлаждение	Температура, °С	16-20	
	Прочность брикетов, МПа:		
	– с лузгой	5,9	
	– с бумагой	6,56	

Внедрение разработанных в ходе лабораторных исследований режимов подготовки композиционной шихты, ее брикетирования и термообработки полученных брикетов с применением битумной эмульсии в качестве связующего в промышленности требует корректировки времени смешивания.

5.4.6 Определение удельной теплоты сгорания композиционных брикетов

В общем случае теплота сгорания композиционного брикета определяется содержанием в брикете компонентов (γ) и их теплотой сгорания (Q).

Для брикета, как товарного продукта, важна рабочая теплота сгорания, которая может быть отнесена к рабочей массе топлива Q^P , то есть к топливу в том виде, в каком оно поступает к потребителю, с учетом зольности и влажности.

Для расчета теплоты сгорания введены следующие обозначения:

Q_o^P ; A_o^d ; W_o – рабочая теплота сгорания брикета, его приведенная зольность и влажность, соответственно;

Q_y^P ; Q_y^c ; Q_y^e – теплота сгорания угольной составляющей, отнесенная к рабочей массе, к сухой массе (не содержащей влаги) и к горючей массе (не содержащей влаги и золы), соответственно;

Q_o^P ; Q_o^c ; Q_o^e – теплоты сгорания растительных добавок, соответственно;

Q_c^P ; Q_c^c ; Q_c^e – теплоты сгорания твердой фазы связующего, соответственно;

γ_y ; γ_o ; γ_c – содержание в брикете (по сухой массе) угля, добавки и связующего, соответственно, %;

Расчет теплоты сгорания компонентов на сухую массу (с учетом зольности) производится по выражению:

$$Q^c = Q^e (1 - A^d / 100), \quad (5.5)$$

где Q^e – экспериментально определенная теплота сгорания горючей массы компонентов (например, высшая), МДж/кг, (табл. 5.21).

Теплота сгорания брикета на сухую массу определяется по формуле:

$$Q_o^c = (\gamma_y \cdot Q_y^c + \gamma_o \cdot Q_o^c + \gamma_c \cdot Q_c^c) / 100. \quad (5.6)$$

Рабочая теплота сгорания брикета (с учетом его влажности и зольности) рассчитывается по выражению:

$$Q_o^p = Q_o^c(1 - W_o / 100). \quad (5.7)$$

Влажность товарного брикета (W_o) следует определять экспериментально перед упаковкой. Если упаковка не герметична, брикет при хранении частично поглощает атмосферную влагу и его влажность возрастает. При использовании в качестве связующего битумной эмульсии влагопоглощение практически отсутствует.

Для учета в брикете горючей массы связующего можно использовать данные, приведенные в табл. 5.58.

Таблица 5.58 – Теплота сгорания горючей массы связующих (Q_c^e)

Связующее	Теплота сгорания, (высшая), МДж/кг
Лигносульфонат	2,4
Меласса	6,7
Мучка	8,2
Битум	41,5

5.4.7 Рекомендации по разработке технологической схемы брикетирования композиционных брикетов

Технологическая схема брикетирования и применяемое оборудование зависят от многих факторов, основными из которых являются:

1. Гранулометрический состав исходных компонентов шихты;
2. Влажность исходных компонентов шихты;
3. Используемое связующее (твердое или жидкое).

При разработке вариантов схем брикетирования следует учитывать следующие положения, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований:

1. При наличии в исходных угольных компонентах брикетирования зерен крупнее 6 мм необходимо предусмотреть в схеме операцию дробления.

2. При использовании в качестве добавок древесной стружки, соломы, утилизированных бумажных отходов технологическая схема должна включать измельчение (резание) указанных компонентов.

3. Перед смешиванием композиционной шихты желательно осуществить пропаривание растительных добавок.

4. При применении водорастворимых жидких связующих или битумной эмульсии и превышении влажности угольной составляющей более 6%, в схеме необходимо предусмотреть операцию подсушивания угля (до 6%, при использовании битумной эмульсии – до 2-3%).

5. В случае использования сухих связующих рекомендуется установить аппарат для пропаривания связующих (например, малаксер) с подачей в него перегретого пара с температурой 150-200°C. Эту операцию можно совместить с операцией по п. 3.

6. Для прессования сложной шихты следует применять вальцевый пресс с давлением прессования не ниже 25-30 МПа.

7. При использовании водорастворимых связующих обязательной операцией является термическая обработка сырых брикетов, для чего следует установить термическую сушилку с регулируемой температурой в пределах (150-300)°C.

8. Применение в качестве связующего битумной эмульсии исключает в технологической схеме операцию термообработки брикетов, необходимо естественное охлаждение.

Вариант технологической схемы брикетирования с сухими связующими показан на рис. 5.28. Схема соответствует технологическому регламенту, представленному в табл. 5.57. На схеме указаны точки контроля параметров, необходимых для управления процессом.

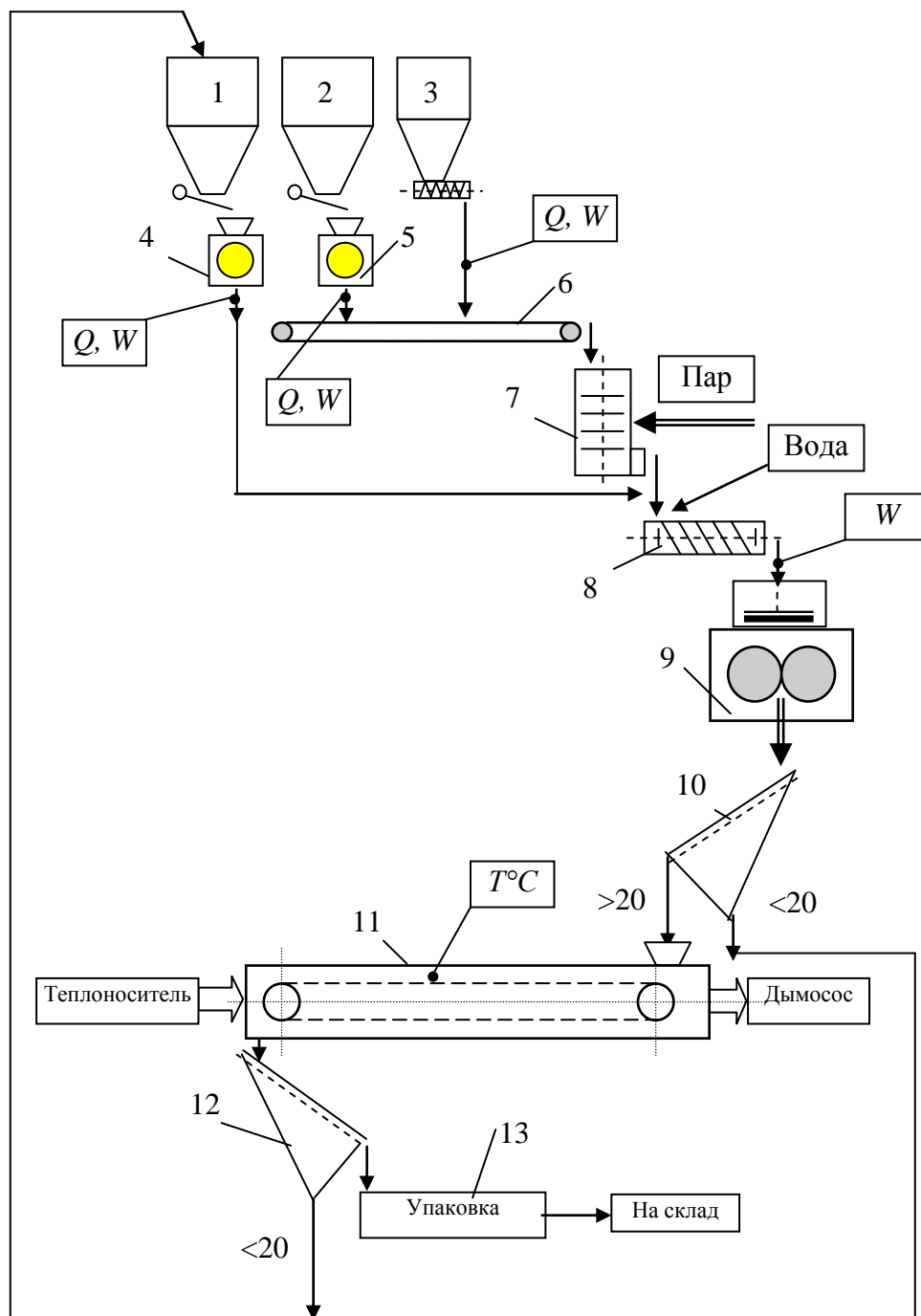


Рисунок 5.28 – Вариант технологической схемы брикетирования с сухим связующим:

1, 2, 3 – бункера с питателями антрацита, добавок, сухого связующего, соответственно; 4, 5 – дробилка (измельчитель); 6 – сборный конвейер; 7 – малаксер; 8 – смеситель шнековый с обогревом; 9 – пресс; 10, 12 – грохот статический; 11 – печь термообработки брикетов; 13 – упаковочный аппарат, \bullet — $Q, W, T^{\circ}C$ – точки контроля нагрузки, влажности, температуры

Установленные статические (колосниковые) грохоты (поз.10-12) служат для отсева возможного боя брикетов и возврата его в процесс. На первом этапе строительства установки грохот после термопечи (поз. 11) можно не устанавливать. Вероятнее всего, боя брикетов здесь не будет.

Подача воды в шнековый смеситель (поз. 8) осуществляется при необходимости, в случае низкой влажности исходной шихты.

5.4.8 Выводы по результатам экспериментальных исследований технической возможности производства композиционных брикетов, содержащих отходы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Производство композиционных брикетов, содержащих кроме угольной составляющей растительные отходы, технически возможно.

2. Прочность композиционных брикетов на 25-30% ниже, чем однокомпонентных угольных брикетов, она снижается с увеличением содержания растительных добавок.

3. Превышение содержания в брикете добавок (свыше 10%) приводит к существенному снижению его прочности.

4. Вид растительных добавок незначительно влияет на режимы брикетирования, однако их крупность должна быть предельно минимальна.

5. Из исследованных связующих наилучшие результаты при брикетировании композиционной шихты получены при использовании битумной эмульсии и отходов мучного производства (мучка).

6. Установленные рациональные режимы этапов брикетирования при всех принятых к исследованию связующих, представлены в таблицах раздела 5.

7. Разработан вариант технологической схемы брикетирования шихты с сухими водорастворимыми связующими.

5.5 Выводы по результатам экспериментальных исследований технологии брикетирования углесодержащих материалов в лабораторных условиях

1. Разработана методика проведения лабораторных исследований, предусматривающая:

- получение брикетов различного размера (от 20 до 50 мм);
- контроль влажности компонентов шихты;
- применение давления прессования 25 МПа, что соответствует развиваемому давлению в промышленных вальцевых прессах;
- использование различных связующих веществ в расходах, принятых по рекомендациям фирм-производителей и с учетом опыта предприятий, на которых эти технологии уже внедрены и опробованы;
- определение рациональных режимов термообработки;
- оценку прочности и влагостойкости брикетов.

2. В ходе исследования технологии брикетирования антрацитового штыба выявлено, что:

- гранулометрический состав антрацитовых компонентов брикетирования не соответствует оптимальному для процесса;
- применение цемента в качестве связующего вещества требует включения в шихту илистых шламов и отсева класса крупностью более 6 мм;
- добавление илистых шламов в шихту значительно повышает прочность брикетов; при этом имеется возможность снизить расход цемента;
- включение в состав шихты технического парафина обеспечивает высокую водостойкость брикетов, не снижая их механическую прочность; рекомендуемый расход парафина находится в пределах 0,75-1,0%.

Применение водорастворимых связующих (лигносульфонат, меласса) требует мероприятий по повышению водостойкости брикетов (включение в шихту технического парафина или покрытие брикетов пленкой парафина). Разработаны рациональные режимы брикетирования и термообработки с применением этого типа связующих.

Разработан рациональный режим брикетирования при использовании цемента, обеспечивающий достаточную прочность и водостойкость брикетов.

3. Исследование технологии брикетирования смеси антрацитового штыба и концентрата угля марки Г позволяют сделать следующие основные выводы:

- гранулометрический состав концентрата марки Г не соответствует оптимальному для процесса брикетирования; схема подготовки шихты к брикетированию должна содержать операции классификации и дробления класса крупностью более 6 мм;

- применение в качестве связующего твердого лигносульфоната не обеспечивает требуемую прочность брикетов;

- наиболее приемлемое связующее для применения в данном случае – отходы мукомольной промышленности;

- рекомендуемый способ повышения влагостойкости брикетов – обработка горячих брикетов мазутной аэрозолью.

Разработана режимная карта брикетирования, термической обработки и гидрофобизации, а также рекомендуемая для реализации технологическая схема получения топливных брикетов.

4. Исследование технических возможностей производства композиционных брикетов, содержащих древесные отходы, свидетельствует о том, что:

- марка каменного угля (и его зольность), входящего в шихту для брикетирования, определяет только теплоту сгорания брикета и не влияет на рациональный технологический режим брикетирования;

- крупность угольной компоненты не должна превышать 6 мм (в промышленных условиях), но прочность брикета будет выше при крупности 0-3 мм;

- вид растительных отходов, включаемых в шихту, незначительно влияет на технологический режим прессования, но для получения требуемой прочности брикета, обеспечивающей его транспортабельность, необходимо подвергать растительные добавки измельчению до 1 мм;

- добавка в шихту прессования любых растительных отходов снижает прочность брикетов, а при превышении содержания в шихте добавки более 10-12% в структуре брикета появляются трещины уже на выходе из матрицы прессования;

- в производственных условиях, где размер брикета значительно превышает лабораторные образцы, критическое содержание растительных отходов должно быть уточнено;

- все исследуемые связующие могут быть использованы при брикетировании композиционной шихты, однако каждое из них требует определенной последовательности и режимов в подготовительных операциях к прессованию;

- наибольшую сложность при брикетировании представляет композиционная шихта, содержащая лузгу подсолнечника;

- применение водорастворимых связующих веществ требует термической обработки сырых брикетов при определенных теплотехнических параметрах.

- при использовании катионной битумной эмульсии в качестве связующего отпадает необходимость в термической обработке брикета, но повышаются требования к влажности компонентов шихты; приведенная влажность шихты перед прессованием в этом случае не должна превышать 2-3%;

- применение технического парафина при производстве брикетов целесообразно только при необходимости повышения водостойкости продукции.

5. Разработаны регламент и режимы процесса брикетирования композиционной шихты с битумной эмульсией и другими связующими.

6. Разработана рекомендуемая технологическая схема процесса брикетирования композиционных брикетов, содержащих древесные отходы.

6 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ СО СВЯЗУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

С каждым годом запасы рудного сырья с достаточным количеством железа непрерывно истощаются. Специалисты считают, что в ближайшее десятилетие технологии, широко используемые в металлургии в настоящее время, станут непригодными для переработки низкосортного сырья. В связи с этим актуальной становится задача разработки технологий изготовления металлопродукции из вторичного сырья, которое в огромных количествах скапливается на каждом металлургическом предприятии.

Несмотря на современные достижения в сфере защиты окружающей среды, металлургическое производство оказывает значительное влияние на биосферу. Черная металлургия является одной из материало- и энергоемких, а также экологически вредных отраслей промышленности. Так, общий расход материально-сырьевых ресурсов по циклу от добычи руды и угля до прокатки составляет до 7 т на 1 т готового проката [79].

Металлургические заводы и комбинаты для того, чтобы уменьшить собственные затраты на производство, утилизируют эти отходы путем захоронения их на специальных полигонах. Это происходит в основном из-за отсутствия технологий переработки отходов или недостаточной эффективности таких технологий.

Альтернативные методы получения металла, металлургия тонкоизмельченных материалов и ресурсосберегающие технологии в недалеком будущем получают все более широкое распространение. При этом, наличие большого количества тонкофракционных материалов – концентратов глубокого обогащения, а также шламов и пыли – приводит к ухудшению процессов агломерации, усложняет окучивание сырья.

Возвращение в производство отходов решает не только задачи ресурсосбережения, но и улучшает экологическую обстановку на

предприятиях и прилегающих территориях. В последние годы, в связи с постоянно растущим количеством мелкофракционных промышленных отходов, интерес к их подготовке к использованию на многих предприятиях существенно вырос. К таким предприятиям, прежде всего, относятся КГГМК «Криворожсталь», ОАО «МК «Азовсталь», ОАО «МК «Запорожсталь», ОАО «Никопольский завод ферросплавов», Донецкий металлургический завод, огнеупорные заводы и др.

Производство окатышей и брикетов, которые включают тонкодисперсные компоненты железосодержащих отходов металлургии, связано с некоторыми трудностями, обусловленными рядом противоречивых требований к технологическим режимам окускования и значительной нестабильностью характеристик получаемого сырья.

При современном уровне развития металлургического производства постоянно растут масштабы материального потребления ресурсов и значение фактора полноты их использования. Поэтому привлечение вторичных материальных ресурсов имеет первоочередное значение. В связи с этим усовершенствование традиционных и разработка новых технологий является необходимым условием дальнейшего развития металлургии.

Содержание в промышленных отходах полезных компонентов иногда даже превышает содержание их в действующих или в разрабатываемых месторождениях, что свидетельствует об их сырьевой ценности и целесообразности использования в технологических переделах. Однако, следует отметить, что без предварительного окускования мелкофракционного материала отходы не могут быть использованы в таких переделах.

Проблема окускования сырьевых материалов для металлургического передела возникла еще в XIX веке, когда, наряду с богатыми кусковыми рудами и флюсами, в производство начали привлекать и их мелкие фракции.

Толчком к развитию данного направления стало возрастание интереса к технологии брикетирования в отечественной и зарубежной металлургии, связанное с истощением запасов месторождений

полезных ископаемых, постоянным ростом количества техногенных отходов и требованиями экологии. Именно брикетирование в ряде случаев позволяет наиболее эффективно окусковывать и возвращать в производство мелкофракционные и тонкодисперсные промышленные отходы, повторное использование которых позволяет уменьшить потребность металлургии в железной руде и флюсах.

Резкое обострение ситуации в конце 80-х – начале 90-х годов XX столетия на рынке энергоносителей вызвало необходимость проанализировать процесс брикетирования с точки зрения энергозатрат. В результате наиболее выгодным, и поэтому приоритетным, оказался процесс брикетирования мелкофракционных материалов в холодном состоянии со связующими добавками. Поэтому разработка и внедрение передовых, энергосберегающих, эффективных технологий окускования железосодержащих отходов металлургического производства является перспективной и актуальной научно-практической задачей.

6.1 Современное состояние вопроса вторичного использования промышленных отходов

В настоящее время проблема использования отходов, как вторичного сырья, остается одной из наиболее важных, что обусловлено ростом масштабов загрязнения природных сфер отходами производственной и хозяйственной деятельности человека. В Украине по состоянию на конец 2012 г. образовалось 2301,8 млн. тонн отходов, а в целом, наличие отходов в специально отведенных местах составило 21017,2 млн. тонн. Большая часть отходов может быть использована вторично, кроме того для этого есть необходимые технологии и способы. Однако, объемы использованного вторичного сырья в стране постоянно сокращаются. Так за 2012 г. уровень использования отходов в качестве вторичного сырья составил только 5,26% от общего объема отходов [81].

Работниками государственной статистической службы по заданию государственной комиссии приоритетного развития направлений в научно-технических исследованиях проведен обзор образования и использования вторичного сырья и отходов производства по регионам в 2012 году. Данные, приведенные в табл. 6.1 выборочно по тем регионам, где образование вторичного сырья является наибольшим, для большей наглядности показаны на диаграмме рис. 6.1.

Таблица 6.1 – Образование и использование вторичного сырья и отходов производства по регионам в 2012 году

Регион	Образовалось вторичного сырья, млн. т	Использовано вторичного сырья, млн. т
Днепропетровская обл.	153,8	62,0
Донецкая обл.	28,7	6,91
Запорожская обл.	3,6	1,5
Луганская обл.	13,5	5,1
Харьковская обл.	2,8	1,6

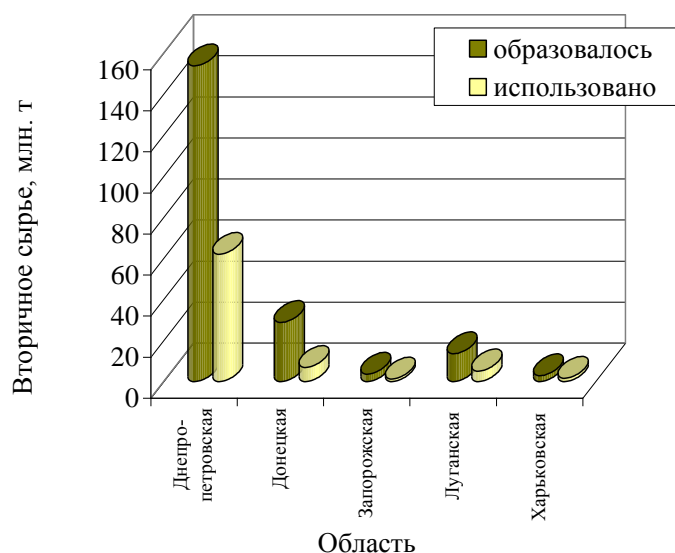


Рисунок 6.1 – Образование и использование вторичного сырья и отходов производства по регионам в 2012 году

Из анализа данных видно, что образование вторичного сырья превышает его переработку, при этом уровень использования отхо-

дов в качестве вторичного сырья вырос в среднем до 38% от общего объема отходов. На предприятиях имеет место проблема утилизации и захоронения отходов производства, или обеспечения сохранения их для дальнейшего использования. В Украине размещено более 2 млрд. тонн шлаков и шламов производства черных металлов, которые занимают 160 тыс. га земель. Нарастание объемов складирования отходов продолжается и в настоящее время.

Проблема утилизации техногенных отходов приобретает все большую актуальность в ряде отраслей промышленности, в основном в горнодобывающей, металлургической, угольной и машиностроительной.

Данные по образованию и использованию металлолома и отходов черных и цветных металлов в целом и по регионам в 2012 году представлены в табл. 6.2-6.4 и на рис. 6.2-6.4.

Таблица 6.2 – Образование и использование металлолома и отходов черных и цветных металлов за отчетный период

Всего металлолома и отходов	Образовалось, млн. т	Использовано, млн. т
Черных металлов	7,9	11,3
Цветных металлов	0,045	0,22



Рисунок 6.2 – Образование и использование металлолома и отходов черных и цветных металлов в 2012 году

Таблица 6.3 – Образование и использование металлолома и отходов черных и цветных металлов по регионам за отчетный период

Регион	Всего металлолома и отходов черных металлов, тыс. т		Всего металлолома и отходов цветных металлов, тыс. т	
	образовалось	использовано	образовалось	использовано
Днепропетровская обл.	2092,2	2886,5	5,67	23,6
Донецкая обл.	3212,9	5275,8	15,7	100,25
Запорожская обл.	964,8	1581,2	5,8	19,55
Луганская обл.	975,4	1319,2	1,5	18,9
Харьковская обл.	130,6	15,1	2,72	5,18

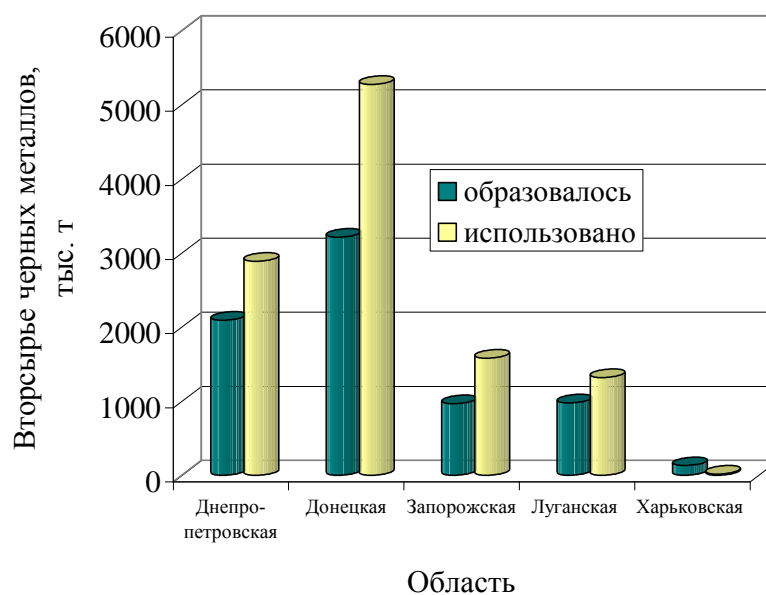


Рисунок 6.3 – Образование и использование металлолома и отходов черных металлов по регионам в 2012 году

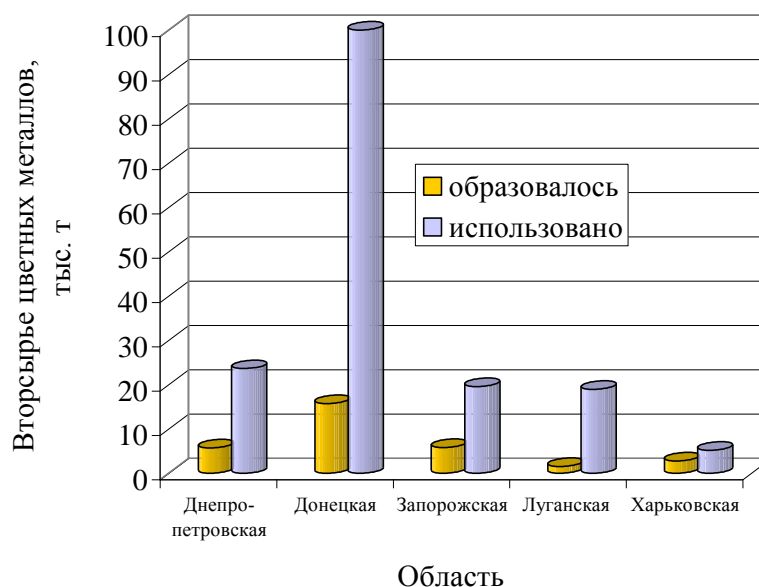


Рисунок 6.4 – Образование и использование металлолома и отходов цветных металлов по регионам в 2012 году

Таблица 6.4 – Образование и утилизация металлических отходов в 2012 году

Образовано, млн. т	Утилизировано, обработано (переработано), млн. т
7,35	6,77

Основной проблемой в отношениях между экономикой и экологией является незаинтересованность субъектов предпринимательской деятельности в улучшении экологической ситуации, поскольку внедрение перерабатывающих и ресурсосберегающих технологий ведет к увеличению расходов и в большинстве случаев не дает экономического эффекта. Переработка и повторное использование отходов в качестве вторичных ресурсов может и должно быть выгодным, эта деятельность должна положительно отражаться на прибыли или экономической эффективности предприятия [83].

В процессе хозяйственной деятельности перед субъектами экономической деятельности постоянно возникает необходимость выбора между несколькими альтернативными вариантами, из которых необходимо выбрать наиболее рациональный с экономической точки зрения и при этом получить положительный экологический эф-

фект. Симбиозом таких выгод может стать использование на предприятии технологий по переработке отходов, в результате которых предприниматель получает вторичное сырье, которое может использовать в качестве материальных ресурсов в основном производстве. То есть альтернативой приобретению материальных ресурсов в сторонней организации может стать вложение средств в создание перерабатывающих процессов на базе основного производства.

Наиболее приемлемой не только с экологической, но и с экономической точки зрения является утилизация отходов внутри собственного производства, так как это позволяет использовать их в виде относительно дешевого сырья, что способствует значительному снижению затрат на шихту, повышению качества и конкурентоспособности продукции, а главное, уменьшению себестоимости готовой продукции.

Эти выводы были учтены при дальнейшем рассмотрении этой темы и разработке варианта технологической схемы и рекомендаций.

6.2 Современные способы и технологии брикетирования вторичных железосодержащих материалов

В России и других странах СНГ в последнее время резко возрос интерес к брикетированию как экологически чистого и экономически выгодного способа окускования металлургических отходов [82]. Утилизация тонкозернистых полезных ископаемых, возможность получения из них высококачественной продукции для бытового и промышленного потребления – главное назначение брикетирования.

В цветной металлургии брикетирование нередко применяют в качестве основного метода окускования сырья (см. подраздел 2.8).

Среди технологий, применяемых для возвращения отходов в технологический передел, особое место занимает холодное брикетирование со связующим. Поскольку процесс окускования мелкофракционных отходов этим методом не предъявляет жестких требований

по крупности и составу материалов, то он является менее энергозатратным, и, следовательно, более экономичным. Кроме того, возможность введения в шихту различных полезных при дальнейшей переработке брикетов добавок позволяет целенаправленно управлять качеством конечного продукта, формируя, таким образом, его оптимальный химический состав и свойства.

В Институте черной металлургии (ИЧМ) НАНУ накоплен значительный опыт по окускованию мелкофракционных материалов брикетированием, что позволяет производить в непрерывном режиме окускование сырья в виде брикетов одинаковых размеров, формы и массы. Научные и методологические основы этих разработок, их аппаратное обеспечение были заложены в ходе работ по горячему брикетированию тонкодисперсных частично восстановленных железорудных концентратов, которые велись под руководством З.И. Некрасова [83].

В связи с резким подорожанием и дефицитом энергоресурсов разрабатываемые специалистами ИЧМ технологии получения брикетов базируются на холодном прессовании материалов со связующими добавками. Разработана технология получения брикетов из аглодоменного и сталеплавильных шламов, колошниковой пыли, коксовой мелочи, прокатной окалины, отсеков ферросплавов и др.

Брикетирование имеет ряд существенных преимуществ, которые в условиях развития металлургии позволяют считать его перспективным методом окускования. К их числу относятся следующие:

- брикетирование предъявляет менее жесткие требования к качеству сырья, позволяет окусковывать материалы широких классов крупности менее 10 мм, практически в любых пропорциях и составах;
- процесс брикетирования технологически прост; некоторую сложность представляет лишь дозирование связующих и их смешивание с брикетируемым материалом;
- при брикетировании сохраняются свойства компонентов, входящих в брикеты;

- брикетирование является экологически чистым способом окускования;
- брикетирование расширяет сырьевую и топливно-энергетическую базу металлургии, позволяет шире внедрять внедоменные способы получения железа.

Эти преимущества эффективно решают такие актуальные задачи, как получение новых, комплексных видов сырья, включающих оксиды железа, восстановитель и флюс, внедрение эффективных способов обработки сырья, например, металлизацией, снижение вредного воздействия металлургических процессов на окружающую среду.

К основным недостаткам брикетирования обычно относят следующие:

- недостаточная прочность брикетов, особенно при высоких температурах и в условиях восстановительной атмосферы;
- использование связующих, содержащих вредные примеси и имеющие недостаточные вяжущие свойства;
- высокая стоимость качественных связующих;
- трудности, связанные с равномерным введением связующих в шихту;
- недостаточная производительность прессового оборудования.

К настоящему времени большинство этих проблем частично решено. За рубежом сформированы несколько направлений получения прочных брикетов, к числу которых относят «горячее» брикетирование, высокотемпературную обработку брикетов, использование термостойких связующих.

6.3 Характеристики используемого сырья и его качество. Требования к качеству брикетов

Материалы, подлежащие брикетированию, и область применения брикетов представлены в табл. 6.5.

Таблица 6.5 – Область применения процесса брикетирования

Место образования отходов	Бригетируемые материалы	Область применения брикетов
1	2	3
Доменное производство	<ul style="list-style-type: none"> - шламы газоочисток; - пыль аспирационных установок; - коксовая мелочь и пыль - мелкодисперсное первичное сырье; - отсеvy флюсующих компонентов (известняка, доломита и др.) 	В составе доменной шихты как заменитель железосодержащих и углеродосодержащих компонентов. Для промывки металлоприемника доменных печей. Для наращивания гарнисажа металлоприемника доменных печей
Аглодоменное производство	Отсев агломерата <5 мм (11-19%)	В составе доменной шихты
Сталеплавильное производство	<ul style="list-style-type: none"> - шламы газоочисток; - пыль аспирационных установок; - коксовая мелочь и пыль; - прокатная окалина; - стальная и чугунная стружка 	Как заменитель чугуна, стального скрапа, карбюризатора, флюсующих добавок в конвертерных, мартеновских, электродуговых печах и вагранках
Машиностроение и металлообработка	<ul style="list-style-type: none"> - прокатная и кузнечная окалина; - чугунная и стальная стружка; - отсев из металла; - пыль установок аспирации 	Как заменитель чугуна, стального скрапа, карбюризатора, флюсующих добавок в конвертерных, мартеновских, электродуговых печах и вагранках

Окончание таблицы 6.5

1	2	3
Коксохимические предприятия и другие производители углеродсодержащих материалов	Некондиционные углеродсодержащие отсеvy и шламы	Поставка на металлургические предприятия
Горнодобывающие предприятия	<ul style="list-style-type: none"> - отсев железосодержащего концентрата < 5 мм; - мелкодисперсное первичное сырье; - отсев известняка, доломита < 5 мм; - отсеvy угля, антрацита < 5 мм 	Поставка на металлургические предприятия
Комбинаты по переработке вторичных ресурсов	<ul style="list-style-type: none"> - чугунная и стальная стружка; - отсеvy кокса 	Поставка на металлургические предприятия
Лесная промышленность	<ul style="list-style-type: none"> - мелочь и пыль древесного угля; - лигносульфонаты 	Поставка на металлургические предприятия

В зависимости от фракционного состава и физико-химических свойств исходные материалы по прочности делятся на три группы.

Первая группа – широкий класс отходов более крупного фракционного состава и худшей слипаемости, который требует добавок связующих. К ней относятся колошниковая пыль, аглодоменный шлам, пыль и отсев известняка и др. Добавка таких материалов в брикет приводит к снижению его прочности.

Вторая группа – тонкоизмельченные конвертерные и мартеновские шламы, шламы аспирационных и тонких степеней агломераци-

онных и доменных газоочисток, обладающие высокой слипаемостью. Материалы этой группы могут быть основными компонентами состава брикета.

Третья группа – высокодисперсные известь- и глиноземсодержащие материалы: известь и отсев извести, известковая пыль, глиноземистый шлам. Брикетты флюсов, изготовленные из этих материалов, удовлетворяют требованиям по механической прочности, предъявляемым к доменным материалам. Эта группа материалов может использоваться как укрепляющие и соединительные добавки в материалы первой и второй группы.

По источникам образования все материалы подразделяют на первичные, свежие материалы и оборотные, вторичные материалы или отходы. К оборотным материалам относят использованные отходы, просыпи, возвраты, побочные и попутные продукты. Под отходами металлургического производства в широком смысле слова следует понимать сырье, материалы и энергоресурсы, в силу тех или иных причин не использованные для получения основной продукции. Отходы являются неизбежным элементом существующей технологии производства металлов.

В случае окускования отходов с использованием брикетирования первичное сырье, материалы и отходы классифицируют:

- по месту производства, возникновения или источников образования;
- по характеру образования и удаления;
- по способу добычи, извлечения или улавливания;
- по химическому (вещественному) составу;
- по физическим свойствам;
- по другим (в т.ч. технологическим) критериям.

По месту производства первичное сырье и материалы делятся на поставляемые со стороны и собственные.

По характеру образования и удаления все отходы разделяют на: уносимые и отходящие с газами (пылью), просыпи, осыпи, смывы

(шламы), сливы, натеки, остатки (шлаки, сварочный шлак, скардоины).

По химическому (вещественному) составу отходы группируют по двум уровням – виду (наличию) и содержанию основного компонента. По виду основного компонента отходы классифицируют на железосодержащие, марганецсодержащие и др., а также отходы, детерминирующиеся по вредному компоненту [83].

По содержанию основного компонента отходы классифицируют на богатые, относительно богатые и бедные. Уровень «богатства» определяют сопоставлением с аналогичным первичным сырьем.

По вещественному (компонентному) составу шламы представляют собой смеси остатков сырья и материалов, которые частично подверглись обработке, возгоны и вторичные оксиды.

К физическим свойствам, определяющим пригодность шламов к окомкованию гранулированием, относят плотность, дисперсность, адгезионную способность и другие свойства.

Плотность является важным свойством материалов, от которой зависит эффективность того или иного способа окускования. Так, при агломерации желательно, чтобы объемная плотность шихты принимала максимальное значение при определенном оптимальном значении насыпной плотности, обеспечивающей нужную газопроницаемость. При брикетировании, наоборот, следует стремиться к увеличению насыпной плотности, что уменьшает усадку материала и позволяет получать более прочные брикеты.

К основным свойствам, характеризующим брикетируемость материалов, относится дисперсность (измельченность). 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 [83].

Многие виды металлургического сырья и отходов имеют мелкий и пылевидный состав, а также различные физические свойства. По физическим свойствам и химическому составу эти материалы обладают целым рядом особенностей. К ним относятся неоднородность химического состава, низкая смачиваемость и плохое влагоудаление.

По слипанию все материалы и пыль можно условно разделить на три группы:

- первая группа – неслипаемые и слабо слипаемые; как правило, это сухие материалы, фракция +0,063 мм в которых составляет более 80%;
- вторая группа – средне слипаемые, 80% которых имеют размер 0,063-0,01 мм;
- третья группа – сильно слипаемые; это пыль с частицами крупностью менее 0,01 мм.

По влажности измельченное сырье и шламы разделяют на пылевидные (до 3% влаги), сухие (3-6%), нормальные (6-12%), влажные (12-18%) и переувлажненные (более 18%). Влагоемкость данных материалов в значительной степени зависит от удельной поверхности частиц, то есть, чем сильнее измельчен материал, тем больше влаги он содержит.

Важной металлургической характеристикой сырья является его способность образовывать легкоплавкие и жидкоподвижные соединения, хорошо увлажняющие и скрепляющие частицы шихты при спекании, что повышает прочность агломерата.

Традиционные связующие, используемые при брикетировании железосодержащего сырья описаны в подразделе 2.3. Здесь следует лишь упомянуть, что общим недостатком органических связующих является их пиролиз или выгорание при высоких температурах с потерей прочности, а также внесение в брикеты значительного количества серы. Такие связующие, как патока (меласса) и ССБ, не обеспечивают влагостойкость и термическую прочность брикетов. Поэтому их используют в основном с цементом или известью.

Для решения проблемы температурной обработки рассмотрен ряд возможностей промышленного использования органических связующих. В качестве таковых на сегодняшний день используют отходы и высокомолекулярные компоненты, полученные при фракционной перегонке и различных крекингах нефти, а также основные и побочные продукты сланцевой переработки. Особенностью таких материалов является высокая вязкость, текучесть и низкая температура обработки. Но чаще всего они не обеспечивают должного уровня прочности и могут содержать вредные для металлургического производства компоненты.

Связующие неорганического происхождения, располагаясь между частицами оксидов железа и восстановителя, ухудшают возобновляемость. Наряду с этим, некоторые виды связующих при нагревании могут способствовать образованию легкоподвижных фаз, например, фаялита, что желательно для усадки восстанавливаемых брикетов. Также хорошие результаты дают так называемые комбинированные связующие.

Качество исходного сырья относится к наиболее важным показателям и значительно влияет на процесс брикетирования.

Качество материала – это совокупность его свойств, удовлетворяющих определенные потребности в соответствии с его назначением. Качество брикетов, как и любого металлургического сырья и материалов, должно соответствовать условиям потребляющего процесса.

Современный технический уровень металлургического производства позволяет использовать материалы различного качества с достаточно широким разбросом по содержанию полезных компонентов и вредных примесей. Однако, для обеспечения экономически эффективной переработки требуется сырье определенного качества. Брикеты же, изготавливаемые из отходов, имеют пониженное содержание полезных компонентов и повышенное – вредных.

Для усиления заинтересованности в использовании брикетов, в т.ч. и из отходов, требования, предъявляемые к ним, должны быть несколько снижены. Экономически это снижение обеспечивается

уменьшением воздействия на окружающую среду путем использования более дешевого и экологически безопасного метода окускования по сравнению с агломерацией или изготовлением окатышей, снижение платежей, вносимых предприятиями за размещение отходов в окружающей среде, а также более низкой стоимостью отходов по сравнению с первичным сырьем [84].

В настоящее время для оценки качества металлургического сырья – мономатериалов (руды, концентрата, флюсов и т.д.) и материалов, которые из них изготавливаются (агломерата, окатышей), сформирована система единичных показателей, представленных в соответствующих ГОСТах, ДСТУ, СТП, технических условиях и других нормативно-технических документах, позволяющих оценивать соответствие того или иного материала тому или иному металлургическому процессу. Они регламентируют химический состав, физические и металлургические свойства, а также механическую прочность, см. рис. 6.5.



Рисунок 6.5 – Система оценки качества металлургического сырья и материалов

Шламы, используемые при окусковании, должны отвечать следующим требованиям:

- влажность шлама не более 8-12%;

- крупность кусков шлама после сушки не более 6 мм;
- минимальное приведенное содержание железа не менее 45%;
- содержание вредных примесей определяется возможностями потребляющих технологий; содержание цинка не более 1%;
- общее содержание полезных компонентов не менее 45%.

Большинство из этих показателей являются браковочными, то есть, если значение любого показателя не соответствует требованиям нормативного документа, то материал не подлежит использованию в данном процессе.

Для агломерата и окатышей, изготовленных с добавками шламов, сохраняются практически те же требования, что и для обычных материалов. Однако, для брикетов из первичного сырья и отходов, являющихся поликомпонентным сырьем, следует использовать другие методы оценки, такие, как оценка по приведенному содержанию железа, по металлургической ценности или по методу академика М.А. Павлова, который выдвинул идею укрупненной стоимостной оценки качества [85]. Для более точной оценки следует использовать сложные системы.

Прочность – это свойство материалов в определенных условиях и пределах, не разрушаясь, воспринимать те или иные действия (нагрузка, неравномерный температурный нагрев, высыхание, набухание, неравномерное протекание физико-химических процессов в различных частях тела и др.).

В металлургии прочность является важной характеристикой кускованного материала. По сути, она является браковочным критерием, по которому оценивают материал на пригодность к металлургической обработке. Недостаточная механическая прочность приводит к преждевременному измельчению материала и изменению условий, при которых процесс металлургической обработки является оптимальным, в частности, ухудшается газопроницаемость, увеличиваются потери материала с выносами и т.п.

Прочность металлургических материалов в значительной степени зависит от степени нагрева и химических воздействий, имеющих место в металлургическом агрегате, которые изменяют их ха-

рактеристики прочности. При этом, многие материалы в естественном состоянии обладают высокой прочностью, а при нагревании и восстановлении быстро ее теряют и разрушаются.

По данным [86] браковочные пределы механической прочности брикетов составляют следующие значения, приведенные в табл. 6.6.

Таблица 6.6 – Требования к брикетам по механической прочности

Брикет	Размер брикета, мм	Пористость, %	Прочность			
			по ГОСТ 15137-77		на сжатие, МПа	по ГОСТ 19575-84
			на сбрасывание, %	на истирание, %		
Доменный	40	> 10	>70	5	> 18	> 40
Конвертерный	30	<10	< 70	< 10	10	-
Электропечной	100	-	< 70	10	> 7,5	-

Наиболее эффективным оказывается брикетирование измельченных материалов. При этом весьма сложной, трудно разрешимой проблемой продолжает оставаться недостаточная механическая прочность брикетов.

Сложившимся направлением повышения прочности, который стал традиционным, является разработка и использование высокопрочных связующих. В принципе, оно может обеспечить нужную прочность, но на практике пока еще не дает удовлетворительного решения поставленной задачи в основном из-за высокой стоимости связующих или ухудшения металлургических свойств брикетов.

Временной альтернативой этому направлению является более широкое использование брикетов в тех производствах, где требования к прочности менее высокие, например, в сталеплавильном про-

изводстве. В долгосрочной перспективе получение высокопрочных брикетов может осуществляться только комплексным сочетанием, как известных методов укрепления, так и находящихся в настоящее время в стадии изучения и становления.

Важным фактором, определяющим работу доменных печей, является процесс шлакообразования, которому предшествует размягчение и плавление шихтовых материалов. Оптимальной работы доменной печи можно достичь только при использовании материалов с относительно высокой температурой начала размягчения и довольно узким интервалом температур размягчения.

К показателям, которые характеризуют металлургические свойства сырья, относят температуру начала и температурный интервал размягчения, восстанавливаемость и прочность железорудных материалов при восстановлении. Для сталеплавильных материалов, подвергающихся интенсивным температурным воздействиям при загрузке в сталеплавильный агрегат, испытание на термоудар является обязательным.

Металлургические свойства брикетов также определяют по горячей прочности (прочности при восстановлении), которая определяется в барабане Линдера (для доменных брикетов) и способности выдерживать термоудар (для сталеплавильных брикетов). При отсутствии барабана Линдера металлургические свойства брикетов оценивают по показателям размягчения и восстанавливаемости. Совокупность этих показателей дает возможность с достаточной степенью точности определить металлургические свойства брикетов [87].

В частности, брикеты, удовлетворяющие требованиям доменной плавки, должны быть устойчивыми при температуре 900-1000°C, а также в атмосфере перегретого до 150°C пара, быть пористыми, газопроницаемыми и вместе с тем водостойкими. Размягчение материалов, предназначенных для доменной плавки, должно осуществляться в интервале температур от 1050 до 1200°C.

Брикеты для сталеплавильного производства должны выдерживать нагревание до 1500°С в течение трех минут и при этом не разваливаться на куски, а также иметь пористость не более 5-10%.

6.4 Методика исследования качества брикетов, полученных из железосодержащих материалов

Основные положения методики исследования процесса брикетирования изложены в подразделе 5.1. Для оценки качества брикетов, полученных из железосодержащих материалов, дополнительно определялась механическая прочность и проводились высокотемпературные испытания на размягчение и восстанавливаемость.

По каждой серии экспериментов готовились брикеты в количестве 50 шт. Из них отбирали произвольно по три брикета для дальнейшей оценки их прочности.

Механическая прочность металлургических материалов определялась по трем показателям: ударной прочности, прочности на сжатие и истирание. При этом основным показателем считается ударная прочность.

Ударная прочность (прочность на сбрасывание) определялась в соответствии с ГОСТ 21289. Для этого брикеты массой 4 кг, сбрасываются на металлическую плиту толщиной не менее 8 мм, с высоты 1,5 м (по изменению ГОСТа с 2,0 м) четыре раза. Затем производится просев на сите с размером отверстий 25 мм. Показатель прочности $P_{сброс}$ (%) после отсева рассчитывается по формуле:

$$P_{сброс} = \frac{\Phi_{p > 25.мм}}{\text{Масса (до испытания)}} \times 100\% .$$

Для сбрасывания применяется ящик с размерами 300×250×250 мм с открывающимся двустворчатым дном. Сбрасывание производится на металлическую плиту с размерами 1500×1500 мм, толщиной не менее 8 мм.

Для брикетов, полученных из железосодержащих материалов, выполнялись высокотемпературные испытания на размягчение и восстанавливаемость.

Одним из параметров, характеризующих поведение шихты при высокой температуре, характерной для доменной печи, является температура размягчения железорудных материалов и их восстанавливаемость. Методика разработана для исследования качества агломерационного сырья, однако в практике применяется для сравнения поведения различных железорудных материалов при высоких температурах в доменной печи.

Методика основана на непрерывном прогреве образца материала с одновременным замером проникновения в тело образца зонда под стандартной нагрузкой ($0,5-6 \text{ кг/см}^2$). Поведение материала при размягчении характеризуется температурой первичной усадки (до начала усадки), температурой начала размягчения (начало крутого падения – истинная пластическая деформация) и температурой, характеризующей конец размягчения, когда первоначальная высота слоя материала уменьшилась на 40%.

Началом размягчения условно принято считать температуру, при которой начинается интенсивное уменьшение высоты слоя (проникновение зонда в слой материала). При нагреве до определенной температуры проба материала может увеличиваться в объеме за счет термического расширения, затем начинается усадка с характерной для каждого материала скоростью. Факторами, определяющими температуру размягчения железорудных материалов, являются: минералогический и химический составы, степень дисперсности и гомогенности оксидов, степень восстановленности железа к моменту начала размягчения, крупность материалов, характер атмосферы и т.д.

Для технологии доменного производства характер размягчения имеет большое значение. В доменной печи вязкие тестообразные массы создают значительное сопротивление печным газам. Поэтому с точки зрения совершенства хода печи желательно работать на шихте с наиболее высокой температурой начала размягчения. В этом

случае железорудный материал не размягчается в шахте доменной печи, что благоприятно сказывается на газопроницаемости столба шихты. Чем короче интервал размягчения шихты, тем быстрее тестообразные массы превращаются в жидкий подвижный расплав, не представляющий препятствия для потока печных газов. Поэтому железорудный материал с коротким интервалом размягчения предпочтительнее иметь в шихте при любом уровне начала размягчения.

Методика проведения испытаний состояла в следующем:

- тигель наполненный исследуемым материалом слоем 40 мм загружали в печь при температуре 500°C;
- на поверхность материала устанавливается зонд определенного веса и известного сечения торца;
- для достижения необходимого удельного давления на образец, зонд дополнительно нагружается (в данном случае 2,5 кг/см²);
- затем со скоростью 40-50 град./мин прогревают печь с одновременной фиксацией на приборе величины вертикального смещения зонда;
- опыт прекращается при величине усадки 40% от слоя материала.

Для испытаний на размягчение были представлены образцы:

- образец размерами 15×15×40 мм, вырезанный из полупромышленного брикета ДМЗ диаметром 100 мм;
- образец фракции 3-5 мм из материала брикета ДМЗ диаметром 100 мм (тот же брикет);
- образец размерами 30×40 мм того же состава, отпрессованный на лабораторном прессе.

Степень восстановления рассчитывалась по формуле:

$$\psi_1 = \frac{O_{2исх} / Fe_{общ.исх} - O_{2пробы} / Fe_{общ.пробы}}{O_{2исх} / Fe_{общ.исх}} \times 100\% ,$$

где $O_{2исх}$ – содержание кислорода в окислах железа до восстановления, %; $O_{2пробы}$ – содержание кислорода в окислах железа после

восстановления, %; $Fe_{\text{общ.исх}}$ $Fe_{\text{общ.пробы}}$ – содержание железа общего в пробе до и после восстановления, соответственно, %.

6.5 Основные факторы, влияющие на процесс окускования, их особенности и оценка влияния на свойства брикетов

Процессы, протекающие в материале при его обработке, чрезвычайно разнообразны. Достижение необходимого результата осуществляют с помощью различных физико-химических свойств, процессов и явлений, т.е. причин, движущих сил и условий, которые называются факторами.

Для достижения максимального результата необходимо использовать и создавать условия для развития положительных факторов и снижения или устранения влияния отрицательных. Хорошие результаты дает погашение одних негативных факторов другими. Для этого следует выявить максимально возможное количество этих свойств и явлений и оценить их значимость.

Широкий промышленный опыт получения брикетов различного назначения и способов окускования показывает, что их механическая прочность зависит от большого количества факторов, в основе которых лежат физико-химические свойства брикетируемого сырья, и которые в той или иной степени реализуются технологическими факторами производства.

По качественным различиям факторы прочности брикетов делятся на шесть групп:

1. Свойства брикетируемой шихты и ее компонентов.
2. Качество подготовки шихты.
3. Связующее (тип и количество).
4. Режимы (характер) прессования.
5. Свойства брикетов.
6. Упрочнение и защита брикетов от воздействий.

Выбор количества групп факторов и последовательность их реализации определяется особенностью процесса брикетирования и

очередности операций в нем. Расположение, ранжирование любого фактора в той или иной группе определяется значимостью процессов, важностью, т.е. степенью, величиной влияния на прочность брикетов, последовательностью операций или сложностью их реализации.

Свойства брикетируемой шихты и ее компонентов во многом определяют прочность брикетов. Адгезионные и когезионные свойства компонентов брикетируемой смеси могут оказаться недостаточными для получения прочных брикетов, поэтому в шихту необходимо вводить материалы, повышающие эти свойства.

Свойства компонентов смеси, их адгезионные и когезионные свойства, химическая и реакционная активность в присутствии слабых электролитов, способность образовывать комплексные соединения по типу реакций, происходящих в бетонах, использование активирующих добавок, фракционный состав, определяющий плотность упаковки – это те факторы, даже частичная реализация которых способна существенно повысить прочность брикетов. Таким образом, данная группа факторов позволяет полнее использовать закономерности физико-химического укрепления смесей и создать предпосылки для получения прочных брикетов.

Качество подготовки шихты является важной группой технологических факторов, что позволяет с небольшими затратами получить дополнительный прирост прочности. Важным положительным моментом факторов данной группы является то, что их реализация не ухудшает химический состав и свойства компонентов брикетов, что обеспечивает эффективное их использование.

Несмотря на то, что влияние типа связующих веществ и их количества относится к первой группе факторов, выделение этого фактора в самостоятельную группу вызвано особым влиянием на прочность и другие свойства брикетов. Так, свойства многих связующих такие, что их использование позволяет получить брикеты необходимой механической прочности. Но проблема заключается в том, что такие брикеты имеют чрезмерно высокую стоимость, в них снижается содержание полезных компонентов и увеличивается количество

вредных примесей. Совокупное влияние этих факторов таково, что брикеты становятся неэффективными для использования. Поэтому задачей задействия данной группы факторов является выявление и оптимизация условий, при которых их влияние проявляется наиболее эффективно.

Режимы (характер) прессования определяется давлением прессования и методом его наложения. Как уже отмечалось, давление является основным условием, однозначно определяющим метод окускования сырья. Величина давления прессования и особенности его программы, такие, как продолжительность выдержки под максимальным давлением, характер наложения давления (например, прессования со смещением), особенности обжима смеси (двустороннее прессование, стадийность прессования, в том числе повторное прессование) и дополняющие его факторы, (например, вибрация) решающим образом влияют на прочность брикетов. Однако, использование этой группы факторов в определенной степени ограничивается возможностями прессующего оборудования. Поэтому данный фактор может быть использован только в той мере, которую позволяет реализовать имеющийся тип прессов.

Исследования показывают, что свойства брикетов оказывают непосредственное влияние на их прочность. Некоторый прирост прочности по этим факторам можно получить за счет оптимизации размеров и формы брикетов, что достигается изготовлением прессующих ячеек соответствующей конфигурации. Ограничением данного фактора могут быть только требования, предъявляемые к размеру брикетов. Факторы свойств брикетов в значительной степени определяются свойствами используемых материалов, которые по-разному ведут себя при прессовании, поэтому пресс-формы и прессующие ячейки следует производить с учетом особенностей прессования такого сырья.

В связи с тем, что прирост прочности за счет данной группы факторов значительный, а стоимость прессов при этом существенно не растет, их реализация является важным условием повышения прочности брикетов.

Упрочнение и защита брикетов от различных воздействий способны значительно повысить их прочность. Упрочнение брикетов осуществляют сушкой, вылёживанием, средне- и высокотемпературной термообработкой, а также спеканием. Известно также химическое упрочнение брикетов, в том числе карбонизацией, пропариванием и др. Эти способы настолько эффективны, что их применение желательно для большинства видов брикетов. Если химическое упрочнение по каким-либо причинам оказывается не эффективным, то совмещение сушки с карбонизацией продуктами горения для влажных брикетов является предпочтительным.

Менее используемыми и недостаточно изученными способами упрочнения брикетов, однако, от этого не менее эффективными, являются активные способы повышения прочности. К ним относится армирование, то есть наполнение брикетов волокнистыми материалами, прочными гранулами и другими материалами. Нанесение защитных покрытий способствует снижению влагопоглощаемости, увеличению прочности, изменению других свойств.

Поскольку реализация многих факторов приводит к существенным затратам, которые не всегда окупаются, необходимость за действия подобных факторов должна быть экономически обоснована.

Каждый метод окускования имеет отличительные особенности, которые его характеризуют. Так, для агломерации определяющим фактором окускования является температура спекания, для окомкования – силы сцепления (адгезионные и когезионные свойства) и температура упрочнения. Для брикетирования таким определяющим фактором является давление. Теоретически при сверхвысоких давлениях прессования возможно получение достаточно прочных брикетов, однако реализация на практике этого положения сталкивается с рядом технических трудностей, делает производство таких брикетов экономически неэффективным. Поэтому одним этим фактором обеспечить необходимую прочность брикетам практически невозможно.

Другим важным условием брикетирования является наличие упрочнения брикетов. Но и в этом случае обеспечить необходимую прочность не всегда удастся. Поэтому в брикетировании, наряду с давлением и упрочнением, целесообразно использовать максимальное количество других факторов, повышающих прочность готовых брикетов и позволяющих снизить расходы на брикетирование до приемлемого уровня. Рассмотрим и оценим влияние этих факторов на прочность и плотность брикетов.

В силу различных особенностей и возможностей производителей сырья и источников образования отходов, на брикетирование поступают материалы различной крупности, что вызывает вопрос о его оптимальной крупности. Поэтому на нее накладывается ряд серьезных ограничений.

Во-первых, верхний предел крупности частиц ограничивается возможностью прессов. С учетом безаварийной их работы (поломка пресс-форм или скалывание перемычек ячеек) верхний предел гранул ограничивают крупностью 10 мм. Крупные гранулы необходимо отсеивать и измельчать или удалять.

Во-вторых, ограничителем верхнего размера частиц является продолжительность переработки брикетов в используемом процессе. В доменном и мартеновском производстве, где материал подвергается обработке в течение нескольких часов, верхний размер частиц в брикетах не имеет решающего значения, поскольку за это время полностью успевает восстановиться и расплавиться. В этом случае рекомендуемый размер брикетов составляет от 40-60 до 100-120 мм.

В-третьих, любое измельчение приводит к дополнительным затратам, что повышает себестоимость брикетов.

Однако, это далеко не главные проявления размера частиц. Основным следствием неоптимального гранулометрического состава шихты является то, что повышение числа крупных фракций в материале приводит к ухудшению слипания и увеличению числа частиц, служащих центрами концентрации напряжений, по поверхности которых происходят сколы, то есть из крупных материалов получают менее плотные и менее прочные брикеты.

Тонкий фракционный состав повышает локальную однородность смеси и дает большую поверхность контакта частиц, что является важным условием для обеспечения прочности брикетов. Но при этом наблюдается снижение веса брикетов. Легкие брикеты хуже погружаются в расплавленный металл и не обеспечивают заданный режим обработки. Поэтому количество мелких частиц не должно быть чрезмерно большим. Общее количество мелких классов при получении наиболее прочных бетонов должно составлять около 30%. Тот же уровень достаточен и для металлургических брикетов.

Таким образом, оптимизация гранулометрического состава смеси является необходимым условием получения плотных и прочных брикетов. Эту возможность подтверждают эксперименты, выполненные на исследовательской брикетной фабрике в Германии. Наиболее плотные брикеты получали при брикетировании такой смеси: 30% мартеновского шлака класса -8 мм (крупные частицы), 50% мелкой пыли из сухих пылеуловителей (колошниковая пыль) и 20% из циклонов (тонкая пыль) при расходе связующего до 10%. Прочность на сжатие таких брикетов составляет 25 МПа.

6.6 Особенности выбора параметров технологии брикетирования

Для выбора рациональных параметров технологии брикетирования используют ряд критериев. Критерием (от греч. *Kritērion*) называют признак или мерилу, на основании которого производится оценка или выбор чего-либо. Технологическим параметром (от греч. *Parametrōn* - отмерять, соизмеримый) процесса называют величину, которая характеризует этот процесс или отличает его от любого другого процесса [71].

6.6.1 Критерии выбора технологии и её параметров

При разработке технологии брикетирования металлургического сырья используют следующие критерии выбора факторов, операций и параметров:

- показатели экономической эффективности (общей и сравнительной);
- условия необходимости и достаточности той или иной операции технологического процесса и величины ее параметра.

Применение этих общих критериев в принципе может обеспечить репрезентативный выбор технологии и её параметров. При необходимости из них могут быть выделены и другие критерии, такие как:

- соответствие способов обработки сырья и оборудования качеству обрабатываемого сырья;
- техническая сложность процесса;
- стоимостные критерии и др.

К основным технологическим параметрам процесса брикетирования относят: качество подготовки шихты (степень измельчения компонентов, однородность шихты, уровень влажности и т.д.), режимы прессования (давление прессования, производительность и др.), а также показатели термического и химического упрочнения брикетов (температура сушки, продолжительность процесса упрочнения и др.), качество брикетов (прочность, химический состав, влагостойкость и др.) [87].

Необходимость соответствия способов обработки сырья и типа оборудования качеству обрабатываемого материала следует из возможностей процесса и обрабатывающего оборудования.

Критерий технической сложности позволяет выбрать наименее интенсивный процесс с умеренными параметрами.

Стоимостные критерии при близких технических характеристиках позволяют выбирать более дешевый, следовательно, и наиболее выгодный вариант. К их числу относят стоимость капитальных,

эксплуатационных и приведенных затрат, сумму экологических потерь и др.

Рассмотренные критерии пригодны для выбора любых технических параметров оборудования или параметров технологических процессов.

Наиболее обоснованно данная задача решается методом функционально-стоимостного анализа, так как относится к классу задач технико-экономического характера, связанных с определенными условиями, в число которых включается необходимость стоимостной оценки влияния каждого учтенного фактора на себестоимость брикетирования. При наличии нескольких альтернативных факторов или операций, расходы на их реализацию сопоставляются с экономией от повышения прочности брикетов, упрощения или удешевления технологии. При этом выбирают вариант с максимальной эффективностью [88].

На практике такие расчеты затруднены наличием значительного количества факторов и операций, реализующих эти факторы. Поэтому в дальнейшем ограничимся выбором минимально необходимого их количества, который обеспечит брикетам необходимую механическую прочность без использования экстремальных значений параметров, значительно усложняющих и удорожающих процесс брикетирования.

6.6.2 Выбор способа получения прочных брикетов

Способ получения прочных брикетов необходимо выбирать практически по тем же критериям, что и выбор технологии и её параметров, однако с той разницей, что перед разработкой технологии выбирают способ, сравнивая его с известными альтернативными, а затем на его основе разрабатывают технологию и определяют её параметры, соответствующие данному способу, что позволяет достичь заданный уровень качества продукции.

К настоящему времени сложились несколько способов получения прочных брикетов. К наиболее известным вариантам относят брикетирование с использованием связующих, а также «горячее» брикетирование. Эти варианты позволяют добавить брикетам прочность, однако имеют ряд недостатков (высокая стоимость, введение со связующими вредных и балластных примесей, высокий износ оборудования и т.п.), не позволяет получить высокую эффективность процесса брикетирования.

Компонентный состав брикетов определяется не только требованиями по механической прочности и химическому составу, в том числе по содержанию глиноземистых компонентов, но и условием утилизации максимальных объемов шламов. При необходимости корректировки химического состава брикета в состав шихты для его изготовления добавляют различные окислители (Mn, Al, Si, C).

В зависимости от наличия тех или иных инвестиционных возможностей предприятия имеют место два способа получения брикетов.

Первый способ менее капиталоемкий, но требует более значительных эксплуатационных расходов. Он включает подготовку шихты, брикетирование, интенсивную сушку и отгрузку. Склад готовой продукции может отсутствовать, так как сухие брикеты готовы к употреблению. Этот способ применяют при избытке дешевых теплоносителей, например, доменного или коксового газа.

Второй способ требует меньших эксплуатационных затрат, но более капиталоемкий из-за необходимости строительства крытых складов, в которых происходит естественная сушка, упрочнение и защита брикетов от осадков. При продолжительности сушки от 14 до 28 суток емкость такого склада для годового объема производства 300 тыс. тонн брикетов в год должна составлять 15-35 тыс. тонн.

В целом второй способ имеет меньшие приведенные затраты, однако в качестве основного следует выбирать первый вариант, обеспечивающий независимость от погодных условий.

6.6.3 Влияние масштабного эффекта

При внедрении в производство результатов лабораторных исследований неизбежно приходится сталкиваться с явлением несоответствия получаемых промышленных образцов и параметров их производства с экспериментальными образцами и параметрами. Это явление носит название масштабного эффекта.

Масштабный эффект – это погрешность физического моделирования, которая возникает в результате нарушения подобия (геометрического, химического, термического и др.) процессов в лабораторных и промышленных условиях [71].

Для брикетов это касается размеров, формы, плотности, прочности, давления прессования, параметров упрочнения и др. Механический перенос достигнутых в лабораторных условиях давления, влажности, времени сушки в промышленные условия может не обеспечить брикетам необходимой прочности.

Отличие свойств брикетов, полученных в результате прессования в лабораторных и опытно-промышленных условиях, позволяет оценить величину масштабного эффекта и разработать необходимые изменения принятой технологии брикетирования и при необходимости пересмотра параметров брикетирования.

6.6.4 Определение основных параметров технологии брикетирования

При определении технологии брикетирования следует принять основные технологические параметры, приемлемые для получения прочных брикетов:

– тип пресса – вальцевый, обеспечивающий давление прессования: рабочее – 50 МПа, максимальное – 90 МПа; характер прессования – двухсторонний, на вальцевом прессе должно быть предусмотрено подпрессование; регулирование прочности брикетов может осуществляться повышением давления до 90 МПа;

- фракция крупности брикетов – 50-60 мм для типовой ячейки форма брикетов – седлообразная или подушкообразная, обеспечивающая максимум производительности;

- очередность смешивания шихты следующая: сначала смешивают известняково-глиноземистые компоненты, потом добавляют другие;

- предпочтительно обрызгивание ячеек масляно-графитовой суспензией;

- предусматривается использование возврата в количестве 2%, что равняется количеству отсева и боя брикетов, образующихся при промышленном брикетировании, равносильное повторному прессованию такого же количества брикетов; при наличии аглофабрики преимущественным является введение этой мелочи в аглошихту, что существенно увеличивает производительность агломашин и улучшает качество агломерата;

- влажность брикетируемой шихты должна выдерживаться на оптимальном уровне, определяемом экспериментально;

- предусматривается два режима сушки: интенсивный – при температуре сушки 250-500°C, естественный – при 20-25°C; вариант сушки определяется заданной конечной влажностью брикетов (0,5% и 1-2%).

Поскольку результирующее влияние выбранных факторов на механическую прочность брикетов в общем случае не равно сумме воздействий каждого из них, проводят пробное брикетирование с учетом выбранных технологических факторов.

Опыт брикетирования мелкозернистых материалов показывает, что обязательным условием получения брикетов требуемого качества является строгое соблюдение технологического регламента, в том числе:

- безусловное выполнение установленного режима подготовки материала;

- соотношение количества материала и связующего, а также влажности;

- условий смешивания материала со связующим;
- соответствие производительностей дозатора материала и пресса;
- оптимального давления прессования;
- условий дозревания брикетов и их складирование.

Критериями необходимости той или иной операции и отнесения её к той или иной стадии производства является требование достижения заданных показателей, характеристик и параметров обрабатываемого материала. Так, при подготовке сырья к прессованию в качестве этих характеристик выступают влажность, фракционный состав, однородность смеси и др. При прессовании такими характеристиками служат плотность и прочность сырых брикетов, количество возврата, образующегося при вынимании брикетов из пресс-формы, и др. При упрочнении брикетов – прочность готовых брикетов, их остаточная влажность, наличие летучих веществ и др.

Кроме основных, непосредственно производственных операций, брикетирование включает подготовительно-заключительные операции, в частности, такие, как прием исходного сырья и отгрузки готовой продукции.

Процесс брикетирования металлургического сырья содержит ряд составляющих, элементов, операций, в той или иной степени схожих с другими методами окускования – агломерацией и окомкованием. К таким составляющим, в первую очередь, относится подготовка сырья и элементы отгрузки готовой продукции, которые могут быть использованы и в брикетировании. Имеют сходство и отдельные процессы окускования, в основе которых лежат одни и те же процессы слипания и связывания частиц в прочный монолит.

Это сходство во многом определяется одинаковыми видами и свойствами исходного сырья, компонентным составом шихты, закономерностями формирования куска, наличием термообработки, требованиями к готовой продукции, её отгрузки и т.п. Эти операции во многом предопределяют условия подготовки сырья и могут быть использованы для производства брикетов практически в неизменном виде.

Использование максимально возможного количества известных процессов позволяет применять стандартное оборудование и типовые операции, что значительно упрощает технологию брикетирования, а также удешевляет капитальные и текущие затраты на строительство установки и ее эксплуатацию.

Таким образом, технологический процесс брикетирования в общем виде состоит из трех стадий (технологически связанных этапов, групп операций):

- подготовка сырья к брикетированию;
- прессование (формирование) брикетов;
- упрочнение (сушка) брикетов.

Подготовка сырья к брикетированию включает следующие этапы:

- прием и складирование сырья;
- подготовка сырья к обработке;
- дозирование, смешивание и усреднение сырья;
- подготовка и введение в шихту связующих.

Стадия прессования брикетов состоит из одного этапа – прессование брикетов. В случае получения брикетов другим способом, чем прессование, применяют обобщающий термин – формирование.

Упрочнение брикетов включает следующие этапы:

- вылёживание;
- сушка и выдержка брикетов;
- укрепляющая обработка активными средами и материалами.

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

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

Для проектирования установки брикетирования необходим подбор оборудования, выполняющего соответствующие технологические операции или группы операций, которые устанавливаются в соответствии с технологической схемой в единый цикл. Так, операцию смешивания выполняют смесители различных типов, дозировку – дозаторы, прессование – брикетные прессы, сушку – сушильные печи и т.д.

Выбор того или иного типа оборудования должен проводиться по следующим критериям:

- пропускной способности (производительности) оборудования с учетом резерва мощности, что позволяет его эксплуатацию в щадящем режиме;
- обеспечению заданных характеристик и качества обработки сырья;
- минимизации капитальных и эксплуатационных расходов;
- минимальных габаритов, которые «вписываются» в здание;
- обеспечению экологических норм, нормативов охраны труда и др.

Окончательный выбор того или иного вида оборудования проводят путем сопоставления его технических характеристик с соответствующими требованиями данной операции. Если эффективность работы выбранного типового оборудования вызывает сомнения, необходимо проведение исследовательского опробования и внесения необходимых изменений в конструкцию в процессе его изготовления у производителя.

6.7 Экспериментальные исследования и разработка технологий производства композиционных брикетов

В данном разделе приведены результаты исследований и разработки технологий производства композиционных брикетов из же-

лезосодержащего сырья, являющегося отходами металлургической промышленности.

6.7.1 Исследуемые материалы

В результате комплексной переработки металлургического шлака, группа исследователей разработала технологию отделения магнитной и слабомагнитной фракции от металлургического шлака, которая в дальнейшем может довольно успешно возвращаться в производственный процесс и приносить значительный экономический эффект от переработки сырья [89].

В качестве исходного для этой исследовательской работы принят материал, химический состав которого приведен в табл. 6.7 и 6.8.

Таблица 6.7 – Химический состав вторичного исходного материала (магнитные фракции)

Продукт	Выход, %	Fe	Cr	Ni	Mn	Ti	V	Co	ПЭ
Магнитная фракция 1-3 мм	50,6	80,6	11,5	2,5	2,8	0,3	0,3	1,5	0,8
Магнитная фракция 0,5-1 мм	28,1	78,6	12,8	1,9	2,9	0,4	0,4	1,9	1,5
Магнитная фракция 0,074-0,5 мм	21,3	77,5	11,5	3,1	3,6	0,4	0,3	1,3	2,3
Всего	100	79,34	11,87	2,46	3,00	0,35	0,33	1,57	1,32

Таблица 6.8 – Химический состав вторичного исходного материала
(слабомагнитные фракции)

Продукт	Выход, %	Fe	Cr	Ni	Mn	Ti	V	Co	ПЭ
Слабомагнитная фракция 0,5-1 мм	50,87	65,1	12,7	13,8	5,5	0,4	0,4	1,3	1,2
Слабомагнитная фракция 0,074-0,5 мм	49,13	67,6	11,9	13,2	5,4	0,3	0,4	1,1	0,4
Всего	100	66,33	12,31	13,51	5,45	0,35	0,40	1,20	0,81

По данным таблиц можно сделать выводы о том, что этот материал имеет существенное содержание железа и может быть окускован для дальнейшего использования на производстве в виде брикетов.

Впоследствии материал из магнитных и слабомагнитных фракций будет использован при проведении исследований процесса брикетирования.

В ходе исследований проведена серия экспериментов с различными связующими веществами для сравнения свойств полученных брикетов и для дальнейшей разработки рекомендаций для промышленного использования.

При рассмотрении современных технологий брикетирования, как в нашей стране, так и за рубежом, и с учетом уже существующего опыта, принято решение использовать в качестве связующих для экспериментов следующие вещества:

– неорганическое комбинированное связующее, предложенное фирмой «Мидрекс», следующего состава, %: 3-5 смолы, 30-35 гашеной извести, 15-20 жидкого силиката натрия и до 50 воды;

– портландцемент, по опыту использования и по технологии ООО «ЕкоМашГео»;

– полимерное органическое двухкомпонентное связующее новейшей разработки компании «SNF Floerger», а именно FLODRI BQ 550 – в качестве адгезива, FLODRI BQ 1200 – в качестве отвердителя.

6.7.2 Математическое моделирование оптимизации гранулометрического состава многокомпонентной брикетуемой шихты

В практике брикетирования часто приходится решать задачи оптимизации состава многокомпонентной смеси – определение оптимального гранулометрического состава шихты или состава композиционных связующих.

В этих случаях применяем метод активного планирования эксперимента для исследования систем «состав-свойство». Так как сумма долей всех компонентов, составляющих смесь, равна единице, то факторное пространство может быть представлено правильным симплексом, для трех компонентов – правильным треугольником, для четырех – правильным тетраэдром и т.д. Свойства состава исследуются в заранее заданных точках симплекса, которые образуют так называемую симплексную решетку. В случае трехкомпонентной смеси каждой точке треугольной диаграммы соответствует один, вполне определенный состав, а каждому составу соответствует одна точка на диаграмме. В каждой вершине треугольной диаграммы содержание одного компонента составляет 100%. На противоположной этой вершине стороне содержание этого компонента равно нулю. Стороны треугольника соответствуют бинарным смесям.

Как уже отмечалось ранее, эффективность брикетирования вторичных железосодержащих материалов во многом определяется гранулометрическим составом исходного материала. Теоретический принцип подбора смеси частиц разной крупности заключается в создании композиции, обладающей наиболее плотной упаковкой зерен.

Такие композиции обеспечивают максимальную прочность железорудных брикетов.

Для определения оптимального гранулометрического состава железосодержащего концентрата крупностью 0-3 мм исходная шихта формировалась из трех узких классов: 0,074-0,5; 0,5-1; 1-3 мм.

Подобные исследования наиболее целесообразно проводить методами симплекс-решетчатого или симплекс-центроидного планирования для систем «состав-свойство». В данных исследованиях был использован симплекс-центроидный план Шеффе, что обеспечивает равномерный разброс экспериментальных точек в факторном пространстве. В качестве целевой функции принят показатель механической прочности железорудных брикетов на сжатие P (МПа). Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл. 6.9. Для обработки экспериментальных данных использовалась стандартная компьютерная программа Statgraphics [88].

Таблица 6.9 – Матрица планирования и результаты экспериментов

№ опыта	Компоненты (классы крупности)			Прочность брикетов P , МПа
	X1 (0,074-0,5 мм)	X2 (0,5-1 мм)	X3 (1-3 мм)	
1	1	0	0	8,3
2	0	1	0	7,6
3	0	0	1	5,5
4	0,5	0,5	0	10
5	0,5	0	0,5	8,8
6	0	0,5	0,5	8,5
7	0,3333	0,3333	0,3333	12,4
8	0,6666	0,1666	0,1666	11,2
9	0,1666	0,6666	0,1666	10,2
10	0,1666	0,1666	0,6666	8,1

С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$P = 8,46016X_1 + 7,57834X_2 + 5,20561X_3 + 8,477X_1X_2 + 7,33154X_1X_3 + 7,1679X_2X_3 + 62,0471X_1X_2X_3, \quad (6.1)$$

где X_1 , X_2 , X_3 – компоненты (классы крупности).

Испытывалась специальная кубическая модель в целом с помощью дисперсионного анализа, таблица которого представлена на рис. 6.6.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Special Cubic Model	32,9017	6	5,48361	9,66	0,0017
Total error	1,70235	3	0,56745		
Total (corr.)	34,604	9			

R-squared = 97,0805 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 95,2415 percent
Standard Error of Est. = 0,253293
Mean absolute error = 0,311716
Durbin-Watson statistic = 0,829836
Lag 1 residual autocorrelation = 0,260449

The StatAdvisor

This table shows an analysis of variance for the currently selected special cubic model. Since the P-value for this model is less than 0.05, there is a statistically significant relationship between P and the components at the 95% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains

Рисунок 6.6 – Таблица дисперсионного анализа

Высокий уровень значимости ($p < 0,05$), большое (более 97%) значение коэффициента детерминации R-квадрат и малое значение стандартной ошибки оценки SE ($SE = 0,2533$) свидетельствуют об адекватности полученной модели исследуемому процессу.

Как видно из данных, приведенных на рис. 6.7, максимальная прочность брикетов ($P = 12,0$ МПа) достигается при следующем соотношении классов крупности: X1 (0,074-0,5 мм) – 39%; X2 (0,5-1 мм) – 35%; X3 (1-3 мм) – 26%.

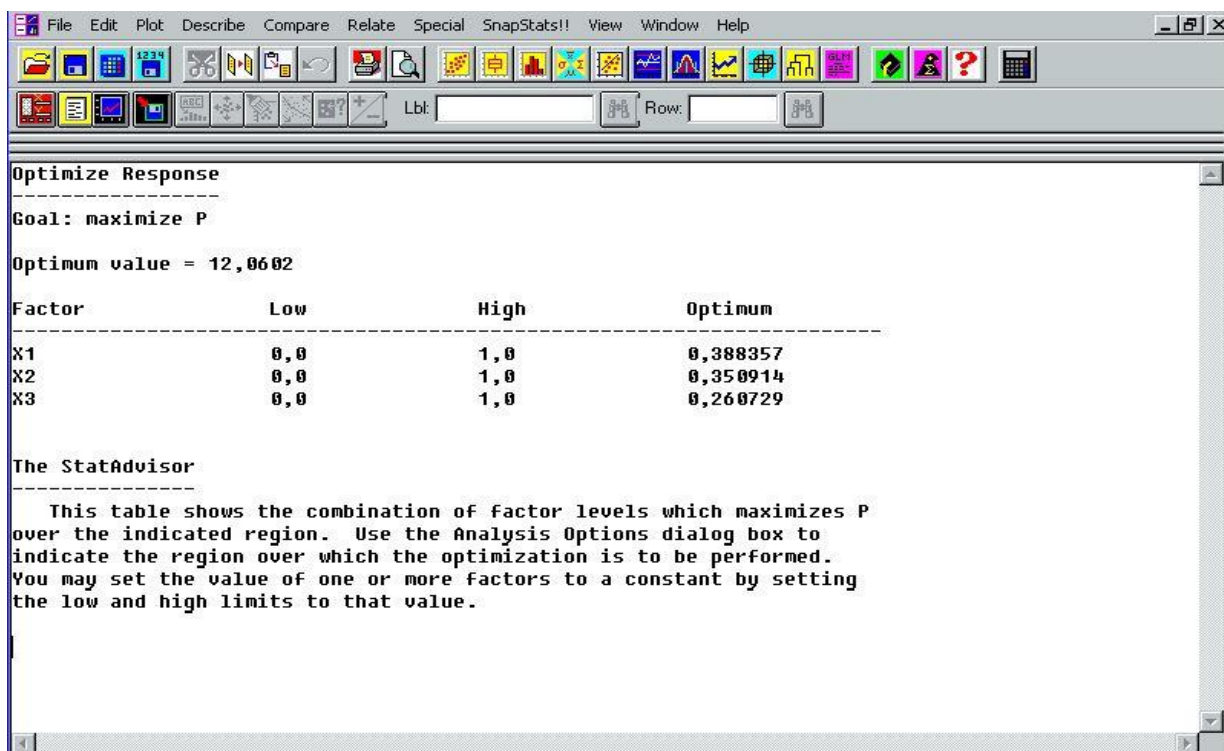


Рисунок 6.7 – Оптимизация целевой функции

Чтобы проиллюстрировать полученные результаты, обратимся к графическим отображениям, приведенным на рис. 6.8.

На графике четко прослеживается экстремальный характер зависимости прочности железорудных брикетов от состава трехкомпонентной шихты. При этом, рост содержания в шихте классов 0,074-0,5 мм (компонент X1) и 0,5-1 мм (компонент X2) однозначно сопровождается увеличением прочности брикетов. Наиболее эффективными являются не моно-, а полидисперсные композиции, состоящие из двух и более классов крупности. В тоже время, существенный рост содержания класса 1-3 мм нежелателен, так как приводит к резкому снижению прочности брикетов. Рост содержания в шихте более крупного класса (1-3 мм) сопровождается меньшей

плотностью упаковки зерен в структуре брикета, увеличением их пористости и, как следствие, снижением прочности брикетов.

Аналогичным методом определялся гранулометрический состав для слабомагнитных материалов, в результате чего были получены данные, в соответствии с которыми максимальная прочность брикетов ($P = 11,3$ МПа) достигается при следующем соотношении классов крупности: X1 (0,074-0,5 мм) – 53%; X2 (0,5-1 мм) – 47%.

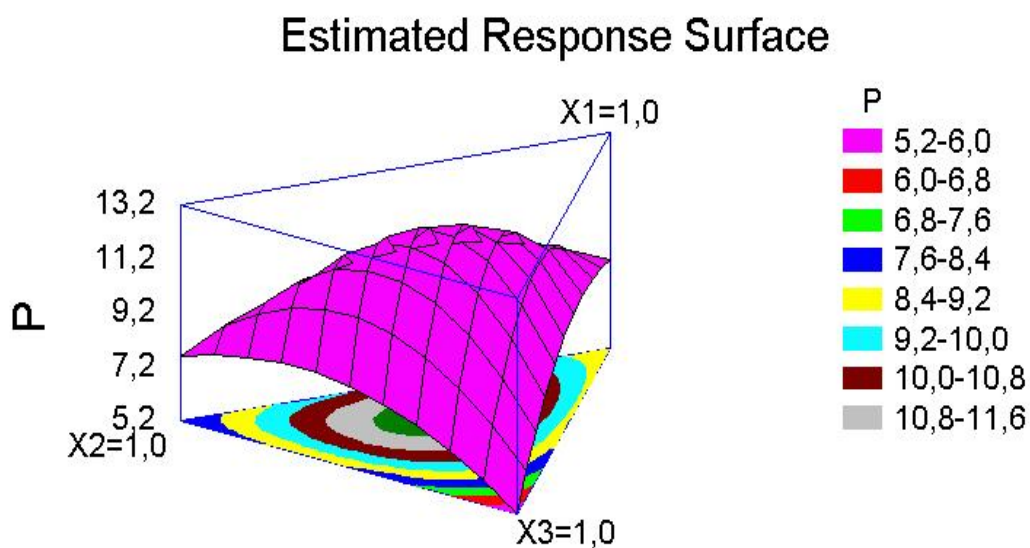


Рисунок 6.8 – График поверхности функции отклика

7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием лабораторного оборудования, приборов и методик, описанных в подразделах 5.1 и 6.4.

Перед проведением серий исследований по брикетированию с использованием математического моделирования рассчитан оптимальный гранулометрический состав шихты, который бы обеспечил максимально плотную упаковку зерен. По результатам исследований принимается состав компонентов шихты, который в дальнейшем будет использоваться во всех экспериментах по брикетированию с различными связующими веществами для проведения сопоставления и сравнения.

Принятое расчетное количество компонентов шихты для брикетирования в определенной последовательности смешивается до получения однородной массы и прессуется на валковом брикетном прессе при давлении прессования 25 МПа. В отдельных случаях применялось повышенное давление прессования.

В ходе исследований проведены три серии экспериментов технологии брикетирования магнитной и немагнитной фракций с различными связующими.

7.1 Брикетирование шихты магнитной и слабомагнитной фракций с неорганическим комбинированным связующим (серия 1)

Разработчиком исследуемого неорганического комбинированного связующего является фирма «Мидрекс». Это связующее имеет следующий состав, %: 3-5 смолы, 30-35 гашеной извести, 15-20 жидкого силиката натрия и до 50 воды.

По данным разработчика брикеты отличаются высокими физико-механическими свойствами, высокой водостойкостью, что позволяет хранить их в открытых складских помещениях. Разработанное связующее не вносит в состав брикетов вредных примесей. Брикеты практически не подвержены вторичному окислению. Физические и химические свойства брикетированного металлизированного материала приближаются к свойствам компактного металла.

Лабораторные исследования процесса брикетирования магнитной и слабомагнитной фракции железосодержащего материала с неорганическим комбинированным связующим проводились по схеме, представленной на рис. 7.1.

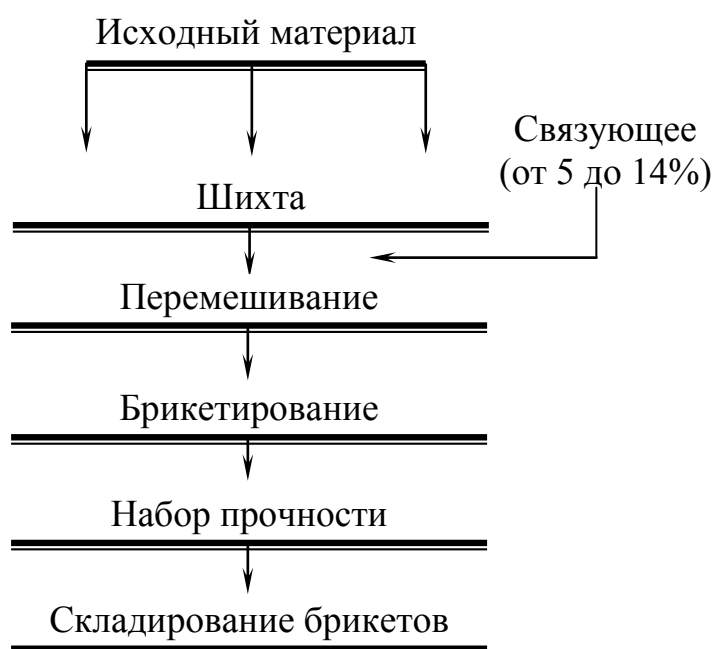


Рисунок 7.1 – Схема проведения лабораторных исследований с неорганическим комбинированным связующим

Исходные данные и параметры эксперимента приняты следующими:

- железосодержащий материал (магнитная фракция) крупностью 0,074-0,5 мм – 39%; 0,5-1 мм – 35%; 1-3 мм – 26%;
- железосодержащий материал (слабомагнитная фракция) крупностью 0,074-0,5 мм – 53%; 0,5-1 мм – 47%;

– неорганическое комбинированное связующее, изготовленное по разработке фирмы «Мидрекс», расход – от 5 до 14%, более 100% по массе;

– давление прессования – 25 МПа;

– режим приобретения прочности брикетами при сушке: температура 250-500°C, продолжительность сушки 40 минут;

– перемешивание смеси со связующим в течение 30 минут.

По результатам, полученным в ходе проведения экспериментальных исследований, показанным в табл. 7.1, оценивалась зависимость прочности железорудных брикетов от расхода неорганического комбинированного связующего (рис. 7.2). Анализ данных свидетельствует об экстремальной зависимости прочности брикета, которая оценивается средним давлением разрушения, от расхода связующего.

Таблица 7.1 – Результаты испытаний готовых брикетов
(магнитная фракция)

№	Расход связующего, %	Давление разрушения образца, МПа	Среднее давление разрушения, МПа
1	2	3	4
1	5	8,1	8,2
2		8,3	
3		8,2	
4	5,5	8,4	8,6
5		8,7	
6		8,7	
7	6	9	8,9
8		8,9	
9		8,8	
10	6,5	9,1	9,3
11		9,4	
12		9,3	

Окончание таблицы 7.1

1	2	3	4
13	7	9,5	9,5
14		9,6	
15		9,4	
16	7,5	10,1	9,9
17		9,8	
18		9,9	
19	8	10,5	10,4
20		10,6	
21		10,2	
22	8,5	10,7	10,9
23		10,8	
24		11,1	
25	9	11,3	11,5
26		11,4	
27		11,7	
28	9,5	12,3	12,3
29		12,2	
30		12,3	
31	10	12,7	12,8
32		12,9	
33		12,7	
34	11	11,9	11,9
35		12	
36		11,8	
37	12	10,1	10,2
38		10,2	
39		10,2	
40	13	7,9	8,4
41		8,6	
42		8,7	

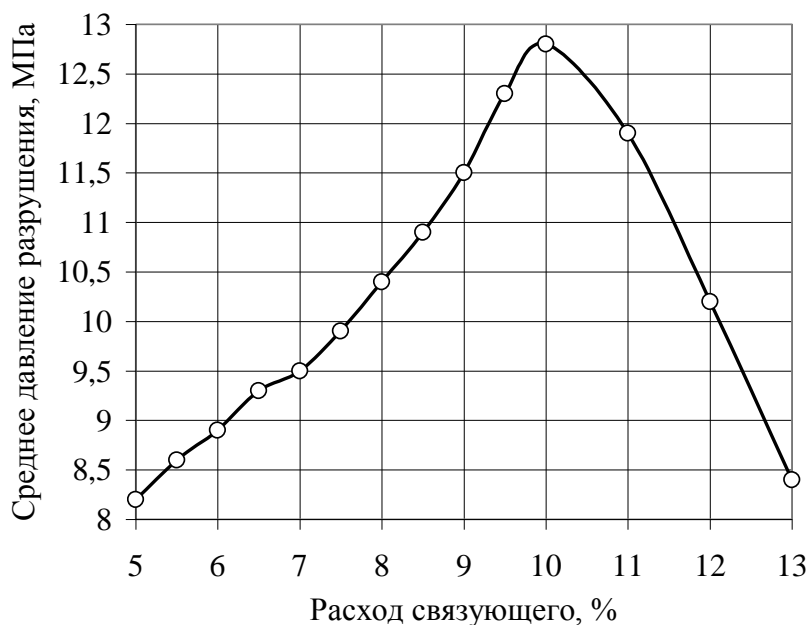


Рисунок 7.2 – Зависимость прочности железорудных брикетов от расхода неорганического комбинированного связующего

Показатели табл. 7.1 свидетельствуют о том, что брикеты с неорганическим комбинированным связующим, соответствуют требованиям, предъявляемым к металлургическим брикетам. В целом эти показатели достаточно высоки. К недостаткам можно отнести: слишком длительное перемешивание смеси со связующим – от 20 до 40 минут, потребность в специальном оборудовании и специалистах, которые могут готовить комбинированное связующее.

Результаты исследований по брикетированию магнитной и слабомагнитной фракций сведены в табл. 7.3 и 7.4.

Таблица 7.3 – Результаты исследований процесса брикетирования магнитной фракции (серия 1)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	12,8	70	91
7	14,2	77	95
30	14,2	77	95

Таблица 7.4 – Результаты исследований процесса брикетирования слабомагнитной фракции (серия 1)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	10,2	65	89
7	11,2	70	91
30	11,8	72	93

7.2 Брикетирование шихты магнитной и слабомагнитной фракций с портландцементом в качестве связующего (серия 2)

Следующая серия экспериментов по брикетирование шихты магнитной и слабомагнитной фракций выполнялась с использованием портландцемента в качестве связующего.

Анализ эксплуатационных качеств брикетов с различными соединениями и технологичность их применения в производстве, а также опыта предприятий, использующих портландцемент в качестве связующего, позволили прийти к заключению, что наиболее экономически выгодным является применение портландцемента.

К преимуществам портландцемента относятся:

- возможность быстрого (не более 16 часов) достижения требуемой эксплуатационной прочности;
- незначительные энергозатраты для ускорения набора прочности брикетами (обеспечение температуры около 50°С);
- начало схватывания цемента (адгезионная активность) наступает не ранее 2 часов, что обеспечивает возможность регламентированной эксплуатации оборудования, исключает «заклинивание» машин и механизмов при непродолжительной аварийной остановке;
- цемент не настолько химически агрессивен, как, например, жидкое стекло или известь, работа с которыми требует специальных

навыков персонала и специального транспортного и накопительного оборудования;

– портландцемент является гидравлическим вяжущим, то есть сохраняет свои свойства, как в воздушно-сухих, так и во влажных условиях, в отличие от воздушных вяжущих (известки, магнезиального вяжущего, жидкого стекла и др.);

– высокая удельная поверхность цемента позволяет обеспечить достаточное сцепление частиц основных компонентов брикета при минимальном расходе связующего;

– под влиянием вибрации цемент подвергается «разжижению», обеспечивая создание плотной структуры брикета в процессе формирования без образования внутренних напряжений, в отличие от воздействия высоких давлений;

– процесс гидратации цемента, который происходит в камерах тепловой обработки, экзотермичен;

– при твердении цемента выделяется теплота в количестве 40-80 ккал/г (в зависимости от вида цемента), то есть каждая тонна брикета в процессе набора прочности является дополнительным источником тепла в количестве 4000-8000 ккал;

– рынок поставщиков портландцемента достаточно велик, данное вяжущее относится к недефицитным, что является значимым фактором при организации высокопроизводительных брикетных фабрик.

Основным недостатком портландцемента является содержание серы порядка 0,4-1,2%. Однако следует отметить, что в составе брикета количество цемента не превышает 10%, то есть каждая тонна брикета привносит в металлургическую шихту 0,04-0,12% серы, что сравнимо с количеством серы в традиционном углеродистом материале.

Портландцемент – это комплексный материал, полученный обжигом и совместным помолом глины и известняка, имеет в своем составе оксиды: CaO – 62-67%; SiO₂ – 20-23%; Al₂O₃ – 4-8%; Fe₂O₃ – 1-4%; MgO – 0,5-5%; SO₃ – 1-3%; K₂O + Na₂O – 0,5-1%. Поведение

портландцемента при высоких (более 1000°C) температурах требует дополнительного изучения.

Наличие в составе цемента таких окислов, как CaO , MgO , дают основание для предположения, что сера останется в шлаковой части, а не перейдет в расплав металла. Кроме того, в зависимости от времени твердения портландцемента (этот процесс интенсивно идет в течение 28 суток, а дальше развивается медленно) образуются различные кристаллогидраты.

Лабораторные исследования процесса брикетирования магнитной и слабомагнитной фракции железосодержащего материала с неорганическим минеральным связующим портландцементом проводились по схеме, представленной на рис. 7.3.

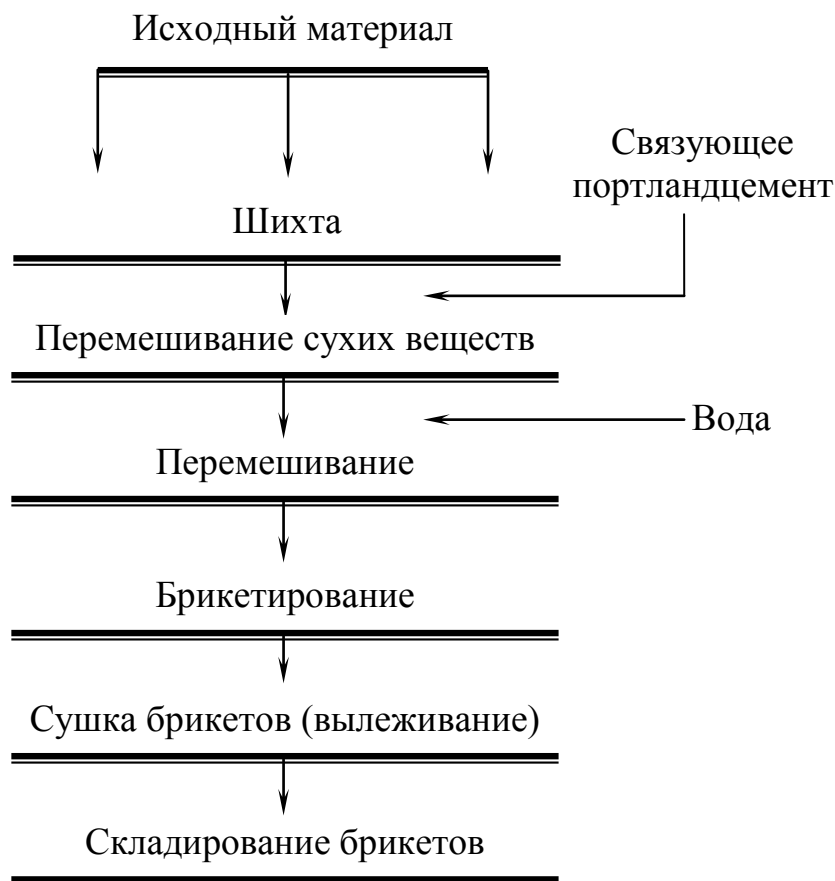


Рисунок 7.3 – Схема проведения лабораторных исследований при использовании портландцемента

Исходные данные и параметры эксперимента приняты следующими:

- железосодержащий материал крупностью: (0,074-0,5 мм) – 39%; (0,5-1 мм) – 35%; (1-3 мм) – 26%;
- железосодержащий материал (слабомагнитных фракция) крупностью: (0,074-0,5 мм) – 53%; (0,5-1 мм) – 47%;
- связующее, портландцемент, расход от 3 до 10%, более 100% по массе;
- расход воды – 10%;
- давление прессования – 25 МПа;
- выдержка – 48 часов.

В результате экспериментов выявлена зависимость прочности брикетов от расхода портландцемента, данные приведены на рис. 7.4 и в табл. 7.5.

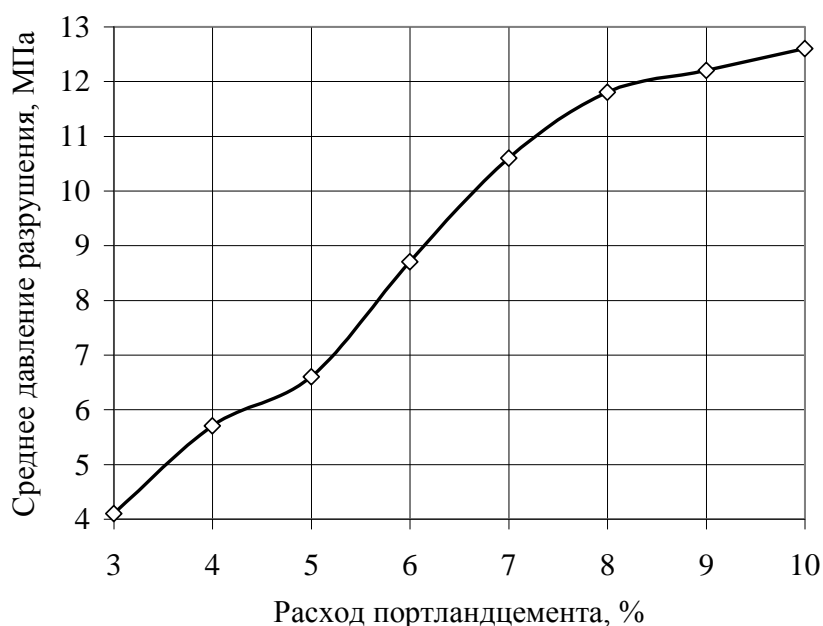


Рисунок 7.4. – Зависимость давления разрушения брикета от расхода связующего

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что увеличение расхода связующего портландцемента от 3 до 8% ведет к значительному резкому приросту прочности полученных брикетов, при расходе от 8 до 10% скорость прироста снижается, при этом наблюдается устойчивый рост прочности, увеличение расхода связующего более 10% считается нецелесообразным.

Таблица 7.5 – Результаты исследований процесса брикетирования магнитной фракции (серия 2)

№	Расход связующего, %	Давление разрушения образца, МПа	Среднее давление разрушения, МПа
1	3	4,2	4,1
2		4,4	
3		3,7	
4	4	5,4	5,7
5		6	
6		5,7	
7	5	6,9	6,6
8		6,4	
9		6,6	
10	6	9	8,7
11		8,7	
12		8,4	
13	7	10,9	10,6
14		10,4	
15		10,6	
16	8	12	11,8
17		11,6	
18		11,8	
19	9	12,1	12,2
20		12,4	
21		12,2	
22	10	12,6	12,6
23		12,4	
24		12,7	

Сводные результаты экспериментальных исследований процесса брикетирования магнитной и слабомагнитной фракций при ис-

пользовании портландцемента в качестве связующего представлены в табл. 7.6 и 7.7.

Таблица 7.6 – Результаты исследований процесса брикетирования магнитной фракции (серия 2)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	12,6	67	84
7	13,1	72	91
30	15,5	85	94

Таблица 7.7 – Результаты исследований процесса брикетирования слабомагнитной фракции (серия 2)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	10,5	65	81
7	11,9	70	87
30	14,2	81	90

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод о преимуществах использования портландцемента в качестве вяжущего при производстве металлургических брикетов. Это не исключает использование других видов связующих (извести, жидкого стекла, магнезиального, шлакощелочного вяжущего и др.) для решения специальных задач. В настоящее время технология изготовления металлургических брикетов способом вибропрессования отработана на различных линиях отечественного и импортного производства.

7.3 Брикетирование шихты магнитной и слабомагнитной фракций с полимерным органическим двухкомпонентным связующим (серия 3)

В серии 3 было использовано полимерное органическое двухкомпонентное связующее. Компания «SNF Floerger» представляет новый продукт серии FLODRI BQ как готовый к использованию жидкий продукт для смешивания с сырьем. В соответствии с рекомендациями фирмы-производителя полимерное органическое двухкомпонентное связующее FLODRI BQ 550, используемое в качестве адгезива, дозируется и перемешивается на первом этапе в количестве 1–3% по массе, а FLODRI BQ 1200, используемое в качестве отвердителя, дозируется и перемешивается на первом этапе в количестве 5-10% по массе.

Данных об использовании этого связующего на предприятиях Украины и за рубежом нет, это коммерческая тайна фирмы разработчика. Фирма «SNF Floerger» представляет его в качестве нового очень эффективного материала для производства брикетов из железосодержащих отходов, имеющего приемлемую цену.

При добавлении полимерного связующего продукт создает сильную связь с частицами порошка и дает высокую прочность брикетов при уплотнении.

7.3.1 Схема проведения эксперимента, исходные данные и параметры эксперимента

Свойства брикетов при использовании полимерного связующего (по данным фирмы-производителя):

- значительная ударопрочность;
- низкий индекс по истиранию;
- легко транспортируется;
- отсутствие пыли.

Преимущества, которые гарантируются производителем:

- отсутствие серы;
- большая гибкость в выборе качества металла;
- более высокая степень утилизации;
- снижение необходимых хранилищ для продуктов.

Исследование процесса брикетирования с использованием связующего серии FLODRI BQ проведено по схеме, приведенной на рис. 7.5.

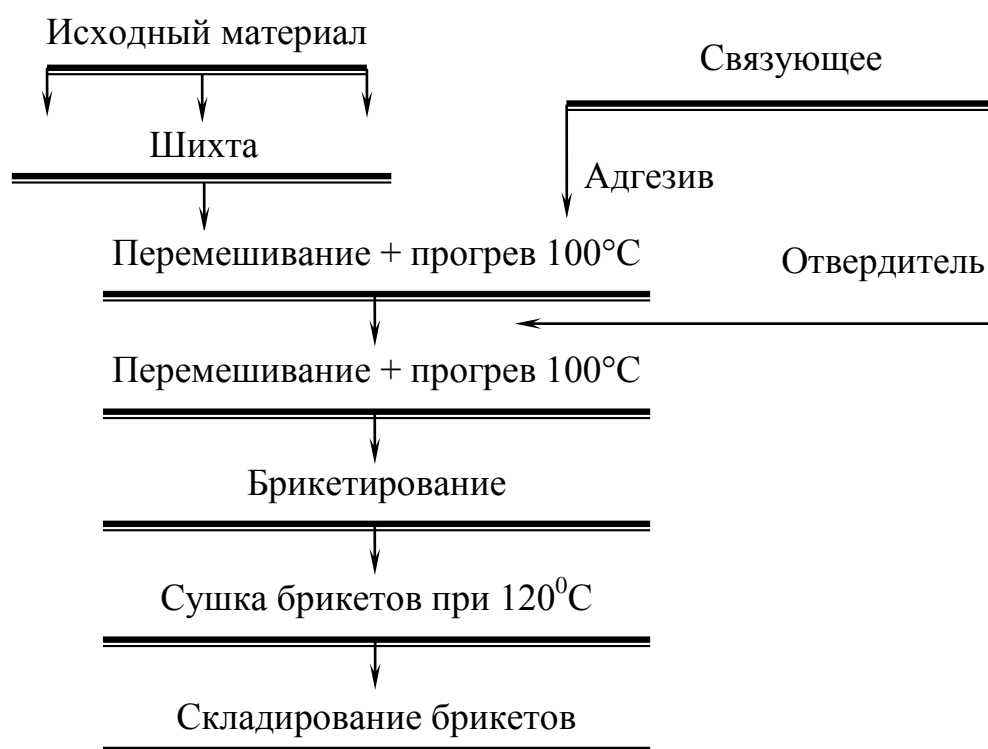


Рисунок 7.5 – Технологическая схема проведения эксперимента

Приняты следующие исходные данные лабораторного эксперимента:

- железосодержащий материал крупностью: (0,074-0,5 мм) – 39%; (0,5-1мм) – 35%; (1-3 мм) – 26%;
- железосодержащий материал (слабомагнитная фракция) крупностью: (0,074-0,5 мм) – 53%; (0,5-1 мм) – 47%;
- температура перемешивания в первом и во втором смесителе 100°C;
- давление прессования – 25 МПа;

- термическая сушка брикетов при температуре 120°C.

Целью экспериментов по брикетированию является определение оптимальных параметров процесса, которые обеспечат максимальную прочность брикета:

- гранулометрический состав шихты;
- время первого и второго смешивания и прогрева;
- расход первого и второго связующего;
- время термообработки готовых брикетов.

7.3.2 Математическое моделирование процесса брикетирования с двухкомпонентным органическим полимерным связующим

При исследовании процесса брикетирования с применением данного связующего было использовано математическое моделирование эксперимента.

Для получения регрессионной модели изучаемого процесса использован центрально-композиционный ротатабельный план второго порядка для четырех факторов, выбранных на основе предыдущих исследований:

- время первичной полимеризации, T_n ;
- расход связующего (адгезива), Q_a ;
- расход связующего (отвердителя), Q_o ;
- продолжительность набора прочности, T_{np} .

Факторы и принятые границы их варьирования приведены в табл. 7.8.

Экспериментальная область факторного пространства: $T_n = 10-50$ мин, $Q_a = 1-3$ мас.%, $Q_o = 5-13$ мас.%, $T_{np} = 30-150$ мин. Целевая функция – прочность P железосодержащих брикетов.

Таблица 7.8 – Факторы, влияющие на прочность брикетов, и границы их варьирования

Фактор	Код фактора	Единицы измерения	Уровни факторов				
			-2	-1	0	1	2
Время первичной полимеризации, T_n	X_1	мин	10	20	30	40	50
Расход связующего вещества 1 (адгезива), Q_a	X_2	%	1	1,5	2	2,5	3
Расход связующего вещества 2 (отвердителя), Q_o	X_3	%	5	7	9	11	13
Продолжительность набора прочности, T_{np}	X_4	мин	30	60	90	120	150

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 7.9.

Таблица 7.9 – Матрица планирования и результаты исследований брикетирования железосодержащего концентрата (магнитная фракция)

№	Значения факторов в безразмерном масштабе				Значения факторов в натуральном масштабе				Прочность P , МПа
	X_1	X_2	X_3	X_4	T_n , мин	Q_a , %	Q_o , %	T_{np} , мин	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-1	-1	-1	-1	20	1,5	7	60	13,5
2	1	-1	-1	-1	40	1,5	7	60	12,5
3	-1	1	-1	-1	20	2,5	7	60	13,9
4	1	1	-1	-1	40	2,5	7	60	12,7
5	-1	-1	1	-1	20	1,5	11	60	11,5
6	1	-1	1	-1	40	1,5	11	60	10,3

Окончание таблицы 7.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	-1	1	1	-1	20	2,5	11	60	12,3
8	1	1	1	-1	40	2,5	11	60	11,9
9	-1	-1	-1	1	20	1,5	7	120	15,9
10	1	-1	-1	1	40	1,5	7	120	14,3
11	-1	1	-1	1	20	2,5	7	120	16,1
12	1	1	-1	1	40	2,5	7	120	15,6
13	-1	-1	1	1	20	1,5	11	120	14
14	1	-1	1	1	40	1,5	11	120	13
15	-1	1	1	1	20	2,5	11	120	13,2
16	1	1	1	1	40	2,5	11	120	14,7
17	-2	0	0	0	10	2	9	90	9,7
18	2	0	0	0	50	2	9	90	10,3
19	0	-2	0	0	30	1	9	90	10,9
20	0	2	0	0	30	3	9	90	11,5
21	0	0	-2	0	30	2	5	90	15,7
22	0	0	2	0	30	2	13	90	11,2
23	0	0	0	-2	30	2	9	30	11,7
24	0	0	0	2	30	2	9	150	14,7
25	0	0	0	0	30	2	9	90	11,5
26	0	0	0	0	30	2	9	90	11,5

Для обработки экспериментальных данных использовалась стандартная компьютерная программа Statgraphics [92].

Полученный полином имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P = & 11,5 - 0,175X_1 + 0,275X_2 - 0,941667X_3 + 1,00833X_4 - 0,125X_1^2 + \\
 & + 0,2625X_1X_2 + 0,2 X_1X_3 + 0,1375X_1X_4 + 0,175X_2^2 + 0,075X_2X_3 - \\
 & - 0,0375X_2X_4 + 0,7375X_3^2 - 0,025X_3X_4 + 0,675 \cdot X_4^2, \quad (7.1)
 \end{aligned}$$

где P – прочность, МПа; X_1, X_2, X_3, X_4 – коды факторов, приведенные в табл. 7.9.

Коэффициенты модели приведены в нормированном виде. Модель адекватна исследуемому процессу. Об этом свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 99,06\%$).

На рис. 7.6 представлен стандартизированный Парето-график, согласно которому можно выбрать коэффициенты A, C, B, D, CD, BC, AD, AB, BB, AC и BD, которые статистически значимы.

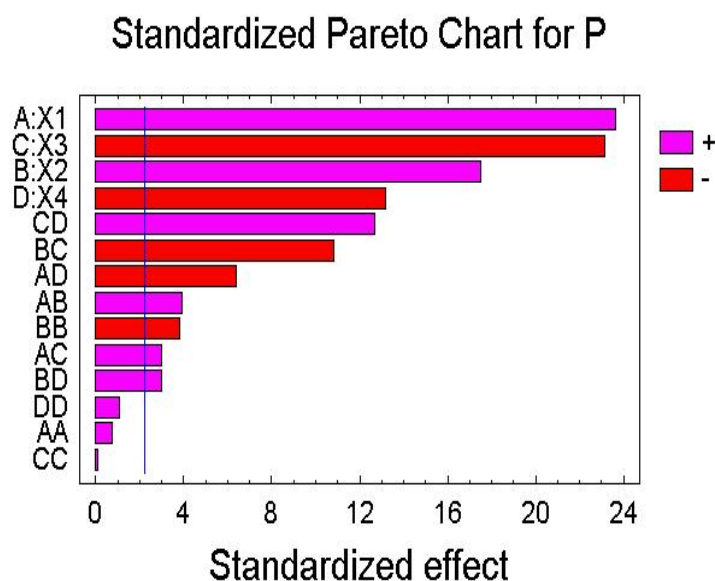


Рисунок 7.6 – Значимость коэффициентов модели (Парето-график)

Больше всего влияют на прочность железорудного брикета время первичной полимеризации связующего T_n и расход связующего (отвердителя) Q_o . Другие факторы влияют на целевую функцию значительно меньше.

На Парето-графике показан характер влияния факторов и эффектов их взаимодействий на прочность P . При этом выделены факторы и эффекты – составляющие регрессии, которые снижают прочность железорудного брикета (гистограммы со знаком « - ») и увеличивают ее (гистограммы со знаком « + »). Вертикаль соответствует 95% значимости.

Полученная модель может быть использована для углубленного исследования влияния на процесс брикетирования вторичных железосодержащих материалов выбранных вариативных факторов, ко-

торые по своей значимости располагаются в таком ряду: при первичной полимеризации – расход связующего (отвердителя) – расход связующего (адгезива) – продолжительность сушки брикетов. Модель также может быть использована для прогнозирования прочности железосодержащих брикетов.

На рис. 7.7 представлены трехмерные сечения гиперповерхности целевой функции P .

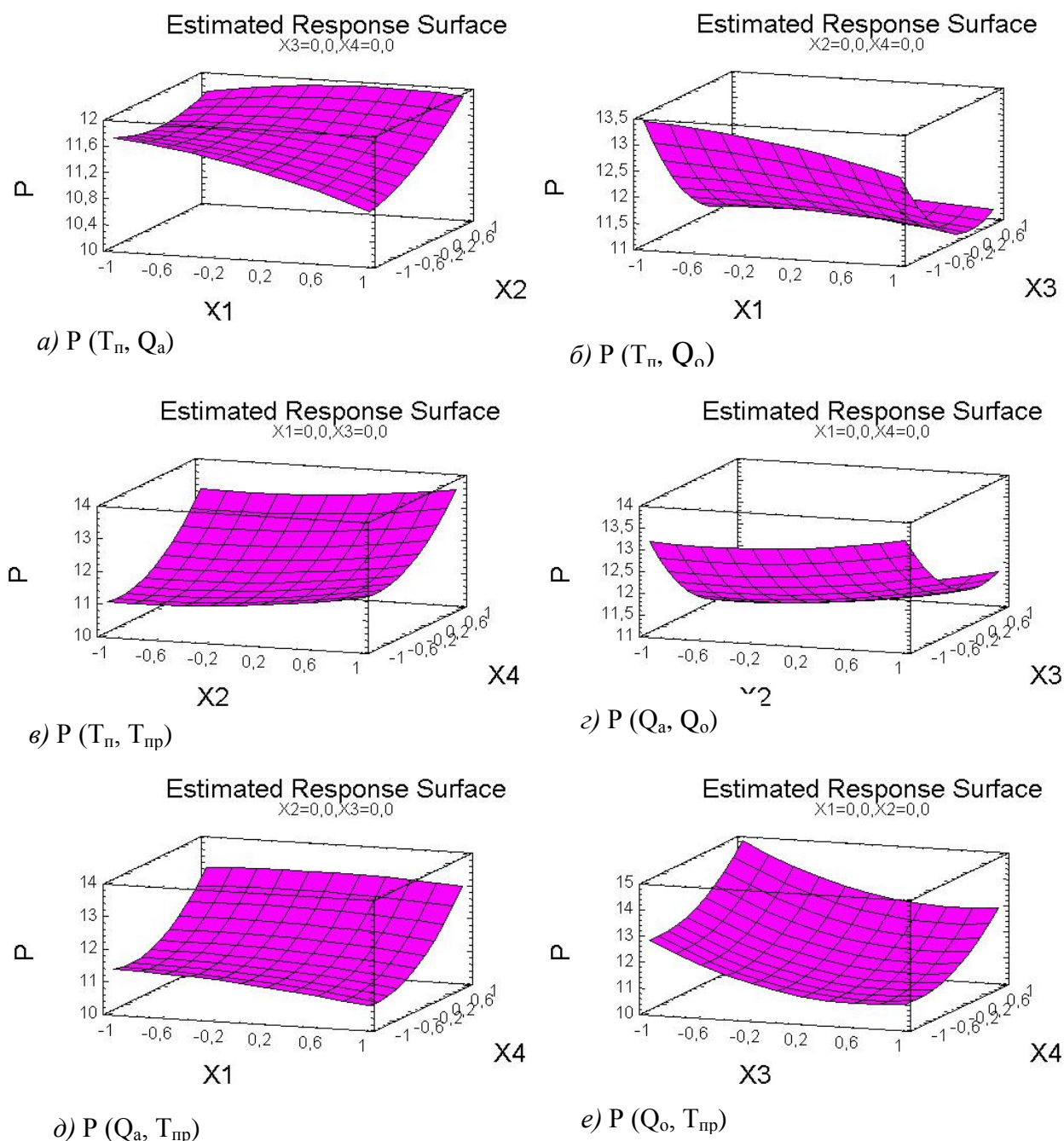


Рисунок 7.7 – Трехмерные сечения гиперповерхности целевой функции: а) $P(T_n, Q_a)$; б) $P(T_n, Q_o)$; в) $P(T_n, T_{np})$; г) $P(Q_a, Q_o)$; д) $P(Q_a, T_{np})$; е) $P(Q_o, T_{np})$

На рис. 7.8 приведены контурные кривые этих гиперповерхностей.

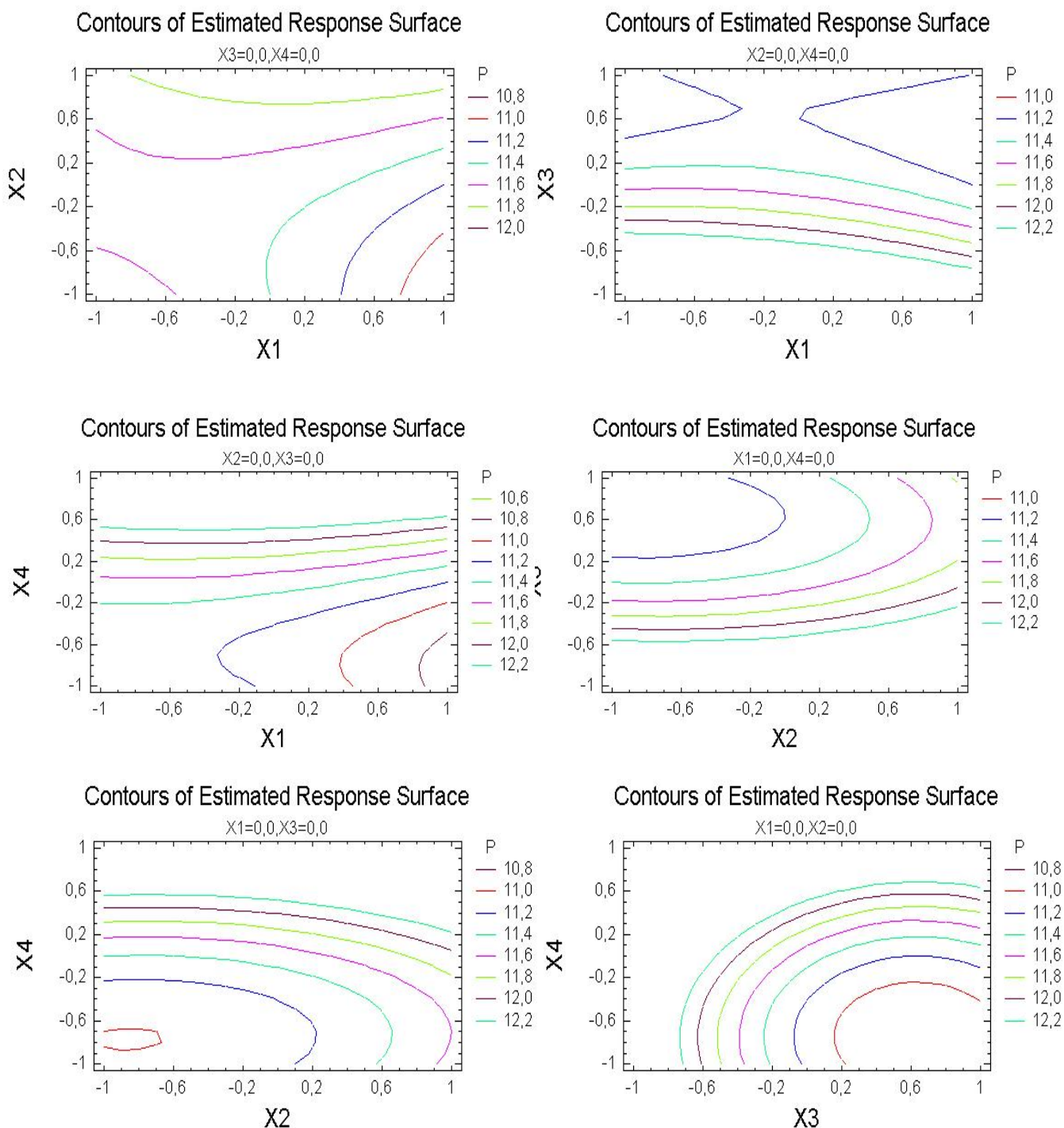


Рисунок 7.8 – Контурные кривые гиперповерхностей

Аналогичные исследования проведены для слабомагнитной фракции железосодержащих материалов.

7.3.3 Результаты проведенных экспериментальных исследований

Как видно из данных, приведенных на рис. 7.7 и 7.8, рост времени первичной полимеризации приводит сначала к резкому увеличению прочности P при значениях T_n от -2 до -1 (т.е. 10-20 мин), при дальнейшем увеличении $T_n > 20$ мин происходит снижение прочности железосодержащих брикетов.

Рост расхода связующего (отвердителя) Q_o в диапазоне значений факторного пространства не приводит к существенному повышению прочности брикетов, таким образом, не является целесообразным.

Изменение расхода связующего (адгезива) Q_a в диапазоне значений факторного пространства имеет экстремум при $Q_a = 1$ (т.е. 2,5% масс.), а дальше резко идет на спад, что дает основание утверждать, что увеличивать расходы этого связующего более чем 2,5% по массе шихты железосодержащих брикетов нет необходимости.

Время пребывания брикетов в сушке существенно влияет на его прочность. Это объясняется тем, что оптимальное значение прочности брикета достигается при максимальном времени $T_{np} = 2$ (т.е. 150 мин).

Анализ эффектов парных взаимодействий факторов показывает, что прочность достигает максимальных значений при сочетании значений факторов:

- расходов связующего (адгезива) $Q_a = 1$ (2,5% масс.);
- расходов связующего (отвердителя) $Q_o = 2$ (5% масс.);
- время первичной полимеризации $T_n = 1$ (20 мин);
- время набора прочности $T_{np} = 2$ (150 мин).

Сводные результаты экспериментальных исследований процесса брикетирования магнитной и слабомагнитной фракций при использовании двухкомпонентного органического полимерного связующего представлены в табл. 7.10 и 7.11.

Таблица 7.10 – Результаты исследований процесса брикетирования магнитной фракции (серия 3)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	18,3	89	93
7	21,2	95	96
30	21,2	95	96

Таблица 7.11 – Результаты исследований процесса брикетирования слабомагнитной фракции (серия 3)

Продолжительность выдерживания, сут.	Прочность		
	на сжатие, МПа	на удар, %	на истирание, %
1	18,0	85	90
7	20,9	91	92
30	20,9	91	93

Для более наглядного сопоставления полученных результатов по проведенным экспериментам все данные сведены в табл. 7.12 и 7.13.

Таблица 7.12 – Сводная таблица результатов исследований брикетирования железосодержащего материала с различными связующими (магнитная фракция)

Параметр	Единицы измерения	Серия 1	Серия 2	Серия 3
1	2	3	4	5
Тип связующего		Неорганическое на основе жидкого стекла	Неорганическое, минеральное – портланд-цемент	Полимерное органическое двухкомпонентное

Окончание таблицы 7.12

1	2	3	4	5
Расход связующего	%	10	10	2,5 + 5
Брикет после охлаждения				
Прочность на сжатие	МПа	12,8	12,6	18,3
Ударная прочность	%	70	67	89
Прочность на истирание	%	91	84	93
Брикет на 7-е сутки выдержки				
Прочность на сжатие	МПа	14,2	13,1	21,2
Ударная прочность	%	77	72	95
Прочность на истирание	%	95	91	96
Брикет на 30-е сутки выдержки				
Прочность на сжатие	МПа	14,2	15,5	21,2
Ударная прочность	%	77	85	95
Прочность на истирание	%	95	94	96

Таблица 7.13 – Сводная таблица результатов исследований брикетирования железосодержащего материала с различными связующими (слабомагнитная фракция)

Параметр	Единицы измерения	Серия 1	Серия 2	Серия 3
Тип связующего		Неорганическое на основе жидкого стекла	Неорганическое, минеральное – портланд-цемент	Полимерное органическое двухкомпонентное
Расход связующего	%	12	7	2,7+7
Брикет после охлаждения				
Прочность на сжатие	МПа	10,2	10,5	18,0
Ударная прочность	%	65	65	85
Прочность на истирание	%	89	81	90
Брикет на 7-е сутки выдержки				
Прочность на сжатие	МПа	11,2	11,9	20,9
Ударная прочность	%	70	70	91
Прочность на истирание	%	91	87	92
Брикет на 30-е сутки выдержки				
Прочность на сжатие	МПа	11,8	14,2	20,9
Ударная прочность	%	72	81	91
Прочность на истирание	%	93	90	93

Графически зависимости прочности брикетов от продолжительности их выдерживания представлены на рис. 7.9 и 7.10.

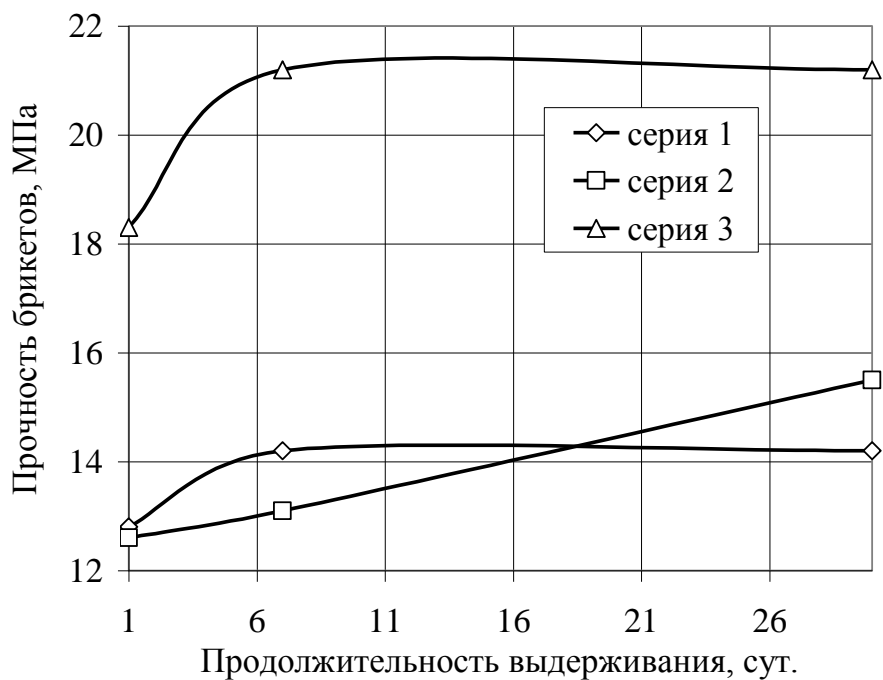


Рисунок 7.9 – Зависимость прочности брикетов от продолжительности их выдерживания (магнитная фракция)

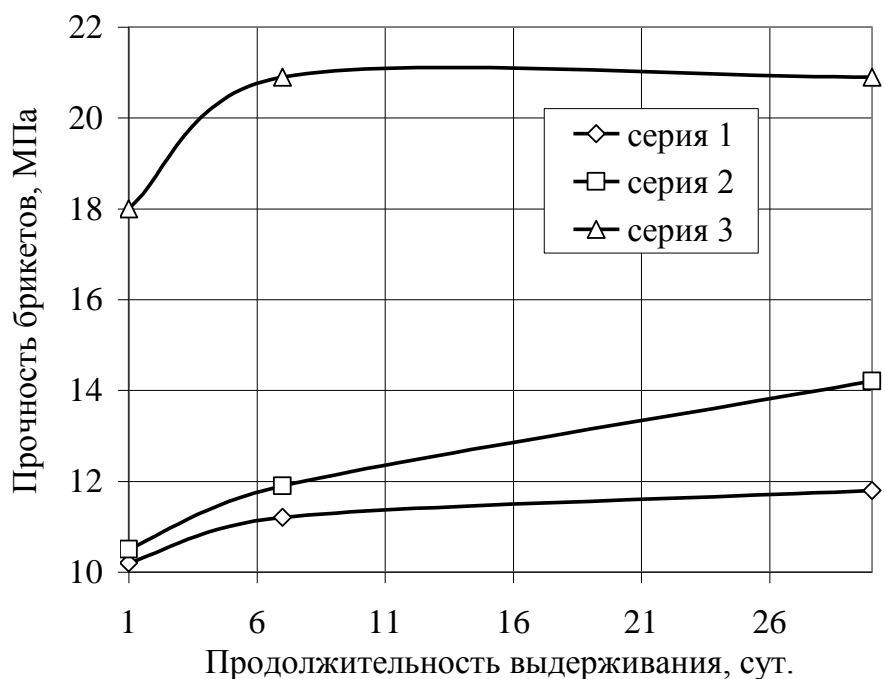


Рисунок 7.10 – Зависимость прочности брикетов от продолжительности их выдерживания (слабомагнитная фракция)

Таким образом, на основании моделирования и экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Железосодержащий материал магнитной и слабомагнитной фракции можно брикетировать с целью дальнейшего использования в переделах металлургического производства.

2. Брикетирование с органическим двухкомпонентным полимерным связующим дает лучшие результаты по прочности брикетов. Возможно использование этого способа без дополнительных затрат на складирование и хранение готовых брикетов, так как они после охлаждения набирают достаточную прочность и могут быть использованы в производстве сразу. Присутствие тонкой пленки на поверхности брикета обеспечивает полное отсутствие пыли.

3. По сравнению с другими видами органическое полимерное связующее не вносит вредные вещества, а именно серу, в состав брикета, тем самым улучшается состав восстановленного металла.

4. Брикеты имеют высокие показатели на ударную прочность, одно из главных требований к металлургическим брикетам.

5. Органическое полимерное связующее легко транспортируется, не требует дополнительных условий хранения, не изменяет своего состава при перепадах температур. Отсутствуют дополнительные операции по смешиванию и приготовлению связующего, по сравнению с неорганическими комбинированными связующими, требующими особого оборудования и обучения рабочих.

7.4 Разработка технологических схем и рекомендаций по промышленному применению разработанных технологий

Проведенные экспериментальные исследования позволяют разработать технологические схемы и рекомендации по промышленному применению разработанных технологий.

7.4.1 Разработка варианта технологической схемы процесса брикетирования

Технологическая схема брикетирования и используемое оборудование зависят от многих факторов, основными из которых являются:

- гранулометрический состав исходных компонентов шихты;
- тип связующего и его расход;
- время полимеризации шихты;
- время сушки брикета;
- время полного набора прочности брикетов.

При разработке вариантов схем брикетирования следует учитывать следующие положения, полученные в результате проведенных исследований:

1. В процессе смешивания композиционной шихты со связующим (адгезивом) необходимо осуществить прогрев шихты с целью лучшего растекания связующего по поверхности зерен.

2. При смешивании композиционной шихты со связующим (отвердителем) необходимо контролировать время смешивания, в течение которого происходит первичная полимеризация материала, и температуру, необходимую для этого процесса.

3. Для прессования шихты следует использовать вальцевый пресс с давлением прессования не ниже 25-30 МПа.

4. На прессе необходимо предусмотреть подпрессовщик, что обеспечивает уплотнение материала перед процессом прессования.

5. На выходе из пресса следует предусмотреть установку грохота для отсева боя и мелочи.

6. Для термообработки готовых брикетов рекомендуется использовать оборудование непрерывного действия, типа туннельной сушилки в потоке обратных газов.

7. Оборудование для процесса необходимо подбирать в соответствии с технологическим регламентом, приведенным в табл. 7.14.

Таблица 7.14 – Регламент и режимы смешивания, брикетирования шихты и термообработки композиционных брикетов с двухкомпонентным органическим полимерным связующим

Операция	Параметр	Значение
Смешивание № 1 (Адгезив)	Продолжительность, мин	5
	Расход, %	2,5
	Температура, °С	100
Смешивание № 2 (Отвердитель)	Продолжительность, мин	5
	Расход, %	5
Термообработка	Продолжительность, мин	20
	Температура, °С	100
Брикетирование	Давление прессования, МПа	25
Термообработка	Продолжительность, мин	150
	Температура, °С	120

По результатам промышленных испытаний длительность смешивания может быть скорректирована, а необходимое время термообработки промышленных брикетов – увеличено.

В результате проведенных экспериментов и исследований, а также сделанных выводов, разработана технологическая схема процесса брикетирования вторичных железосодержащих материалов с двухкомпонентным органическим полимерным связующим, представленная на рис. 7.11.

Вторичный железосодержащий материал – концентрат различных классов – из бункеров 1, 2, 3 с помощью питателей 4, попадает на конвейер 7, где происходит первичное смешивания классов. Далее он подается в смеситель 8 для тщательного перемешивания со связующим (адгезивом), которое подается из емкости 5. В смесителе материал нагревают до температуры 100°С.

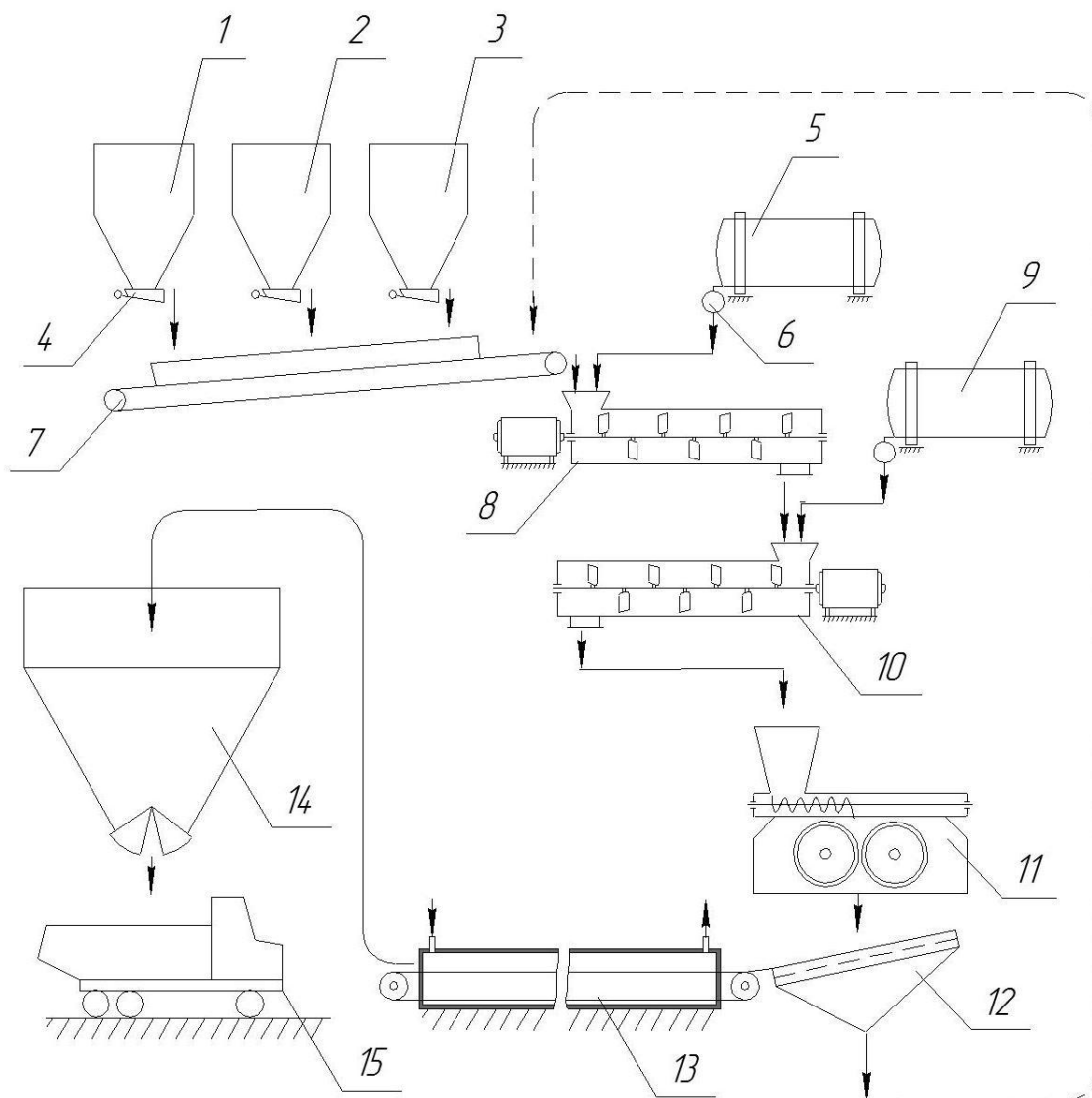


Рисунок 7.11 – Вариант технологической схемы процесса брикетирования:

1, 2, 3 – бункера железосодержащих концентратов различных классов; 4 – питатель; 5, 9 – емкость со связующим; 6 – дозатор; 7 – конвейер; 8, 10 – смеситель; 11 – валковый пресс со шнековой подпрессовкой; 12 – грохот; 13 – туннельная сушилка; 14 – бункер готовых брикетов; 15 – отделение отгрузки

Повышенная температура способствует растеканию густого связующего по поверхности металлосодержащих частиц. Через некоторое время материал поступает в смеситель 10, в который подается связующее (отвердитель) из емкости 9, материал тщательно перемешивается при температуре 100°C. После того, как наступает первичная полимеризация связующего, шихта подается через шне-

ковый подпрессовщик к валковому брикетному прессу 11, где под давлением 25 МПа прессуются брикеты. Сырые брикеты с грохота 12, где отсеивается крошево и разрушенные брикеты, поступают на участок набора прочности 13, который представляет собой туннельную сушилку, через которую проходит поток горячих газов. Твердение брикетов происходит при температуре 120°C в течение 150 минут. Далее брикеты направляются в бункер 14 и вывозятся транспортом 15 потребителю.

7.4.2 Рекомендации по промышленному применению разработанной технологии и внедрению ее на предприятии

На основании математического моделирования и экспериментальных исследований процесса брикетирования железосодержащего сырья с двухкомпонентным органическим полимерным связующим разработана схема внедрения технологии на предприятии, изображенная на рис. 7.12.

По результатам исследований подготовлены и опубликованы статьи в профессиональных изданиях.

7.5 Выводы по результатам исследования процесса брикетирования железосодержащих материалов

Выполненный анализ отечественного и зарубежного опыта показывает высокую эффективность брикетирования при его использовании не только в качестве основного, но, особенно, в качестве вспомогательного метода окускования измельченного металлургического сырья.

Изучение опыта получения и использования брикетов свидетельствует о том, что в черной металлургии, несмотря на рост потребности в новых материалах, брикетирование не находит должного применения, которого оно по праву заслуживает.



Рисунок 7.12 – Схема внедрения технологии брикетирования на предприятии

Производственники и некоторые ученые-металлурги объясняют это положение различными объективными причинами, в том числе неудовлетворительной прочностью брикетов, недостаточным научным и производственным опытом их получения, отсутствием

необходимого оборудования, низкой его эффективностью, нехваткой необходимой информации и т.п. Однако успешный зарубежный опыт и полученные результаты исследований опровергают эти утверждения.

Поэтому разработка и внедрение передовых энергосберегающих эффективных технологий окускования железосодержащих отходов металлургического производства является перспективной и актуальной научно-практической задачей.

Таким образом, можно утверждать, что:

1. Повышенный интерес к брикетированию в настоящее время объясняется кризисным развитием экологической обстановки.

2. Процесс брикетирования позволяет уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду за счет утилизации металлургических отходов.

3. При употреблении металлургических брикетов в доменном производстве наблюдается существенное увеличение производительности, экономия первичного сырья, снижение расхода энергоресурсов, повышение выхода и улучшение качества металла.

4. Организация брикетных фабрик позволяет снизить стоимость конечного продукта за счет возвращения полезных материалов в технологический процесс, а также благодаря уменьшению выплат на размещение отходов.

5. Для развития брикетирования имеется широкая как сырьевая, так и технологическая база. Поэтому привлечение в эту сферу производства современных металлургических предприятий является актуальной задачей не только экологии, но и экономики.

6. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических схем брикетирования вторичных железосодержащих материалов на производстве.

8 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ДОМЕННОМ И СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Переработка и утилизация техногенных отходов важны не только как источник сырья, но и как важное направление охраны окружающей среды. Лишь 10% сырья, извлекаемого из недр, превращается в готовую продукцию, остальные 90% – это отходы, загрязняющие окружающую среду. Metallургическое производство технологически сопровождается значительным количеством различных отходов, достигающих 30% от выплавки стали, из них 80% составляют шлаки, 20% пыли и прочие отходы. На долю черной металлургии приходится 16% общих выбросов промышленности.

С переходом на уплату экологических налогов пропорционально объемам фактических выбросов производства, в том числе и за вывоз отходов на технологические свалки, наиболее прогрессивные компании начали понимать, что значительно дешевле исключить или сократить количество отходов на местах их образования, чем выплачивать растущие экологические налоги.

Утилизация пыли и шламов производится на заводах, имеющих агломерационное производство. На предприятиях, не имеющих аглофабрик, шламы идут в отвалы. Основная технологическая сложность в переработке шламов – их обезвоживание до 10-12% влаги. В связи с этим актуальным становится развитие компактных производств малой и средней мощности по переработке сухой пыли и шламов во вторичное сырье в виде брикетов, отвечающих требованиям современных металлургических процессов. Брикетты, пригодные для выплавки чугуна и стали, должны отвечать следующим требованиям:

- не должны содержать вредных для металлургии примесей сверх допустимого уровня;
- иметь прочность достаточную для их последующей транспортировки;

- сохранять прочность при воздействии атмосферных осадков;
- сохранять достаточную прочность при высоких температурах;
- иметь однородный химический состав;
- иметь однородный фракционный состав;
- иметь себестоимость, сопоставимую с традиционной шихтой;
- быть экологически чистыми.

В настоящее время известны три распространенных способа окускования мелких материалов: агломерация, окомкование (получение окатышей) и брикетирование. Мелкодисперсные материалы обладают низкой газопроницаемостью, что затрудняет их использование при агломерации.

Брикетирование тонкодисперсных материалов с применением связующих – наиболее оптимальное место утилизации отходов металлургических заводов в их собственное производство в связи с тем, что:

- по составу отходы близки к используемой шихте,
- минимизируются транспортные расходы,
- максимально используется инфраструктура и свободные мощности.

Наиболее экономически выгодно и экологически безопасно холодное брикетирование. Брикетирование со связующими (с усилием 10-50 МН/м²) и без связующего (с усилием 100-200 МН/м²) предложено в России в 30-х годах 19 века А.П. Вешняковым. В 1858 году в Германии пущена первая брикетная фабрика по производству бурого угольного брикета, в 1860 году пущен первый валковый пресс. Окусование рудной мелочи брикетированием широко применялось во второй половине 19 века.

При брикетировании создаются дополнительные сырьевые ресурсы из мелких материалов (топлива и руд, использование которых малоэффективно), а также утилизируются отходы. С одной стороны в мире сокращаются запасы полезных ископаемых, природного газа, растет цена сырья, транспортные расходы, с другой стороны, растут накопления отходов металлургического и топливно-энергетического

комплексов. Отходы расположены вблизи металлургических производств и не требуют больших затрат на освоение. Таким образом, можно, с одной стороны, снизить себестоимость продукции за счет применения дешевого сырья, а с другой стороны – улучшить экологическую ситуацию, сократить площади отвалов.

К середине 2012 года только в Донецкой области накоплено 3,11 млн. тонн железосодержащих отходов, 19,1 млн. тонн сталеплавильных шлаков, 1,8 млн. тонн доменных шлаков, в шламонакопителях складировано более 30 млн. тонн шламов.

В целом по СНГ таких отходов до 550 млн. тонн и их количество продолжает расти. В Российской Федерации производится 52 млн. тонн агломерата, 30 млн. тонн окатышей, и 0 тонн промышленных брикетов! В опытном порядке предприятия используют брикеты из железорудных отходов (табл. 8.1).

Таблица 8.1 – Использование брикетов из железорудных отходов

Предприятие	Вид производства и объемы	Использование брикетов из железорудных отходов, т
ОАО Тулачермет	Доменная печь, 1030 м ³	300
ОАО Свободный Сокол	Доменная печь, 1030 м ³	300
БМЗ г. Жлобин	ДСП, 100 т	350
ОАО НЛМК	Доменная печь, 1000 м ³	2500

В настоящее время шламы доменного производства используются как добавка к аглошихте. КПД такого использования шламов на разных предприятиях колеблется от 10 до 80%. Низкий уровень использования шламов объясняется низким содержанием железа (<50%) и повышенным содержанием цинка (>1%).

Технология подготовки шламов доменных газоочисток предусматривает обезвоживание осаждением в отстойниках, фильтрование в аппаратах различного типа и, при необходимости, термическую сушку. Особенность их – повышенное содержание цинка.

Поэтому при подготовке их к использованию надо проводить обесцинкование. Оно может производиться как пиро- так и гидрометаллургическими методами. При содержании в шламах более 12% цинка, они могут использоваться как сырье для получения цинка.

При фильтровании шламов происходит процесс удаления влаги под действием разрежения или давления через пористую перегородку. В настоящее время разработаны различные технологии комплексной переработки шламов (пылей). Часть из них реализована в промышленном масштабе за рубежом. В СНГ такие технологии разрабатываются на уровне НИР и полупромышленных испытаний.

Промышленного производства металлизированных окатышей из шламов аглодоменного и сталеплавильного производства пока нет. Эти материалы используются сейчас как компоненты аглошихты.

8.1 Опыт Новолипецкого меткомбината в решении проблемы утилизации железосодержащих отходов

В 2003 году НЛМК ввел установку по утилизации шламов доменного и коксохимического производства в шламовый концентрат с 15% влажностью производительностью 170 тыс. т/год и стоимостью более 40 млн. руб. Установка позволяет снизить потребность в концентрате для аглофабрики на 89 тыс. т. Срок окупаемости 2 года.

Степень утилизации железосодержащих отходов доменного и коксохимического производств – 96%. Технология предусматривает осаждение в отстойниках, фильтрование, термическую сушку, обесцинкование. При сгущении влажность снижается с 30-60% до 8-10%.

На установке можно перерабатывать все текущие (140 тыс. т/год) и ранее накопленные отходы. Это на 90 тыс. т/год снизит потребность в закупках железорудного сырья. Комплекс мероприятий

по переработке и утилизации отходов помогает НЛМК сократить объемы складированных отходов в 2,8 раза.

На предприятии внедрена новая экологически безопасная установка по утилизации маслоотходов производительностью 5,5 тыс. т/год.

На НЛМК изготовили и проплавили опытную партию шламо-коксовых брикетов объемом 2500 т из конверторных шламов и коксовой мелочи (шлам 65%, коксовая мелочь 20%, цемент 15% с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ 31-37%). Средний расход брикетов за период плавки составлял 121 кг/т чугуна, максимальный 192 кг/т чугуна. При этом расход кокса снизился на 23,2 кг/т (0,19 т кокса на 1 т брикетов), производительность печи уменьшилась на 5% (103 т/сутки). Показатели работы доменной печи (ДП) представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2 – Показатели работы доменной печи (ДП) в зависимости от расхода брикетов

Показатели	Периоды работы, суток		
	15	7	3
Расход брикетов, кг/т	200	92	167
Производительность печи, кг/т	2009	1852	1797
Расход кокса, кг/т	495,8	487	479
Расход дутья, м ³ /мин	1810	1725	1699

Внедрение брикетов позволит:

- уменьшить удельный расход первородного железорудного сырья (концентрата и окатышей) до 7%, кокса – до 7%;
- в течение 8-10 лет ликвидировать шламовые отвалы.

Требования к брикетам отражены в ТУ 0320-007-55978394-03 «Брикеты металлургические для доменного передела», где отпускная прочность оговорена не менее 70% от расчетной (6,0 МПа), а химическая стабильность должна быть на уровне агломерата, укладка по основным компонентам – в пределах 90% от заданного.

Для определения устойчивости брикета к удару при падении используются методики, согласно которым партии брикетов сбрасываются с высоты 1,5-2,0 м и по выходу образовавшейся мелочи 5, 10 или 25 мм определяют ударную прочность. Считается, что брикеты имеют удовлетворительную прочность, если количество мелочи не превышает 5-10%.

8.2 Опыт Челябинского металлургического комбината в решении проблемы подготовки железосодержащих отходов к утилизации

На Челябинском меткомбинате (ЧелМК) шлам из радиальных отстойников после сгущения подается на вакуум-фильтр, а после него с влажностью 36% – в сушильные барабаны, затем с влажностью 10% – на аглофабрику. Однако использование шлама снижает производительность агломашин, увеличивает вынос мелочи (<10 мкм), а ее содержание в шламах доходит до 30-40%. Содержание цинка в шламах – 0,4-0,6%. На предприятии опробована технология получения во вращающихся печах окускованного продукта из смеси доменного и мартеновского шлама. Барабан печи имеет длину 18 м и угол наклона 2°. Шлам с влажностью 30-70% подавался форсункой, пыль предварительно гранулировалась (окатыши 5-15 мм).

8.3 Разработки фирмы «ЭкоМашГео» по утилизации железосодержащих отходов

Фирма ООО «ЭкоМашГео» разработала и широко рекламирует технологию металлургических брикетов с портландцементом в качестве связующего и схемой их производства вибропрессованием (см. п. 2.8, рис. 2.5).

Схема производства брикетов состоит из бункеров с цементом, сухим и влажным компонентами шихты, расходных бункеров, доза-

торов, смеситель шихты, накопителя шихтовой смеси, транспортера подачи смеси, вибропресса, бункера-накопителя поддонов с брикетами, конвейера готовой продукции, склада.

Технология включает в себя хранение и дозирование сырьевых компонентов, приготовление смеси в смесителях принудительного действия, транспортирование смеси к посту формования, формование брикетов способом вибропрессования, транспортирование отформованной продукции к посту выдержки, пакетирование и складирование.

Вибропрессование – процесс уплотнения шихтовой смеси в ячейках матрицы путем одновременного воздействия вибрации и давления. Продолжительность процесса вибропрессования составляет 15-30 с.

Разработана полуавтоматическая линия с производительностью до 80 т/сут, автоматические линии производительностью 2000 и 5000 т/сут. Ориентировочная стоимость оборудования – 250-320 тыс. евро. Линии обслуживаются персоналом из 32 человек. Месячный расход электроэнергии – 36 тыс. кВтч, пара – 240 Гкал, воды технической – 500 м³, цемента – 500 т.

Разработаны составы брикетов для доменной плавки, как заменитель железосодержащего сырья, кокса и флюса; для промывки металлоприемника домны; для наращивания гарнисажа. Разработаны также брикеты для сталеплавильных печей, как заменитель чугуна, скрапа, карбюризаторов и флюсов.

Металлургические брикеты разделяются на три крупных класса.

Первый класс – самовосстанавливающиеся брикеты. Компоненты брикетов – оксиды железа и углерод, идущий на восстановление и науглероживание железа. В условиях восстановительной и окислительной плавки их соотношение различно. Основным принцип работы таких брикетов – прямое восстановление оксидов железа углеродом за счет тесного контакта реагентов внутри брикета. Фракционный состав компонентов должен быть для кокса < 3 мм, содержание железа в шихте доменной печи, работающей на передельный

чугун, должно быть в пределах 44-45%. Брикетты такого состава экономят кокс и увеличивают производительность доменной печи. При доменной плавке брикеттов соотношение углерод – окислы железа должно быть подобрано для обеспечения наиболее полного их восстановления.

Второй класс – брикетты без углерода. Их используют для приготовления фракционной шихты с высоким содержанием железа. Это брикетты из чугунной стружки, дроби, окалины, стальной стружки, железной губки и т.п. Эффект достигается за счет улучшения газодинамики, увеличения содержания железа, уменьшения потерь шихты.

Третий класс – специальные брикетты, например, для промывки горна, наращивания гарнисажа и т.п.

Что касается прочностных требований к брикетту, то по результатам исследований сделан вывод, что реальная нагрузка на брикет в доменной печи значительно ниже требуемой согласно нормативной базы и составляет 3-5 кг/см². Вместо этого рекомендуется обратить внимание на тот факт, что разрушение брикета в основном обусловлено ударными нагрузками при перегрузках, а в печи – фазовыми превращениями при нагреве.

Получаемые по этой технологии брикетты имеют следующие физико-механические характеристики:

– прочность на сжатие, МПа	8,5-9,7 (85-97 кг/см ²);
– масса брикета, кг	7,89;
– ударная прочность (по методике агломерата), %	52,8;
– прочность на истирание, %	25,3;
– осыпаемость, %	1,1 – 2,7;
– пористость общая, %	45,1.

Размягчаемость брикеттов близка к размягчаемости окатышей Михайловского МК. Восстановимость определяли по ГОСТ 21707. Брикетты восстанавливались практически полностью в течение 40 мин.

Испытания по сравнению степени восстановимости брикетов, агломерата ОАО Тулачермет и Михайловских окатышей проводили при температуре 970°C. Состав брикетов: аглодоменный шлам 20%, прокатная окалина 20%, коксовая мелочь 18%, чугунная стружка 32%. После выдержки в атмосфере водорода брикеты, агломерат и окатыши имели сопоставимую механическую прочность, причем более высокая степень восстановимости брикетов по сравнению с агломератом и окатышами подтвердилась.

Преимущества брикетов:

- имеют одинаковую заданную форму и фиксированный вес,
- обладают более высоким удельным весом,
- безотходность, отсутствие высоких температур при изготовлении.

В промышленных условиях проведены плавки с использованием брикетов.

ОАО Тулачермет: ДП объемом 1030 м³, проплавлено 300 т для промывки горна (88% окалина, 12% связующее), 489 т для промывки горна.

Завод Свободный Сокол (г. Липецк): ДП объемом 700 м³ (железосодержащие 59%, коксовая мелочь 26%, цемент 15%).

ОАО Тулачермет (04.2003г.) провело промышленные плавки брикетов в ДП 1030 м³ и 1500 м³ с расходом до 70 кг/т чугуна. В составе брикета прокатная окалина, стружка чугунная и стальная, шлам, пыль, коксовая мелочь.

НЛМК: ДП 1000 м³, проплавлено 2500 т брикета (прокатная окалина, конверторный и доменный шлам, коксовая мелочь, пыль).

ОАО Тулачермет: железоуглеродистые брикеты проплавливались на ДП2 при выплавке литейного чугуна, расход брикетов составил 1 т/подачу (70 кг/т чугуна). Продолжительность периода работы – 20 суток. Приведенная производительность печи при базовой 1327 т/сутки увеличилась на 37 т/сутки, приведенный расход кокса при базовом 641,8 кг/т снизился на 14,4 кг/т, расход дутья в опытном периоде увеличился с 1777 до 1965 м³/мин, вынос колошниковой пыли снизился с 31,9 кг/т до 27,7 кг/т. Таким образом, коксовая состав-

ляющая брикета полностью заменила кокс, а каждые 10 кг брикетов на 1 т чугуна позволили снизить расход кокса на 0,32%.

Использование на ДП2 брикетов для промывки горна (90% окалины, 10% цемента, 58% FeO) окисляет углерод в горне, переводя его в CO, за счет чего разрушаются конгломераты графито-коксовых образований с последующим выносом их с жидкими продуктами плавки. Загромождение горна приводит к потере производительности до 150 т/сутки, увеличению расхода кокса на 12 кг/т и простоям из-за прогара фурм.

Промывка осуществлялась следующим образом:

- за 10 подач до загрузки промывочных брикетов;
- непосредственно промывка состояла из двух подач промывочных брикетов и одной подачи рудой Михайловской доменной (кварцитом).

При регулярном применении промывочных брикетов:

- прекращаются прогары воздушных фурм;
- объем горна через 3-4 суток промыва восстанавливается, что подтверждается теплосъемами горна;
- уменьшаются колебания по нагреву;
- увеличивается расход дутья.

Фирма «Тулит» совместно с «ЭкоМашГео» производит железосодержащие брикеты из отходов металлургического производства с использованием в качестве связующего портландцемента. Ниже представлены данные по составу и качественным характеристикам производимого брикета (табл. 8.3).

Из приведенных данных видно, что механическая прочность брикетов достаточно высокая. Показатель, определяющий сопротивление брикета перевозкам и перегрузкам, называется осыпаемостью. При 3-х кратном сбрасывании с высоты 1,5 м на стальную плиту, выход фракции -5 мм составил 1,1% при требовании не более 10%.

Пористость железокислородистого брикета составляет более 40%, при требовании не менее 10%.

Таблица 8.3 – Физико-химический состав металлургических брикетов при различном компонентном составе и количестве связующего

№	Расход компонентов, %				Химсостав, %		В _{осн}	Плотность, г/см ³	Прочность на сжатие, МПа	
	цемент	прокатная окалина	коксовая мелочь	колошниковая пыль	Fe _{общ}	С			1 сут.	28 сут.
1	13,0	60,9	26,1		45,75	16,7	1,18	2,35	5,7	8,1
2	13,0	60,9	26,1		45,75	16,72	1,18	2,41	6,5	9,3
3	13,0	87,0			62,68	1,21	1,2	3,2	12,5	13,7
4	16,7	58,3	25,0		41,54	20,0	1,15	2,3	9,7	14,5
5	13,0	54,8	23,5	8,7	44,15	17,25	1,09	2,04	5,0	7,1
6	16,7	58,3	25,0		41,31	19,8	1,16	2,06	6,1	8,1

Гигроскопическая влажность зависит от условий хранения. В представленных образцах она находится на уровне 2-3%. Брикет выдерживает, не разрушаясь, температуру до 1300°C, т.е. более высокую, чем предъявляется к такому виду шихты (800-1000°C). Размягчаемость брикета близка к размягчаемости Михайловских окатышей.

Для сравнения приведены данные по Волгоградскому металлургическому железосодержащему брикету:

- прочность на сжатие 37,6 кг/см²;
- плотность 1,839 г/см³;
- пористость 18%;
- содержание окалины 45%;
- содержание графитового боя 40%;
- содержание жидкого стекла 15%.

8.4 Разработки Института черных металлов (ИЧМ) НАН Украины

В последние годы проведен ряд работ по использованию мелкодисперсных железорудных отходов в доменном и сталеплавильном производстве.

Институт черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск) исследовал возможность брикетирования шихты следующего состава, %: аглодоменный шлак 50; колошниковая пыль 32; конверторный шлак 12; вторичная окалина 6; при общей влажности шихты 13,5-14%.

К шихте добавляли известь (фракция < 1 мм), с таким расчетом, чтобы в шихте для брикетирования она составляла 15%. Перемешанную с шихтой известь выдерживали для гашения 2-3 часа, влажность шихты перед прессованием составляла 6,5-7,5%, насыпная плотность 1,13 г/см³. При давлении прессования 900-1000 кг/см² и частоте вращения валков валкового пресса 1,5 мин⁻¹ прочность сырых брикетов составляла 50 кг/брикет, при плотности 2,62 г/см³. После сушки брикетов при температуре 150-160°C прочность на сжатие по ГОСТ 24765-81 составляла 132 кг/брикет. Без сушки при вылеживании в течение 1, 3, 6, 14 суток прочность брикетов составила соответственно 76, 88, 122, 141 кг/брикет. Для условий МК Азовсталь для получения 120000 т брикетов в год требуется установить 3 таких пресса производительностью 8 т/час.

В этом же институте отработана технология получения брикетов на лабораторной установке. Брикеты с размерами 33x30x18 мм и объемом 10-11 см³ получали на валковых прессах с диаметром валков 500 и 650 мм. Из железосодержащего шлама завода им. Петровского (влажность 17%) с добавкой 20% известковой муки при давлении прессования 500 кг/см² получали сырые брикеты с прочностью на сжатие 145-155 кг/брикет, после сушки при температуре 150°C прочность на сжатие составила 400-410 кг/брикет. Из колошниковой пыли этого же завода (влажность 12,5%) с добавкой 15% извести при давлении прессования 500 кг/см² получены сырые брикеты с

прочностью 190-200 кг/брикет. После сушки при 150°C прочность на сжатие составила 390-405 кг/брикет, а при вылеживании в течение 3 суток – 300-320 кг/брикет. Рекомендуется вводить в шихту ДП такие брикеты в количестве не более 6-8%.

8.5 Разработки Приазовского государственного технического университета

Исследования по брикетированию железосодержащих отходов, проведенные в Приазовском государственном техническом университете (ПГТУ) (г. Мариуполь) совместно с металлургическим комбинатом МК Азовсталь, показывают, что при определенных условиях, к числу которых можно отнести давление прессования, гранулометрический и компонентный состав смеси, размер и форму брикетов, а также термическую обработку, можно получить брикеты высокой прочности, пригодные для использования в доменной плавке.

В университете (ПГТУ) проведены исследования брикетирования шихты следующего состава:

- аглодоменный шлам 40%;
- кек (конверторный шлак с известью) 10%;
- известь-пушонка 25%;
- известковая мука 25%.

Свойства полученного брикета:

- насыпная плотность брикетов 1,78 г/см³;
- масса брикета 3,63 кг;
- размеры 200×100×70 мм;
- прочность на раздавливание (сушка 13 суток) 161 кг/см²;
- давление прессования 1000 кг/см².

В лабораторном варианте получены брикеты цилиндрической формы диаметром 30 мм, содержащие 70% конверторного шлама, 20% гидратированной извести, 10% глиноземистого шлама. Брикеты

спрессованы при давлении 50 МПа и высушены в течение 0,5 часа при температуре 250°C.

Брикеты показали следующие механические характеристики:

- барабанная проба М+10 72%;
- прочность на раздавливание 39 МПа.

Для сравнения приводим характеристики агломерата:

- барабанная проба М+10 67,6%;
- прочность на раздавливание 38 МПа.

Исходным материалом для получения шламовых гранул могут служить наиболее распространенные виды отходов: пыль газоочисток, отсеvy извести, доломита и т.д.

Для определения возможности использования брикетов в доменной плавке была изготовлена партия брикетов в количестве 150 т в форме полукирпича 118×88×62 мм с добавлением связующего, являющегося «ноу-хау» фирмы «ДиМет», и обеспечивающего брикетам повышенную прочность. Ударная прочность М+10 образцов фракции 30 мм, вырезанных из брикетов, составила 92%, прочность на раздавливание – 22 МПа. После прокаливания при температуре 600°C в течение 1 часа прочность образцов снижается до 74% и 16,7 МПа, соответственно, что является удовлетворительным показателем.

Расход брикетов составлял 65 кг/т чугуна. В процессе экспериментов изменения параметров доменной плавки находились в пределах допустимого уровня. Нарушений хода печи не отмечалось. Выход чугуна, шлака и колошниковой пыли были обычными. Содержание взвешенных частиц в мокрой ступени доменной газоочистки также находилось в пределах нормы.

8.6 Опыт Первоуральского Новотрубного завода по утилизации промасленной окалины

Работы по утилизации промасленной окалины велись на ОАО Первоуральский Новотрубный завод (ПНТЗ). В 1999-2002 г. уже

были изготовлены опытные партии брикетов, которые прошли все-сторонние испытания как доменное сырье в ОАО «Мечел» и в литейном цехе ПНТЗ. При плавке шихты, содержащей 90-95% брикетированной окалины, получены отливки, отличающиеся чистотой по сере и фосфору.

Основные технические характеристики брикетов:

Прочность, кН/брикет:

- при раздавливании брикетов 13,45-16,65;
- при прокаливании 1000°C 6,05;
- при прокаливании 750°C 9.

Истираемость в барабане (8 минут),% 9.

Прочность по барабану, % 90.

В настоящее время в ПНТЗ введена в эксплуатацию опытно-промышленная линия брикетирования окалины, в т.ч. и промасленной, с проектной годовой производительностью 10 тыс. т/год железосодержащих брикетов для использования в качестве шихты для доменного передела. Расчетный годовой доход от использования 10 тыс. т брикета составит около 10 млн. рублей, затраты на линию в количестве 8,5 млн. рублей окупятся в течение года.

В процессе работы возникли дополнительные возможности применения, как брикетов, так и подготовленной шихты по другим схемам.

Для этих целей используется целый ряд отходов лесопромышленного комплекса – древесно-угольной составляющей, которая может заменить часть металлургического кокса; применение других видов связующих материалов, значительно снижающих содержание кремнезема, серы, фосфора, что позволит также снизить цену готовой продукции. На опытно-промышленной линии изготовлены опытные партии флюсообразующих, железосодержащих брикетов с различным содержанием доломита и т.д.

8.7 Разработки НП «Экологический региональный центр» по утилизации железосодержащих отходов

В НП «Экологический региональный центр» (г. Новокузнецк) разработана технология брикетирования колошниковой пыли и металлургических шламов, позволяющая получить брикеты с высокими качественными характеристиками:

– прочность на сжатие – 130-160 кг/см² для брикетов таблеточной формы; – 250 кг/брикет для брикетов подушкообразной формы;

– прочность на истирание (ГОСТ 21289-75) 92-99%;

– прочность на сбрасывание (ГОСТ 21289-75) 97-99%;

– водопоглощение (ГОСТ 21289-75) 1-3%.

В качестве связующих используются продукты металлургического производства и отходы смежных отраслей промышленности. Брикеты по своим прочностным характеристикам не уступают агломерату и могут эффективно использоваться в доменном процессе. Кроме того, брикеты практически не содержат мелочи, в то время как в агломерате присутствует до 50% фракции менее 6 мм.

Разработана технологическая схема производства брикетов, которая содержит: емкость для хранения связующего, плунжерный насос, расходную емкость, бункеры для исходного сырья, смеситель, валковый пресс, ленточную сушилку, вентилятор, колосниковую решетку, расходный бункер, склад готовых брикетов, бункер готовых брикетов, циклон, ленточный питатель, ленточный конвейер, вытяжной зонт. Годовая производительность линии – 15 тыс. т. Себестоимость производства брикетов составляет 470 руб/т брикета.

Металлургическое предприятие при использовании брикетов в доменном процессе получает экономию в размере 5,8 млн. руб/год за счет частичной замены агломерата. Дополнительная экономия в размере 8,8 млн. руб. получается за счет снижения экологических платежей за размещение отходов.

Технологическая ценность брикетов может быть значительно повышена за счет их металлизации. Разработан способ получения

самовосстанавливающихся брикетов при вводе в их состав твердых восстановителей, обеспечивающих возможность повышения степени металлизации в брикетах от 16 до 94,6% в ходе их термической обработки. Металлизированные брикеты могут быть использованы в конверторном и электросталеплавильном производстве. Кроме того, при металлизации происходит удаление из брикета цинка на 90%, что делает перспективным производство брикетов из доменных шламов.

8.8 Опыт других организаций, занимающихся производством оборудования для утилизации железосодержащих отходов

ИЧМ и НПП Экотом производят и поставляют прессы валковые малогабаритные, массой до 4-5 т, производительностью 0,5-20 т/ч, с удельным давлением прессования до 1250 кг/см^2 , диаметром валков до 800 мм, шириной рабочей части до 500 мм, мощностью привода до 30 кВт, скоростью вращения $0,5-15 \text{ мин}^{-1}$, объемом брикета до 60 см^3 .

ООО «Экостройтехнология» (г. Днепропетровск) предлагает технологию и линию по производству брикетов для металлургического производства с использованием отходов. Линия обеспечивает производство брикетов со следующими показателями:

- прочность при сжатии $80-180 \text{ кг/см}^2$;
- осыпаемость не более 10%;
- пористость до 40%;
- производительность от 100 т/сутки;
- годовая производительность 33 тыс. т;
- установочная электрическая мощность 296 кВт·ч;
- себестоимость производства брикета 400 руб/т;
- годовая прибыль 12,5 млн. руб;
- стоимость линии 2,9 млн. руб;

– состав брикета – окалина, дробленый шлак, комплексное связующее.

Из представленных данных можно сделать вывод о перспективности применения брикетов из различных железосодержащих материалов в доменном производстве.

9 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДОНЕЦКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА К УТИЛИЗАЦИИ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Выполненный анализ опытных работ по утилизации железосодержащих отходов, проведенных в последнее время на Украине и за рубежом, свидетельствует о значительном интересе промышленных предприятий и исследователей к существующей проблеме. Заводы, имеющие в своем составе аглофабрики (МК им Ильича, МК Азовсталь, Алчевский и др.), значительную часть своих отходов перерабатывают на аглолентах. Однако ввод в аглошихту мелкодисперсных материалов (класс $< 0,08$ мм), какими являются шламы, колошниковая пыль, известковая мука, снижает газопроницаемость аглошихты и производительность агломашины.

Поэтому идет постоянный поиск других способов переработки железосодержащих отходов. Одним из наиболее перспективных и уже широко внедряемых в настоящее время является их брикетирование на валковых и штемпельных прессах. Так, ОАО «Брикет» (г. Донецк) освоил производство брикетов первичной прокатной окалины на валковых прессах при давлении 25-30 МПа с использованием органического связующего. Полученные брикеты применяются для промывки доменной печи на МК Азовсталь и Енакиевском метзаводе (ЕМЗ). Освоено производство брикетов из замасленной прокатной окалины (вторичной) на Первоуральском Новотрубном заводе с проектной мощностью линии 10000 т/год. При плавке шихты, содержащей 90-95% брикетированной окалины, получены отливки чугуна и стали с пониженным содержанием серы и фосфора.

Особенностью железосодержащих отходов (исключая первичную окалину) является их мелкодисперсность (фракция крупностью $< 0,08$ мм) и наличие в составе коксовой пыли, что обуславливает следующие пути их брикетирования:

- брикетирование при высоком давлении (более 100 МПа) без связующих;
- применение связующих, обеспечивающих достаточную прочность при минимальном расходе;
- комбинация этих двух направлений.

Брикетирование при высоких давлениях связано со сложным в обслуживании оборудованием, низкой производительностью и высокими затратами на передел.

Очевидно, оптимальным решением проблемы брикетирования мелкодисперсных железосодержащих отходов является подбор оптимального связующего при невысоких давлениях прессования с минимумом технологических операций.

9.1 Исследование процесса брикетирования железосодержащих отходов Донецкого металлургического завода

В Донецком национальном техническом университете на кафедре «Обогащение полезных ископаемых» (г. Донецк) проведены исследования процесса брикетирования железосодержащих отходов Донецкого металлургического завода (ДМЗ) с целью их использования в доменном производстве.

Для определения состава шихты для брикетирования отходов из всех известных в настоящее время связующих рассматривались применяющиеся на ОАО ДМЗ материалы, а также недефицитные материалы промышленного производства. Опробованы известковая мука, жидкое стекло, лигносульфонат, доменный шлак, шлак производства силикомарганца, связующее СБ, угольный пек.

Для утилизации были предложены следующие отходы ОАО ДМЗ:

- колошниковая пыль,
- доменный шлам,
- замасленная окалина (вторичная),

– пыль газоочистки печи-ковша.

Эти компоненты шихтовали в соотношениях, соответствующих их генерации на заводе:

- колошниковая пыль 55%,
- доменный шлак 40%,
- замасленная окалина 5%.

Среднее содержание железа в опытной смеси составило 42%.

Методика исследований содержала подходы и положения, изложенные в п. 5.1 и п. 6.4.

Были проведены опыты по получению брикетов с использованием в качестве связующего известковой муки, жидкого стекла, цемента марки 500, доменного шлака, шлака производства силикомарганца.

Свойства отходов ОАО ДМЗ в состоянии поставки представлены в табл. 9.1. и 9.2.

Таблица 9.1 – Физические свойства отходов ОАО ДМЗ в состоянии поставки

№	Вид материала	Влажность, %	Плотность, г/см ³
1	Известковая пыль	4,5	1,25
2	Колошниковая пыль	2,5	1,2
3	Пыль с печи-ковша (ПК)	1,3	0,46
4	Доменный шлак	27	1,39
5	Прокатная окалина вторичная	21	1,74

Таблица 9.2 – Химический состав железосодержащих отходов
ОАО ДМЗ и брикетов

Материалы	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	CaO	SiO ₂	S	P	Доля в ших- те
Колошниковая пыль	38,2	52,6	3,1	18,1	10,3	9,1	0,24	0,08	56,3
Окалина вторичная	66,0	50,6	39,5	5,77	1,82	1,27	0,17	0,05	4,2
Доменный шлак	45,2	58,6	5,5	10,5	8,9	7,2	0,55	0,07	39,5
Смесь 1 базовая	41,9	55	4,3	14,5	9,6	8,15	0,40	0,08	-
Состав брикета	33,9	40,1	7,58	19,1	11,5	8,2	1,04	0,02	-

9.1.1 Исследование применения различных связующих для брикетирования шихты базового состава (смесь 1)

Для подбора рационального режима брикетирования железосодержащих отходов ОАО ДМЗ проведены экспериментальные исследования с применением различных связующих веществ. Результаты исследования представлены в табл. 9.3.

Анализ полученных данных показывает, что большое значение для прочности брикета имеет усилие прессования. В то же время карбонизация не оказала никакого влияния на показатели брикета за исследуемое время (24 час). Доменный шлак с жидким стеклом показал результат 283,4 кг/см². В то же самое время этот состав в качестве связки дал минимальную прочность. Это говорит о том, что для смеси 1, в составе которой есть коксовая мелочь, данные материалы в качестве связующего непригодны.

Таблица 9.3 – Сравнительная прочность брикетов различных составов, отпрессованных (16,0 МПа) и отформованных вручную

Состав	Прочность, кг/см ²		
	Отпрессован, 3 суток выдержки	Отформован, 3 суток выдержки	Отформован, карбонизация 24 часа при 200°С в атмо- сфере CO ₂
100 смесь 1, 20 доменный шлак, 20 жидкое стекло	такой вариант состава не из- готавливался	0,68	брикет рассыпался
100 смесь 1, 20 шлак SiMn, 20 жидкое стекло	37	21	14,7
100 смесь 1, 20 пыль ПК, 20 жидкое стекло	31	3,4	4,4
100 смесь 1, 20 цемент 500, 30 жидкое стекло	11	10,4	5,3
100 смесь 1, 20 известковая мука, 20 жидкое стекло	такой вариант состава не из- готавливался	такой вариант состава не из- готавливался	3,7
100 шлак SiMn, 20 жидкое стекло	55,6	такой вариант состава не из- готавливался	такой вариант состава не из- готавливался
Доменный шлак, жидкое стекло	такой вариант состава не из- готавливался	283,4	такой вариант состава не из- готавливался

Для проверки полученных результатов, совместно с институтом ПромстройНИИПроект (как организацией, работающей со связующими, применяемыми в строительстве) были проведены исследования по подбору состава связующего для брикетирования смеси состава 1. Результаты испытаний представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4 – Результаты исследований связующих веществ для брикетов состава 1

Наименование	Номер состава, %				
	1	2	5	8	10-11
Смесь 1	60	80	83	74	73
Цемент	20	-	8,3	4	7,3
Ускоритель	-	-	0,4		0,36
Вода	-	-	8,3	9	8,7
Эмульсия:	20	20	-	13	10,64
в том числе					
- регенерата	1,88	1,88	-	1,22	1,0
- глины	0,4	0,4	-	0,26	0,21
- ПАВ	0,52	0,52	-	0,34	0,28
- воды	17,2	17,2	-	11,18	9,15
Режим изготовления	прессование 150 кг/см ²		вибро- формовка	прессование 150 кг/см ²	
Плотность, кг/м ³	2230	2270	1870	2050	2090
Прочность на сжатие после 7 суток, кг/см ²	107,37	7,13	30,0	33,67	54,6-64,3
Выдержка при 900°С в течение 3 час	шелушение с поверхности, брикет не рассыпается	брикет рассыпался			сохранил форму, есть трещины

Результаты проведенной совместно с ПромстройНИИПроект работы подтверждают ранее сделанный вывод о том, что приведенные выше связующие непригодны для материала состава 1, т.к. не дают прочности в сыром виде, а при прокаливании брикеты рассыпаются (исключение – образец, содержащий 20% цемента и 20% эмульсии в качестве связующего).

Затем были проведены исследования по выявлению зависимости прочности брикетов, спрессованных при давлении 160 кг/см^2 , от времени выдержки, результаты которых представлены в табл. 9.5.

Таблица 9.5 – Прочность различных составов в зависимости от времени выдержки

Состав, %	Время выдержки, суток		
	0	14	22
	Прочность брикетов на сжатие, кг/см^2		
100 смесь 1 20 шлак SiMn, 20 жидкое стекло	5,1	11	63
100 смесь 1, 25 жидкое стекло	7,1	18,9	14
100 смесь 1, 25 жидкое стекло без воды	12,8	35,7	22,7
100 смесь 1,5 сода, 22 жидкое стекло	5,8	48,5	50,7
100 смесь 1, 10 известковая мука, 10 пек молотый	108,9	118,8 (3 суток)	75 (9 суток)
100 смесь 1, 10 известковая мука, 10 жидкое стекло 1,5	175,6	244,1 (3 суток)	250 (9 суток)

Из приведенных данных следует, что, хотя уровень прочности даже после выдержки недостаточен, выявляется тенденция к упрочнению, особенно заметная в течение первых 14 суток.

Прочность брикетов на сжатие на этих связующих оказалась на порядок ниже требуемой величины (200 кг/см^2) и составляла в среднем менее 50 кг/см^2 . Такую низкую прочность брикетов можно объяснить высоким содержанием коксовой составляющей колошниковой пыли, связать которую используемые материалы в применяемых количествах (не более 10%) не смогли.

Прочность брикетов, изготовленных с применением в качестве связующего каменноугольного пека и жидкого стекла модифицированного (с плотностью $1,5 \text{ г/см}^3$), оказалась близкой к необходимой. Однако, в процессе испытаний на сжатие выявилось хрупкое разрушение брикета на частицы фракции менее 5-8 мм.

В связи с этим, особое внимание было уделено связующему СБ, которое применяется для брикетирования коксовой и угольной мелочи. Были изготовлены брикеты из угольного штыба (АШ), которые показали прочность на раздавливание $20\text{-}35 \text{ кг/см}^2$ для свежееотпрессованных и 79 кг/см^2 после 14 суток выдержки. Таким образом, применение СБ позволяет частично устранить негативное влияние угольной и коксовой мелочи на прочность железосодержащего брикета.

9.1.2 Исследование возможности применения связующего СБ для брикетирования шихты базового состава (смесь 1), режима термообработки брикетов

Исследование технологии применения связующего СБ проводилось по следующим направлениям:

- поиск оптимального количества связки (в интервале 5-10%);
- определение влияния усилия брикетирования на прочность брикета на сжатие (в интервале $140\text{-}700 \text{ кг/см}^2$);

– определение технологии термо-временной обработки брикетов после брикетирования.

Была подготовлена серия брикетов с различным содержанием связки СБ (5%, 7%, 10%), отпрессованных при разных удельных давлениях. Результаты представлены в табл. 9.6.

Таблица 9.6 – Прочность брикетов на сжатие в зависимости от количества связующего и усилия прессования

Усилие прессования, кг/см ²	Количество связующего СБ, %		
	5	7	10
	Прочность брикетов на сжатие, кг/см ²		
140	26	39	114
280	20	29	102
700	43	64	245

Поскольку результаты, представленные в табл. 9.6 для состава с 10% СБ, близки к требуемым по прочности, в дальнейшем за базовый принят именно этот состав (10% СБ).

Для определения технологии термообработки брикетов была приготовлена серия брикетов с содержанием 10% СБ и проведена ее сушка при 150°C с различной выдержкой по времени. Результаты исследований режима термообработки представлены в таблице 9.7.

Таблица 9.7 – Зависимость прочности брикетов на сжатие от времени сушки при температуре 150°C

Выдержка, час	0	2	4	6
Прочность, кг/см ²	44	86	128	78

По результатам эксперимента выявлен оптимум термической обработки – это выдержка в течение 4 часов при температуре 150°C (для брикета размером: диаметр 32 мм, высота 15 мм).

Параллельно была проведена выдержка серии брикетов базового состава с применением связующего СБ в количестве 10% при температуре 20°C. Результаты представлены в таблице 9.8.

Таблица 9.8 – Влияние выдержки брикетов при температуре 20°C на их прочность

Выдержка, сут.		0	10	18	24
Прочность, кг/см ²	Образец 1	42	108	112	105
	Образец 2	35	119	132	132

Из приведенных данных видно, что, в основном, упрочнение происходит в первые 10 суток, в дальнейшем прочность растет незначительно. Выдержка брикетов в течение 10 суток при 20°C позволила поднять прочность брикетов с 42 до 108 кг/см².

При исследовании режима высокотемпературной обработки брикетов в качестве связующего были проведены плавки в печи Таммана различных составов шихты.

Первая серия (А) – проведена плавка колошниковой пыли без дополнительного восстановителя (за счет имеющегося в составе коксовой мелочи углерода, содержание которого составляет $C = 18,1\%$). Масса загрузки составила 100 г колошниковой пыли, температура плавки – 1500°C. На выходе получено 34 г металла (34% от шихты) и 32 г шлака (32% от шихты).

По результатам можно заключить, что при содержании $Fe_{общ} = 38,2\%$ выход железа составляет 34%, т.е. что соответствует 89% восстановления. Таким образом, коксовая мелочь, имеющаяся в составе загрузки колошниковой пыли, позволяет получить степень восстановления железа из колошниковой пыли на 89%.

Вторая серия (Б) – выполнена аналогичная плавка в печи Таммана брикета базового состава с содержанием 10% СБ в качестве связующего. Масса загрузки составила 74,5 г брикета, температура плавки – 1500°C. На выходе получено 24 г металла (32,2% от веса брикета) и 19,5 г шлака (26,1% от веса брикета).

По результатам можно заключить, что при содержании $Fe_{\text{общ}} = 34\%$ выход железа составляет практически 94,7%, что указывает на работу углерода связующего как восстановителя (в брикете содержание углерода составляет $C = 19,1\%$ с учетом углерода связки).

9.1.3 Высокотемпературные испытания брикетов на размягчение и восстанавливаемость

Одним из параметров, характеризующих поведение шихты при высокой температуре, характерной для доменной печи, является температура размягчения железорудных материалов и восстанавливаемость. Методика разработана для исследования качества агломерационного сырья, однако в практике применяется для сравнения поведения различных железорудных материалов при высоких температурах в доменной печи. В данном исследовании использована эта методика, описанная в п. 6.4.

Поведение материала при размягчении характеризуется температурой первичной усадки (до начала усадки), температурой начала размягчения (начало крутого падения – истинная пластическая деформация) и температурой, характеризующей конец размягчения, когда первоначальная высота слоя материала уменьшилась на 40%.

Факторами, определяющими температуру размягчения железорудных материалов, являются: минералогический и химический составы, степень дисперсности и гомогенности оксидов, степень восстановленности железа к моменту начала размягчения, крупность материалов, характер атмосферы и т.д.

Для сравнения в табл. 9.9 приведены стандартные величины размягчения для распространенных железорудных материалов.

Брикет ДМЗ и лабораторный брикет после извлечения из тигля не потеряли свою форму. Прочность после отжига до температуры 1240°C составила 12-20 кг/см².

Таблица 9.9 – Сравнительные результаты испытаний брикета ДМЗ на размягчение

Материал	Начало раз- мягчения, °С	Конец раз- мягчения, °С	Интервал, °С	Приме- чание
Лебединская аглоруда	960	1150	190	Усадка 40%
Бурый железняк	880	1080	200	Усадка 40%
Марганцевая руда	930	1120	190	Усадка 40%
Колошниковая пыль	870	1060	190	Усадка 40%
Брикет ДМЗ 15x15x40 мм	1000	1240	240	Усадка 19%
Брикет ДМЗ фракция 3-5 мм	880	1000	120	Усадка 33%
Брикет лабораторный Ø30x40 мм	990	1240	250	Усадка 35%

Материалы всех трех образцов были подвергнуты химическому анализу для определения восстановимости и степени металлизации железа. Результаты представлены в табл. 9.10.

Таблица 9.10 – Результаты определения восстановимости и степени металлизации железа в образцах

Материал	Степень восстановления, Ψ_1 , %	Степень металлизации железа, Ψ_2 , %	Прочность после отжига, кг/см ²
1	2	3	4
Брикет ДМЗ 15x15x40 мм	74	68,7	20,5

Окончание таблицы 9.10

1	2	3	4
Брикет ДМЗ фракция 3-5 мм	83,4	86,3	не испытыва- лась
Брикет лабораторный Ø30x40 мм	87,6	91,2	12,46

Степень восстановления определяли по формуле, приведенной в п. 6.4.

9.2 Опытнo-промышленное опробование технологии брикетирования на технологической базе КП Коммунаэкоресурсы

На полупромышленной установке КП Коммунаэкоресурсы было проведено опробование технологии прессования опытной шихты базового состава с использованием связующего СБ в количестве 10%. Установка представляет собой последовательно расположенные шнековые смеситель и пресс, которые позволяют получать непрерывный поток материала цилиндрической формы диаметром 40 мм в четыре ручья. Прочность после прессования составила 20-32 кг/см². Брикетy прошли упрочняющую выдержку, после которой прочность составила через 15 суток 34-54 кг/см².

На этом же оборудовании, по аналогичной технологии был получен брикет угольного штыба диаметром 32 мм, прочность которого после прессования составила 22-29 кг/см², а после 15 суток выдержки – 58 кг/см². Данный эксперимент позволил сделать вывод о том, что принятое связующее СБ эффективно в равной степени, как для железосодержащих отходов, так и для угольного штыба. Поэтому содержание угольного штыба в брикете при необходимости может быть увеличено.

Проведена сравнительная проверка стабильности и однородности прочности брикетов производства ОАО Брикет (г. Донецк), ко-

торые ранее давали разброс величины прочности 60-164 кг/см². Проверка прочности 10 брикетов из одной партии показала величину 51,7±5 кг/см² (партия свежеизготовленная, выдержка 5 суток), результаты испытаний приведены в табл. 9.11.

Таблица 9.11 – Показатели прочности брикетов ОАО Брикет
(5 суток выдержки)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Прочность, кг/см ²	52	54	54	63	59	40	37	50	56	55	51,7

Испытания опытной партии брикетов ОАО Брикет с марганцевой рудой показали прочность на раздавливание в среднем 55 кг/см².

Сравнение результатов свидетельствует о том, что брикеты ОАО Брикет (г. Донецк) имеют прочность одного порядка с прочностью брикетов, отпрессованных на шнековом прессе, но после временной выдержки 15 суток.

На следующем этапе исследований с применением брикетировочного пресса типа Б-6234 был получен опытный образец брикета диаметром 105 мм базового состава.

Технические характеристики брикета:

- компоненты брикета, %: смесь 1 базовая 80, в том числе колошниковая пыль 44; доменный шлак 32; окалина вторичная 4; известь 10; связующее СБ 10;
- размеры: диаметр 105 мм, высота 105±5 мм;
- плотность брикета 2,46 г/см³;
- вес одного брикета 2,28 кг;
- прочность на сброс (после 4 сбросов с высоты 2 м) 98,2%;
- прочность на раздавливание свежеотпрессованных брикетов с торца составляет 194-263 кг/см², с боковой поверхности – 62-69 кг/см², в том числе после выдержки 10 суток – 240 кг/см²;
- характер разрушения – пластичный без растрескиваний и мелочи;

- водопоглощение 0,8%.

Технические характеристики брикетировочного пресса:

- усилие прессования 2,5 МН (250 тс);
- для брикета диаметром 105 мм удельное давление равно 320 МПа;
- давление в гидросистеме 200 кг/см²;
- ход поршня 355 мм;
- усилие трамбовки 0,016 МН;
- усилие подпрессовки 0,16 МН;
- установочная мощность 30 кВт;
- производительность пресса 2,1-2,3 т/ч на чугунной стружке с получением брикета с плотностью 5 г/см³;
- расчетная производительность пресса на рудугольном брикете плотностью 2,4 г/см³ составляет $2,2/5 \cdot 2,4 = 1,056$ т/час или 24 т/сутки.

9.3 Требования к составу и техническим характеристикам оборудования для линии по производству железосодержащих брикетов

Технология брикетирования включает в себя следующие операции:

- смешивание железосодержащих компонентов шихты с целью усреднения состава и влажности;
- разогрев и дозирование связующего;
- смешивание компонентов шихты и связующего (шнековый смеситель);
- подача шихты на прессование (конвейер ленточный);
- непосредственно прессование с усилием около 100 МПа (валковый или штемпельный пресс соответствующей производительности);

- складирование готовой продукции в помещении для технологической выдержки;
- обеспечение достаточной вентиляции в рабочих помещениях для удаления паров масел и связующего.

В связи с вышеперечисленным, состав оборудования для линии по брикетированию железосодержащих отходов должен быть следующим:

- бункера для хранения компонентов шихты, колошниковой пыли, прокатной окалины вторичной, доменного шлама, угольного штыба (коксовой мелочи), для других компонентов (при необходимости);
- ленточные питатели;
- смеситель шнековый;
- емкость с подогревом 150-200°C для связующего;
- насос-дозатор для подачи связки в смеситель;
- пресс брикетировочный с усилием 100 МПа;
- ленточная сушилка;
- колосниковая решетка для отсева мелочи;
- расходный бункер;
- ленточный конвейер;
- склад готовых брикетов объемом (площадью), достаточным для технологической выдержки продукции в течение 10 суток;
- система вентиляции (включая циклон, местный газоотсос, зонты).

9.4 Расчет эффективности замены в шихте доменной печи окатышей ЛебГОКа и СевГОКа на брикеты из отходов ДМЗ

Расчет эффективности замены в шихте доменной печи окатышей ЛебГОКа и СевГОКа на брикеты из отходов ДМЗ выполнен исходя из следующих положений:

– Генерация колошниковой пыли составляет 48000 т/год. При содержании колошниковой пыли в брикете ДМЗ 50%, его производство должно составить 96000 т/год. При годовом производстве чугуна в 1 млн. т имеем расход брикета на 1 т чугуна 96 кг/т. Принимается расход 100 кг брикета/т чугуна.

– Состав «Шихта 1» определен без применения доменного шлама, исходя из того, что не решен вопрос его обезвоживания (особенно в зимний период).

– Состав «Шихта 2» – это базовый состав на связующем СБ, в котором доли компонентов пропорциональны среднегодовой генерации их на ДМЗ.

– Состав «Шихта 3» – это базовый состав на цементном связующем, который принят для сравнения.

– Состав «Шихта 4» – это базовый состав на жидком стекле (ЖС) в качестве связующего, принят для сравнения.

Исследования прочности проводились по составу Шихта 2, который обеспечивает утилизацию всех генерируемых железосодержащих отходов ДМЗ (кроме прокатной окалины первичной) в пропорциях, соответствующих их генерации на заводе.

Далее выполнены расчеты расходов различных компонентов для условий внедрения всех вариантов шихты по одной и той же методике.

Расчет для брикетов ДМЗ состава Шихта 1.

Составляющие брикета Шихта 1, %: окалина первичная 20, колошниковая пыль 50, антрацитовый штыб 20, связующее 10.

Расчет ведется на удельный расход брикетов ДМЗ (Шихта 1) 100 кг/на т чугуна, который вносит 36,66 кг железа.

1. При вводе брикетов ДМЗ можно вывести из шихты ДП окатышей ЛебГОКа $36,66 / 0,6573 = 55,77$ кг, где 0,6573 – доля Fe в окатышах.

2. С окатышами ЛебГОКа выводится шлака $55,77 \cdot 0,067 = 3,74$ кг, где 0,067 – доля шлака в окатышах ЛебГОКа.

3. Выводится из шихты доломитизированный известняк, который шел на ошлакование окатышей ЛебГОКа $55,77 \cdot 0,01 \cdot (5,3 \cdot 1,22 - 0,40) / 0,44 = 7,69$ кг, где 5,3 – процентное содержание кремнезема в окатышах, 1,22 – основность шлака, 0,44 – доля извести в доломитизированном известняке с учетом MgO.

4. При вводе брикетов ДМЗ выход шлака увеличится на $10,98 - 3,74 = 7,24$ кг, где 10,98 – выход шлака из 100 кг брикетов ДМЗ, 3,74 – выход шлака из выводимых окатышей ЛебГОКа.

5. При вводе брикетов ДМЗ (состава Шихта 1) увеличится расход доломитизированного известняка на $(8,6 \cdot 1,22 - 2,38) / 0,44 = 18,44$ кг.

6. Общий расход известняка увеличится на $18,44 - 7,69 = 10,75$ кг.

7. При вводе брикетов ДМЗ расход кокса снижается на $31,75 / 0,85 \cdot 0,8 - 7,24 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 - 10,75 \cdot 4,0 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 27,18$ кг (6,9%), где 0,85 – доля углерода в коксе, 0,8 – коэффициент использования углерода брикетов, 3,5 – изменение удельного расхода кокса при изменении выхода шлака на 100 кг/т чугуна, %, 4,0 т – изменения удельного расхода кокса при изменении расхода доломитизированного известняка на 100 кг/т чугуна, %. Сводные результаты расчета для шихты 1 представлены в табл. 9.12.

Таблица 9.12 – Калькуляция себестоимости брикета (Шихта 1)

№ п/п	Статьи расходов	Расходный коэффициент, т/т	Цена***, руб.	Затраты, руб/т
1	Колошниковая пыль	0,5	12,5	6,25
2	Окалина прокатная	0,2	375	75,00
3	Штыб АШ	0,2	750	150,00
4	Известковая мука	0,085	37,5	3,15
5	Связующее СБ	0,1	5000,0	500,00
6	Расходы по переделу		250,0	250,00
	ИТОГО			981,4

*** – цены взяты ориентировочные

Расчет для брикетов ДМЗ (состава Шихта 2) выполнен по тем же пунктам, что и предыдущий (по аналогии).

Составляющие брикета Шихта 2, %: окалина вторичная 3,6, колошниковая пыль 46,9, доменный шлак 32,9, известковая мука 8,3, связующее 8,3.

1. $34,90/0,6573 = 53$ кг;
2. $53 \cdot 0,067 = 3,55$ кг;
3. $53 \cdot 0,01(5,3 \cdot 1,22 - 0,40)/0,44 = 7,3$;
4. $22,0 - 3,55 = 18,45$ кг;
5. $(13,7 - 6,8 \cdot 1,22)/0,44 = 12,28$ кг.

В связи с увеличением основности брикетов ДМЗ (Шихта 2) доля доломитизированного известняка уменьшается.

6. Общий расход известняка снижается на $7,3 + 12,28 = 19,58$ кг;

7. $19,10/0,85 \cdot 0,8 - 18,45 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 + 12,28 \cdot 4,0 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 17,36$ кг (4,4%).

Сводные результаты расчета для шихты 2 показаны в табл. 9.13.

Таблица 9.13 – Калькуляция себестоимости брикета (Шихта 2)

№ п/п	Статьи расходов	Расходный коэффициент, т/т	Цена***, руб.	Затраты, руб/т
1	Колошниковая пыль	0,47	12,5	5,88
2	Окалина вторичная	0,034	12,5	0,43
3	Доменный шлак	0,33	12,5	4,12
4	Известковая мука	0,083	37,5	3,13
5	Связующее СБ	0,083	5000,00	415,00
6	Расходы по переделу		250,00	250,00
	ИТОГО			678,55

Расчет для брикетов ДМЗ (состава Шихта 3) выполнен по аналогии с предыдущими.

Составляющие брикета Шихта 3, %: окалина первичная 3,4; колошниковая пыль 47,6; доменный шлак 34; связующее (портландцемент) 15.

1. $35,87/0,6573 = 54,57$ кг;
2. $54,57 \cdot 0,067 = 3,65$ кг;
3. $54,57 \cdot 0,01 \cdot (5,3 \cdot 1,22 - 0,4)/0,44 = 7,52$ кг;
4. $31,28 - 3,65 = 27,63$ кг;
5. $(17,75 \cdot 1,22 - 12,41)/0,44 = 21,0$ кг;
6. $21,0 - 7,52 = 13,48$ кг;
7. $10,15/0,85 \cdot 0,8 - 27,63 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 - 13,48 \cdot 4,0 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 8,97$ кг (2,3%).

Сводные результаты расчета для шихты 3 приведены в табл. 9.14.

Таблица 9.14 – Калькуляция себестоимости брикета (Шихта 3)

№ п/п	Статьи расходов	Расходный коэффициент, т/т	Цена***, руб.	Затраты, руб/т
1	Колошниковая пыль	0,476	12,5	5,88
2	Окалина вторичная	0,034	12,5	0,43
3	Доменный шлак	0,34	12,5	4,12
4	Связующее цемент	0,15	1250,00	187,5
5	Расходы по переделу		250,00	250,00
	ИТОГО			447,93

Расчет для брикетов ДМЗ (состава Шихта 4).

Составляющие брикета Шихта 4, %: окалина первичная 3,6; колошниковая пыль 50,4; доменный шлак 36; связующее (жидкое стекло) 10.

1. $37,71/0,6573 = 57,37$ кг;
2. $57,37 \cdot 0,067 = 3,84$ кг;
3. $57,37 \cdot 0,01 \cdot (5,3 \cdot 1,22 - 0,4)/0,44 = 7,90$ кг;
4. $21,73 - 3,84 = 17,89$ кг;
5. $(13,14 - 8,55 \cdot 1,22)/0,44 = 6,15$ кг.

В связи с увеличением основности брикетов ДМЗ расход доломитизированного известняка уменьшается.

6. Общий расход известняка снижается на $7,90 + 6,15 = 14,05$ кг;

7. $10,68/0,85 \cdot 0,8 - 17,89 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 + 14,05 \cdot 4,0 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 9,8$ кг (2,5%).

Сводные результаты расчета для шихты 4 представлены в табл. 9.15.

Таблица 9.15 – Калькуляция себестоимости брикета (Шихта 4)

№ п/п	Статьи расходов	Расходный коэффициент, т/т	Цена***, руб.	Затраты, руб/т
1	Колошниковая пыль	0,504	12,5	6,30
2	Окалина вторичная	0,036	12,5	0,45
3	Доменный шлак	0,36	12,5	4,50
4	Связующее ЖС	0,10	750,00	75,00
5	Расходы по переделу		250,00	250,00
	ИТОГО			336,25

Далее выполнены расчеты статей калькуляции себестоимости чугуна, которые изменяются при замене окатышей ЛебГОКа и окатышей СевГОКа на брикеты из отходов ДМЗ.

Расчетный состав брикета ДМЗ приведен в табл. 9.16.

Таблица 9.16 – Состав брикета ДМЗ (расчетный)

Состав	Fe _{общ}	CaO	SiO ₂	C	S	∑ шлакообразующих	Связующее
Шихта 1	36,66	2,38	8,6	31,75	0,58	10,98	СБ
Шихта 2	34,9	13,7	6,8	19,1	0,33	22,00	СБ
Шихта 3	35,87	12,41	17,75	10,15	0,36	31,28	Цемент
Шихта 4	37,71	13,14	8,55	10,68	0,36	21,73	ЖС

Для сравнения в табл. 9.17 приведен химический состав окатышей СевГОКа и ЛебГОКа, принятый для расчета.

Таблица 9.17 – Химический состав окатышей СевГОКа и Леб-ГОКа, %

Материал	Fe _{общ}	CaO	SiO ₂	∑ шлакообразующих
Окатыши Сев-ГОК	60,1	3,9	7,9	12,95
Окатыши Леб-ГОК	65,73	0,4	5,3	6,7

Расчет выполнен на удельный расход брикетов ДМЗ 100 кг/т чугуна.

Для состава брикета ДМЗ Шихта 1.

1. При вводе брикетов ДМЗ выводится окатышей СевГОКа: $36,66/0,601 = 61$ кг.

2. С окатышами СевГОКа выводится шлака: $61 \cdot 0,1295 = 7,9$ кг.

3. Выводится из шихты доломитизированный известняк, который шел на ошлакование окатышей СевГОКа: $0,01 \cdot 61 \cdot (7,9 \cdot 1,22 - 3,9)/0,44 = 13$ кг, где 1,22 – основность шлака, 0,44 – доля извести в доломитизированном известняке.

4. При вводе брикетов увеличится выход шлака: $10,98 - 7,9 = 3,08$ кг.

5. При вводе брикетов увеличивается расход доломитизированного известняка: $(8,6 \cdot 1,22 - 2,38)/0,44 = 18,44$ кг.

6. Общий расход доломитизированного известняка увеличится на: $18,44 - 13 = 5,44$ кг.

7. При вводе брикетов снижается расход кокса на: $31,75/0,85 \cdot 0,8 - 3,08 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 - 5,44 \cdot 4 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 28,6$ кг (7,8%). Здесь 0,85 – доля углерода в коксе, 0,8 – коэффициент использования углерода брикетов, 3,5 – процент изменения расхода кокса при изменении выхода шлака на 100 кг/т чугуна, %, 3,95 – 1% удельного расхода кокса, кг/т, 4 – процент изменения удельного расхода кокса при изменении расхода доломитизированного известняка на 100 кг/т чугуна, %.

Долее, по аналогии с расчетом состава Шихта 1, рассчитаны другие составы.

Для состава брикета ДМЗ Шихта 2.

1. $34,90/0,601 = 58$ кг;
2. $58 \cdot 0,1295 = 7,51$ кг;
3. $0,01 \cdot 58 \cdot (7,9 \cdot 1,22 - 3,9)/0,44 = 7,56$ кг;
4. $22,0 - 7,51 = 14,49$ кг;
5. $(-6,8 \cdot 1,22 + 13,7)/0,44 = 12,28$ кг;
6. Общий расход доломитового известняка снижается на: $7,56 + 12,28 = 19,84$ кг;
7. $19,10/0,85 \cdot 0,8 - 14,49 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 + 19,84 \cdot 4 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 19,10$ кг (4,84%).

Для состава брикета ДМЗ Шихта 3.

1. $35,87/0,601 = 59,7$ кг;
2. $59,7 \cdot 0,1295 = 7,73$ кг;
3. $0,01 \cdot 59,7 \cdot (7,9 \cdot 1,22 - 3,9)/0,44 = 7,78$ кг;
4. $31,28 - 7,73 = 23,55$ кг;
5. $(-10,15 \cdot 1,22 + 17,75)/0,44 = 5,36$ кг;
6. Общий расход известняка снижается на: $7,78 + 5,36 = 13,14$ кг;
7. $10,15/0,85 \cdot 0,8 - 23,55 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 + 13,14 \cdot 4 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 8,37$ кг (2,12%).

Для состава брикета ДМЗ Шихта 4.

1. $37,71/0,601 = 62,7$ кг;
2. $62,7 \cdot 0,1295 = 8,12$ кг;
3. $0,01 \cdot 62,7 \cdot (7,9 \cdot 1,22 - 3,9)/0,44 = 8,17$ кг;
4. $21,73 - 8,12 = 13,61$ кг;
5. $(13,14 - 8,55 \cdot 1,22)/0,44 = 6,15$ кг;
6. Общий расход доломитового известняка снижается на: $8,17 + 6,15 = 14,32$ кг;
7. $10,68/0,85 \cdot 0,8 - 13,61 \cdot 3,5 \cdot 3,95 \cdot 0,01 + 14,32 \cdot 4 \cdot 3,95 \cdot 0,01 = 10,43$ кг (2,64%).

Все рассчитанные величины приведены в табл. 9.18.

Таблица 9.18 – Статьи калькуляции себестоимости чугуна, которые изменяются при замене окатышей ЛебГОКа и СевГОКа на брикеты из отходов ДМЗ

№ п/п	Статья расходов	Шихта 1 Расход, кг/т чугуна	Шихта 2 Расход, кг/т чугуна	Шихта 3	Шихта 4
Для ЛебГОКа					
1	Окатыши ЛебГОК	-55,7	-53,0	-54,5	-57,37
2	Кокс	-27,18	-17,36	-8,97	-9,8
3	Доломитовый известняк	+10,75	-19,58	-13,48	-14,05
4	Брикет ДМЗ	+100,0	+100,0	+100	+100
5	Выход шлака	+7,2	+18,45	+27,63	+17,98
Для СевГОКа					
1	Окатыши СевГОК	-61	-58	-59,7	-62,7
2	Кокс	-28,6	-19,1	-8,37	-10,43
3	Доломитовый известняк	+5,44	-19,84	-13,14	-14,32
4	Брикет ДМЗ	+100,0	+100,0	+100	+100
5	Выход шлака	+3,08	+14,49	+23,55	+13,61

На основе проведенных исследований составлены технические требования к железосодержащему брикету, предназначенному для использования в доменной печи, представленные в Приложении 1. В Приложении 2 приведены характеристики связующего СБ.

9.5 Выводы по результатам исследований процесса брикетирования железосодержащих отходов Донецкого металлургического завода

Проведенный комплекс исследований и разработка технологии подготовки железосодержащих отходов ДМЗ к утилизации в доменной печи позволили заключить следующее.

1. Выполнен анализ состояния брикетирования мелкодисперсных железосодержащих отходов в СНГ.

2. Оработана методика исследования технологии брикетирования и оценки прочности полученных брикетов.

3. Из опробованных связующих выделено связующее СБ (продукт из отходов нефтепереработки), которое позволяет брикетировать мелкодисперсные материалы с высоким содержанием коксовой мелочи (до 18% содержания углерода), поскольку является эффективным связующим для углеродсодержащих материалов.

4. Определена возможность получения брикетов из мелкодисперсных железосодержащих отходов ДМЗ (колошниковая пыль, доменный шлак, вторичная прокатная окалина) со связующим СБ в количестве 10% с прочностью на раздавливание 100-130 кг/см² (для лабораторного брикета, полученного при удельном усилии прессования до 700 кг/см²).

5. Высокотемпературные испытания полученных брикетов ДМЗ показали: температура начала и окончания размягчения материала брикета составляет, соответственно, 880 и 1000°C; брикет сохраняет форму после отжига при температуре 1240°C; степень металлизации железа при этом составляет 68,7-91,2%; степень восстановления – 74-87,6%.

6. Определены схема и состав оборудования технологической линии по утилизации мелкодисперсных железосодержащих отходов и для производства брикета ДМЗ.

7. Брикетирование на промышленном прессе Б-6234 обеспечило получение брикета диаметром 105 мм с требуемой прочностью (194-263 кг/см²), что позволяет рекомендовать

разработанную технологию к опытно-промышленному опробованию.

8. Для опытно-промышленного опробования технологии производства железосодержащего брикета с применением связующего СБ предлагается использовать существующую технологическую базу КП Коммунаэкоресурс, содержащую:

- участок шнековых смесителей и дозаторов для смешивания и подготовки шихты к брикетированию;
- участок прессования металлической стружки с промышленным прессом Б-6234 для изготовления опытно-промышленной партии брикетов.

9. Проведенные исследования позволили сформулировать технические требования к железосодержащему брикету, предназначенному для использования в доменной печи (см. Приложение 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тысячи лет человечество пользуется природными ресурсами планеты. На определенной стадии взаимодействия человека с окружающей средой возобновимые природные ресурсы становятся невозобновимыми. Многие месторождения полезных ископаемых с высоким содержанием ценных компонентов уже выработаны. Новые месторождения становятся более труднодоступными, их разработка и получение кондиционных концентратов - более затратными.

Ежегодно из недр извлекается и перерабатывается около 100 млрд. т минеральных ресурсов, в том числе топливных, перемещаются гигантские массы горной породы. При переработке используется до $100 \cdot 10^{10}$ т воды и расходуется порядка $10 \cdot 10^{12}$ Вт энергии. Перемещение больших количеств пород и материалов нарушает равновесие в природной среде, т.к. эти процессы ей не свойственны. Продукты технологий, произведенные человеком, выбрасываются на свалки через какое-то время после их производства. Таким образом, можно считать, что человечество производит в основном отходы, и их количество постоянно растет в соответствии с ростом промышленного производства.

В любом хозяйственном цикле образующиеся отходы и побочные эффекты не устранимы. Они могут быть лишь переведены из одной физико-химической формы в другую или перемещены в пространстве. Это говорит о том, что создание безотходного производства практически невозможно. Однако, рациональное использование отходов является вполне посильной задачей.

Представленные выше результаты исследований и полупромышленных испытаний для железосодержащих отходов металлургических заводов и древесных отходов при производстве брикетов, проведенные в Донецком национальном техническом университете, свидетельствуют о возможности их рационального и эффективного использования. При этом, по сравнению с агломерацией и окомкованием, процесс брикетирования является наиболее доступным и экологичным.

На основании исследований разработаны регламенты и режимы брикетирования шихты, содержащей отходы, а также рекомендации по разработке технологических схем процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вегман, Е. Ф. Окускование руд и концентратов / Е. Ф. Вегман. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Metallurgy, 1984. – 256 с.
2. Политехнический словарь / гл. ред. А. Ю. Ишлинский. – 2-е изд. – Москва : Совет. энцикл., 1980. – 656 с.
3. Использование железококсовых брикетов на цементной связке в доменной плавке / А. С. Белкин [и др.] // Metallurg. – 2003. – № 4. – С. 39-41.
4. Садовой, М. І. Розробка параметрів для отримання багатоконпонентних брикетів із застосуванням твердого та рідкого зв'язуючого / М. І. Садовой, О. М. Корчевський // Технології та процеси в гірництві та будівництві : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Донецьк. – Донецьк. – 2014. – С. 28-33.
5. Ярхо, Е. Н. Экономическая эффективность подготовки железных руд к плавке / Е. Н. Ярхо. – Москва : Metallurgy, 1974. – 96 с.
6. Равич, Б. М. Брикетирование руд / Б. М. Равич. – Москва : Недра, 1982. – 183 с.
7. Справочник по обогащению руд. В 3 т. / редкол.: О. С. Богданов [и др.]. – Москва : Недра, 1982. – Т. 1. – 366 с.
8. Равич, Б. М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б. М. Равич. – Москва : Metallurgy. – 1975. – 231 с.
9. Разработка комплексной системы утилизации железосодержащих отходов / Л. А. Смирнов В. А. Кобелев, В. Н. Потанин [и др.] // Сталь. – 2001. – № 1. – С. 89-90.
10. Справочник по обогащению руд. В 3 т. / редкол.: О. С. Богданов [и др.]. – Москва : Недра, 1982. – Т. 1. – 366 с.
11. Менковский, М. А. Связующие вещества в процессах окускования горных пород / М. А. Менковский, Б. М. Равич, В. П. Окладников. – Москва : Недра, 1977. – 183 с.

12. Корчевський, О. М. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокomпонентних брикетів / О. М. Корчевський, А. М. Сурженко, М. І. Садовой // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. – № 2(35). – С. 9-15.
13. Воскобойников, В. Г. Технология и экономика переработки железных руд / В. Г. Воскобойников, Л. П. Макаров. – Москва : Metallurgy, 1977. – 256 с.
14. Бабанин, В. И. Разработка и внедрение новой технологии брикетирования мелкофракционных материалов с жидким стеклом / В. И. Бабанин, А. Я. Еремин, Г. Н. Бездежский // Metallurg. – 2007. – № 1. – С. 68-71.
15. Тюренков, Н. Г. Брикетирование руд / Н. Г. Тюренков. – Москва : Metallurgizdat, 1948. – 128 с.
16. Влияние жидкого стекла на прочность железорудных брикетов при сушке / В. М. Борисов [и др.] // Бюллетень ЦНИИ черной металлургии. – 1971. – № 23(667). – С. 17-20.
17. Ожогин, В. В. Совершенствование ресурсосберегающей технологии получения и использования высокопрочных шламовых брикетов в аглодоменном производстве : дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / В. В. Ожогин. – Мариуполь : ПГТУ, 2004. – 207 с.
18. Вешан, Е. Ф. Теория и технология агломерации / Е. Ф. Вешан. – Москва : Metallurgy, 1975. – 288 с.
19. Интегральные показатели металлургических свойств окускованного железорудного сырья / А. Р. Жак, Н. В. Ратников, Ю. С. Юсфин [и др.] // Сталь. – 1998. – № 3. – С. 10-13.
20. Интегральные показатели химического состава окускованного железорудного сырья / А. Р. Жак, Н. В. Ратников, Ю. С. Юсфин [и др.] // Сталь. – 1998. – № 11. – С. 7-12.
21. Ожогин, В. В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья : монография / В. В. Ожогин. – Мариуполь : ПГТУ, 2010. – 442 с.

22. Экономика чёрной металлургии СССР / Н. П. Банный, А. А. Федотов, П. А. Ширяев [и др.]. – Москва : Металлургия, 1978. – 344 с.
23. Бычков, С. В. Комплексная утилизация железосодержащих мелкофракционных отходов в условиях действующего металлургического завода [Электронный ресурс] / С. В. Бычков // Металлургия-ИНТЕХЭКО-2008 : сб. докл. Междунар. конф., 25-26 марта 2008 г., г. Москва. – Электрон. дан. – Москва, 2008. – С. 58-60. – Режим доступа: http://www.intecheco.ru/doc/sb_met2008.pdf. – Загл. с экрана.
24. Елишевич, А. Т. Брикетирование полезных ископаемых / А. Т. Елишевич. – Москва : Недра. – 1989. – 300 с.
25. Котляр, А. Ю. Металлургия благородных металлов : учеб. пособие / А. Ю. Котляр. – Москва : АСМИ, 2002. – 466 с.
26. Носков, В. А. Исследование технологических параметров и режимов получения брикетов из металлургических отходов / В. А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 5. – С. 115-117.
27. Разработка и внедрение комплексной технологии переработки лома аккумуляторных батарей / А. Ю. Шустров, Ю. А. Маценко, В. И. Никифоров [и др.] // Цветные металлы. – 2004. – № 1. – С. 35-39.
28. ТТИ 2.2-08-02-81. Типовая технологическая инструкция о порядке учета образования и использования железосодержащих шламов (пылей) на металлургических предприятиях Минчермета СССР : утв. Техн. упр. Минчермета СССР 26.06.81 : срок действия с 01.01.82 / Минчермет СССР. – Свердловск, 1982. – 32 с.
29. Кравченко, Н. Д. Магнитная сепарация отходов цветных металлов / Н. Д. Кравченко. – Москва : Металлургия, 1986. – 116 с.
30. Бредихин, В. Н. Современные технологии для переработки отходов цветных металлов / В. Н. Бредихин. – Москва : ЦНИИЭИЦМ, 1991. – Вып. 1. – 74 с.

31. Зарічанська, Є. В. Оцінка економічних умов ефективного поводження з промисловими відходами / Є. В. Зарічанська // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – Хмельницький, 2010. – Вип. 3, т. 1(151). – С. 56-59.
32. Эсезобор, Д. Э. Разработка малоотходной технологии аглодоменного производства : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / Д. Э. Эсезобор. – Донецк : Донец. гос. техн. ун-т, 1994. – 20 с.
33. Ожогин, В. В. Дефекты брикетов и способы их устранения / В. В. Ожогин, И. А. Ковалевский, А. И. Ковалевский // Metallургические процессы и оборудование. – 2008. – № 4. – С. 36-39.
34. Комплексное использование сырья и отходов / Б. М. Равич, В. П. Окладников, В. Н. Лыгач [и др.]. – Москва : Химия, 1988. – 288 с.
35. Носков, В. А. Перспектива подготовки и использования мелкофракционных железосодержащих отсеков сталеплавильных шлаков в доменной плавке / В. А. Носков, Н. М. Можаренко, Б. Н. Маймур // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 1. – С. 119-121.
36. Оборудование для брикетирования отходов в производстве ферросплавов / В. И. Гернер [и др.] // Сталь. – 2000. – № 3. – С. 36-39.
37. Переработка мелкофракционных отходов металлургии на брикетной фабрике "Донецкая" / А. В. Зуев [и др.] // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 3. – С. 105-107.
38. Буторина, И. В. Утилизация промышленных и бытовых отходов / И. В. Буторина. – Мариуполь : Стратегия, 1999. – 150 с.
39. Брикетирование как полноправный метод окускования металлургического сырья / В. В. Ожогин, А. А. Томаш,

- И. А. Ковалевский [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – Вып. 2. – С. 54-58.
40. Елишевич, А. Т. Брикетирование угля со связующим / А. Т. Елишевич. – Москва : Недра, 1972. – 216 с.
41. Тихонов, Б. С. Тяжелые цветные металлы : справочник / Б. С. Тихонов. – Москва : Цветметинформация, 1999. – Т. 1. – 416 с.
42. Справочник по обогащению руд. В 3 т. / редкол.: О. С. Богданов [и др.]. – Москва : Недра, 1982. – Т. 1. – 366 с.
43. Производство агломерата и окатышей : справ. изд. / С. В. Базилевич, А. Г. Астахов, Г. М. Майзель [и др.]. – Москва : Metallurgia. – 1984. – 216 с.
44. Малооперационная технология получения брикетов из тонкодисперсных углеродистых материалов и отходов / В. М. Динельт, В. М. Левинец, М. С. Никишанин [и др.] // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 2007. – № 6. – С. 61-63.
45. Вторичные материальные ресурсы чёрной металлургии : справочник. В 2-х т. Т. 2: Шлаки, шламы, отходы обогащения железных и марганцевых руд, отходы коксохимической промышленности, железный купорос / В. Г. Барышников, А. М. Горелов, Г. И. Папков [и др.]. – Москва : Экономика, 1986. – 344 с.
46. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – Москва : Химия, 1991. – 320 с.
47. Ефремов, Г. И. Пылеочистка / Г. И. Ефремов, В. П. Лукачевский. – Москва : Химия, 1990. – 72 с.
48. Гончаров, Б. Ф. Техничко-экономические расчеты по производству чугуна / Б. Ф. Гончаров, И. С. Соломахин. – Харьков : Вища шк., 1979. – 176 с.
49. Вегман, Е. Ф. Краткий справочник доменщика / Е. Ф. Вегман. – Москва : Metallurgia, 1981. – 240 с.
50. Овчаренко, Н. Л. Неполомки хода доменных печей / Н. Л. Овчаренко. – Москва : Metallurgia, 1972. – 192 с.

51. Ярхо, Е. Н. Экономическая эффективность подготовки железных руд к плавке / Е. Н. Ярхо. – Москва : Metallurgy, 1974. – 96 с.
52. Методика металлургической оценки качества марганцевого сырья по его химическому составу / П. Ф. Мироненко, Ю. Б. Дедов, В. А. Гладких [и др.] // Сталь. – 2000. – № 8. – С. 29-31.
53. Дударенко, А. А. Концепция формализации управления качеством продукции по экономическому критерию / А. А. Дударенко, Т. А. Мазурова, А. Г. Чефранов // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 6. – С. 60-64.
54. Купряков, Ю. П. Вторичные материальные ресурсы цветной металлургии / Ю. П. Купряков. – Москва : Экономика, 1984. – 152 с.
55. Доменное производство : справ. изд. В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / под ред. Е. Ф. Вегмана. – Москва : Metallurgy. – 1989. – 496 с.
56. Рывнен, И. Ю. Брикетирование мелкозернистых и тонкодисперсных материалов со связующими / И. Ю. Рывнен // Кокс и химия. – 2000. – № 10. – С. 336-342.
57. Рентгенография / Я. С. Уманский, А. К. Трапезников, А. И. Китайгородский [и др.]. – Москва : Машгиз, 1951. – 310 с.
58. Бабанин, В. И. Брикетирование мелкозернистых материалов в ферросплавном производстве: опыт и возможности / В. И. Бабанин, А. Я. Ерёмин // Металлург. – 2006. – № 5. – С. 45-50.
59. Носков, В. А. Научные разработки ИЧМ в области брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов / В. А. Носков, Б. Н. Маймур // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. – 2004. – Вып. 8. – С. 363-369.
60. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – Москва : Metallurgy, 1980. – 496 с.

61. Уманский, А. М. Прессование порошковых материалов / А. М. Уманский. – Москва : Metallurgy, 1981. – 81 с.
62. Либенсон, Г. А. Основы порошковой металлургии. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г. А. Либенсон. – Москва : Metallurgy, 1987. – 208 с.
63. Пфлинсен, Х. Д. Применение брикетированных металлургических пылей в конвертерах ТМВ фирмы «Тиссен шталь» / Х. Д. Пфлинсен, В. Флорин, Р. Хефкен // Чёрные металлы. – 1989. – № 7. – С. 3-6.
64. Griscom, F. N. Fastmelt™ your waste to profit / F. N. Griscom, J. T. Kopfle, M. Landow // Skill. Mining Rev. – 1999. – V. 88, № 2. – P. 5-8.
65. Брикеты для цветной металлургии / С. Ф. Одинокоев, Н. В. Кузьмин, В. В. Кузнецов [и др.] // Сталь. – 2006. – № 9. – С. 47-48.
66. Носков, В. А. Современное состояние брикетирования техногенных отходов на металлургических предприятиях Украины / В. А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 6. – С. 90-94.
67. Эйдельман, Л. П. Состояние брикетирования в металлургии СССР / Л. П. Эйдельман // Чёрная металлургия. Бюл. ин-та Черметинформация. – 1981. – № 18. – С. 8-18.
68. Носков, В. А. Подготовка брикетированием мелкофракционных отходов металлургического и машиностроительного комплексов Украины к утилизации в металлургических агрегатах / В. А. Носков, Б. Н. Маймур, Н. И. Можаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 2. – С. 100-104.
69. Товаровский, И. Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного производства / И. Г. Товаровский. – Москва : Metallurgy, 1987. – 192 с.
70. Писи, Дж. Г. Доменный процесс. Теория и практика / Дж. Г. Писи, В. Г. Давенпорт. – Москва : Metallurgy, 1984. – 142 с.

71. Котенев, В. И. Новая технология получения комплексного металлургического сырья из железо- и углеродосодержащих отходов [Электронный ресурс] / В. И. Котенев, Е. Ю. Барсукова, И. Ф. Курунов. – Электрон. дан. – Москва, 2009. – Режим доступа: http://briket.ru/files/newpublications/novaya_technologia_polucheniya_kompleksnogo_met_siry_a_ecomashgeo.pdf. – Загл. с экрана.
72. Равич, Б. М. Брикетирование руд / Б. М. Равич. – Москва : Недра, 1982. – 183 с.
73. Ожогин, В. В. Дефекты брикетов и способы их устранения / В. В. Ожогин, И. А. Ковалевский, А. И. Ковалевский // Металлург. процессы и оборудование. – 2008. – № 4. – С. 36-39.
74. Ожогин, В. В. Совершенствование ресурсосберегающей технологии получения и использования высокопрочных шламовых брикетов в аглодоменном производстве : дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / В. В. Ожогин. – Мариуполь, ПГТУ, 2004. – 207 с.
75. Кузнецов, В. К. Ввод в эксплуатацию опытно-промышленной линии брикетирования окалины / В. К. Кузнецов // Сталь. – 2003. – № 7. – С. 96-97.
76. Кожевников, И. Ю. Окускование и основы металлургии : учеб. пособие для вузов / И. Ю. Кожевников, Б. М. Равич. – Москва : Металлургия, 1991. – 303 с.
77. Равич, Б. М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б. М. Равич. – Москва : Металлургия, 1975. – 231 с.
78. Справочник по обогащению руд. В 3 т. / редкол.: О. С. Богданов [и др.]. – Москва : Недра, 1982. – Т. 1. – 366 с.
79. Фоменко, А. И. Утилизация шламов металлургических производств / А. И. Фоменко // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2001. – № 11. – С. 70-71.
80. Раджи, О. И. Совершенствование технологии подготовки и утилизации металлургических шламов : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / О. И. Раджи. – Донецк, ДНТУ, 2004. – 21 с.

81. Корчевский, А. Н. Комплексное использование и переработка отвального шлака / А. Н. Корчевский К. В. Гуменюк, А. В. Пластовец // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. – № 1(34). – С. 22-27.
82. Современная технология производства железорудных окатышей / Л. А. Дрожилов, Н. Н. Бережной, К. Ю. Латков [и др.] // Чёрная металлургия. Бюл. ЦНИИЧермет. – 1973. – № 2. – С. 3-17.
83. Лурье, Л. А. Брикетирование в черной и цветной металлургии / Л. А.. Лурье. – Москва : Металлургиздат, 1963. – 324 с.
84. Экспериментальные исследования основных параметров и режимов брикетирования мелкофракционных техногенных отходов в валковых прессах / В. А. Носков, Б. Н. Маймур, В. И. Петренко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 6. – С. 104-107.
85. Экономика чёрной металлургии СССР / Н. П. Банный, А. А. Федотов, П. А. Ширяев [и др.]. – Москва : Металлургия, 1978. – 344 с.
86. Ожогин, В. В. Дефекты брикетов и способы их устранения / В. В. Ожогин, И. А. Ковалевский, А. И. Ковалевский // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 4. – С. 36-39.
87. Одинокоев, С. Ф. Брикет для цветной металлургии / С. Ф. Одинокоев, Н. В. Кузьмин, В. В. Кузнецов [и др.] // Сталь. – 2006. – № 9. – С. 47-48.
88. Кирьянов, Д. В. Самоучитель Mathcad 13 [Электронный ресурс] / Д. В. Кирьянов ; гл. ред. Е. Кондукова. – Электрон. дан. (1 файл). – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – Систем. требования: Acrobat Reader.
89. Ожогин, В. В. Комплексная оценка качества металлургического сырья / В. В. Ожогин, Н. С. Захаренко // Вестник Приазов. госуд. техн. ун-та. – Мариуполь. – 1999. – Вып. 8. – С. 254-256.

Приложение 1

Технические требования (проект) на поставку железосодержащих брикетов из отходов ДМЗ для использования в доменном производстве.

Настоящие технические требования распространяются на железосодержащие брикеты, изготовленные из отходов металлургического производства ДМЗ: колошниковой пыли, доменного шлама, вторичной прокатной окалины и др., поставляемые для использования в доменном цехе ДМЗ.

1. Сортамент железосодержащих брикетов

1.1. Габаритные размеры:

- диаметр не более 105 мм,
- высота от 50 до 105 мм.

1.2. Масса брикета:

от 1,1 до 2,2 кг.

2. Технические требования

2.1. Химический состав брикетов должен соответствовать следующим показателям.

№ п/п	Наименование показателей	Норма
1	Массовая железа общего, % не менее	32
2	Отношение CaO/SiO ₂ , не менее	1,2-1,4
3	Массовая доля углерода, %	14-20
4	Массовая доля серы, % не более	1,0
5	Массовая доля фосфора, % не более	0,06

2.2 Физические свойства брикетов:

- прочность на раздавливание 100 кг/см² (10 МПа);

- прочность на сбрасывание (4 сброса с высоты 2 м, отсев фракции >25 мм) не менее 90%;
- термостойкость (сохранение формы в восстановительной атмосфере) до 1000°C;
- фракционный состав крупности: фракции менее 25 мм не более 10%, фракции более 105 мм не допускаются;
- влажность не более 7%.

3. Требования безопасности

3.1. Брикеты не токсичны, при их использовании не происходит вредных пылевывделений; взрыво- пожаробезопасны.

4. Правила приемки и методы контроля.

4.1. Брикеты поставляются партиями по 60-500 т.

4.2. Каждая отгружаемая партия брикетов должна сопровождаться документом о качестве, в котором указывается:

- наименование предприятия изготовителя,
- наименование продукции,
- номер партии, дата изготовления,
- механическая прочность и химический состав,
- масса партии,
- дата отгрузки.

4.3. Определение химического состава брикетов осуществляется:

- массовая доля железа общего в соответствии с требованиями ГОСТ 23581.18-81,
- массовая доля оксида кальция в соответствии с требованиями ГОСТ 23581.16-81,
- массовая доля оксида кремния в соответствии с требованиями ГОСТ 23581.15-81,

- массовая доля серы в соответствии с требованиями ГОСТ 23581.20-81,
- Массовая доля фосфора в соответствии с требованиями ГОСТ 23581.19-81,
- массовая доля углерода в соответствии с требованиями МИ 232-58-64-2002,
- массовая доля влаги в соответствии с требованиями ДСТУ 3201.

5. Транспортирование и хранение

5.1. Транспортировку брикетов осуществляют навалом железнодорожным транспортом в соответствии с правилами, действующими при перевозках на этом виде транспорта для данного вида груза.

5.2. Допускается хранение брикетов на открытых площадках.

5.3. Гарантийный срок хранения на открытых площадках – 2 месяца, в закрытых помещениях – 6 месяцев.

Приложение 2

Связующее для сыпучих материалов марки СБ-М (ТУ У 24.6-00190443-145-2002), получаемое на основе продуктов нефтехимического синтеза.

Производитель фирма ИНКОР (г. Донецк)

Свойства:

1. Температура размягчения, °С 20-30 (по ГОСТ 11506).
2. Выход коксового остатка, % не менее 20 (ТУ У 322-00190443-146-2002).
3. Зольность, % 3 (по ГОСТ 1461).
4. Плотность, г/см³ (при 20°С) 1,15-1,20.
5. Элементарный состав, %

С	85,
Н	8,
О	7.
6. Химический состав, %

полимеры	83-86,
димер стирольный	6,0,
стирол	0,3,
метилстирол	0,6,
ацетофенон	3,0,
метилацетофенон	3,0,
крезолы	1,3.
7. Внешний вид: вязкая жидкость черного цвета.
8. IV класс опасности.
9. В настоящее время применяется на ОАО МК Азовсталь в качестве связующего для получения леточной массы на ДП.