

ООО «ИНСТИТУТ ГИПРОНИКЕЛЬ»

На правах рукописи

ОЗЕРОВ Сергей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ БРИКЕТИРОВАНИЯ
СУЛЬФИДНОГО МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И
СИЛИКАТНОГО ФЛЮСА**

Специальность: 05.16.02 – Metallургия чёрных, цветных и редких металлов

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Цемехман Лев Шлемович

Санкт-Петербург - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 БРИКЕТИРОВАНИЕ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ В ЦВЕТНОЙ И ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	13
1.1 Классификация связующих веществ	15
1.2 Брикетирование с использованием неорганических связующих	18
1.3 Брикетирование с органическими связующими	27
1.4 Комбинированные связующие	35
1.5 Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БРИКЕТИРОВАНИЯ	42
2.1 Механизм формирования брикета	42
2.2 Давление прессования	46
2.3 Гранулометрический состав	48
2.4 Влажность шихты	50
2.5 Связующие вещества	51
2.6 Температура прессования	58
2.7 Упрочняющие операции	59
2.8 Выводы по главе 2	62
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ ЗАСКЛАДИРОВАННОГО ПРОСОРА ПЕСЧАНИКА КАЙЕРКАНСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА	63
3.1 Описание конструкции лабораторного брикет-пресса	63
3.2 Материалы, используемые в исследовании	66
3.3 Методика проведения исследований	70
3.4 Исследование брикетируемости просора песчаника месторождения	
КУР УПНГ	72
3.4.1 Брикетирование в отсутствие связующих веществ	73
3.4.2 Брикетирование с ангидритом	74

3.4.3 Брикетирование со связующими применяемыми в строительной индустрии	77
3.4.4 Брикетирование с использованием смесей гашеной извести и ангидрита	82
3.4.5 Брикетирование с жидким стеклом	83
3.4.6 Брикетирование с водными растворами сульфатов никеля и меди	86
3.4.7 Брикетирование с техническим лигносульфонатом	89
3.4.8 Структура брикетов и эффективность использования связующих при брикетировании просора песчаника	91
3.5 Выводы по разделу 3.4	94
3.6 Описание технологического процесса брикетирования	98
ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА АО «КОЛЬСКАЯ ГМК»	101
4.1 Методика проведения исследований	105
4.1.1 Характеристика исходных материалов	105
4.1.2 Способы подготовки шихты и контроль качества брикетов	112
4.2 Результаты и их обсуждение	113
4.2.1 Исследование эффективности использования в качестве связующих водных растворов сульфатов	114
4.2.1.1 Сульфат алюминия	115
4.2.1.2 Сульфат натрия	118
4.2.1.3 Сульфат никеля	121
4.2.1.4 Сульфат меди	124
4.2.1.5 Сульфат железа (II)	126
4.2.1.6 Сульфат железа (III)	129
4.2.1.7 Раствор вскрытия железистого кека	131
4.2.1.8 Серная кислота	135
4.2.1.9 Выводы по разделу 4.2.1	137

4.2.2 Исследование эффективности комбинированных связующих	139
4.2.2.1 Лигносульфонат-Известь	139
4.2.2.2 Лигносульфонат-Стоки ЦЭН-1	141
4.2.2.3 Лигносульфонат-Сульфат никеля	141
4.2.2.4 Лигносульфонат-Сульфат меди	145
4.2.2.5 Лигносульфонат-Сульфат железа (II)	146
4.2.2.6 Лигносульфонат-Сульфат железа (III)	148
4.2.2.7 Лигносульфонат-Comprex A12	149
4.2.2.8 Выводы по разделу 4.2.2	156
4.2.3 Исследование эффективности органических связующих	158
4.2.3.1 Связующие компании «Kemira Oyj»	158
4.2.3.2 Связующие ООО «Полипласт Новомосковск»	160
4.2.3.3 Модифицированные лигносульфонаты	166
4.2.3.4 Поливиниловый спирт	169
4.2.3.5 Выводы по разделу 4.2.3	172
4.3 Выбор перспективных видов связующих и условий брикетирования ..	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	176
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	178
ПРИЛОЖЕНИЕ А	192
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	193
ПРИЛОЖЕНИЕ В	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	201
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	202

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

На текущий момент основной сырьевой базы металлургической промышленности являются мелкозернистые руды и концентраты, которые представляют собой продукты глубокого обогащения, оборотные материалы, техногенные отходы, ранее не вовлекавшиеся в переработку. Необходимость использования данных материалов объясняется количественным содержанием в них ценных компонентов.

Вовлечение в переработку мелкозернистых материалов часто осложняется их агрегатным состоянием. Во-первых, переработка их в некоторых металлургических агрегатах, таких как руднотермические, шахтные печи, горизонтальные конвертора Пирса-Смита сопряжена с возникновением аварийных ситуаций (хлопков, взрывов, выбросов расплава) и высокой степенью незавершенности производства. Во-вторых, возникает проблема транспортировки дисперсных материалов от мест их добычи или складирования непосредственно до металлургического агрегата. Транспортировку можно осуществлять с помощью пульпопроводов (в частности, данный способ реализован на Заполярном Филиале ПАО «ГМК «Норильский Никель» [1]), однако его строительство и эксплуатация требует высоких капитальных и эксплуатационных затрат, в известной степени сказывающихся на себестоимости металлов, и зачастую технологически и экономически неоправданно. Поэтому успешным способом вовлечения в переработку мелкозернистых материалов является их предварительное окускование.

В металлургической практике наибольшее распространение получили три способа окускования мелкодисперсных материалов: агломерация, грануляция (окомкование) и брикетирование. Основной задачей окускования является производство качественного окускованного продукта, обладающего необходимой прочностью для транспортировки и загрузки в плавильный агрегат, а так же

снижение пылевыноса и ликвидация аварийных ситуаций при пирометаллургическом производстве.

Способы окускования можно подразделить на две группы: высокотемпературные и холодные. К высокотемпературным способам следует отнести, прежде всего, агломерацию, вторым способом является окатывание с последующим упрочняющим обжигом. В обоих случаях необходимая прочность кускового продукта достигается за счет воздействия высоких температур, при которых происходит частичное подплавление и твердофазное спекание материала.

Группу холодных способов окускования составляют брикетирование и безобжиговое окатывание. В этих случаях необходимая прочность брикетов обеспечивается введением в состав окусковываемого материала связующих веществ.

Процесс брикетирования мелкозернистых материалов имеет ряд преимуществ в сравнении с окатыванием, а именно [2-7]:

- более высокая прочность и лучшая транспортабельность брикетов;
- брикеты имеют одинаковую правильную форму и вес;
- брикеты обладают более высоким удельным весом, концентрируют в минимуме объема максимум полезных компонентов;
- возможность получения комплексных брикетов, состоящих из нескольких компонентов шихты в различных пропорциях;
- возможность использования мелкозернистых материалов широкого гранулометрического состава, в то время как для окатывания предпочтительно использование частиц крупностью менее 74 мкм;
- возможность проведения процесса при повышенных температурах или горячее брикетирование, представляющее собой совмещенный процесс брикетирования и спекания, проводимый при температуре, составляющей 0,5-0,95 температуры плавления основного компонента материала (данный способ успешно реализован на Лебединском ГОКе).

В металлургической отрасли при брикетировании мелкофракционных материалов применялись разнообразные конструкции брикет-прессов: штемпельные, ленточные, столовые, кольцевые [2,7-13]. В настоящий момент в металлургической промышленности наибольшее распространение получило брикетирование в валковых брикет-прессах, вследствие наличия у них ряда преимуществ относительно прессов других конструкций [7,8,10-12]: непрерывность процесса, высокая производительность, простота в управлении, отсутствие динамических нагрузок, сравнительно малый износ рабочих поверхностей и невысокий расход энергии. Ведущими фирмами, специализирующимися в области разработок и серийного производства валковых прессов являются: «K. R. Komarek, Inc.» (США), «Köppern» (Германия), «Sahut-Compneur» (Франция), «Спайдермаш» (Россия), ИЧМ им. Некрасова (Украина).

В данное время брикетирование как способ окускования мелкофракционных руд и концентратов применяется в России на ряде предприятий цветной металлургии: АО «Кольская ГМК», ООО «Медногорский Медно-Серный Комбинат», ОАО «Кировградский МК», ОАО «Уфалейникель» и ранее на ООО «Буруктальский НЗ» и ЗАО «ПО Режникель»; черной металлургии: ОАО «Косогорский МК», ОАО «Лебединский ГОК», ОАО «Челябинский Электрометаллургический Комбинат». Из зарубежных предприятий следует отметить: ОАО «Донской ГОК» (Казахстан), ОАО «Никопольский Завод Ферросплавов» и ОАО «Побужский Ферроникелевый Комбинат» (Украина), «Falconbridge Ltd.» (подразделение компании в Доминиканской Республике), «Nippon Yakin Kogyo Co. Ltd.» (Япония).

Для каждого процесса брикетирования существует своя специфика подготовки мелкофракционных материалов, заключающаяся в количестве и последовательности операции. Подготовка сырья к брикетированию представляет собой сочетание механических и теплотехнических процессов. Технологический процесс брикетирования состоит из:

- подготовки сырья к брикетированию (дробление, классификация, флотация, сушка, дозировка и смешивание компонентов);

- прессования брикетной шихты;
- операции обработки брикетов в целях отделения мелочи и упрочнения.

Неотъемлемым участником процесса брикетирования мелкозернистых руд и концентратов являются связующие вещества. В подавляющем большинстве случаев в брикетируемый материал производится добавка индивидуально подобранного «внешнего» связующего в количестве, обеспечивающем необходимые прочностные характеристики. В некоторых случаях, например при брикетировании окисленной никелевой руды нет необходимости в добавке «внешних» связующих веществ. Так, охристые и каолиновые глины группы смектитов (монтмориллонитовые, нонтронитовые, галлаузитовые), входящие в состав руды, выступают в роли связующего [14,15].

Универсального связующего одинаково эффективного для всех мелкозернистых материалов не существует. Сегодня в качестве связующих применяется весьма широкий спектр минеральных (неорганических) и органических материалов. Они используются как индивидуально, так и в различных комбинациях (комбинированные связующие). Активно ведутся работы по созданию высокоэффективных синтетических связующих, позволяющих получать брикеты с высокими прочностными характеристиками при минимальном расходе связующего.

Одновременно с тем, что выбор и расход связующего является решающим условием прочности брикетов, затраты, связанные с его закупкой и транспортировкой, нередко составляют не менее 50% от себестоимости брикетов, поэтому выбор рационального связующего вещества является ключевым фактором, определяющим эффективность процесса брикетирования мелкозернистых материалов.

Цель работы – разработка технологии брикетирования силикатного флюса (просора песчаника Кайерканского угольного разреза) Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель», для переработки в различных металлургических агрегатах, а также выбор рационального связующего для

снижения затрат при брикетировании медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК».

Научная новизна:

1. На основании анализа научно-технической литературы и результатов собственных исследований установлены закономерности изменения качественных характеристик брикетов от давления прессования, влажности шихты, гранулометрического состава, вида и расхода связующего, обосновывающие рациональные параметры процесса брикетирования.

2. С помощью оптических методов изучена структура брикетов с различными видами связующих: водный раствор сульфата никеля, жидкое стекло, технический лигносульфонат. Установлено, что наиболее равномерное распределение связующего по телу брикета наблюдается при использовании технического лигносульфоната.

3. Установлено, что наибольшей эффективностью обладают комбинированные, связующие, полученные из компонентов, обладающих соизмеримыми вяжущими свойствами. В данном случае наблюдается «эффект суперпозиции».

4. На основании характера разрушения брикетов установлено, что при использовании неорганических связующих брикеты представляют собой хрупкое тело, в значительной степени подверженное истирающим и ударным разрушениям. В свою очередь брикеты, полученные при использовании органических связующих, характеризуются большей пластичностью, что позволяет им дольше сохранять потребительские свойства.

Практическая значимость работы:

1. Разработана технология брикетирования просора песчаника Кайерканского угольного разреза Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель», включающая в себя сушку просора в сушильном барабане, смешение его с лигносульфонатом и брикетирование шихты на валковом прессе с последующей упрочняющей сушкой брикетов в том же сушильном барабане. Технология позволяет получить прочные с требуемой влажностью брикеты,

которые можно использовать на различных переделах металлургического производства. На основании технологического регламента, разработанного по результатам настоящей работы Департаментом проектных работ ООО «Институт Гипроникель» выполнены технико-экономические расчеты, показавшие высокую эффективность данной технологии.

2. Изучено влияние различных связующих на брикетируемость медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» (водные растворы сульфатов, комбинированные связующие на основе лигносульфоната, модифицированные лигносульфонаты, поливиниловый спирт, синтетические органические связующие). В качестве альтернативных лигносульфонату связующих предложены: поливиниловый спирт марки PVA 088-50, комбинированное связующее Лигносульфонат-Comprex A12, связующее Термопласт 4СВ и рекомендованы рациональные параметры их использования. Результаты лабораторных исследований подтверждены проведенными промышленными испытаниями.

Методы исследований. Для исследований вещественного состава исходных материалов и продуктов брикетирования использовались методы химического анализа (атомно-абсорбционная спектрометрия и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой), растровый электронный микроскоп Tescan 5130MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов, рентгенофазовый анализ. Гранулометрический состав материалов определялся методами ситового и лазерно-дифракционного анализов. Исследования брикетирования концентрата проводились на валковом брикет-прессе B050 производства фирмы «K.R. Komarek, Inc.». Контроль влажности осуществлялся на влагомере MA-45 «Sartorius». Прочность брикетов определялась на модифицированном гидравлическом прессе. Для изучения структуры брикетов использовался микроскоп универсальный RX производства фирмы «Leica». Измерение коэффициента динамической вязкости осуществлялось с помощью ротационного вискозиметра DV-II+ фирмы «Brookfield Inc.», плотность

связующих определялась ареометрами общего назначения АОН-1 ПАО «Стеклоприбор».

Основные защищаемые положения:

1. Качественные характеристики брикетов зависят от множества факторов, среди которых: давление прессования, влажность шихты, гранулометрический состав, выбор и расход связующего, ключевым является выбор связующего.

2. Получение брикетов из просора песчаника, обладающих высокими прочностными характеристиками, достигается путем выбора рациональных параметров процесса и связующего – технического лигносульфоната, применение которого наряду с низким расходом характеризуется наиболее равномерным распределением по телу брикета.

3. В условиях минимальной реконструкции существующей технологии брикетирования медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» и при сохранении прочностных характеристик брикетов на должном уровне в качестве связующих альтернативных лигносульфонату могут быть использованы поливиниловый спирт марки PVA 088-50, комбинированное связующее Лигносульфонат-Сомпгех А12, связующее Термопласт 4СВ.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается полным соответствием современных представлений физико-химической сущности брикетирования, использованием промышленных материалов (медно-никелевый концентрат, просор песчаника, связующие), применением современных методов исследований и оборудования: валковый брикет-пресс В050 фирмы «K.R. Komarek Inc.» производительностью до 25кг/час, растровый электронный микроскоп Tescan 5130MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов, микроскоп универсальный RX производства фирмы «Leica».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на заседания научно-технических советов ООО «Институт Гипроникель», АО «Кольская ГМК», ПАО «ГМК «Норильский Никель».

Личный вклад автора состоит в анализе существующих и перспективных процессов брикетирования мелкозернистых руд и концентратов с различными видами связующих; проведении экспериментальных исследований, обработке и обобщении их результатов; подготовке публикаций.

Автор выражает сердечную благодарность за творческую помощь, содействие и поддержку во время выполнения диссертационной работы Портову А.Б. (ст.н.с. ООО «Институт Гипроникель»).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

1 БРИКЕТИРОВАНИЕ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ В ЦВЕТНОЙ И ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

(критический литературный обзор)

В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам подготовки шихты к последующим металлургическим переделам. Истощение запасов богатых кусковых руд привело к широкому распространению обогатительных процессов, продуктами которых являются мелкозернистые концентраты и руды. Актуализация экологических проблем ограничивает использование, ставших в период индустриализации традиционными способами окускования, агломерации и технологии производства обожженных окатышей. В связи с этим брикетирование, как способ окускования мелкозернистых материалов, выходит на лидирующие позиции.

Необходимость предварительного окускования мелкозернистых материалов обуславливается аппаратным оформлением основных технологических стадий производства готовой продукции. На текущий момент брикетирование тонкодисперсных сульфидных концентратов применяется на АО «Кольская ГМК» (плавка в РТП), ООО «Медногорский МСК» и ОАО «Кировградский МК» (плавка в шахтных печах). Мелкозернистая окисленная никелевая руда брикетируется на ЗАО «ПО Режникель» и ОАО «Уфалейникель» (плавка в шахтных печах), «Falconbridge Ltd.» (восстановление в шахтном реакторе и плавка в РТП), «Nippon Yakin Kogyo Co. Ltd.» (кричный процесс). Кроме того никельсодержащие пыли брикетируются на ОАО «Побужский ферроникелевый комбинат» (плавка в РТП). В черной металлургии железосодержащие материалы брикетируются на ОАО «Донской ГОК», ОАО «Косогорский МК», ОАО «Лебединский ГОК», ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат», ОАО «Никопольский завод ферросплавов».

Ужесточающиеся с каждым десятилетием экологические требования, увеличение количества и объемов техногенных месторождений и собственных мелкозернистых полупродуктов в совокупности с истощением богатых кусковых

руд создают необходимые предпосылки для более широкого применения брикетирования в различных отраслях металлургической промышленности.

В основу развития теории процесса брикетирования мелкозернистых материалов легли работы в области порошковой металлургии и продольной прокатки металлических порошков. В них рассмотрены условия деформации и характеристики уплотнения порошков, технологические особенности процессов, предложены методики расчета технологических и силовых параметров.

Изучением процесса брикетирования мелкофракционных материалов занималось большое число отечественных и зарубежных исследователей, среди которых следует выделить: Иоффе Р.С., Белого И.К., Носкова В.А., Елишевич А.Т., Портова А.Б., Клементьева В.В., Pietsch W., Johanson J.R.

В своих работах [16-19] Johanson J.R. исходя из характеристик материала и усилия прессования, предложил методику для расчета технических параметров брикет-прессов. Значительный интерес представляют отдельные работы [20-22], выполненные сотрудниками ИЧМ им. З.И. Некрасова, на основе которых созданы методики расчета валковых брикетных прессов и разработан системный подход к проектированию машин данного типа.

W. Pietsch предпринял попытку математического описания процесса брикетирования мелкофракционных шихт и сил, отвечающих за конченную прочность брикетов [23,24]. Анализом сил [25,26] обеспечивающих прочность окускованного материала занимался Коротич В.И. Дальнейшее развитие его исследования получили в работах [27-29] Пузанова В.П. и Кобелева В.А.

Частными вопросами брикетирования занимались Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Логинов Ю.Н. В этих работах [30-33] рассмотрен вопрос оптимизации размещения формующих элементов на рабочей поверхности валков, исследованы протекающие при уплотнении мелкофракционных шихт в валковых прессах и влияние газовой фазы на энергосиловые и скоростные параметры процесса брикетирования.

Следует так же отметить работы Ожогина В.В. [7] и Capes С.А. [34], посвященные всестороннему рассмотрению широкого спектра вопросов брикетирования.

Применение при брикетировании мелкозернистых руд и концентратов различных связующих веществ рассмотрено в работах Равич Б.М. [10,11] и Лурье Л.А. [2]. Елишевич А.Т. выдвинул гипотезу [8] процесса образования брикетов со связующими веществами и предложил уравнения [35] для расчета адгезионных связей, с учетом особенностей связующего и брикетируемого материала.

Не смотря на то, что процесс брикетирования является наиболее ранним из способов окускования мелкозернистых материалов, он во многих направлениях развивался и развивается эмпирически. Решение и сколько-нибудь теоретическое обоснование находили исключительно вопросы, поставленные производством, а развитию теоретических основ уделяется гораздо меньшее влияние. Полученные аналитические зависимости, описывающие этот процесс, представлены в виде уравнений, содержащих большое количество экспериментальных данных. Зависимости выведены на основе анализа процессов уплотнения материалов при отсутствии связующих веществ, что существенно сужает область их применения. Подробнее общие теоретические вопросы брикетирования рассмотрены в главе 2.

1.1 Классификация связующих веществ

Вещества, способные соединять разобщенные зерна мелкозернистого материала и сохранять их прочный контакт в условиях значительных внешних воздействий, называются связующими веществами [8]. Брикетирование мелкодисперсных материалов с использованием связующих веществ, в отличие от брикетирования без их применения, позволяет получать качественные брикеты практически из любых материалов при относительно низких давлениях прессования. Формирование брикетов с использованием связующих веществ можно рассматривать как один из видов многостадийного процесса склеивания

отдельных разобщенных зерен с помощью клеевых веществ [36]. При этом к связующим веществам предъявляются специфические требования [2,8,9,11,37,38]:

- высокая поверхностная активность и смачиваемость поверхности брикетируемого материала;
- наличие эластических и пластических свойств;
- устойчивость к атмосферным осадкам, температуре, действие солнечных лучей, окислению атмосферным кислородом и т.п.;
- отсутствие веществ, загрязняющих готовую продукцию;
- высокая скорость отвердения;
- отсутствие возникновения в отвердевшем связующем высоких внутренних напряжений, способных к разрушению клеевого соединения;
- отсутствие летучих соединений, токсически воздействующих на организм человека;
- дешевизна и доступность;
- легкость применения;
- стойкость при хранении и транспортировке.

Известно [2,8,9,34,39-43], что все типы связующих веществ, используемых при брикетировании руд и рудных концентратов, можно классифицировать:

- по типу образующейся связи;
- по физическому состоянию связующего вещества на момент его смешения с материалом основы;
- по химической природе связующего;

По *природе образующихся связей* между связующим и окусковываемым материалом связующие делятся на три группы [34,39]:

- связующие объемного взаимодействия,
- связующие пленочного взаимодействия,
- связующие вещества, у которых вяжущие свойства проявляются после химического взаимодействия между его компонентами или компонентами и брикетируемым материалом.

При использовании связующих объемного (матричного) взаимодействия связи-мостики образуются во всем теле брикета, т.е. частицы материала находятся в непрерывной сети связующего. К связующим этого типа относятся различного типа смолы, битум, асфальт, воск, цементы.

Пленочные связи обычно образуются при высыхании, а их эффективность определяется площадью поверхности смоченных частиц брикетируемого материала. К этому типу связующих относятся вода и водные растворы различных веществ (например, силиката натрия), лигносульфонаты, меласса, крахмал, декстрин, бентонит и другие глины.

Вязущие свойства связующих веществ химического взаимодействия проявляются в образовании новой фазы, продукта реакции между компонентами связующего или компонента связующего и шихты, возникающего между частицами брикетируемого материала и, тем самым, их связывающей между собой. К таким связующим относятся гашеная известь, смеси каустического магнетита с магнетитом или хлоромангнетитом и др.

По *физической консистенции* связующие делятся на жидкости, гели, порошковые материалы, пасты. В случае применения порошковых связующих немаловажным фактором является тонкость их помола (и брикетируемого материала), что в противном случае отрицательно сказывается на взаимодействии между компонентами шихты и, в конечном итоге, на прочностных характеристиках окускованного материала [34,39].

По *химической природе* связующие, используемые при брикетировании мелкозернистых руд и концентратов, можно разделить на четыре большие группы [8,9]: связующие органического и неорганического происхождения, комбинированные связующие, активирующие добавки.

В свою очередь связующие органического происхождения можно разделить на:

- природные, к которым относятся нефтяные связующие (битумы, гудроны), продукты переработки твердых горючих ископаемых

(каменноугольные смолы, пеки, фусы, торф), продукты конденсации природных газов;

- продукты-отходы производств (лигносульфонат, сульфитно-спиртовая барда, меласса и др.);

- синтетические эпоксидные смолы, клеи и прочие, получаемые на основе высокомолекулярных соединений;

- связующие животного происхождения (казеин, желатин, альбумин и др.);

- связующие растительного происхождения (крахмал, декстрин, специальные клеящие вещества).

Все связующие неорганического происхождения делятся на:

- природные (глинистые);

- продукты переработки минерального сырья: карбонатные (известковые, магнезиальные, доломитовые), сульфатные (гипсовые, магнезиальные), фосфатные, растворимое стекло, цементы (портландцемент, пуццолановые и зольные цементы);

- продукты, получаемые из отходов производства (шлак, чугунная стружка, силикокальциты и др.).

К комбинированным связующим относятся связующие на основе органических веществ и неорганических веществ, а также органоминеральные связующие.

К активирующим добавкам относятся ПАВ, химические реагенты (неорганические кислоты, щелочи, соли), некоторые минералы (пемзы, туфы).

1.2 Брикетирование с использованием неорганических связующих

Неорганическими (минеральными) связующими являются преимущественно порошкообразные минеральные материалы или растворы солей. Прочность брикетов, обуславливаемая введением минеральных связующих, в большинстве случаев является результатом возникновения

гидратных новообразованиях при взаимодействии связующего с водой и последующей их кристаллизацией. В некоторых случаях, например при применении гашеной извести, прочность брикетов обуславливается ее взаимодействием с углекислотой воздуха и одновременной перекристаллизацией гидрата окиси кальция. При твердении минеральных связующих существенное значение имеет время схватывания – т.е. период, в течение которого происходит прогрессирующее нарастание прочности [40-42].

Минеральные связующие в зависимости от состава, основных свойств и областей применения подразделяются на группы: гидравлические, воздушные и связующие автоклавного твердения.

Жидкое стекло

Жидкое стекло ($R_2O \cdot nSiO_2$, где R – Na, K или Li) находит применение в различных отраслях цветной и черной металлургии: при брикетировании хромовых [10,11,44-47], сурмянистых [10-12], флюоритовых [10,11], марганцевых [11,48] концентратов; железорудных материалов [10,11,49-52]; кварцитов [43,53-56].

На ОАО «Донской ГОК» реализована технология брикетирования мелких классов хромовых руд с использованием жидкого стекла в качестве связующего, разработанная НВФ «БРИК-92». При брикетировании используется валковый пресс с желобчато-зубчатыми прессующими бандажами. Давление прессования составляет 100 МПа. Для увеличения прочности брикетов используют «дозреватели» - конвейер, обдуваемый горячим воздухом. Время нахождения брикетов в «дозревателе» составляет 10-15 минут. На выходе из «узла дозревания» брикеты имеют прочность 1,2 Н/см², в дальнейшем происходит увеличение прочности до 8 Н/см² [44-46].

В СПГГИ проводились исследования [49,50] по брикетированию богатой железной руды крупностью -5+0 мм. В качестве связующего использовалось жидкое стекло. Качественными считались брикеты, прочность которых на одноосное сжатие превышает 6МПа. По результатам проведенной работы была разработана технология, позволяющая варьировать в широких пределах расход

связующего и давление прессования в зависимости от гранулометрического состава руды (от 30 до % класса -0,074мм) и массовой доли отходов производства (до 50%).

В работе [57] изучалось брикетирование обогащенной окисленной никелевой руды Серовского месторождения, содержащей, %: 1,67-1,72 Ni, 0,09-0,14 S, 42,1-45,5 SiO₂, 17,0-17,5 Fe₂O₃, 16,5-17,9 MgO, 1,7 CaO, 3,9-4,1 Al₂O₃. Гранулометрический состав руды был следующим, %: 1,9 – фракция +2 мм, 20,9 – фракция -2+1 мм, 21,5 – фракция -1+0,4 мм, 55,7 – фракция -0,4 мм. Влажность руды составляла 3,5-12 %. В ряде экспериментов в качестве связующего использовалось жидкое стекло. Брикетирование осуществлялось на гидравлическом прессе EDZ-40 в круглой матрице с вогнутой формой верхнего и нижнего основания. Объем брикетов составлял 10-25 см³. Усилие прессования изменялось от 15 до 150 МПа. После изготовления брикеты испытывались на раздавливание и сброс. В процессе проведения экспериментов было установлено, что добавка связующего в количестве 2,5% способствует повышению прочностных свойств брикетов на 26 %, и они достигают 78-82 кгс/брикет.

Болгарский институт «НИИЦветмет» проводил исследования, направленные на улучшение технологии брикетирования медного сульфидного концентрата на Горно-металлургическом комбинате в г. Елисейна [12,58]. Было изучено влияние влажности, подготовки шихты перед брикетированием, давления прессования и расхода связующего и режима сушки на механическую прочность брикетов. Связующим, которое использовалось при брикетировании медного концентрата, являлось жидкое стекло плотностью 1,4 г/мл. Прессование опытных образцов цилиндрической формы (Ø62, h55 мм) массой ~530 г производилось на гидравлическом прессе с усилием прессования 50 тс. Полученные брикеты сушились в термошкафу при температуре 150⁰С в течение 4 часов. Сушеные брикеты испытывались на сжатие и сброс. Прочность получаемых брикетов на сжатие не превышала 65 кгс/см².

Определяющую роль при брикетировании мелкозернистых руд и концентратов с жидким стеклом играет его модуль [51,59]. Увеличение модуля

жидкого стекла повышает его вязкость и скорость затвердевания. Правильно подобранный модуль для каждого конкретного случая позволяет добиваться максимальной прочности брикетов.

Цементы

Идея использования цементов в качестве связующего вещества принадлежит русскому горному инженеру Л. Юбашеву [10,11,43]. В 1899 он опробовал брикетирование железорудной мелочи с портландцементной связкой. Количество связующего составляло 3,5-6,0% от веса руды.

В Воронежском Государственном Университете, Львовском и Новочеркасском политехнических институтах исследовалась возможность применения в качестве связующего для процесса брикетирования железорудных материалов высокожелезистых быстротвердеющих цементов. Цемент в тонкоизмельченном состоянии добавлялся к железорудному материалу в количестве 15-30%, смесь увлажнялась и брикетировалась. Полученные брикеты имели прочность после 24 часовой выдержки на воздухе 1,2-1,8 кН/см², после семи суточной – 1,96-2,6 кН/см² и после четырех часовой пропарки (100⁰С) – 1,85-3,5 кН/см² [10].

Исследования и дальнейшие промышленные испытания [10,11], проведенные в Венгрии, показали, что введение цементов, полученных из смеси железных руд и пустой породы, в количестве 12% обеспечивает высокую механическую прочность и термическую устойчивость брикетов, удовлетворяющие требования металлургического производства.

Институт «Уралмеханобр» исследовал окускование качканарского титано-магнетитового концентрата с использованием высокожелезистого цемента, полученного из этого же концентрата и известняка [60]. Цемент имел следующий состав, %: 49,5 Fe₂O₃; 40,0 CaO; 1,0 MgO; 4,0 SiO₂; 2,5 Al₂O₃. Брикеты, содержащие 23,0% цемента, при упрочнении в естественных условиях послу недельной и 4 недельной выдержки имели прочность 43 и 74 кгс/брикет, а после 6 часов пропарки при 95⁰С – 50 кгс/брикет.

В различное время технологии брикетирования с использованием различных типов цементов активно разрабатывались и применялись в таких странах как [10,11,43,53,61-65]: Россия, Украина, Япония, ФРГ, Франция, США и др. Так в 1993 году на брикетной фабрике Медногорского медно-серного комбината испытывалась технология брикетирования медных концентратов с использованием в качестве связующего цементного клинкера [66].

Большинство цементов схватываются в сравнительно долгие сроки, содержат в своем составе довольно значительно количество кремнезема, а получаемые брикеты имеют низкую текущую прочность. Отмечается [67], что для успешного применения цементов крупность частиц должна быть менее 50 мкм.

Известь

В Московском горном институте проводились исследования [2] по брикетированию мелочи медистых колчеданов следующего химического состава: 1,43% Cu; 40,89% $S_{\text{общ.}}$; 6,51% S_{SO_4} ; 38,92% Fe; 3,65% SiO_2 ; 0,75% Al_2O_3 . В качестве связующего использовалась гашенная известь в количестве 10% от массы шихты. Влажность поддерживали на уровне 5-9%, давление прессования 500 кгс/см². По результатам исследований установлено, что необходимую механическую прочность брикеты приобретают через 24 часа после их изготовления. Сушка при 105-110⁰С в течение 2-3 часов ускоряет схватывание брикетов, полученных в таких условиях.

Магнитогорской Горно-металлургической Академией была разработана технология брикетирования различных типов неметаллических шихт для производства чугуна, стали и ферросплавов. Эта технология включает в себя холодное прессование на мощных (100 т/час) брикетных валковых прессах с использованием извести в качестве связующего. Промышленные испытания, проведенные на Белорецком металлургическом комбинате и исследования на других площадках, показали, что брикеты, полученные либо из местных железных руд (бурых), либо из железосодержащих отходов, имеют высокую прочность в диапазоне 120-200 кгс/брикет [68].

В работе [69] изучалось брикетирование смитсонитовой мелочи месторождения Ангоуран, имеющей химический состав: 27,72% Zn; 5,06% Pb; 3,20% Fe; 26,00% SiO₂; 1,55% Al₂O₃. В качестве одного из связующего применялась гашеная известь в количестве 5%. Давление прессования составляло 200 кгс/см², влажность шихты 6%. Полученные брикеты с целью увеличения прочностных характеристик подвергались упрочнительной сушке при 105⁰С. Прочность брикетов, полученных в таких условиях, составляла 141 кгс/брикет.

В МГИ проводились исследования [2] брикетируемости медного концентрата Белоусовского месторождения. Проба имела следующий химический состав: 25,60% Cu; 32,20% S_{общ.}; 8,72% Zn; 3,18% Pb; 23,50% Fe₂O₃; 4,34% Al₂O₃; 1,60% SiO₂. Добавка 4-5% извести и 3-4% воды при давлении прессования 300-500 кгс/см² позволяла получать брикеты с удовлетворительной механической прочностью. Брикеты обладали большим сопротивлением на сжатие и истирание, меньшим – на удар: выдерживали 2-3 падения, но разбивались на крупные куски, образуя незначительное количество мелочи.

Гашеная известь является сравнительно дешевым, хорошо смешивающимся и одновременно флюсующим материалам. Для достижения наилучших результатов при брикетировании необходимо использовать свежегашеную известь. Главным достоинством использования извести в качестве связующего, отмечаемым во многих исследованиях [2,10,11,58,69-72], является увеличение стойкости брикетов к воздействию осадков и влажного атмосферного воздуха.

Глинистые связующие

Благодаря особым свойствам из всех типов глин наибольшее применение в качестве связующего при брикетировании мелкозернистых материалов нашла группа бентонитовых глин [2,5-11,73-77]. Бентонитом принято называть глину, содержащую не менее 70% минерала группы монтмориллонита – Al₂O₃·4SiO₂·3H₂O. Монтмориллонит представляет собой слоистый высокодисперсный алюмосиликат, в котором за счет нестехиометрических замещений катионов кристаллической решетки появляется избыточный

отрицательный заряд, который компенсируют обменные катионы, расположенные в межслоевом пространстве [78].

В результате исследований [9,10] установлено, что определяющим фактором пригодности использования бентонита в качестве связующего является его набухаемость. Объем бентонитовых глин высшего качества при набухании увеличивается в 30 раз. Большое значение также имеет скорость набухания и возможность образования коагуляционных структур в порах брикетов.

В работе [79] брикетированию подвергалась пыль от получения чугуна в доменных печах. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании в качестве связующего бентонита в количестве 6% от массы шихты. Полученные брикеты обладали высокой прочностью на сжатие и сбрасывание.

В исследовательской лаборатории фирмы «Falconbridge Ltd.» (Канада) подвергались брикетированию рудные маломедистые медно-никелевые концентраты [10,11]. В качестве связующего использовались бентонитовые глины. Было установлено, что при небольшом расходе бентонита (до 5%), влажности шихты ~7%, давлении прессования 200 кгс/см² и упрочнительной сушке при 140-145°С в течение 1,5 часа получаются брикеты удовлетворительного качества.

В Германии предложен способ получения железорудных брикетов со сланцевой глиной, содержащей 10-20% угля. Железная руда и сланцевая глина подвергаются совместному измельчению, нагреву до 850°С и горячему брикетированию [10].

В работе [80] при выплавке силумина предложено в состав шихты для брикетов вводить каолин, который помимо того, что является богатым по алюминию сырьем, при содержании влаги более 10 % обладает хорошими вяжущими свойствами. Состав брикетируемой шихты после оптимизации состава был следующим, %: углеродистый восстановитель – 30-40, глинозем – 4-20, каолин – 8-40, дистен-силлиманит – остальное.

В настоящее время месторождения высококачественных глин, пригодных для использования в качестве связующего, крайне редки, стоимость их

сравнительно высока. По этим причинам их использование при брикетировании носит ограниченный характер.

Сульфатные связующие

В работах [81-83] рассмотрены варианты создания высокоэффективного гипсового связующего из фосфогипса. Основным недостатком рассмотренных технологий является обязательный процесс добавления воды для отмывки фосфогипса от примесей. Удаление воды и последующее обезвреживание сточных вод приводит к значительному увеличению эксплуатационных затрат. Приоритетным направлением развития таких технологий является нейтрализация примесей без добавления воды.

В Екатеринбургском Институте металлургии УрО РАН при окусковании шихты для получения германиевых концентратов по технологии восстановительно-сульфидирующей электроплавки в качестве связующего использовался гипс [84].

В Ленинградском технологическом институте [85] выполнены исследования по брикетированию железоокисного кека и магнетитового концентрата с использованием порошков и растворов сульфатов окисного и закисного железа, сульфата аммония, серной кислоты в качестве связующего. Наилучшие результаты при брикетировании кека достигаются при использовании растворов сульфата окисного и закисного железа в виде насыщенного раствора (30-37,5%). При давлении прессования 100 кгс/см^2 , расходе связующего равном 5% (в пересчете на сухой вес) от массы шихты, прочность брикетов после упрочнительной сушки при 150°C составляет $130-195 \text{ кгс/см}^2$. Близкие результаты были получены при использовании растворов серной кислоты. Наибольший эффект использование сульфатов оказывает при брикетировании магнетита. Брикет, полученные без использования связующего, имеют прочность $7-10 \text{ кгс/см}^2$, тогда как прочность брикетов с использованием растворов сульфата окисного железа составляет $380-400 \text{ кгс/см}^2$.

На Кыштымском медеэлектролитном заводе проводились опытно-промышленные испытания [86] по применению ангидрита в качестве связующего.

Испытания показали, что при влажности 8-9% и расходе ангидрита в количестве 8-10% от массы шихты, и гидратации в течение 2 часов обеспечивается прочность брикетов на уровне 3-3,5 МПа, превышающая нормативную величину на 20%. Выдержка брикетов в течение 12 часов в естественных условиях позволяет добиться увеличения прочности до 3,2-3,9 МПа, а при 80⁰С – более 4,9 МПа. Разработанная технология позволяет увеличить производительность участка брикетирования, за счет сокращения в 2 раза времени гидратации в сравнении с существующей технологией, а также улучшить условия труда, исключив выделение паров и газов в атмосферу цеха.

Наибольшее распространение из сульфатных связующих получил сульфат кальция. Наличие в составе этого класса связующих значительного количества серы, является главным недостатком, ограничивающим их использование.

Другие неорганические связующие

Наряду со *связками на известковой основе* определенное распространение при окусковании тонкодисперсных материалов получили *связки на основе окиси магния* [2,8-11]. В МГИ каустический магнезит был использован для брикетирования железной хромоникелевой руды, закиси никеля, доломитовой мелочи, некоторых железных руд. Во всех исследованиях необходимым условием достижения нормативной прочности являлось вылеживание в течение 24 часов. Так же отмечается, что брикеты не полностью соответствовали кондиционным требованиям по водостойкости – через 1,5-2 часа размокали в воде.

В последнее время весьма успешно развивается новое направление в технологии окускования, основанное на использовании связующих свойств, полученных по специальной технологии *высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС)*. Характерной особенностью брикетов, полученных с использованием таких связующих, является их водостойкость [87].

Чугунная стружка испытывалась в качестве связующего для окускования железной руды, концентрата, закиси никеля и других материалов. Возможность применения стружки исследовалась в России, США, Польше, Венгрии [2,8-11].

В целом, для неорганических связующих, как отдельного класса связующих веществ, характерно наличие присущего всем представителям ряда общих черт: доступность; хорошая смешиваемость; высокая рабочая влажность брикетирования; необходимость проведения в большинстве случаев упрочняющей операции для получения брикетов удовлетворительной прочности. Главным преимуществом связующих неорганического происхождения является отсутствие в составе отходящих газов токсических легколетучих веществ, образующихся при неполном окислении связующих органической природы, имеющем место при плавке или обжиге таких брикетов.

1.3 Брикетирование с органическими связующими

Органические связующие в основном являются высокомолекулярными соединениями сложного состава [8,9,88,89]. Полимеры обладают разной молекулярной массой, степенью ионизации, а также природой мономерных звеньев. Особенности строения полимеров оказывают большое влияние на их физико-механические и химические свойства. Вяжущие свойства органических связующих определяются строением отдельных звеньев макромолекул и их структурой, геометрией молекул, так как в закреплении на твердых поверхностях принимают участие лишь часть активных в отношении адгезии центров [9].

Технический лигносульфонат

Лигносульфонаты технические (ЛСТ) одно из самых распространенных связующих веществ при брикетировании мелкозернистых материалов [2,8-12,34,47,56]. Они являются побочными продуктами целлюлозно-бумажного производства, получаемыми в процессе варки древесины с водными растворами сернистой кислоты и ее щелочными, щелочноземельными и аммонийными солями [90].

Специалистами института Гинцветмет был опробован на РОЭМЗе в опытно-промышленном масштабе способ брикетирования мелкозернистых железистых кварцитов [91]. Способ предполагает двухстадийное введение

связующего (жидкий лигносульфонат) по ходу технологического процесса и получение брикетов, пригодных для металлургической переработки непосредственно после прессования, без проведения операции упрочнения. Сушку брикетов заменяет значительно более эффективная сушка мелкозернистой шихты. Полученные брикеты направляют на металлургическую переработку.

На АО «Кольская ГМК» внедрена [92] технология брикетирования рудного медно-никелевого концентрата являющаяся результатом многочисленных совместных исследований [93-96] сотрудников ООО «Институт Гипроникель» и специалистов АО «Кольская ГМК». В окончательном варианте технологической схемы предусмотрены первичное обезвоживание пульпы концентрата на пресс-фильтрах; подача связующего жидкого ЛСТ и перемешивание его с концентратом; сушка полученной смеси; повторное введение ЛСТ и формирование брикетов на валкоовом брикет-прессе фирмы Maschinenfabrik Koppert GmbH & Co. KG, Германия. Прочность брикетов на сжатие превышает 300 кгс/брикет.

На горно-металлургическом комбинате в Мансфельде (Германия) брикетированию подвергали мелкую медную руду, медный концентрат и медьсодержащую пыль шахтных печей. Приготовление шихты брикетирования осуществлялось следующим образом: смесь руды, концентрата и пыли с добавкой 1% жидкого ЛСТ, содержавшего около 50% сухих веществ, подвергалась сушке в трубчатой печи до влажности 0,2%. Затем в шихту добавлялось 8% ЛСТ, после чего ее при влажности 2-3% подавали на прессование на валковые прессы. Прочность и влажность изготовленных брикетов были достаточны, чтобы упрочнительную сушку не проводить, а подавать их непосредственно на рудную плавку [97].

В работе [98] проводились исследования по брикетированию пылей шахтной плавки окисленных никелевых руд. Брикетирование производилось на гидравлическом прессе, развивающем усилие до 10т. Связующим веществом служил ЛСТ Камского ЦБК. Брикеты, полученные при давлении прессования 40 МПа и 15% расходе ЛСТ, удовлетворяли требованиям шахтной плавки:

суммарный выход брикетов и кусков размером более 25мм составлял 70-80% после четырехкратного сбрасывания, прочность на сжатие находилась в пределах 2 МПа.

В ООО «Институт Гипроникель» в начале 2000 годов исследовалась [99] брикетируемость текущих и лежалых пирротиновых концентратов ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель». Брикетируемое и последующее вовлечение в производство пирротиновых концентратов на АО «Кольская ГМК» рассматривалось в качестве альтернативы существующей на Надежденском металлургическом заводе технологии гидрометаллургической переработки пирротиновых концентратов. Брикетировали из концентратов на установке, включающей брикет-пресс и механизм упрочнительной сушки брикетов. В качестве связующего использовали ЛСТ Сокольского и Котласского ЦБК. Добавка связующего количестве 4% от массы концентрата обеспечивает прочность брикетов на сжатие в районе 4,5–8,0 кН/брикет (после сушки при 160⁰С). Отмечается, что дальнейшее повышение содержания связующего не приводит к существенному увеличению прочности брикетов; вовлечение в переработку лежалых концентратов с большим сроком хранения способствует снижению необходимого количества ЛСТ в брикетируемой шихте за счет присутствия в нем в значительных количествах гидрата сульфата железа, обладающего вяжущими свойствами.

Технические лигносульфонаты являются одним из наиболее эффективных связующих. Их использование делает возможным получение качественных брикетов без проведения упрочнительных операций. Однако, наличие серы не позволяет использовать их в отдельных отраслях металлургии.

Меласса

Меласса – кормовая патока, отход, получаемый при переработке на сахаропроизводящих заводах таких растений как свекла, сахарный тростник, сорго, цитрусовые и пр. [100].

В ООО «Институт Гипроникель» проводились исследования [101] по применению мелассы в качестве связующего при брикетировании рудного медно-

никелевого концентрата. Установлено что регламентируемую прочность брикетов на сжатие (1400 Н/брикет) при брикетировании богатого концентрата с мелассой при содержании цветных металлов в концентрате <12,5% можно получить при 8% содержании связующего, при содержании цветных металлов, превышающем это значение, содержание связующего в шихте необходимо увеличить до 10-12 %.

В ИЧМ им. Некрасова исследовалось [38] брикетирование отсевов силикомарганца крупностью 0-6 мм следующего химического состава 71,3% Mn; 17,8% Si; 1,7% C; 0,15% P; 8,4% Fe. Прессование проводилось при давлении 100МПа. Одним из применяемых связующих являлась меласса. При введении в шихту 3% мелассы обеспечивается достаточно высокая прочность брикетов – 212 кгс/брикет, а после сушки в течение 60 минут при температуре 150⁰С прочность возрастает до 2664 кгс/брикет.

Меласса применялась в качестве связующего при брикетировании ильменитового концентрата [102,103]. При давлении прессования 300МПа прочность брикетов при 1,5% добавке мелассы к окусковываемому материалу обеспечивала прочность брикетов на сжатие в районе 0,15МПа.

В Испании проводились опытно-промышленные испытания [104] по брикетированию шихты, состоящей из пыли дуговых сталеплавильных печей и восстановителя (угля), следующего состава: ZnO 34,11%; PbO 7,03% Fe₂O₃ 19,05; C 16; SiO₂ 3,47; Na₂O 2,73%. При влажности 1,2% и давлении прессования 200кгс/см² получаемые брикеты имели прочность 1770 Н/брикет. В качестве связующего вещества использовалась добавка 2% мелассы от массы шихты.

В работе [105] исследовался процесс брикетирования пыли Побужского ферроникелевого комбината. Доставленная из комбината пыль даже при нулевой влажности характеризуется очень плохой сыпучестью. В ней содержится, в % мас.: Ni – 2,90; Fe – 23,50; SiO₂ – 37,10; CaO – 1,10; MgO – 18,21; Al₂O₃ – 1,62; Co – 0,09; Cr₂O₃ – 0,75. Технологические режимы брикетирования пыли отрабатывались на лабораторной установке, позволяющей уплотнять шихту в цилиндрической пресс-форме. В качестве связующего использовалась меласса плотность 1,20 г/см³. Такое значение плотности выбрано из условий хорошего

смешивания с пылью и сохранения связующим высоких вяжущих свойств. Анализ результатов показал, что влажность шихты должна составлять 10-12%, причем такая влажность должна обеспечиваться за счет добавления необходимого количества жидкого связующего с высокими вяжущими свойствами, а не за счет дополнительного увлажнения материала водой. Так, при добавлении 20% мелассы текущая прочность брикетов равна 180 кгс/брикет, а после сушки при 150⁰С в течение часа – 620 кгс/брикет.

Мелассу следует отнести к наиболее эффективным связующим. Являясь отходом свеклосахарного производства, она недефицитна и сравнительно дешева. Наличие в составе примесей фосфора и серы может иметь негативные последствия при ее применении.

Битумы

Битумы – твёрдые или смолоподобные продукты, представляющие собой смесь углеводородов и их азотистых, кислородистых, сернистых и металлосодержащих производных.

Имеются свидетельства [106-108] об использовании битума в качестве связующего при производстве брикетов для получения металлического кремния. Рекомендуемый состав шихты следующий: до 65% кварцевого песка, 0,5-5,0% силиката магния, до 7% битума в качестве связующего, остальное – нефтяной кокс. После прессования брикеты должны проходить стадию упрочняющего обжига при 500° С. При температурах ~500°С происходит выделение газообразных продуктов связующего и угля, крекинг тяжелых углеводородов с коксованием и упрочнением брикетов.

Брикетиrowания каменноугольной мелочи и антрацита производится с использованием нефтебитума в качестве связующего и сводится к следующему [109]: исходный уголь (крупностью не более 6мм) подсушивают, смешивают битумом в паровом смесителе (малаксере). За счет тепла, вводимого паром, связующее поддерживается в текучем состоянии, способствующем покрытию поверхности угольных частиц. На выходе из малаксера смесь имеет температуру порядка 95°С. Для сокращения времени затвердевания связующего в брикете

смесь частично охлаждают и направляют для прессования в валковый пресс. После прессования брикеты охлаждают до 25-40°C (зависит от расхода связующего) и подвергают грохочению для отсева мелочи и боя, последние возвращают в процесс брикетирования. Готовые брикеты отправляют на склад или отгружают потребителю.

В ДГИ проводились исследования по брикетированию марганцевых концентратов с различными восстановителями. В качестве связующего применялся нефтебитум. Установлено, что при расходе нефтебитума 7-9% механические качества брикетов из смеси марганцевого концентрата (80%) и угля (20%) отвечают нормативным требованиям прочности на сжатие – 80-88 кгс/см². Эти показатели достигаются при давлении 200 кгс/см² и температуре шихты перед прессованием 95°C [10,11].

В основном битум как связующее получил распространение при брикетировании топливных и руднотопливных шихт [110-112]. В других отраслях металлургии он не нашел широкого применения.

Каменноугольные пеки

Каменноугольные пеки являются продуктами перегонки каменноугольной смолы и характеризуются повышенным коксовым числом (40-50).

В МГИ проводились исследования [10] по брикетированию восстановленных железорудных концентратов крупностью 100% - 0,074 мм. В качестве связующего использовался среднетемпературный пек в количестве от 4 до 8% (по массе). Шихта прессовалась при давлениях 500-600 кгс/см² и температуре 90-100°C. Установлено что при давлениях 500-600 кгс/см² кондиционные брикеты с высокими физико-механическими свойствами получают при содержании в шихте не менее 6% каменноугольного пека.

В Гинцветмете исследовалась [10] брикетируемость цинковых концентратов и цинковой пыли с каменноугольным пеком (7,5-12,5%). Шихта крупностью 0-1 мм брикетировалась при давлениях 250-500кгс/см². Текущая прочность брикетов имела удовлетворительное сопротивление сжатию – 140-220

кгс/см², но не удовлетворительное сопротивление истиранию. Рост сопротивления истиранию достигалась с помощью температурной обработки.

В Болгарии пеки использовались для брикетирования железной и марганцевых концентратов, в США и Голландии для брикетирования технической окиси молибдена, во Франции – цинковых и железных руд, в Японии для брикетирования губчатого железа, в Турции – хромитовые концентраты [9-11].

Наличие в составе каменноугольных пеков токсических веществ, дефицитность и экономические соображения ограничивают его применение в черной и цветной металлургии.

Другие органические связующие

Поскольку в настоящее время различными методами сополимеризации можно получить полимеры с заранее заданными свойствами, открываются широкие перспективы их возможного применения в качестве связующих. Для направленного регулирования технологических свойств связующих используют структурно-химическую модификацию. Она способствует улучшению вяжущей активности, термической и механической устойчивости связующих. Модификация связующих осуществляется добавкой в них различных поверхностно-активных веществ, пластификаторов и наполнителей. Эти вещества позволяют изменять физико-химические и структурно-реологические свойства связующих в заранее заданном направлении [8,9,35,113,114].

В настоящее время проведены лабораторные технологические испытания [88,115-117] *интерполимерных связующих (ИПС)* на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК) и Лебединском ГОКе и получены обнадеживающие результаты: окатыши, полученные с применением ИПС, показали высокие прочностные характеристики.

В [118] для брикетирования железосодержащей руды использовался ряд типовых (лигносульфонат натрия, мета- и ортосиликат натрия) и синтетических («*Superfloc A-870*», «*Superfloc N-300*», «*Percol 351*», «*Percol 406*», «*Percol 155*», «*Percol 156*», «*Percol E24*», «*Alcotac FE10*», «*Aerospray 70A*», «*Dow A4M*»,

«*Hercules PA 8230*», «*Chem-Loc 411*») связующих. Наиболее эффективными связующими (минимум количества на тонну руды при максимуме прочностных свойств брикетов) себя показали «*Percol 351*», «*Aerospray 70A*», «*Chem-Loc 411*», «*AGG 9250*», в основе состава которых присутствует полиакриламид и его производные [119].

Другим примером [120,121] синтетических органических связующих являются связующие «*Floform*», производства компании «*CNF Co., Ltd*» (Франция), «*Peridur*» (производное карбоксиметилцеллюлозы) и «*Alcotac*» (сополимеры акриламида и акрилата натрия, соединенные с различным количеством карбоната натрия), разработанные компанией «*Ciba Specialty Chemicals*» (США), «*Finnfix® СМС*», разработанное Финской компанией «*CP Kelco*» (модификация материалов на основе целлюлозы). Данные связующие характеризуются весьма низким расходом для достижения нормативной прочности брикетов.

В Китае при окусковании рудных концентратов используют запатентованное органическое связующее «*Funa*» [122,123]. «*Funa*» – это тип углеродсодержащего комплексного связующего, основным составляющим которого является гумат (соль гуминовой кислоты). Оно разработано в «*Central South University*» (КНР). Это связующее вещество получают из выветренного угля или лигнита экстракцией раствором каустика. Для обеспечения высокого качества связующего вещества очень важен выбор сырья. «*Funa*» имеет следующий состав: 45-50% гуматы, 25-30% углерод и 20-25% другие компоненты. «*Funa*» дешевле, чем такие органические связующие, как технические лигносульфонаты, и нашла промышленное применение в Китае при брикетировании угля, фосфатных и железных руд. Его дозировка составляет ~1,5 %. Исследованиями установлено, что органическая добавка «*Funa*» термически устойчива при температуре ниже 250⁰С как в нейтральной, так и в окислительной атмосфере.

Компания «*Полипласт Новомосковск*» (Россия) производит высокотехнологичные органические полимеры «*Термопласт СВ*» [124-128]. Данные полимерные связующие представляют собой комплексы поверхностно-

активных веществ направленного синтеза на основе модифицированных полиметиленафталинсульфонатов. Связующие «Термопласт СВ» прошли опытно-промышленные испытания на технологических линиях ОА «ТНК «Казхром» при брикетировании хромовой руды, ОАО «Комбинат «Южуралникель» при формовании коксового отсева. Так же связующие «Термопласт 1СВ» эффективно применяется в ОАО «Комбинат «Магнезит» при производстве периклазового брикета.

На ОАО «Карельский окатыш», ОАО «Михайловский ГОК» и ОАО «Северсталь» проводились испытания связующего «Carbocel 3V» (синтезированная по специальной технологии карбоксиметилцеллюлоза) производства итальянской компании «Lamberti S.p.A». «Carbocel 3V» [129].

В работе [130] брикетировалась шихта, состоящая из флотационного медного концентрата, оборотной пыли и торфа в соотношении 3:1:1 (по массе). Связующим в данном случае выступал *торф*. Применение торфа обусловлено его развитой волокнистой структурой, и способностью взаимодействовать с неорганическими компонентами шихты.

Органические связующие, как правило, обладают высокими вяжущими свойствами. Их расход для получения качественных брикетов в несколько раз меньше величины для неорганических связующих. Общим недостатком органических связующих является их пиролиз при сравнительно невысоких температурах, что может привести к снижению прочности брикетов и ухудшению экологической обстановки.

1.4 Комбинированные связующие

Вяжущие свойства как органических, так и неорганических связующих могут быть повышены путем комбинации различных веществ, обладающих ограниченными связующими возможностями. Это могут быть как равноправные композиции из отдельных связующих, так и смеси на основе отдельно взятого связующего вещества. В последнем случае в качестве связующего могут

использоваться органические и неорганические связующие, отходы различных производств, обладающие ограниченными клеящими возможностями.

Использование комбинированных связующих получило распространение сравнительно недавно. Основной причиной этого является трудность в смешивании многокомпонентных шихт для получения гомогенной смеси, обеспечивающей производство однородных по качеству брикетов. Компоненты комбинированного связующего должны обладать рядом характеристик[8,9]:

- легко смешиваться друг с другом;
- не вносить вредных примесей в состав шихты;
- обладать высокой текучестью или сыпучестью для точного дозирования;
- соответствовать оптимальным значениям специфического свойства, недостающим остальным компонентам.

В Индии для окускования железорудной пыли применялись [131] различные комбинации следующих связующих: известь, меласса, полиакрилат натрия, декстроза. Наибольшая прочность брикетов, более 300 Н/брикет, была получена при использовании декстрозы и извести, в остальных случаях прочность на сжатие находилась в районе 200 Н/брикет

При производстве феррохрома брикетированию подвергались отсеvy хромовой руды [132]. Исследовались различные комбинации связующих такие как: известь и меласса, бентонит и меласса, цемент и меласса, цемент и нефтяная смола, нефтяная смола и известь. Исходя из экономических соображений предпочтение было отдано комбинированному связующему меласса-известь. Текущая прочность брикетов имела значение 130-140 кгс/брикет, а после вылеживания в течение 96 часов в естественных условиях прочность возрастала в 2 раза.

Для дальнейшего вовлечения в переработку губчатое железо крупностью менее 3 мм брикетировалось с использованием в качестве связующего комбинация мелассы и извести пушонки ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [133].

В США запатентовано [134] комбинированное связующее для брикетирования рудной мелочи, металлургической и угольной пыли. Связующее

представляет собой комбинацию битума и карбоната натрия. При необходимости для увеличения вяжущей способности к связующему могут быть добавлены в количестве 10% от его массы: торф, акриловые сополимеры, виниловые производные, производные крахмала, ЛСТ. Неорганические добавки такие как цемент или бентонит могут быть добавлены в количестве до 70%.

В Харьковском национальном экономическом университете исследовалось [135] брикетирование хромитовой руды и шихты, состоящей из руды и кокса, с использованием термореактивного связующего. Термореактивное связующее готовят из смеси фенольной смолы, 40% водного раствора формальдегида и концентрированного раствора гидроксида натрия в соотношении 75:24, 8:0,2. Установлено, что при 4% расходе связующего и давлении 20 МПа механическая прочность брикетов составляет 180 кгс/см², увеличение содержания до 8% приводит к росту прочности до 235 кгс/см². Дальнейшее увеличение расхода связующего приводит к выдавливанию его на поверхность.

В России для брикетирования рудных концентратов предложено [136] использовать комбинированное связующее, состоящее из углеродистого связующего и железной стружки. В качестве углеродистого связующего следует использовать коксовый пек или битум в количестве 1,0-10% от массы концентрата и до 10% железной стружки.

В работе [137] отмечается, что при холодном брикетировании губчатого железа использование комбинированного связующего известь-меласса позволяет получить брикеты, имеющие прочность на сжатие достигающую 700 кгс/брикет.

Национальный институт металлургии Южной Африки проводил исследования [138] по брикетированию мелкодисперсной хромитовой руды. В качестве связующего использовалась комбинация мелассы и извести. Получаемые брикеты упрочнялись путем вылеживания в естественных условиях. В настоящее время проводятся исследования по замене комбинации меласса-известь на смеси вытяжки фенолов и ЛСТ. Такая замена обусловлена высоким содержанием в

мелассе фосфатов, загрязняющих продукцию и требующую дополнительных рафинировочных операций при получении кондиционного ферро-хрома.

В работе [139] для вовлечения в переработку отходов и полупродуктов производства использовалось брикетирование. Использовалось комбинированное связующее состоящее из мелассы и цемента.

В Египте исследовалось [140] окускование окалины. В качестве связующего использовали смесь бентонита и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Количество бентонита оставалось постоянным и равнялось 0,4% от массы шихты, а расход гидроксида кальция варьировался. Зависимость прочностных характеристик кускового продукта от расхода $\text{Ca}(\text{OH})_2$ имеет минимум отвечающих 0,5% расходу гидроксида кальция. Дальнейшее увеличение содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ приводит к существенному росту прочностных характеристик.

В МГИ для брикетирования пылеватой хромо-никелевой руды (0-1,5 мм) использовалось комбинированное связующее – каустический магнезит и доменный шлак [10]. Брикетирование проводилось при давлении 500 кгс/см^2 , а испытания брикетов через 24 часа после изготовления. Результаты исследований показали, что указанное комбинированное связующее весьма эффективно, а полученные брикеты обладают высокой прочностью на сжатие – $120-150 \text{ кгс/см}^2$.

Комбинированное связующее, состоящее из битума, мазута и ЛСТ, использовалось ДМетИ и Никопольским заводом ферросплавов для брикетирования марганцевого сырья с целью получения товарного силикомарганца. Шихта состояла из марганцевого сырья (41-42% Mn, 16-18% SiO_2) и речного песка (96% SiO_2). Общий расход связующего составлял 10%. С использованием такого комбинированного связующего удалось снизить себестоимость товарного продукта на 7-8% [11].

В Харьковском химико-технологическом институте им. Кирова проводились исследования по брикетированию медистого колчедана с использованием комбинированного связующего из ЛСТ и извести [10]. Установлено, что брикеты при использовании комбинированного связующего обладают более высокой механической прочностью, чем при использовании

только ЛСТ. Так же отмечается незначительное увеличение влагостойкости брикетов.

В ООО «Институт Гипроникель» исследовалась брикетируемость рудного медно-никелевого концентрата с использованием смеси ЛСТ-меласса в качестве связующего. По результатам исследований установлено, что при использовании в качестве связующего смесей мелассы с лигносульфонатом прочность брикетов еще более высокая, чем при использовании каждого из этих связующих в отдельности. Наиболее прочные брикеты получаются при 20–30% содержании лигносульфоната в растворе с мелассой. Так, при 12% содержании связующего при использовании лигносульфоната прочность брикетов на сжатие составляет ~1400 Н/брикет, при использовании мелассы ~1900 Н/брикет и 2250 Н/брикет при использовании комбинированного связующего [101].

Применение комбинированных связующих в случае правильного выбора его компонентов, позволяет существенно повысить эффективность брикетирования. Повышение эффективности может достигаться как за счет снижения общего расхода связующего или расхода наиболее дорогостоящего компонента при сохранении должного качества брикетов, так и за счет устойчивости брикетов при хранении, транспортировке и загрузке в металлургический агрегат.

1.5 Выводы по главе 1

При брикетировании мелкозернистых руд и концентратов нашло применение большое число связующих веществ, начиная от цемента и заканчивая синтетическими полимерами, состав которых держится в секрете. Выбор того или иного связующего прежде всего определяется спецификой производства. Так, например, в черной металлургии нежелательно применение связующих, содержащих в своем составе серу.

Другим важным критерием является географическое положение объекта, производящего брикеты. В регионах, в которых на протяжении всего года выпадает незначительное количество осадков и преобладает плюсовая

температура, возможно использование не самых эффективных связующих, причем в низких количествах. Механическая прочность брикетов необходимая для транспортировки и многочисленных перегрузок в этом случае достигается путем вылеживания брикетов в естественных условиях под открытым небом. К таким регионам, прежде всего, следует отнести страны Африки, Австралию, США. В России с ее суровыми зимами и огромным количеством осадков, выпадающих независимо от времени года, осуществление данного способа потребует постройки отапливаемых складских помещений огромной площади, что делает реализацию такой технологии нецелесообразной.

Огромная территория, заминаемая Россией, обуславливает значительную удаленность предприятий друг от друга. В связи с этим встает вопрос транспортировки. Доставка пусть и самого дешевого связующего на многие тысячи километров непременно поставит под вопрос рентабельность такой технологии производства брикетов. Исходя из этого весьма перспективно применение связующих веществ, являющихся собственными отходами или полупродуктами. Примером таких связующих являются растворы сульфатов, цемент. Если же возможность применения «собственного» связующего отсутствует, следует обратить внимание на близлежащие производственные объекты, которые могут служить источником связующего. К ним следует отнести целлюлоза-бумажные комбинаты, предприятия свеклосахарного производства и др.

Использование связующих неорганического происхождения, несмотря на свои недостатки (высокий расход, низкая прочность брикетов, необходимость тонкого помола (в случае применения порошков)), имеет и свои преимущества. Существенное преимущество - отсутствие в составе отходящих газов токсических легколетучих веществ, образующихся при неполном окислении связующих органической природы, имеющем место при плавке или обжиге таких брикетов. Применение неорганических связующих позволяет не отравлять атмосферу в металлургических цехах и окружающей местности вблизи металлургических

предприятий. Еще одним достоинством неорганических связующих является их высокая влагостойкость.

Органические связующие вещества в первую очередь характеризуются более низким расходом для достижения нормативных показателей. Зачастую он в несколько раз ниже расхода неорганического связующего, необходимого для получения равных по прочности брикетов. Однако следует учитывать, что под действием кислорода воздуха, изменения температуры окружающие среды и других факторов, свойства полимеров могут существенно изменяться. Цепи макромолекул могут разрушаться, укорачиваться, вследствие чего межмолекулярные силы уменьшаются, и физико-химические свойства полимеров ухудшаются, т.е. происходит старение полимера.

В последние годы возрастает применение синтетических полимерных связующих. Такие связующие путем направленного синтеза лишаются основных недостатков присущих органическим связующим – низкой влагостойкости и токсичности. Все это в известной степени сказывается на их стоимости. Так же чаще всего они разрабатываются под конкретный материал и применение их при брикетировании материалов, существенно отличающихся по своему химико-минералогическому составу, не оправдывает ожидания и является нецелесообразным.

Для создания условий стабильной работы установки брикетирования необходимо иметь возможность перехода на другие виды связующих без существенных изменений существующей технологической линии. В каждом конкретном случае необходимо стремиться к рациональному варианту связующего, которое обеспечивает высокие потребительские свойства брикетов, технологичность и экономичность процесса их производства.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БРИКЕТИРОВАНИЯ

Брикетиrowание является сложным процессом, включающим в себя различные физические и физико-химические явления. Получение брикетов является сложным комплексом, состоящим из физико-механических процессов уплотнения мелкозернистых материалов и физико-химических процессов смачивания, адгезии, когезии частиц.

Не вызывает сомнений, что определяющие влияния на процесс брикетиrowания оказывает химико-минералогический состав материала. Хотя в отдельных работах [14,94,101,141] присутствуют попытки оценки влияния химико-минералогического состава, на сегодняшний день нельзя с полной уверенностью судить о степени влияния на конечный результат того или иного минерала или элемента.

Большинство исследований направлены исключительно на поиск рациональных параметров ведения процесса для конкретного материала. Рассмотрению теоретических основ отводится второстепенное место, однако, несмотря на огромное разнообразие руд и концентратов, разительно различающихся химико-минералогическим составом и физико-химическими свойствами, основные технологические параметры брикетиrowания имеют аналогичный характер влияния на конечный результат для всего спектра мелкозернистых материалов.

2.1 Механизм формирования брикета

Образование брикетов в валковом прессе происходит в результате двухстороннего обжатия материала, что является достоинством таких прессов. Двухстороннее обжатие позволяет получать брикеты с высокой и равномерной плотностью. При поступлении в пространство между валками шихта заполняет ячейки. По мере сближения ячеек шихта уплотняется, давление прессования возрастает и достигает максимального значения в момент наибольшего

сближения ячеек. Начальная толщина слоя брикетируемой шихты с приложением давления прессования уменьшается до минимальной, отвечающей рабочему зазору между валками. За зоной контакта валков готовые брикеты выпадают из ячеек.

Непосредственно прессование мелкозернистых материалов происходит в очаге деформации (рисунок 2.1). Под очагом деформации подразумевается объем шихты, расположенный между валками и ограниченный сверху сечением, в котором имеется контакт между шихтой и обоими валками, а снизу сечением выхода спрессованного брикета из валков. Зона деформации материала определяется с одной стороны геометрическими и конструктивными параметрами пресса, с другой стороны – свойствами шихтовых материалов, в частности, коэффициентами внутреннего и внешнего трения. Зону деформации можно разделить на три характерные зоны: зону подачи, зону сдвигов и зону прессования шихты [142].

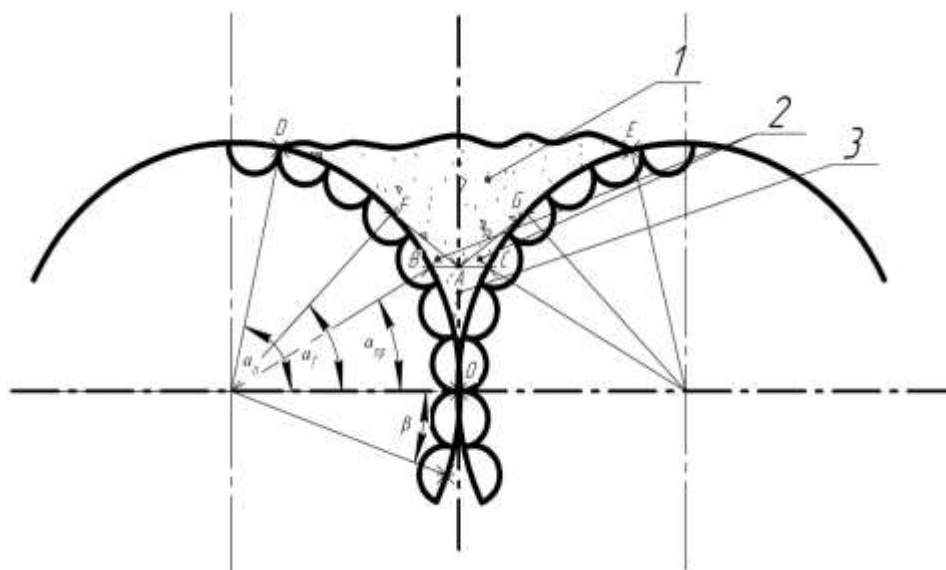


Рисунок 2.1 – Очаг деформации. 1 – зона подачи (плоскость DFAGE), 2 – зона сдвигов (плоскости FAB и GAC), 3 – зона прессования (плоскость BOC), $\alpha_{п}$ – угол подачи шихты, $\alpha_{пр}$ – угол прессования, α_r – граничный угол подачи, β - угол упругого расширения

В зоне 1 (зоне подачи) происходит скольжение слоев шихты относительно поверхности валков и друг друга, происходит более плотная, чем при насыпке, укладка частиц шихты и шихта приобретает плотность, равную насыпной массе утряски [143].

При перемещении шихты в зону 2, в результате сил трения на контактной поверхности вала и в силу специфических физико-механических свойств самой шихты происходит, образование зон сдвигов (затруднённой деформации), в которых шихта находится в заклиненном состоянии [144].

Взаимодействие зон затрудненной деформации, принадлежащих разным валкам, приводит к частичному их разрушению и образованию со стороны свободной поверхности шихты зоны сдвигов. Зона сдвигов ограничена от зоны подачи линиями скольжения AF и AG. По линиям скольжения происходит сдвиг деформируемой шихты. В результате отеснения шихты вверх по линиям скольжения, навстречу направлению подачи, происходит ее скольжение по поверхности валков, образуя зону отставания. Ниже линий скольжения относительные смещения частиц отсутствуют, и шихта перемещается в зону прессования – 3 зону [144].

В зоне прессования, ниже линии BC, начиная с угла $\alpha_{пр}$, под силовым воздействием валков шихта постепенно уплотняется и формуется до толщины брикета [143].

Важнейшими параметрами процесса брикетирования мелкофракционных материалов являются центральные углы. Угол подачи шихты α_n определяется уровнем шихты над линией центров валков. Изменение угла подачи материала влияет на свойства брикетов лишь в ограниченном интервале. По достижению определенного для каждого порошка и условий брикетирования угла α_n толщина и плотность брикетов перестают изменяться, и дальнейшее увеличение угла подачи не оказывает влияние на свойства брикетов, поэтому α_r – граничный угол подачи. Угол прессования $\alpha_{пр}$ – определяет зону прессования и характеризует начало прессования шихты. Зона, ограниченная углом β , называется зоной разгрузки а, сам угол называется углом упругого расширения [142-144].

Для получения максимальных показателей прочности брикетов угол $\alpha_{пр}$ и должен находиться в пределах $7-10^0$ [8,53,145]. При достижении максимального сжатия смеси этот угол становится равным нулю. Максимальное значение угла β – $3-5^0$ [8,53,145]. Для определения угла прессования, соответствующего началу формирования брикетов, используется формула [142]:

$$\alpha_{пр} = \arccos [1 - (K_y - 1) \cdot H_{бр} / D_0], \quad (2.1)$$

где $H_{бр}$ – средняя толщина брикета, D_0 – приведенный диаметр валков, K_y – коэффициент уплотнения, равный отношению насыпной плотности материала к кажущейся плотности брикета.

При брикетировании мелкофракционные материалы подвергаются всестороннему (хотя и не вполне равномерному) давлению, которое уравнивается внутренними напряжениями в теле, направленными противоположно давлению. Поэтому после снятия давления внутренние напряжения, ранее уравнивавшиеся нагрузкой, деформируют материал в направлении противоположном направлению нагрузки, т.е. восстанавливают в некоторой степени первоначальную форму. Это явление называется упругим последствием (расширением). Растягивающие напряжения, обусловленные упругостью частиц материала и давлением запрессованного воздуха, стремятся компенсировать разность между напряжением и трением. После частичного расширения силы уравниваются и процесс прекращается. Упругое расширение возможно, когда упругие силы больше чем сила трения. Величина упругого расширения зависит от формы брикета и тем больше чем выше давление прессования и твердость материала [146-148]. Степень упругого расширения можно определить по формуле [8,145]:

$$\beta = \arccos [1 - (h_1 - h_2) / D_0]; \quad (2.2)$$

где h_1 – толщина брикета по линии центров, h_2 – конечная толщина брикета, D_0 – диаметр валков.

2.2 Давление прессования

Между давлением прессования и прочностью брикетов существует линейная зависимость – с ростом давления возрастает и прочность. Так, при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» рост давления брикетирования с 35 до 50 кН приводит к более чем двукратному увеличению прочности брикетов на сжатие – с 69 до 149 кгс/брикет (рисунок 2.2, приложение А) [149]. Высокие давления необходимы для создания максимального контакта между частицами материала в брикете.

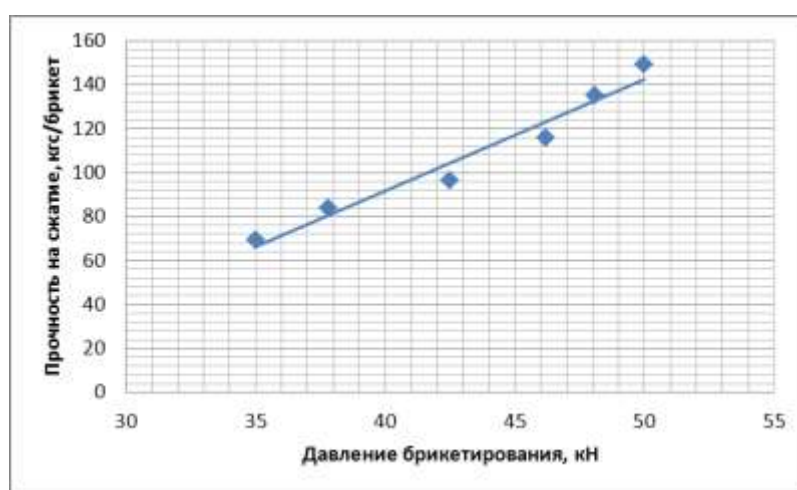


Рисунок 2.2 – Влияние давления прессования на прочность брикетов медно-никелевого концентрата, полученных с использованием в качестве связующего комбинированного связующего ЛСТ-Comprex A12. Содержание связующего – 10%; рабочая влажность - 1,2%

Давление при брикетировании распространяется волнообразно, уменьшаясь в глубину брикета [8]. Уплотнение прекращается вследствие погашения давления от места возбуждения. Это происходит исключительно по причине усиления трения между частицами в результате нарастания усилий. Чем равномернее распределено давление по поверхности брикета, тем прочнее его структурные связи.

При брикетировании происходит изменение структуры и свойств мелкозернистых материалов [147,150]: увеличивается площадь контакта между

частицами материала, повышается прочность, уменьшается пористость, измельчаются скопления частиц, а иногда и сами частицы (происходит их упрочнение - наклеп). Деформация частиц материала в процессе брикетирования протекает неравномерно, как в объеме брикета, так и в каждой индивидуальной частице порошка. Создается неравномерная деформация структурных подразделений (частиц) как по величине, так и по направлению.

Неупорядоченное взаимное расположение частиц определяет величину и направление усилий, приложенных к каждой отдельной частице. Очевидно, что степень деформации частиц будет различной. Внутри отдельных частиц также создается неравномерная деформация. Приложение усилий к частице может быть одно- или многоступенчатым, нагрузка может быть распределена равномерно или неравномерно, приложена в одной или нескольких точках и т.п. Иначе говоря, в частице могут одновременно осуществляться всевозможные варианты деформации: упругая, хрупкая и пластическая. Таким образом, в результате брикетирования получается конгломерат частиц, находящихся в различной степени напряженного состояния и с различной степенью деформации в разных зонах одной и той же частицы.

Усилие прессования необходимое для получения нормативной прочности брикетов, в большинстве случаев растет с дисперсностью материала. Кроме того, с ростом давления прессования значение рациональной точки влажности материала, отвечающей максимуму прочности брикетов, снижается [27,151].

Чрезмерно высокие давления прессования могут иметь отрицательное влияние качество брикетов. Так, при брикетировании медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» слишком высокое давление прессования приводит к выдавливанию воды и жидкого связующего на поверхность брикета. Одновременно происходит снижение доли пластических деформаций и рост хрупких. Преобладание хрупких деформаций приводит к образованию поверхностей, не покрытых связующим. В результате происходит нарушение структуры брикета, что в свою очередь сказывается на механических свойствах –

брикет после выхода из ячеек брикет-пресса разрушается по линии соединения полусфер.

В конечном итоге, при брикетировании давление прессования (P) затрачивается на [147,150]: преодоление трения частиц друг о друга (P_1); преодоления трения частиц о поверхность валков (P_2); на деформацию частиц (P_3); деформацию рабочей поверхности (P_4).

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (2.3)$$

2.3 Гранулометрический состав

Мелкозернистые материалы характеризуются высокой полидисперсностью и широким многообразием форм частиц. Частицы могут быть сферической, чешуйчатой, дендритной, оскольчатой и т.д. формы. Частицы имеют внутренние поры, а на своей поверхности множественные выступы и углубления. Кроме того, тонкодисперсные материалы обладают высокой удельной поверхностью, что определяет наличие большого избытка поверхностной энергии. Избыток поверхностной энергии в свою очередь обуславливает стремление частиц к агрегации, то есть к переходу в устойчивое термодинамическое состояние.

Известно [43,150,152], что при брикетировании с увеличением дисперсности порошка, увеличивается площадь контакта между зернами, а, следовательно, и прочность получаемых брикетов, однако так же возрастает и давление прессования, необходимое для достижения заданной плотности. Повышение дисперсности оказывает положительное влияние до определённого предела, при превышении которого из-за образования коагуляционной структуры невозможно получить достаточно прочные брикеты. В таком случае не удастся прорвать сольватные оболочки, окружающие частицы, и сблизить их. Пористость таких брикетов получается относительно невысокой.

Исследуя [149] влияние гранулометрического состава просора песчаника на прочность брикетов было установлено, что по мере уменьшения крупности

частиц растет прочность брикетов. Если при отсутствии измельченной фракции просора песчаника прочность брикетов составляет 33кгс/брикет, то при ее 30% содержании прочность возрастает на 12%, а при 100% содержании – на 67% и составляет 55 кгс/брикет. Однако зависимость носит нелинейный характер и имеет максимум, отвечающий содержанию измельченного просора в шихте на уровне 80-85% (следует отметить, что в работе [152] получена аналогичная зависимость) (рисунок 2.3). Это объясняется тем, что, частицы крупной фракции создают своеобразный каркас, пустоты которого, а также поры крупных частиц заполняют мелкие пылевидные фракции. Такая упаковка части характеризуется большой площадью контакта зерен. Низкая пористость и большая площадь контакта приводят к более равномерному распределению по телу брикета внешних разрушающих воздействий, которые он испытывает при транспортировке и перегрузках, обуславливающему высокие прочностные характеристики брикетов.

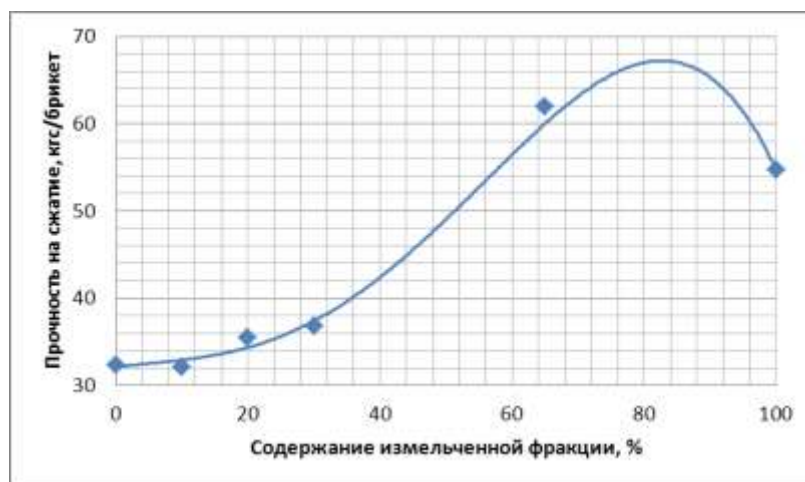


Рисунок 2.3 – Зависимость прочности брикетов просора песчаника КУР, полученных при использовании извести в качестве связующего, от содержания измельченной фракции просора. Расход связующего – 10%; рабочая влажность 3,2-3,7%

2.4 Влажность шихты

Особенно сильно прочность брикетов зависит от содержания влаги и формы ее связи с материалом. Поверхность воды, как и любой жидкости, обладает силовым молекулярным полем, благодаря которому она может взаимодействовать с поверхностями твердых частиц. В отличие от последних вода способна изменять свою поверхность и повторять рельеф поверхности твердых частиц. В результате возникает Ван-дер-Ваальсово взаимодействие между поверхностями адсорбированной воды и твердых частиц. Таким образом, прослойка воды, заключённая между двумя частицами, позволяет связывать частицы на расстояниях больших, чем Ван-дер-Ваальсов радиус взаимодействия двух частиц в отсутствии жидкой фазы.

При окусковании мелкозернистых материалов наибольший интерес представляют адсорбированная и капиллярная вода [25,26,153].

Адсорбированная вода образует своеобразный мономолекулярный «частокол», составленный из ориентированных перпендикулярно поверхности зерна молекул воды. Внутренние концы притягиваются к поверхности частиц, тогда как внешние концы притянутых молекул воды образуют новую поверхность, способную притягивать следующий слой молекул. Адсорбированная вода в зависимости от формы частиц образует на их поверхности пленку различной толщины. Наличие такой пленки благоприятствует подвижности частиц относительно друг друга при наложении давления прессования – повышается площадь контакта зерен.

Важнейшей особенностью воды в капиллярном состоянии является, то, что она обладает капиллярным отрицательным давлением, в результате которого возникают стягивающие капиллярные силы [25,26].

Достоверно известно [25,26,43], что зависимость прочностных характеристик брикетов от влажности носит экстремальный характер. При очень низком содержании воды сеть капилляров частично заполняется воздухом, количество жидкостных мостиков уменьшается, величина капиллярного давления

понижается, что ведет к уменьшению прочности брикетов. Рациональная влажность, при которой достигается наибольшая прочность брикетов, характеризуется наличием манжет во всех точках контакта и оптимальным содержанием воды в них. С увеличением влажности сверх предельного содержания происходит утолщение водных пленок, сопровождающееся отдалением друг от друга твердых частиц с соответствующим снижением молекулярных сил. Капиллярная вода по мере роста влажности переходит в канатное состояние и впоследствии заполняет всю пору. При этом происходит уменьшение, а затем и полное исчезновение стягивающих капиллярных менисков, что вызывает постепенное падение капиллярных сил и снижение прочности брикетов.

Вероятнее всего, значение рациональной влажности шихты, обеспечивающей максимальную прочность брикетов, соответствует значению максимальной молекулярной влагоемкости брикета (ММВ). При прочих равных условиях брикеты, полученные из различных мелкозернистых материалов, имеют различную плотность и пористость, обуславливаемые химико-минералогическим составом и физико-химическими свойствами (рисунок 2.4). Пористость, в свою очередь, определяет величину ММВ, а, следовательно, и значение рациональной влажности шихты. Из этого следует, что изменение давления прессования и дисперсности шихты, оказывает влияние на значение рациональной влажности брикетируемой шихты.

2.5 Связующие вещества

Основная роль при брикетировании мелкофракционных материалов принадлежит связующим веществам. Следует отметить, что альтернативой брикетированию с использованием связующих, является брикетирование мелкозернистых материалов при значительно больших усилиях прессования, составляющих не традиционные 25-50, а 150-200 кН/см (по другой классификации 5-25 и 90-200 МПа) [7,10,11]. В этом случае возможно получение

брикетов, обладающих должными прочностными характеристиками без участия связующих веществ [154].

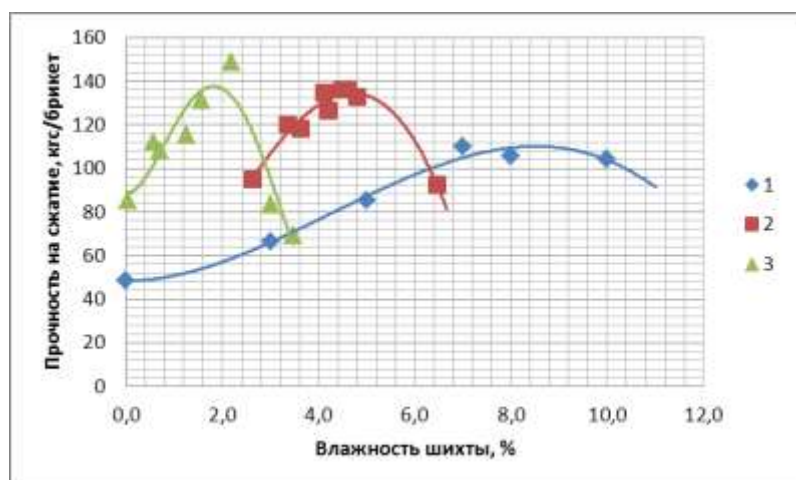


Рисунок 2.4 – Зависимость прочности брикетов на сжатие от влажности шихты: 1– Окисленная никелевая руда без связующего, 2 – Песчаник КУР с использованием в качестве связующего ЛСТ (после упрочнительной сушки), 3 – Медно-никелевый концентрат с использованием в качестве связующего ЛСТ

Используемые для этих целей валковые прессы имеют значительно больший вес и потребление энергии, сложны в управлении. Капитальные затраты на монтаж и изготовление фундамента для таких прессов значительно выше, чем для обычных. По этим причинам брикетирование при повышенных давлениях не получило широкого распространения в металлургической промышленности (см. рисунок 2.5).

В независимости от природы связующего значительное влияние имеет его агрегатное состояние (рисунок 2.6). Порошковые связующие, как правило, обладают невысокой реакционной активностью, что позволяет получать качественные брикеты только после длительной выдержки шихты, во время которой происходит развитие взаимодействия между связующим и частицами материала. Кроме того, введение связующего в виде порошка создает многокомпонентную смесь, должное усреднение которой подчас не

представляется возможным. Это приводит к тому, что получаемые брикеты обладают весьма разрозненными прочностными характеристиками, что отрицательно сказывается на следующем этапе производства.

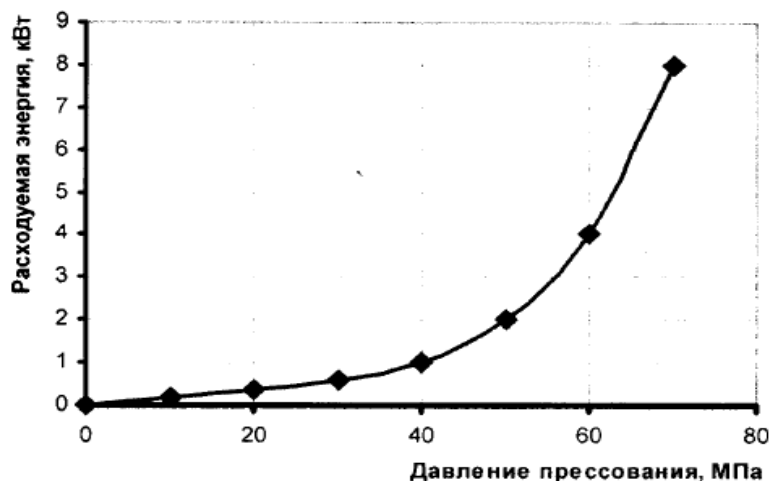


Рисунок 2.5 – Зависимость расходуемой энергии от давления прессования [155]

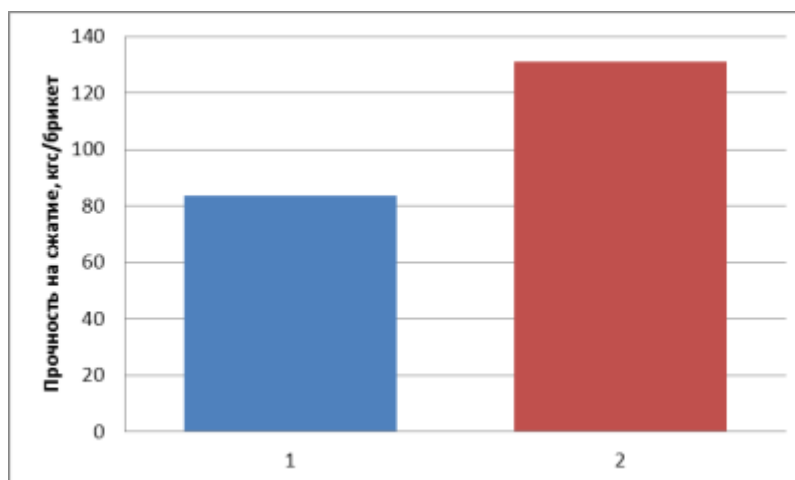


Рисунок 2.6 – Влияние агрегатного состояния связующего (ЛСТ), при одинаковых расходах на сухой вес, на прочность брикетов медно-никелевого концентрата: 1 – порошок, 2 – жидкий раствор

Связующие вещества в виде растворов более равномерно распределяются в объеме брикетируемого материала. Они образуют на поверхности частиц тонкий слой клеевой пленки, увеличивающий истинную площадь контакта частиц и способствуют развитию максимальных значений адгезионных сил. Эти

обстоятельства, а также более высокая реакционная способность, нежели у порошковых связующих, позволяет получать брикеты более высокой прочности [149].

Как показывает практика [156,157] минеральные связующие обладают низкой эффективностью по сравнению со связующими органической природы. Чаще всего для достижения соизмеримой прочности брикетов расход неорганического связующего превышает в несколько раз аналогичный показатель для органического.

Органические связующие в основном являются высокомолекулярными соединениями сложного состава. Их вяжущая способность определяется геометрией молекул, строением отдельных звеньев макромолекул и их структурой. Прочность брикетов, полученных при использовании органических связующих, главным образом обуславливается адгезией, аутогезией и когезией. Согласно уравнению Дюпре – Юнга работа адгезии равна [158-160]:

$$W_a = \sigma_{\sigma,c} \cdot (1 + \cos\theta) \quad (2.4)$$

где $\sigma_{\sigma,c}$ – поверхностное натяжение на границе воздух-связующее, θ – равновесный краевой угол смачивания.

Значение равновесного краевого угла зависит от многих факторов, в том числе от шероховатости и химической однородности поверхности частиц. Чувствительность θ к энергетической неоднородности поверхности, связанной с ее микрорельефом, зависит от концентрации и морфологии дефектов, а также от ориентации дефектов (впадин и выступов). Даже незначительное изменение химического состава поверхности вызывает изменение величины краевого угла [160].

Исходя из выражения 2.4, можно сделать вывод, что работа адгезии имеет максимальную величину при низких значениях угла θ (в идеале $\theta \rightarrow 0$), способствующих развитию максимальной площади контакта между частицами и связующем.

Аутогезия представляет собой частный случай адгезии. Аутогезию рассматривают как самослипание двух приведенных в соприкосновение

поверхностей одного и того же вещества, препятствующее их разделению по месту контакта. Все характерные закономерности для адгезии присущи также аутогезии.

Работа когезии связующего является мерой его механической прочности. В ряде случаев, в частности, когда содержание связующего в брикетируемой шихте велико или при некачественном его смешении с мелкозернистым материалом, разрушение брикетов под действием внешней силы обусловлено когезионным разрывом. В свою очередь работа когезии равна [160]:

$$W_k = 2 \cdot \sigma_{\sigma, c} \quad (2.5)$$

Таким образом, для обеспечения максимальных прочностных характеристик брикетов молекула органического связующего должна обладать следующими характеристиками в строении [89]:

- гидрофильными группами, обеспечивающими высокую смачиваемость поверхности частиц;
- полярными группами, химически взаимодействующими с поверхностными молекулами рудных частиц;
- органическим цепным скелетом, который обеспечивает прочностные характеристики связующего и его термостойкость.

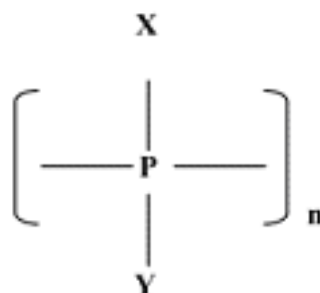


Рисунок 2.7 – Молекулярная структура оптимального органического связующего. X – полярная группа, Y – гидрофильная группа, P – скелет органической цепи, n – степень полимеризации

Выбор полярной группы осуществляется на основании комплекса ее химических свойств и химико-минералогического состава материала. Согласно

электронной теории кислот и оснований Льюиса все вещества можно подразделить на два типа – кислоты и основания, которые в свою очередь на основании принципа Пирсона делятся на: сильные, промежуточные и слабые, причем мягкие кислоты преимущественно реагируют с мягкими основаниями, а жёсткие кислоты – с жёсткими основаниями [161]. Зная минералогический состав мелкозернистого материала и классификацию согласно теории Льюиса и принципа Пирсона можно определить наиболее перспективные полярные группы.

Характеристических параметры полярных групп могут быть рассчитана с использованием метода молекулярных орбиталей Хюккеля. Решив орбитальные уравнения, определяется орбитальная энергия группы, потенциал ионизации и сродство к электрону. Чем выше их значения, тем выше вероятность взаимодействия полярной группы с молекулами, входящими в состав минералов мелкозернистого материала.

Оценить силу образующейся связи можно рассчитав ее ионность. Для расчета ионности связи Полинг предложил следующее выражение [162]:

$$\Phi = 1 - \exp \left[- \frac{1}{4 \cdot (X_a - X_b)^2} \right] \quad (2.6)$$

где Φ – ионность связи, X_a и X_b – электроотрицательности полярной группы связующего и иона (группы) минерала.

Общеизвестным является тот факт, что органические полимеры при сравнительно невысоких температурах подвергаются пиролизу, что может создавать определенные трудности на этапе подготовки шихты к брикетированию. Высокая термическая стабильность связующего достигается за счет увеличения количества двойных и тройных связей, включения в структуру ароматических и гетероциклических колец, минимизации количества одинарных связей между атомами углерода. Двойные и тройные связи, ароматические кольца обладают большей энергией связи по сравнению с одинарными связями, и делают молекулу связующего более устойчивой к воздействию высоких температур.

Обратной стороной такого усложнения молекулы является снижение ее гибкости, что может привести к нарушению структуры молекулы и потере важнейших свойств.

Важным фактором, влияющим на характеристики связующего, является степень полимеризации (n). Эта величина определяет его молекулярный вес, в то время как молекулярный вес оказывает важное влияние на когезионную силу связующего, и, соответственно, на его механическую прочность и термическую стабильность. Для связующих с низким молекулярным весом характерно относительно слабое взаимодействие между соседними цепями. Перемещение одной цепи относительно другой происходит легко, растяжение или сдвиг молекул практически отсутствуют. В связующих с высоким молекулярным весом взаимодействие цепей значительно больше, имеет место, так называемое молекулярное запутывание, которое приводит к зацеплению и переплетению соседних молекул связующего. Молекулярное запутывание способствует рассеиванию силовых напряжений, что позволяет молекуле эффективно сопротивляться как сдвиговым, так и растягивающим напряжениям. Однако не следует забывать, что вязкость раствора полимера быстро увеличивается с его молекулярной массой, что в свою очередь приводит к снижению смачиваемости поверхности брикетируемого материала.

Повышение длины цепи и увеличение разветвленности органического связующего способствует повышению его вяжущих свойств и получению брикетов, обладающих высокими прочностными характеристиками. Введение в состав молекулы связующего большого числа гидрофильных групп делает его в водной среде поверхностно-активным веществом, что приводит к улучшению смачивания и росту площади контакта между связующим и частицами материала. Главный недостаток – сравнительно низкая растворимость в воде, обусловленная высокой степенью полимеризации связующего. Это означает, что водные растворы связующего на пределе насыщения представляют собой гели или эмульсии, дозировка и равномерное распределение которых в объеме мелкозернистого материала весьма затруднительно.

2.6 Температура прессования

Важным фактором повышения прочностных характеристик брикетов является температура прессования. Под температурой прессования следует понимать, как температуру брикетируемой шихты, так и температуру вводимого связующего.

При повышении температуры шихты, поступающей на брикетирование, с 25 до 85⁰С происходит увеличение прочности брикетов в 1,5-2 раза (рисунок 2.8). Нагрев брикетируемой шихты способствует повышению ее пластичности в процессе прессования, что ведет к более равномерному распределению давления [147,163].

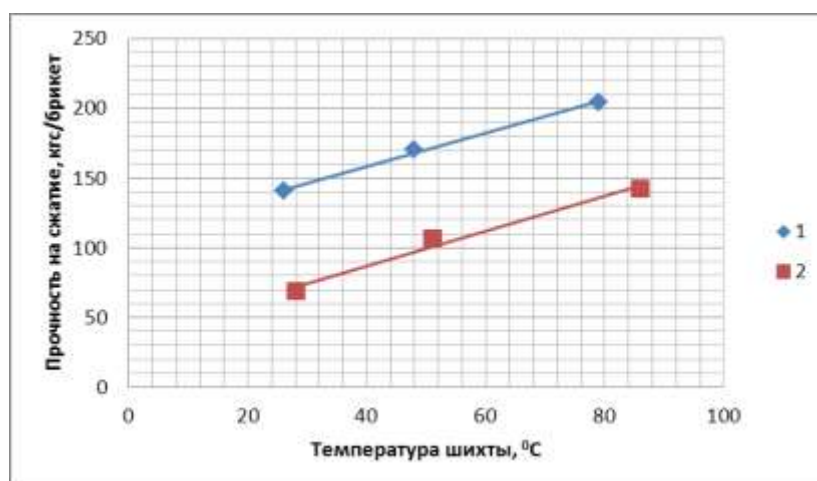


Рисунок 2.8 – Влияние температуры брикетируемой шихты на прочность брикетов медно-никелевого концентрата. Содержание связующего (меласса), %:

1 – 12, 2 – 8

Технологически предварительный нагрев реализуется на этапе подготовки шихты к брикетированию на стадии ее сушки до рабочих значений влажности. Необходимо стремиться к тому, чтобы на валки брикет-пресса шихта поступала с максимально возможной температурой. В тех случаях, когда влажность материала, подступающего на брикетирование, ниже рабочей, вследствие чего отсутствует стадия сушки шихты, организация предварительного подогрева шихты приведет к усложнению процесса и росту затрат, что нецелесообразно.

Нагрев связующего позволяет существенно снизить его вязкость, в результате чего достигается тонкослойное растекание связующего по поверхности зерен. Это позволяет свести к минимуму количество зерен непокрытых связующим, что способствует усилению адгезионного взаимодействия между частицами.

Недостаточная температура брикетируемой шихты приводит к тому, что смачивание связующим твердой поверхности почти не наблюдается. Адгезионные связи в этом случае образуются лишь за счет незначительных точечных контактов капелек связующего. Для повышения прочности получаемых брикетов при низкой температуре прессования неизбежно увеличение расхода связующего [8].

В конечном итоге увеличение температуры прессования позволяет снизить величину давления и расход связующего, необходимые для получения качественных брикетов.

2.7 Упрочняющие операции

Не смотря на выбор рациональных параметров процесса брикетирования (влажность, давление прессования, выбор и расход связующего и т.д.) могут возникать ситуации, когда получаемые брикеты не удовлетворяют нормативным требованиям производства и придание им необходимых прочностных характеристик возможно лишь с помощью дополнительной упрочняющей обработки. На текущий момент известно несколько способов упрочнительной обработки: вылеживание при естественных условиях, искусственная сушка, автоклавное упрочнение [10,11,43], СВЧ упрочнение [64]. Наибольшее распространение в практике брикетирования мелкозернистых материалов нашли вылеживание и упрочнительная сушка.

В процессе естественного вылеживания брикеты в зависимости от рабочей влажности теряют или поглощают атмосферную влагу, выходя на определенный равновесный уровень влажности, величина которого определяется равновесием между процессами сорбции и десорбции водяного пара из тела брикетов, и

зависит от степени гидрофобности материала брикетов и влажности окружающего воздуха (рисунок 2.9). В тех случаях, когда рабочая влажность превышает равновесный уровень, наблюдается увеличение прочности брикетов по мере снижения их влажности, причем, чем больше разница между рабочей и равновесной влажностью, тем сильнее прирост прочности. Если же рабочая влажность имеет более низкое значение чем равновесная, то увеличение прочности отсутствует, а в некоторых случаях отмечается незначительное снижение прочности (см. рисунки 4.16 и 4.17, 4.56 и 4.57, 4.62-4.65, а также Приложение Б).

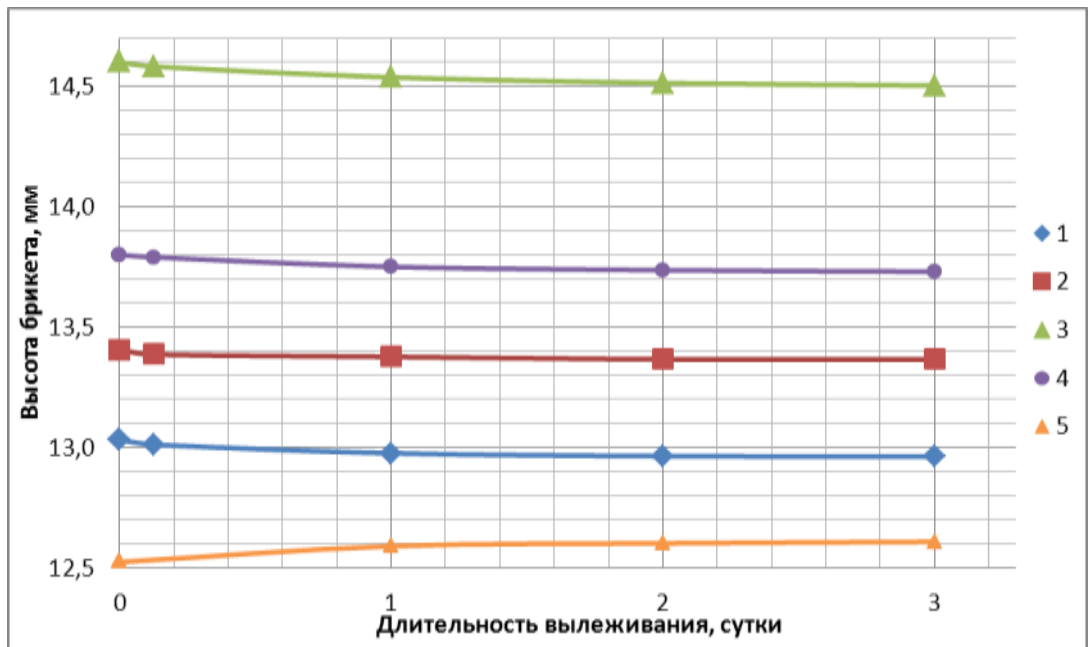


Рисунок 2.9 – Изменение высоты брикетов медно-никелевого концентрата, полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Complex A12, с течением времени. Рабочая влажность: 1 – 1,39%, 2 – 0,92%, 3 – 2,45%, 4 – 1,63%, 5 – 0,15%

Наибольшее возрастание прочностных свойств наблюдается в первые сутки их вылеживания. По мере достижения равновесной влажности рост прочности прекращается. Рост или снижение прочности в обоих случаях объясняются изменением площади контакта между частицами (см. рисунок 2.9). Так по мере испарения влаги частицы стягиваются, и площадь контакта между

ними возрастает, обуславливая увеличение прочности. В результате сорбции водяных паров в порах брикета происходит отдаление части друг от друга, препятствующие росту прочности.

Вылеживание является наиболее простым способом повышения прочности брикетов, однако его реализация требует организации больших складских площадей, на которых это вылеживание будет проводиться.

Наиболее эффективным способом повышения прочностных характеристик брикетов является их сушка. Процесс упрочняющей сушки брикетов проводится в потоке топочных газов (теплоноситель), получаемых путем сжигания топлива, или же в потоке отходящих газов, образующихся на одной из технологических стадий производства. Процесс сушки состоит из перемещения влаги внутри брикета, парообразования и последующего перемещения влаги из тела брикета в окружающую среду. При сушке брикетов имеют место все виды теплопередачи, однако, доминирующим является конвекция [164].

В процессе термической сушки удаление влаги из тела брикета сопровождается увеличением площади контакта между зернами материала, способствующим росту прочности брикетов. Решающее значение в этом случае имеет величина остаточной влажности. Так, например, увеличение значения остаточной влажности на 0,5% приводит к снижению прочности брикетов из медно-никелевого концентрата в несколько раз [151].

Интенсивность сушки, то есть предельные значения скорости и особенно температуры газа-теплоносителя определяются отсутствием разрушений в теле брикета. При чрезмерно высокой интенсивности наблюдаются два типа разрушений [26,73]: трещинообразование на поверхности брикета и взрывное разрушение с образованием мелочи, которое называют «термошоком». При брикетировании мелкозернистых руд и концентратов с использованием органических связующих предельная температура сушки будет ограничиваться не критической температурой, при которой возникают разрушения, а значением температуры пиролиза связующего. Превышение предельной температуры при сушке приведет не только к снижению прочности брикетов, но и к значительному

ухудшению экологической обстановки на производственных объектах и в регионе в целом.

2.8 Выводы по главе 2

На основании анализа собственных и представленных в известных работах других авторов исследований можно сделать вывод, что даже незначительное изменение одного из технологических параметров потребует корректировки остальных, для сохранения стабильного протекания процесса брикетирования.

Естественно, в промышленных условиях стремятся обеспечить максимально допустимые усилия и температуру прессования. Гранулометрический состав мелкозернистого материала полностью определяется стадией, предшествующей брикетированию, будь то дробление или пылеулавливание. А это значит, что доизмельчение или гранулирование какой-либо пусть и самой малой доли мелкофракционного материала для создания оптимального гранулометрического состава, проводиться не будет в связи с неизбежным удорожанием производства брикетов. Несмотря на положительный эффект упрочняющих операций, их внедрение неизбежно повлечет за собой как высокие капитальные затраты и так рост текущих, что в известной степени сказывается на себестоимости. Из двух оставшихся рассматриваемых параметров в большей степени влияние на эффективность процесса брикетирования, несомненно, оказывает правильный выбор связующего вещества.

Так как на текущий момент не существует универсального связующего и достоверных критериев, позволяющих без проведения многочисленных экспериментов оценить эффективность того или иного связующего вещества, то можно лишь обозначить направления поиска связующих для брикетирования мелкозернистых материалов в металлургической промышленности: вещества, являющиеся собственными полупродуктами или отходами производств; органические вещества полимерного строения.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ ЗАСКЛАДИРОВАННОГО ПРОСОРА ПЕСЧАНИКА КАЙЕРКАНСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

На Заполярном Филиале ПАО «ГМК «Норильский Никель» за время многолетней разработки Кайерканского угольного разреза скопилось огромное количество просора песчаника (силикатного флюса). На текущий момент в качестве силикатного флюса, используемого во многих пиromеталлургических процессах комбината, применяется кусковой песчаник и дорогостоящий речной песок. Вовлечение в переработку просора песчаника рассматривается в качестве альтернативы существующим источникам силикатного флюса. Однако, вследствие того, что крупность частиц просора песчаника месторождения КУР УНГП (Кайерканский угольный разрез управления не горных предприятий) составляет 0% по классу +20мм, а по классу -5мм составляет более 70%, использование его в неподготовленном виде в пиromеталлургических процессах Заполярного филиала из-за большого пылевыноса и согласно правилам безопасности (выбросы расплава из металлургических агрегатов) не представляется возможным. Для использования просора песчаника КУР в пиromеталлургических переделах ЗФ, его следует брикетировать.

3.1 Описание конструкции лабораторного брикет-пресса

Исследования проводились на валковом прессе В050 производства американской компании «K.R. Komarek Inc.» (рисунок 3.1). Выбор этого валкового пресса обусловлен тем, что в ходе испытаний [165] по отработке технологии брикетирования коллективного медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК», проведенных в компании «K.R. Komarek Inc.» в г. Аннистон (Алабама, США) при переходе от лабораторных экспериментов, осуществленных на прессе В050, к укрупнено-лабораторным (пресс В220, производительностью 1,5 т/час) и далее к опытно-промышленным (пресс ДН500, производительностью 40 т/час) были получены идентичные результаты по выбору рациональных

параметров шихты (влажность, содержание связующего), работе пресса (скорость вращения валков, зазор между ними, давление прессования) и прочностным характеристикам брикетов (прочность на сжатие). Та же картина повторилась при отработке технологии брикетирования концентрата без упрочнительной сушки брикетов на лабораторном валковом прессе В050 производства компании «K.R. Komarek Inc.» и переходе к опытно-промышленным испытаниям, проведенным в компании «Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co.KG» в г. Фрайберге (Германия) на валковом прессе 52/10-3C 140 DG, на брикетной фабрике ОАО «Медногорский МСК» на валковом прессе 92/10-8D 1225DG2E компании «Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co.KG» и на валковом прессе ПБВ-700/300-200 производства ЗАО «НПО Спайдермаш» (Россия, г. Екатеринбург). Все это свидетельствует, что брикетирование различных дисперсных материалов на брикет-прессе В050 производства компании «K.R. Komarek Inc.» хорошо моделирует процесс брикетирования на промышленных валковых прессах и позволяет получить брикеты с идентичными прочностными характеристиками.

Материал из загрузочной воронки (1) подается в зазор между валками горизонтальным шнеком (3), приводимым в движение приводом с переменной скоростью. Материал, помещаемый в загрузочную воронку, можно смешивать со связующим веществом перед брикетированием или прессованием с помощью мешалки, которая является частью конструкции аппарата. При брикетировании (прессовании) шнек доставляет материал к двум валкам (2), расположенным консольно на концах валов снаружи блоков подшипников. Валки также приводятся в движение приводом с переменной скоростью. Полностью регулируемая гидросистема (5) прижимает валки друг к другу с требуемым усилием. Детали, находящиеся в контакте с обрабатываемым материалом, изготовлены из коррозионно-устойчивого конструкционного материала (нержавеющая сталь 316, 304). В таблице 3.1 приведены Основные технические характеристики валкового пресса.

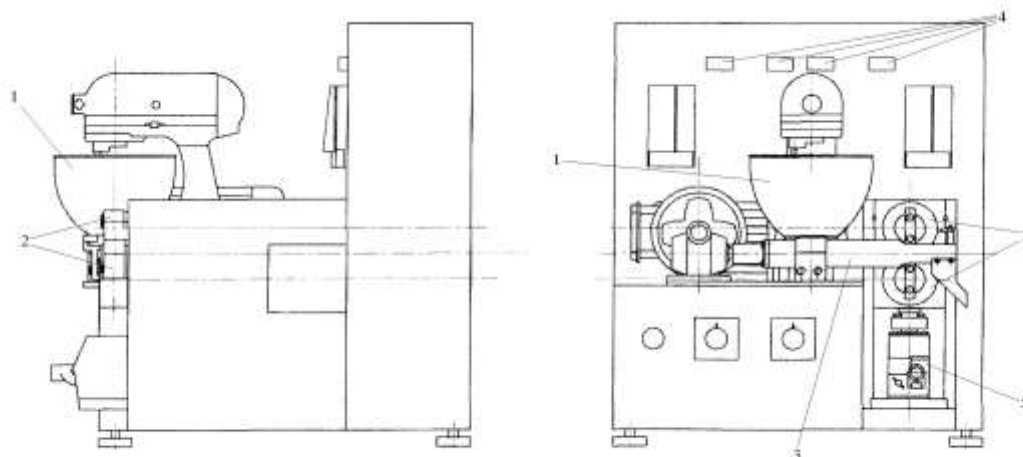


Рисунок 3.1 – Общий вид валкового пресса B050 производства фирмы «K.R. Komarek Inc.». 1 – смеситель, 2 – валки, 3 – шнек, 4 – КИП, 5 – гидравлическая система

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики валкового пресса B050 производства фирмы «K.R. Komarek Inc.»

п/п	Техническая характеристика	Размерность	Величина
1	Диаметр валков	мм	100
2	Ширина валков	мм	38
3	Скорость вращения валков	об/мин	0 - 7,5
4	Максимальный крутящий момент валков	Н·м	380
5	Максимальное давление прессования	кН	50
6	Количество рабочих ячеек на валке		16
7	Размер брикетов	мм	34×18×12
8	Скорость вращения шнекового питателя	об/мин	0 - 137
9	Максимальный крутящий момент шнека	Н·м	42
10	Скорость вращения мешалки		переменная
11	Общая производительность пресса	кг/час	1 - 25
12	Общая установленная мощность	кВт	1,5
13	Масса пресса	кг	310

Установка оснащена соответствующими датчиками контроля всех основных параметров процесса. Изменение во времени этих параметров

фиксируется с помощью подключения выходных клемм панели управления к соответствующим системам сбора информации

3.2 Материалы, используемые в исследовании

Просор песчаника месторождения КУР УНГП

В экспериментах в качестве объекта брикетирования использовалась проба просора песчаника месторождения КУР УНГП, содержащая по результатам химического анализа, выполненного в ИАЦ ООО «Институт Гипроникель», %: 1,12 Fe_Σ; 1,44 FeO; 0,52 CaO; 0,41 MgO; 10,2 Al₂O₃; 72,3 SiO₂; 0,60 Na₂O; 2,58 K₂O; 0,25 S_Σ; 0,07 S_{so₄}; 7,2 C.

По данным рентгенофазового анализа, проведенного на дифрактометре ДРОН-4, основа пробы просора песчаника месторождения КУР УНГП представлена α-кварцем. Присутствуют первые проценты слюды и малое количество калиевого полевошпатного минерала (Na,K)AlSi₃O₈) из ряда «санидин – анортоклаз».

При исследовании методами РЭМ-РСМА, проведенного с применением растрового электронного микроскопа Tescan 5130 MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов, установлено, что основу пробы просора песчаника составляет кварц – его содержание не менее 85-90% по объему (рисунок 3.2). Диагностированы также полевые шпаты типа санидина (таблица 3.2), и слюда – мусковит с общей формулой (K,Na)(Al,Mg,Fe)₂(Si₃Al)O₁₀(OH,F)₂. В подчиненных объемах присутствуют гидроксиды железа (срастания с полевошпатными минералами), рутил (характерная особенность – примесь ниобия); единичные зерна циркона (в основном ассоциирован со слюдой), барита (примесь стронция); проба содержит пирит и продукты его окисления (окисульфиды) в форме включений в силикатных минералах (не более 0,3%).

Таблица 3.2 – Состав минералов, входящих в состав просора песчаника

Минералы	Состав, % масс.												
	F	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	S	Fe	Nb	O
α -кварц	-	-	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	50
пирит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,9	45,9	-	-
полевоы шпат	-	0,5	-	9,8	30,2	13,7	-	-	-	-	-	-	46
рутил	-	-	-	-	0,6	-	-	56,4	-	-	1,0	2,0	40
гидроксиды железа	-	-	5,1	-	0,3	-	0,3	-	0,3	-	37,7	-	50
слюда - мусковит	0,2	-	0,5	18,0	25,7	7,4	-	-	-	-	0,7	-	47

Был проведен гранулометрический анализ пробы брикетируемого просора песчаника. Результаты представлены в таблице 3.3. В этой же таблице приведен и состав измельченного песчаника (сухое измельчение в шаровой мельнице), используемого в ряде экспериментов для изучения влияния его фракционного состава на прочностные характеристики брикетов.

Таблица 3.3 – Гранулометрический состав пробы просора песчаника месторождения КУР УНГП

Тип песчаника	Содержание фракции (мм), %							d _{экв} , мм
	-20+5	-5+1	-1+0,7	-0,7 +0,25	-0,25 +0,18	-0,18 +0,04	-0,04	
Неизмельченный	22,87	46,13	13,58	14,89	1,16	1,32	0,05	4,433
Измельченный	0,00	3,35	2,34	12,11	24,24	51,10	6,86	0,289

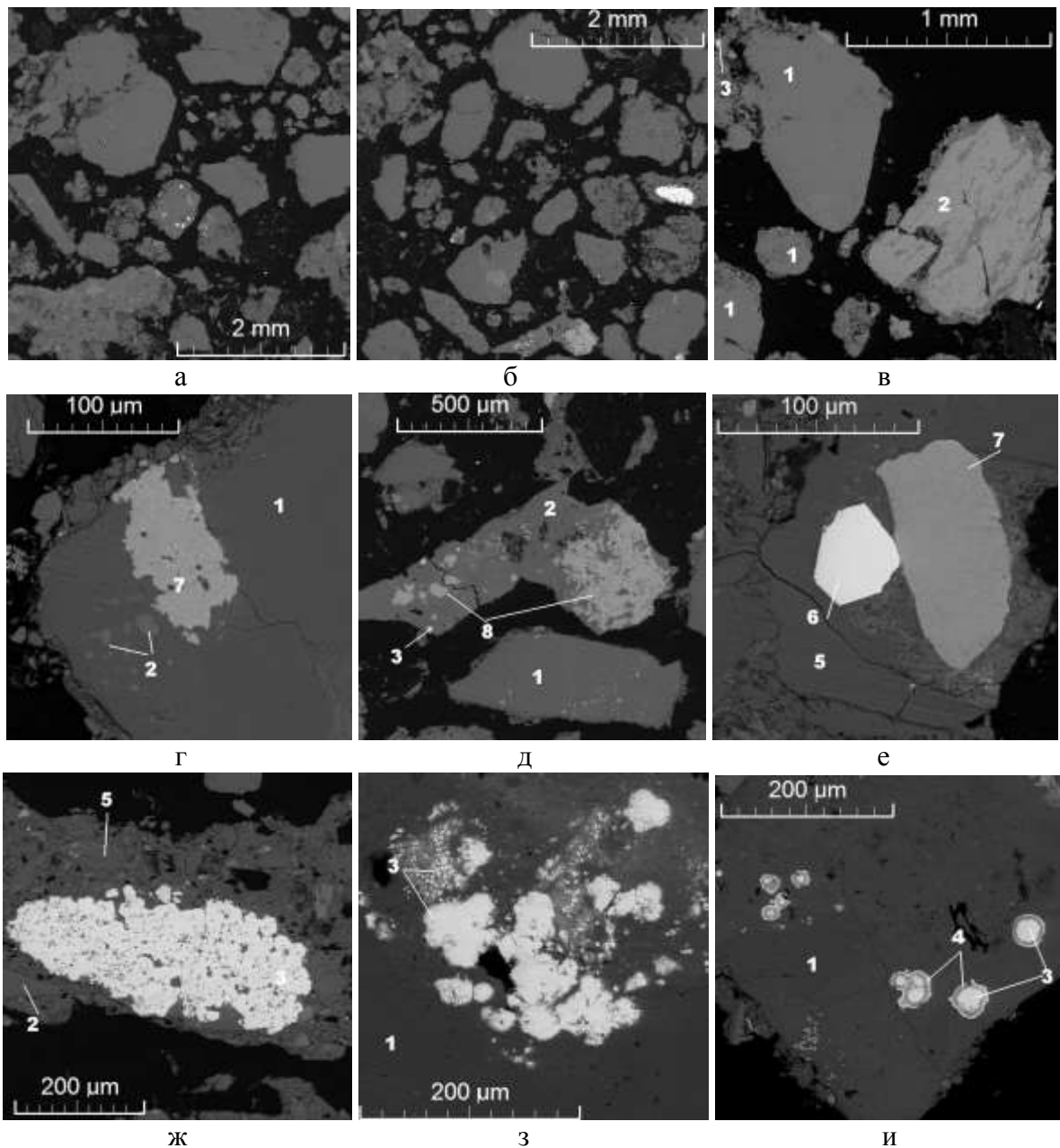


Рисунок 3.2 – Общий вид и строение пробы просора песчаника месторождения КУР УНГП. 1 – кварц; 2 – полевошпатные минералы; 3 – пирит; 4 – продукты окисления пирита; 5 – слюда; 6 – циркон; 7 – рутил; 8 – гидроксиды железа

Связующие вещества

При разработке технологии брикетирования просора песчаника с целью минимизации транспортных затрат приоритетное значение имели связующие, источниками которых могут стать региональные производители, а так же материалы, получаемые на различных переделах металлургического производства

ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» и обладающие вяжущими свойствами. В полный перечень используемых связующих входят:

- *ангидрит*, добываемый в Норильском промышленном районе (НПР) и используемый для производства закладочных смесей и цемента [1]. Химический состав используемой в исследованиях пробы ангидрита был следующим, %: 0,044 Fe₂; 40,9 CaO; 0,089 MgO; <0,05 Al₂O₃; 1,90 SiO₂; 0,029 Na₂O; 0,095 K₂O; 22,9 S₂; 22,8 Sso₄;

- *гашеная известь* (известь строительная гидратная I-го сорта) производства ОАО «Угловский известковый комбинат»;

- *портландцемент* марки М-400 (П/А – Ш 32,5) производства ООО «Топкинский цемент»;

- *алебастр* (гипс строительный Г-5БШ) производства ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»;

- *каолин* марки КСЕ-1 производства филиала Русской сырьевой компании – ОАО «Новокаолиновый ГОК»;

- *водные растворы никеля сернокислого семиводного NiSO₄·7H₂O* марки ХЧ и *меди сернокислой пятиводной CuSO₄·5H₂O* марки ЧДА приобретенных у ООО «Реахим».

- *жидкое натриевое стекло* марки Б производства ООО «Уралхимэкс»;

- *технический лигносульфонат* жидкой консистенции марки А производства ОАО «Кондопога»;

- *хлорид кальция плавленный* (гидрофиллит) приобретенный у ОАО «Химпром». Хлористый кальций использовался в исследованиях по брикетированности просора песчаника в качестве активатора твердения и добавлялся в шихту, если в качестве связующего использовался ангидрит или другие связующие, применяемые в строительной индустрии. Хлорид кальция существенно ускоряет гидратацию строительных связующих, в результате чего сокращается начальное и конечное время схватывания и усадки, в то же время, увеличивается их опережающая прочность, поверхностный износ, устойчивость к холодной погоде и обрабатываемость. Применение хлористого кальция позволяет

увеличить производительность при изготовлении изделий из цемента в 2,5-3 раза за счет сокращения сроков застывания цемента и повышения качества изготавливаемой продукции [43].

3.3 Методика проведения исследований

Предварительно проба просора песчаника подвергалась расसेву на фракции +5 мм и –5 мм. В связи с размерами лабораторного пресса, шага и диаметра вала шнека, его валков и рабочих ячеек, а также того факта, что просор песчаника крупностью 5 мм и более не является пылящей фракцией, при брикетировании просора песчаника использовалась фракция -5 мм. Просор песчаника крупностью 5 мм и более подвергался измельчению и также использовался в ряде экспериментов, как отдельно, так и в смеси с неизмельченным просором.

Способы подготовки шихты, применяемые при проведении экспериментов по брикетированию просора песчаника, были различные. Их целью было получение прочных брикетов при минимальном расходе связующего и экономически оправданном варианте технологии подготовки шихты к брикетированию, проведения самого брикетирования и упрочнения брикетов.

1. Проба просора песчаника (измельченного, неизмельченного или в смеси друг с другом) естественной влажности смешивалась со связующим, увлажнялась или подсушивалась в зависимости от вида используемого связующего и после достижения заданной влажности шихты поступала на брикетирование. Сушка шихты осуществлялась в муфельном шкафу в воздушной среде при 150°С.

2. К высушенному до нулевых значений влажности (~0,1-0,5%) просору песчаника добавлялось связующее в виде водного раствора или консистенции «молока», или «сметаны» (если связующее практически не растворимо в воде) с содержанием твердого в воде, обеспечивающим необходимую влажность шихты и содержание в ней связующего. После тщательного перемешивания шихта направлялась на брикетирование.

3. К высушенному просору песчаника в необходимом количестве добавлялось связующее порошкообразной консистенции и после тщательного перемешивания вода для достижения необходимой влажности для проведения процесса брикетирования.

В ряде экспериментов в качестве связующих использовались комбинированные связующие – смеси вяжущих, применяемых в стройиндустрии, в частности смеси с известью, а также связующие с активаторами твердения.

Вес пробы просора песчаника, отобранной для брикетирования, составлял 2,0 кг. В процессе подготовки шихты к брикетированию (доведения шихты до необходимой влажности) постоянно контролировалась текущая влажность шихты путем отбора проб и их анализа на влагомере МА-45 «Sartorius» (Германия).

После проведения подготовительных операций шихта засыпалась в бункер пресса, и при работающей мешалке осуществлялось ее брикетирование с фиксацией параметров брикетирования (число оборотов шнека пресса, момент на шнеке, зазор между валками пресса, скорость вращения валков пресса, момент на валках, давление брикетирования). По окончании брикетирования производилась оценка количества возврата, и записывались качественные характеристики брикетирования (пыление, зависание материала в бункере и на шнеке пресса, залипаемость рабочих ячеек брикет-пресса).

Отбиралась проба из 20 произвольно выбранных брикетов, половина из которых подвергалась сушке в муфельном шкафу при 150°C в течение 30 минут. Определение предела прочности на сжатие для текущих брикетов и брикетов, прошедших стадию упрочнительной сушки, проводилось на ручном гидравлическом прессе согласно ГОСТ 24765-81. Испытания на определение других пределов прочности (на сброс и истирание) не проводились в виду того, что размеры и масса брикетов была значительно меньше тех, которые наблюдаются у брикетов, изготовленных на промышленных валковых прессах. А это приводит к завышению таких прочностных характеристик [166]. С другой стороны, как было показано в [167] наблюдается определенная связь между прочностными характеристиками брикетов, изготовленных из одного и того же

материала. Иначе говоря, если брикеты имеют высокую прочность на сжатие, то и ударная прочность у них будет достаточно высокая. И наоборот. То есть, для определения качества брикетов достаточно использовать одну прочностную характеристику.

В качестве величины предела прочности брикетов на сжатие была выбрана величина в 140 кгс/брикет, что вытекает, с одной стороны, из условий, выдвинутых ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», и из существующих норм прочности на окучкованное рудное сырье [168], с другой. Ниже этой величины брикеты считались некачественными.



Рисунок 3.3 – Лабораторный валковый пресс (а) и брикеты из просора песчаника (б)

Результаты исследований представлены в Приложении В и на рисунках 3.4-3.31. Ниже приведено обсуждение полученных результатов.

3.4 Исследование брикетированности просора песчаника месторождения КУР УПНГ

В данном разделе представлены результаты исследований процесса брикетирования просора песчаника Кайерканского угольного разреза с использованием и без связующих веществ. Обработка полученных результатов

проводилась с помощью программы Microsoft Excel с использованием метода наименьших квадратов. Оптическими методами в отраженном свете изучено распределение наиболее перспективных связующих в теле брикета.

3.4.1 Брикетирование в отсутствие связующих веществ

На рисунке 3.4 представлены кривые, характеризующие изменение прочности брикетов на сжатие, изготовленных из просора песчаника в отсутствие связующего, в зависимости от влажности брикетируемой шихты. Как видно зависимость имеет максимум прочности брикетов соответствующий влажности шихты 5,0-5,5%.

Сушка брикетов приводит к существенному повышению их прочности: более чем в два раза. Тем не менее, наблюдаемые прочностные характеристики брикетов недостаточны для их транспортировки и загрузки в бункера металлургических агрегатов. Для достижения необходимых значений прочности брикетов из просора песчаника необходимо использовать связующие вещества.

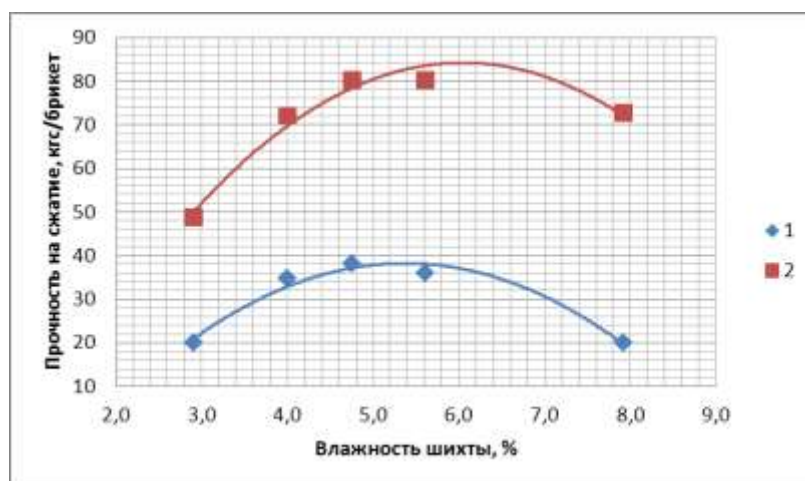


Рисунок 3.4 – Зависимость прочности брикетов просора песчаника на сжатие, полученных без использования связующего вещества, влажности шихты.

1 – текущая прочность брикеты; 2 – после сушки

С повышением влажности брикетируемого просора песчаника наблюдается монотонное уменьшение выхода возврата (рисунок 3.5). Следует

отметить, что дальнейшее увеличение влажности шихты до 6-7% и более приводит не только к снижению прочности брикетов, но и к зависанию шихты в бункере пресса и залипанию его рабочих ячеек.

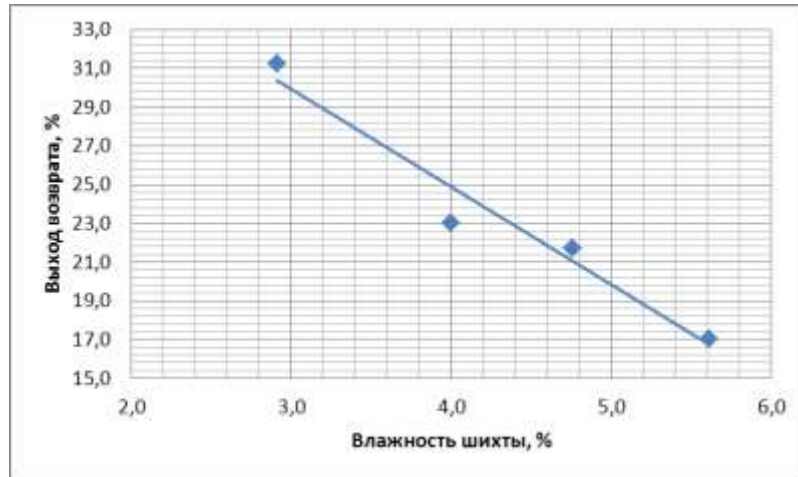


Рисунок 3.5 – Зависимость выхода возврата от влажности шихты при брикетировании просора песчаника без связующих веществ

3.4.2 Брикетирование с ангидритом

Использование ангидрита в качестве связующего при брикетировании просора песчаника не приводит к существенному повышению прочностных свойств брикетов как текущих, так и после сушки (рисунок 3.6). При этом методика подготовки шихты мало влияет на характеристики брикетов: экспериментальные точки, полученные как при использовании сухого связующего (способ 1), так и связующего «молочной» или «сметанной» консистенции (способ 2) ложатся на одну и ту же кривую зависимости. Слабо влияет и способ подготовки связующего (предварительный обжиг при 800⁰С в течение 2 часов) и добавка к нему активатора твердения (хлорида кальция в количестве 3% от массы используемого при брикетировании связующего).

Как и в случае брикетирования просора песчаника без связующего на кривых зависимости прочности брикетов на сжатие, изготовленных из просора с

использованием в качестве связующего ангидрита присутствует максимум, отвечающий 4,8-5,5% влажности шихты.

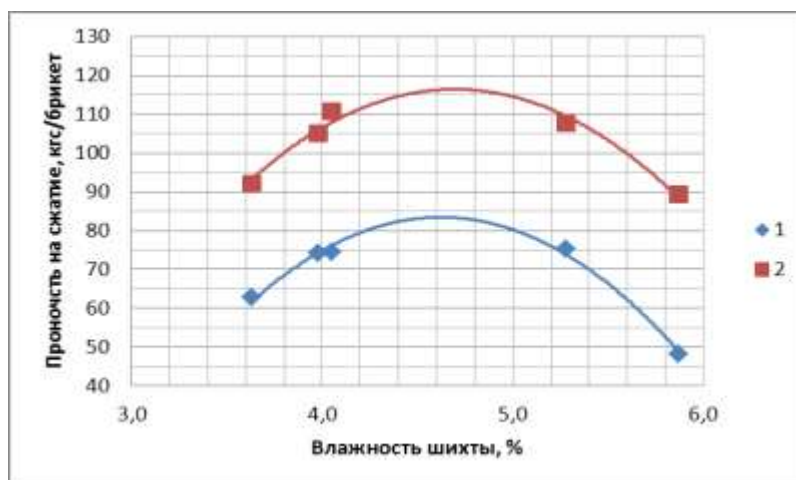


Рисунок 3.6 – Влияние влажность на прочностные характеристики брикетов, полученных с использование в качестве связующего 15% ангидрита.

1 – текущая прочность, 2 – после сушки

Повышение содержания связующего в шихте приводит к возрастанию прочностных свойств брикетов (рисунок 3.7), более существенному при содержаниях ангидрита в шихте более 8%. Тем не менее, даже при 20% содержании ангидрита в шихте прочность брикетов после сушки не превышает 130 кгс/брикет.

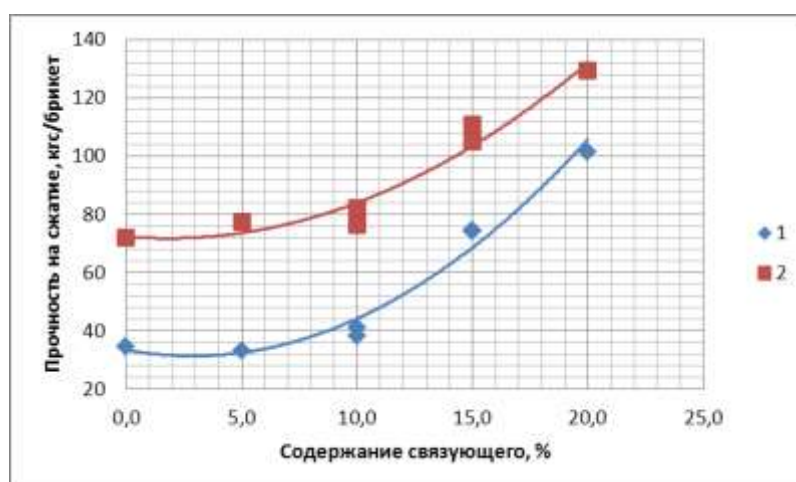


Рисунок 3.7 – Влияние содержания ангидрита на прочность брикетов на сжатие. Рабочая влажность – 3,8-4,3%; 1 – текущая прочность, 2 – после сушки

На рисунках 3.8 и 3.9 показано влияние влажности шихты и содержания в ней ангидрита на выход возврата. Зависимости, монотонно понижающиеся с практически линейным ходом в диапазоне исследуемых значений влажности шихты. Содержание ангидрита в шихте слабо влияет на выход возврата при брикетировании просора песчаника.

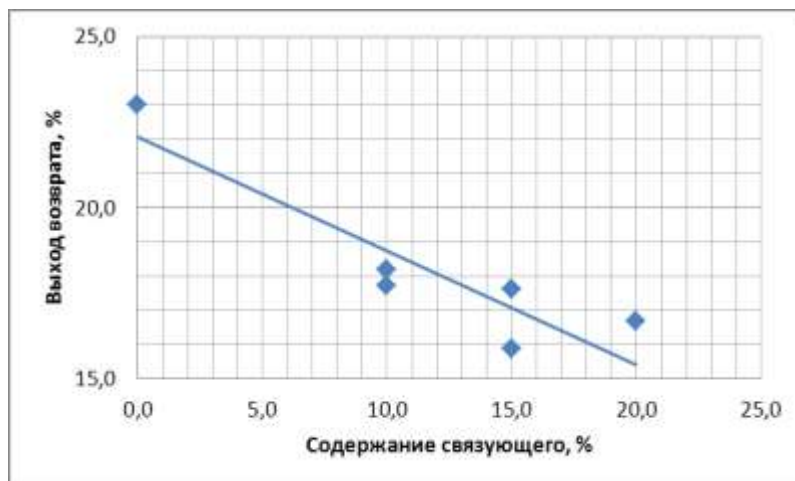


Рисунок 3.8 – Влияние содержания ангидрита на количество возврата.

Рабочая влажность – 3,8-4,3%

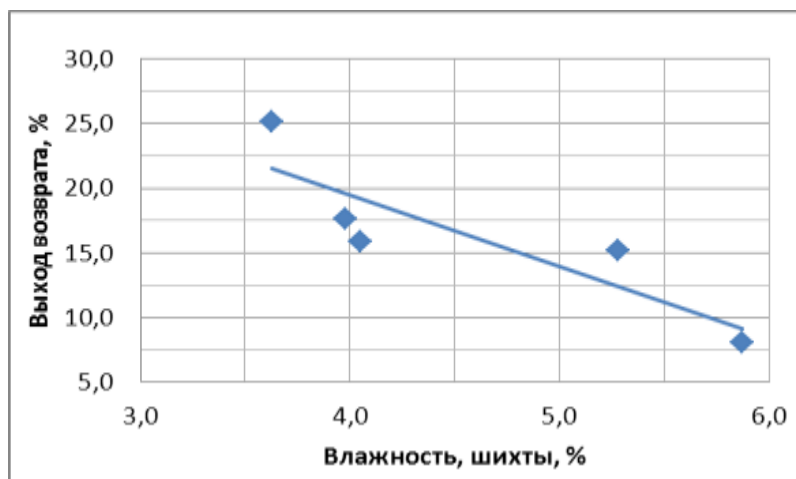


Рисунок 3.9 – Влияние влажности шихты на количество возврата при брикетировании с ангидритом. Количество связующего – 15%

3.4.3 Брикетирование со связующими, применяемыми в строительной индустрии

К связующим веществам, применяемым в строительной индустрии, следует отнести: гашеную известь, портландцемент, каолин, алебастр.

Зависимость прочности брикетов от содержания связующего носит линейный характер (рисунок 3.10). Повышение содержания гашеной извести в шихте приводит к возрастанию прочностных характеристик брикетов, более существенному, чем при использовании ангидрита в качестве связующего. Тем не менее, даже при 15% содержании извести в шихте значения прочности брикетов как текущей, так и после сушки не превышают 60 и 130 кгс/брикет, соответственно, что ниже нормативных значений. Обращает на себя внимание слабая зависимость прочностных свойств брикетов от содержания цемента в брикетируемой шихте.

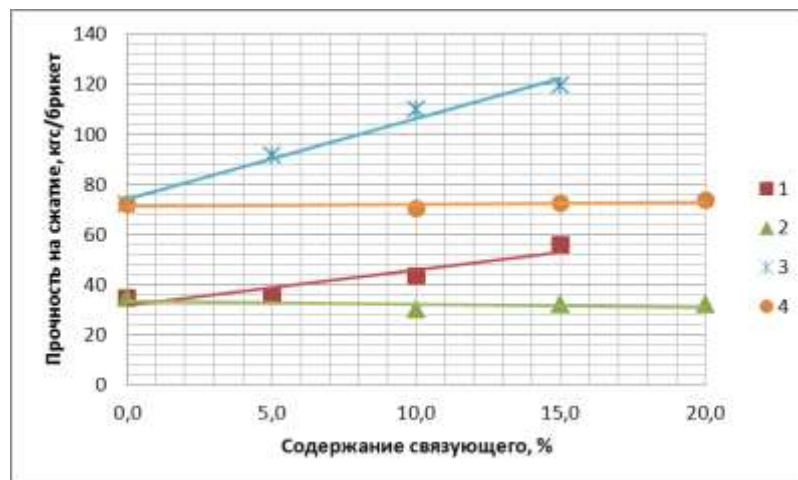


Рисунок 3.10 – Влияние содержания связующего на прочность брикетов на сжатие. Рабочая влажность – 3,8-4,3%; связующее: 1 и 3 – гашеная известь; 2 и 4 – портландцемент; 1 и 2 – текущая прочность; 3 и 4 – после сушки

Зависимость выхода возврата от концентрации связующего (рисунок 3.11) носит монотонно возрастающий характер. Рассматривая зависимости выхода возврата от содержания связующего, следует отметить, что, несмотря на то, что в исследуемом интервале использование извести, в целом, характеризуется

большим количеством облоя, однако, при использовании цемента наблюдается более интенсивный рост выхода возврата.

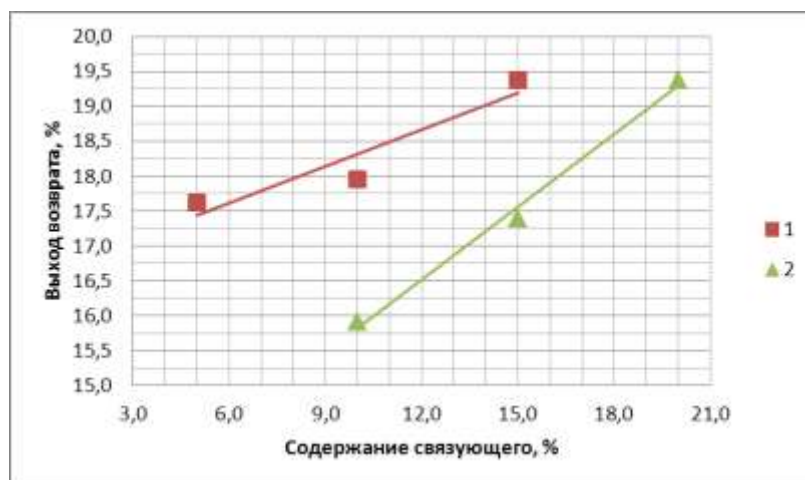


Рисунок 3.11 – Влияние содержания связующего на выход возврата.

Рабочая влажность – 3,8-4,3%; связующее: 1 – гашеная известь,

2 – портландцемент

На рисунке 3.12 приведены зависимости текущей прочности брикетов от влажности с использованием связующих применяемых в стройиндустрии. Все зависимости носят экстремальный характер с максимумом прочности брикетов, отвечающим влажности шихты в пределах от 3,8% до 5,0%. За исключением применения портландцемента и алебастра, применение связующих позволяет достигнуть повышения прочностных характеристик брикетов. Тем не менее, прочность брикетов не удовлетворяет нормативным показателям, несмотря на весьма высокие расходы связующих – от 10% до 15%, и не превышает значения 60кгс/брикет.

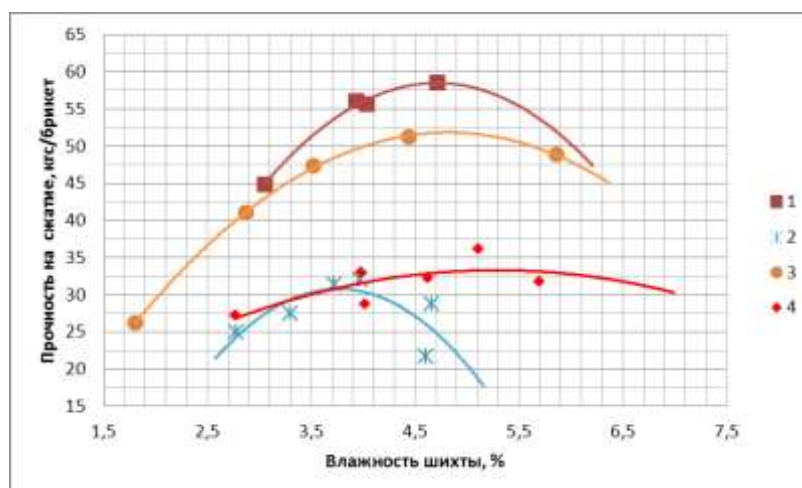


Рисунок 3.12 – Зависимость текущей прочности брикетов на сжатие от влажности шихты. Связующее: 1– 15% гашеной извести, 2 – 15% портландцемента, 3 – 10% каолина, 4 – 10% алебастра

Как и в предыдущих опытах, проведение упрочнительной сушки брикетов обеспечивает более чем двукратное увеличение прочности брикетов во всех случаях, но все так же не позволяет достигнуть прочности 140 кгс/брикет (рисунок 3.13). Максимальная прочность, полученная при использовании строительных вяжущих, достигается при использовании 15% извести и составляет ~130 кгс/брикет.

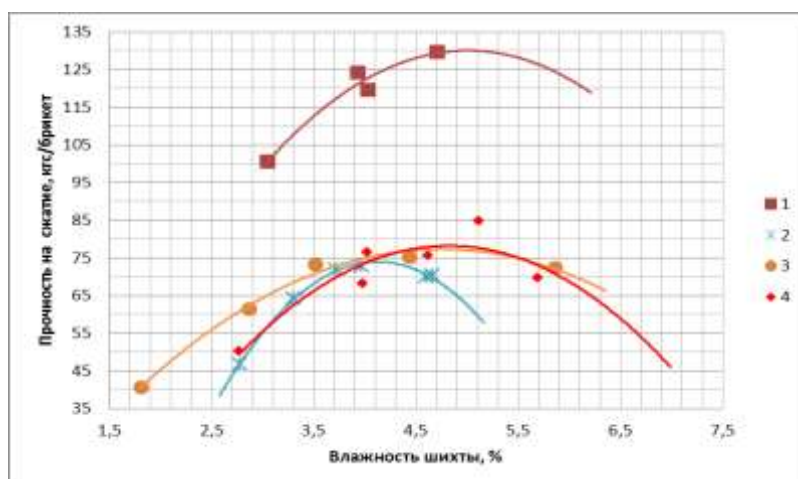


Рисунок 3.13 – Зависимость прочности брикетов после упрочнительной сушки от влажности шихты. Связующее: 1– 15% гашеной извести, 2 – 15% портландцемента, 3 – 10% каолина, 4 – 10% алебастра

В случае применения портландцемента отсутствие увеличения текущей прочности брикетов (в сравнении с брикетированием в отсутствие связующих) вероятнее всего объясняется необходимостью выдержки шихты, которая способствует развитию максимальной вяжущей способностью цемента [43]. Это предположение подтверждается тем, что при добавке активатора твердения – хлорида кальция в количестве 3% от массы связующего наблюдается увеличение текущей прочности брикетов на 38% и на 18% после сушки (см. рисунок 3.14). Однако применение активаторов твердения в других случаях не дает сколько-нибудь заметного результата – значения прочности брикетов имеют аналогичные значения, как с применением активатора твердения, так и без него.

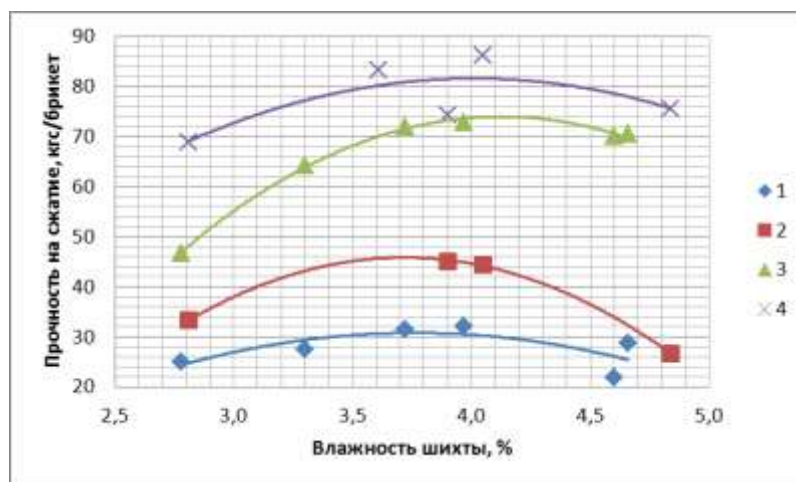


Рисунок 3.14 – Влияние добавки активатора твердения – хлорида кальция на прочностные характеристики брикетов полученных с использованием 15% портландцемента в качестве связующего. 1 и 3 – без активатора твердения, 2 и 4 – с добавкой активатора твердения; 1 и 2 – текущая прочность, 3 и 4 – после сушки

На рисунке 3.15 показано влияние влажности шихты на выход возврата. Повышение влажности шихты приводит к линейному снижению выхода возврата при брикетировании просора песчаника с использованием различных типов связующих применяемых в строительной индустрии. Введение в состав связующего активатора твердения не оказывает влияния на количество возврата.

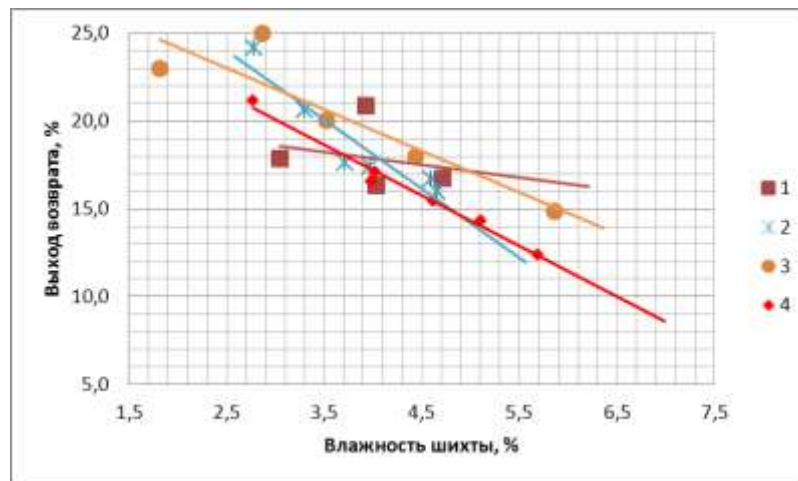


Рисунок 3.15 – Зависимость количества возврата от влажности шихты.

Связующее: 1– 15% гашеной извести; 2 – 15% портландцемента, 3 – 10% каолина, 4 – 10 алебаstra

В целях достижения нормативной прочности исследовалось влияние гранулометрического состава шихты. Известно [8,25,150], что наибольшую плотность и прочность брикетов дают порошки смешанного гранулометрического состава, с определенным соотношением крупных и мелких фракций. При брикетировании шихт со смешанным гранулометрическим составом мелкие, пылевидные частицы укладываются в промежутки между крупными, заполняют поры, чем позволяют добиться значительного увеличения плотности и прочности брикетов, вследствие увеличения сил трения между частицами.

Проводилось измельчение просора песчаника и шихтовка неизмельченной и измельченной фракций в различных соотношениях. В качестве связующего использовалась добавка 10% извести. Результаты влияния добавки измельченной фракции просора представлены на рисунке 3.16.

Увеличение доли измельченной фракции песчаника до 75-80% приводит к значительному увеличению прочности брикетов на сжатие. Дальнейшее увеличение количества измельченной фракций приводит к некоторому снижению прочностных характеристик. Таким образом, зависимость носит экстремальный характер с максимум отвечающим 75-80% содержанию измельченной фракции

просора песчанки. Следует отметить что, данная зависимость носит схожий характер с зависимостью, полученной в работе [152].

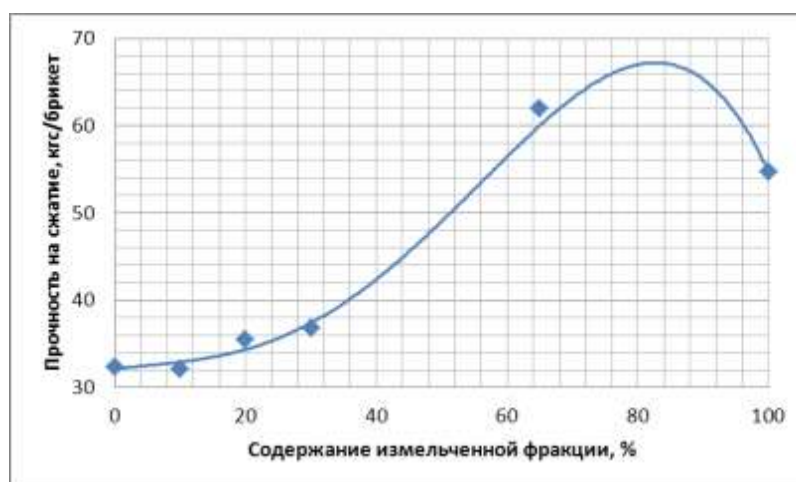


Рисунок 3.16 – Влияние гранулометрического состава песчанки на прочностные характеристики брикетов, полученных с использованием 10% гашеной извести в качестве связующего. Рабочая влажность – 3,2-3,7%

3.4.4 Брикетирование с использованием смесей гашеной извести и ангидрита

Исследовалась возможность частичной замены гашеной извести ангидритом с целью получения прочности брикетов, соизмеримой с достигаемой при использовании в качестве связующего чистой гашеной извести. Для этого был проведен ряд экспериментов с использованием комбинированного связующего известь-ангидрит. На рисунке 3.17 приведены кривые, характеризующие влияние состава такого комбинированного связующего на прочность брикетов на сжатие.

На основании полученных кривых можно сделать вывод о том, что для достижения брикетами, изготовленными из просора песчанки с использованием в качестве связующего смеси гашеной извести и ангидрита, той же прочности, которая может быть достигнута при использовании в качестве связующего чистой гашеной извести, необходимо, чтобы соотношение между компонентами связующего было равно $3 \div 2$.

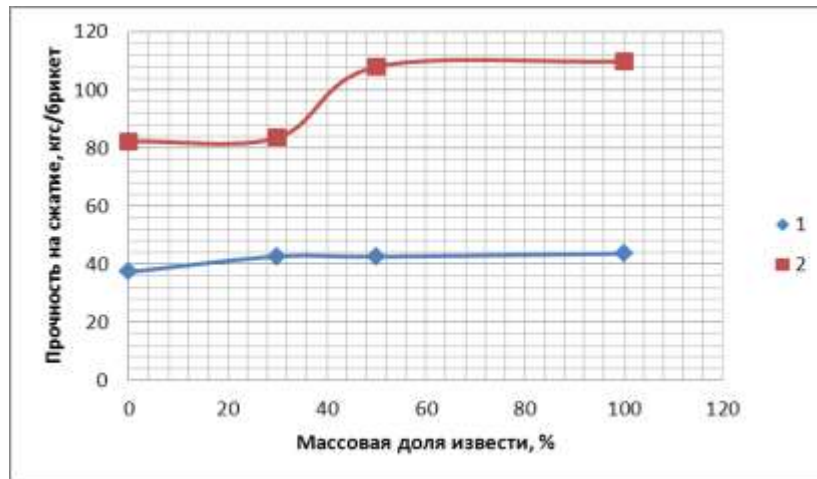


Рисунок 3.17 – Влияние состава комбинированного связующего известь-ангидрит на прочностные свойства брикетов. Содержание связующего – 10%; рабочая влажность – 3,8-4,1%. 1 – текущая прочность, 2 – после сушки

3.4.5 Брикетирование с жидким стеклом

Ряд экспериментов по брикетированию просора песчаника месторождения КУР УНГП проводился с использованием в качестве связующего жидкого натриевого стекла ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$). В экспериментах использовались разбавленный водой (38,9% твердого в остатке при испарении) и исходный концентрированный (49% твердого) растворы жидкого стекла. Плотность растворов составляла 1,35 и 1,50 г/см³, соответственно. Приготовление шихты к брикетированию осуществлялось по 1 и 2 способам, однако, не выявило различий в прочностных характеристиках брикетов.

На рисунке 3.18 представлены кривые, характеризующие влияние влажности брикетируемой шихты на текущую прочность и прочность брикетов после упрочнительной сушки, изготовленных из просора песчаника с жидким стеклом. Ход зависимостей экстремальный, точка максимума прочности брикетов на сжатие отвечает 4,3-5,0% влажности шихты.

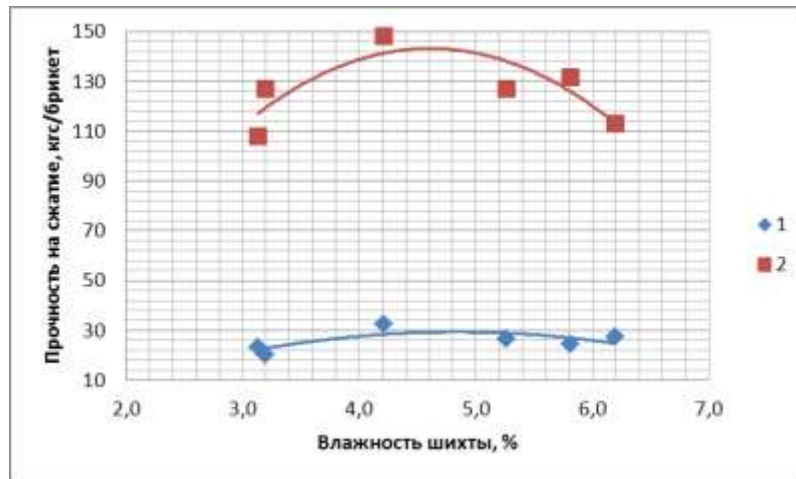


Рисунок 3.18 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов, полученных с использованием 5% жидкого стекла в качестве связующего.

1 – текущая прочность, 2 – после сушки

При увеличении содержания связующего в шихте наблюдается рост прочности брикетов (рисунок 3.19). Текущая прочность брикетов с ростом количества добавки жидкого стекла с 3 до 7% возрастает незначительно – в 1,15 раза. Напротив после упрочнительной сушки повышение содержания жидкого стекла значительно увеличивает прочностные характеристики брикетов – в 1,83 раза, позволяя достигать нормативную величину при 5% содержании связующего в шихте.

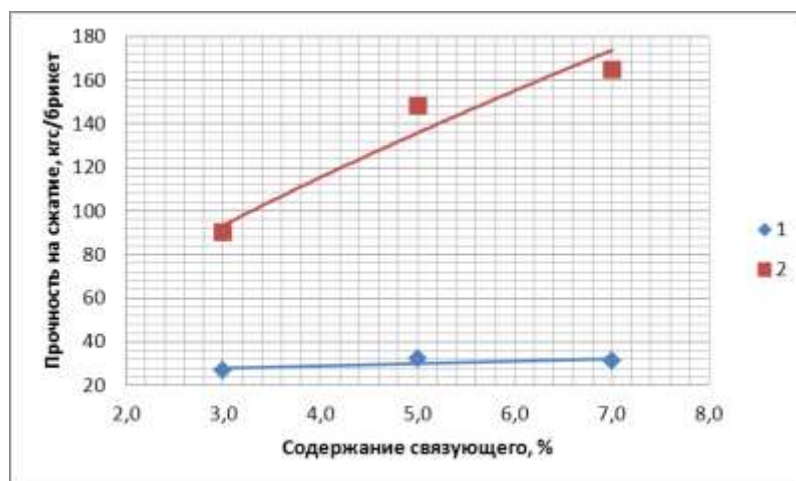


Рисунок 3.19 – Влияние содержания жидкого стекла на прочностные характеристики брикетов. Рабочая влажность 4,2-4,8%. 1 – текущая прочность,

2 – после сушки

На рисунке 3.20 представлена зависимость выхода возврата от влажности брикетируемой шихты, состоящей из просора песчаника и жидкого стекла. Зависимость носит линейный характер, количество возврата снижается по мере роста влажности.

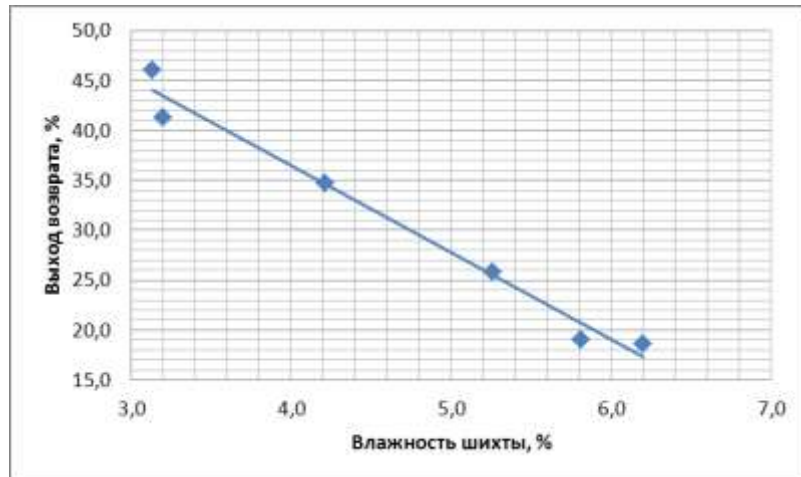


Рисунок 3.20 – Зависимость количества возврата от влажности шихты, при брикетировании с добавкой 5% жидкого стекла в качестве связующего

Повышение содержания жидкого стекла в шихте просора песчаника приводит к некоторому увеличению выхода возврата (рисунок 3.21). Величина возврата имеет весьма высокое значение, и при содержании жидкого стекла, обеспечивающем нормативную прочность, составляет ~35%.

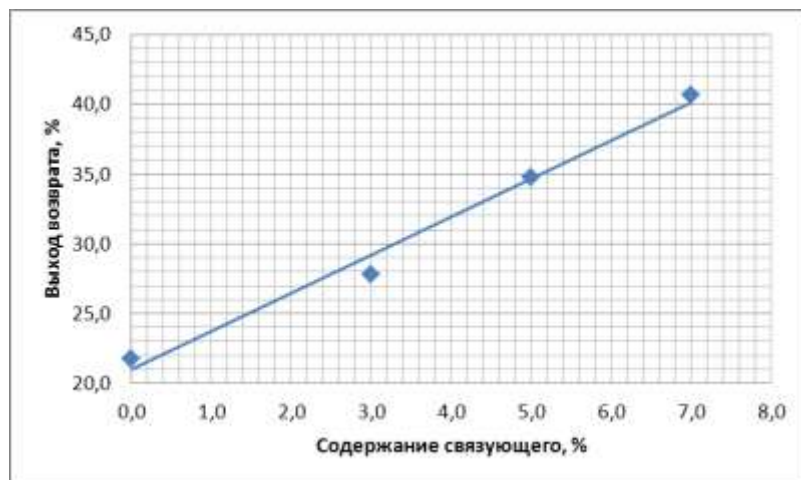


Рисунок 3.21 – Влияние содержания жидкого стекла на выход возврата.

Рабочая влажность – 4,2-4,8%

3.4.6 Брикетирование с водными растворами сульфатов никеля и меди

При разработке технологии брикетирования рудного медно-никелевого концентрата было установлено, что основной причиной повышения прочностных свойств брикетов, изготовленных из лежалых концентратов, на фоне брикетов из свежего концентрата является образование сульфатов никеля и железа, образующихся при окислении пирротина и пентландита в воздушно-влажной среде при его хранении в естественных условиях [167].

Вследствие того, что сульфаты никеля и меди являются промежуточными продуктами при металлургической переработке медно-никелевых руд в ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» (на стадии получения электролитного никеля и меди), был проведен ряд экспериментов по брикетированию просора песчаника с использованием водных растворов сульфатов меди и никеля в качестве связующего.

При использовании в качестве связующего сульфата никеля были приготовлены водные растворы 10, 16, 20 и 50% концентрации, что позволяло проводить подготовку шихты как с ее подсушкой после введения связующего (способ 1), так и без нее (способ 2). Согласно полученным результатам такие изменения в методике подготовки шихты на прочностные свойства брикетов существенного влияния не оказали: экспериментальные точки описывались одними кривыми.

На рисунке 3.22 представлены зависимости прочностных характеристик брикетов, изготовленных из просора песчаника с использованием в качестве связующего 16% раствора сульфата никеля, от влажности брикетируемой шихты. Зависимость носит экстремальный характер, с точкой максимума, отвечающего 4,0-4,5% влажности брикетируемой шихты.

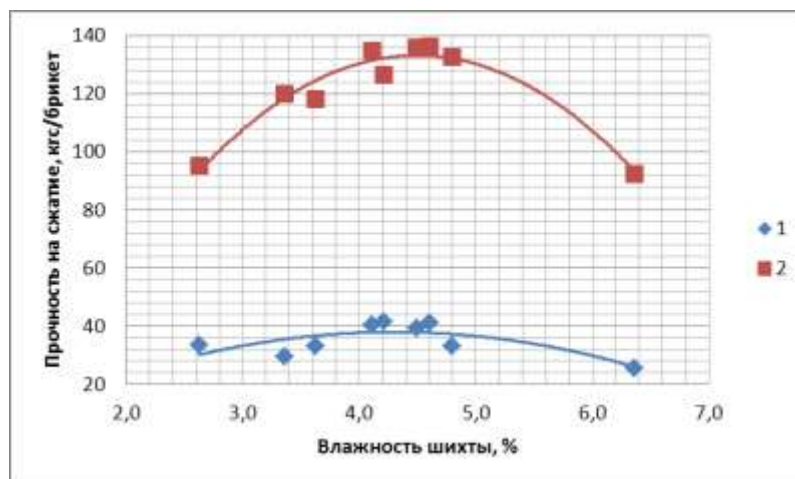


Рисунок 3.22 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов, полученных с использованием 16% раствора Ni_2SO_4 в качестве связующего. Расход связующего 2%. 1 – текущая прочность, 2 – после сушки

Повышение содержания сульфата никеля в шихте приводит к возрастанию, как текущей прочности брикетов, так и после сушки, причем в последнем случае наблюдается более существенный рост (рисунок 3.23). И если текущая прочность брикетов невысока и не превышает 42 кгс/брикет, то после упрочнительной сушки при содержании сульфата никеля в количестве 0,5% в пересчете на сухой вес в точке рациональной влажности шихты прочность удовлетворяет нормативному значению 140 кгс/брикет.

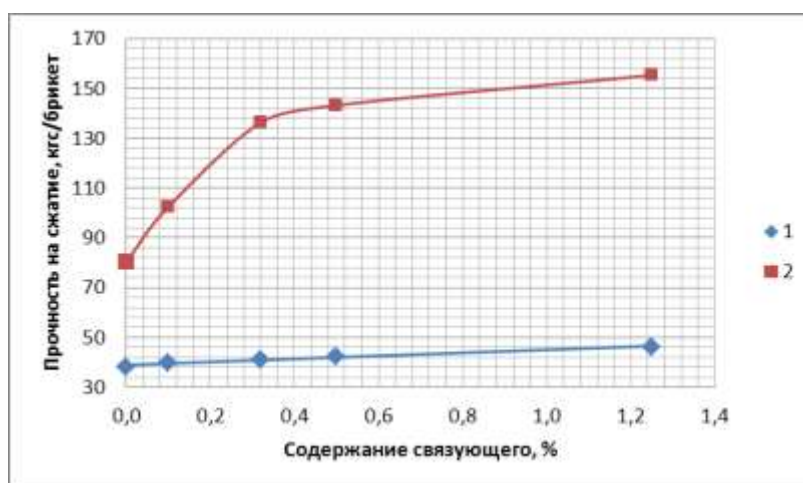


Рисунок 3.23 – Влияние содержания сульфата никеля (в пересчете на сухой вес) на прочностные характеристики брикетов. Рабочая влажность – 4,2-4,8%. 1 – текущая прочность, 2 – после сушки.

Выход возврата, линейно снижается с ростом количества добавляемого связующего, что качественно отличает использование сульфата никеля от жидкого стекла в качестве связующего (рисунок 3.24).

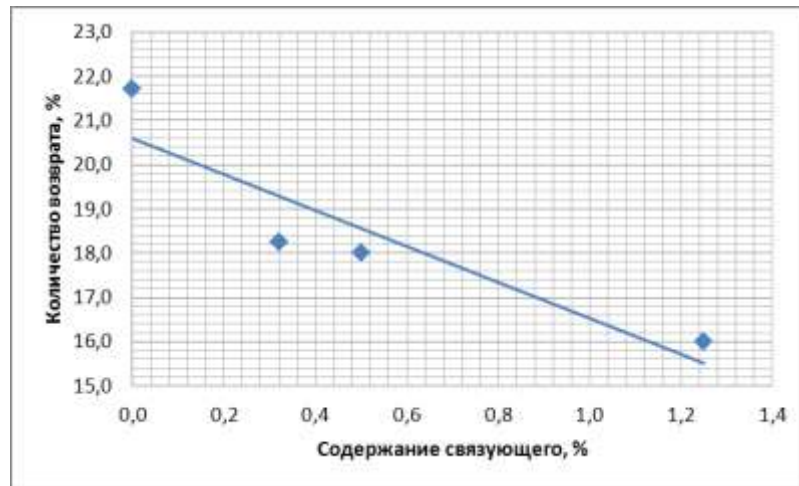


Рисунок 3.24 – Влияние содержания сульфата никеля (в пересчете на сухой вес) на количество возврата. Рабочая влажность – 4,2-4,8%

На рисунке 3.25 представлены кривые, характеризующие влияние влажности шихты на прочностные свойства брикетов при брикетировании просора песчаника с использованием в качестве связующего раствора сульфата меди (использовался раствор 50% концентрации). Вид представленных зависимостей совпадает с видом зависимостей, полученных при брикетировании просора с сульфатом никеля: наличие экстремума на прочностной зависимости при 4,2-4,3 % влажности шихты. Но есть и определенные отличия: при равном содержании связующего в шихте (1,25% в пересчете на сухой вес) и одном и том же значении рабочей влажности более низкое значение прочности брикетов после сушки, составляющее 133 против 155 кгс/брикет.

Влияние влажности на количество возврата в обоих случаях носит схожий характер и в точке рациональной влажности имеет примерно одинаковое значение на уровне 15-16% (рисунок 3.26).

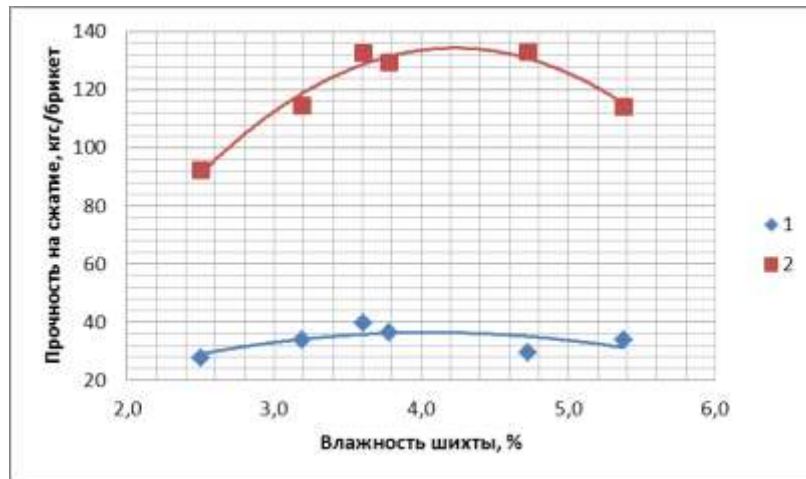


Рисунок 3.25 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов, полученных с использованием 50% раствора CuSO_4 в качестве связующего. Расход связующего 2,5%. 1 – текущая прочность, 2 – после сушки

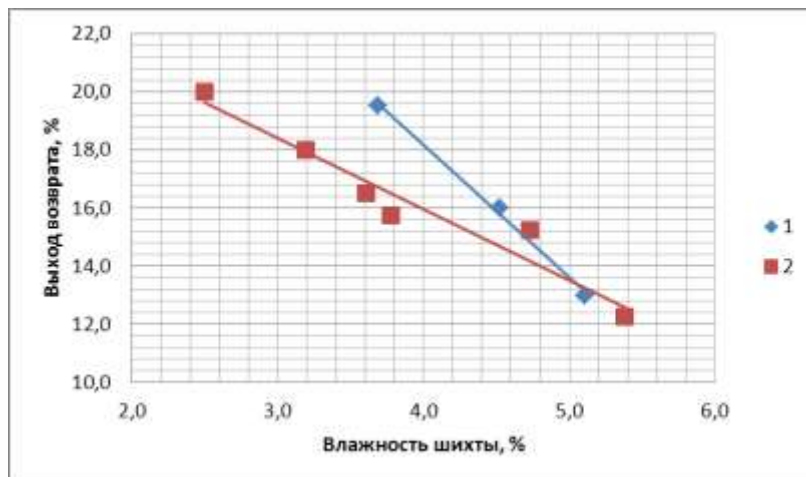


Рисунок 3.26 – Зависимость количества возврата от влажности шихты. Содержание связующего – 1,25% (в пересчете на сухой вес); 1 – сульфат никеля, 2 – сульфат меди

3.4.7 Брикетирование с техническим лигносульфонатом

Широкое распространение при брикетировании различных мелкозернистых материалов нашло применение в качестве связующего жидких растворов технических лигносульфонатов (ЛСТ) (см. п.1.4). Лигносульфонат является побочным продуктом целлюлозно-бумажного производства, характеризуется высокой вяжущей способностью, доступностью, низкой стоимостью, что в совокупности обуславливает его практическую значимость.

Исследовалась возможность применения при брикетировании просора песчаника лигносульфоната жидкой консистенции. Изучалось брикетирование шихты относительно постоянной влажности (3,5-3,6%), но с различным содержанием связующего. Предварительно ЛСТ для снижения вязкости разбавлялся водой (плотность его снижалась с 1,35 до 1,23 г/см³), что технологически оправдано [167]. Подготовка шихты к брикетированию осуществлялась по первому способу, с ее предварительной подсушкой. Результаты экспериментов представлены на рисунках 3.27 и 3.28.

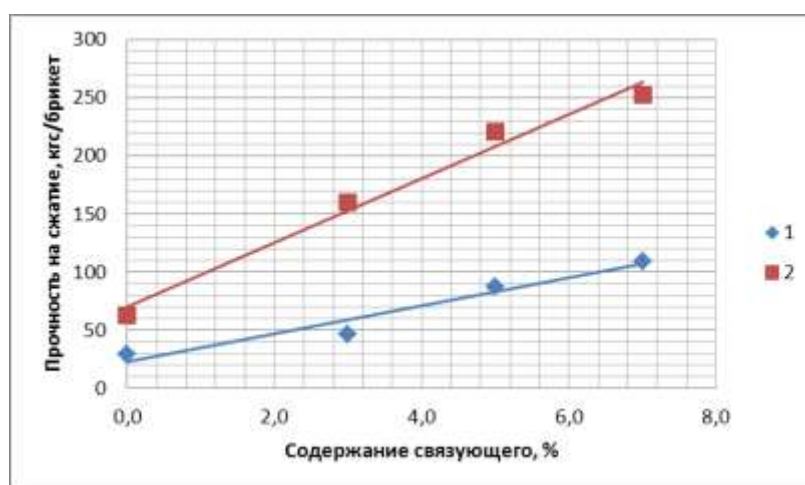


Рисунок 3.27 – Влияние содержания лигносульфоната на прочностные характеристики брикетов. Рабочая влажность – 3,5-3,6%.

1 – текущая прочность, 2 – после сушки

Согласно полученным результатам зависимости прочности брикетов от количества лигносульфоната в шихте носят линейный характер. Необходимая прочность брикетов на сжатие в 140 кгс/брикет достигается после упрочнительной сушки при содержании лигносульфоната в шихте в количестве 2,5%. Отдельно следует отметить, что при добавке 7% ЛСТ текущая прочность брикетов составляет ~110кгс/брикет. Можно предположить, что прочность в 140кгс/брикет возможно достигнуть без использования упрочнительной сушки, но с увеличением содержания ЛСТ до 10%.

Повышение содержания связующего в шихте приводит к снижению выхода возврата. Так, если при отсутствии ЛСТ в шихте выход возврата составляет 28-29%, то при его 7% содержании лигносульфоната он снижается до 9-10%.

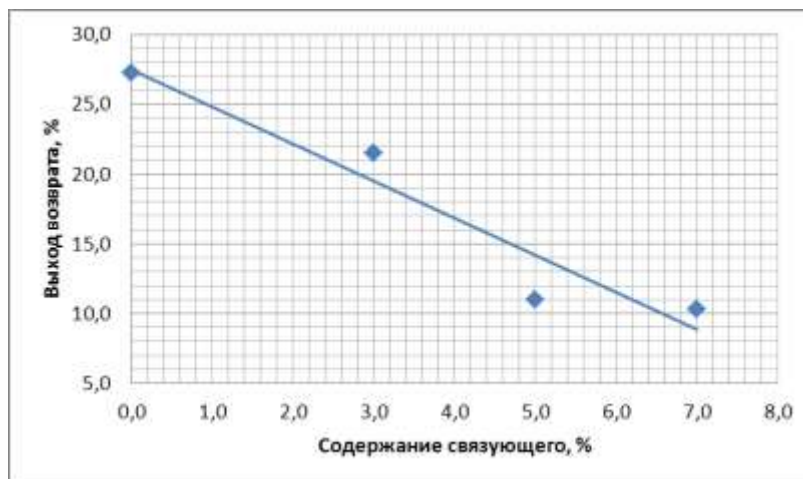


Рисунок 3.28 – Влияние содержания лигносульфоната на выход возврата. Рабочая влажность – 3,5-3,6%

3.4.8 Структура брикетов и эффективность использования связующих при брикетировании просора песчаника

Для изучения распределения связующего вещества в брикетах оптическими методами в отраженном свете (микроскоп универсальный RX фирмы «Leica» (Германия)) были изготовлены полированные и прозрачные шлифы (рисунки 3.29-3.31). Во всех трех брикетах с различными связующими (водный раствор сульфата никеля, жидкое стекло, лигносульфонат) отмечается большая разнородность материала по размеру – от сотых долей миллиметра до 2-2,5 мм. Тонкая фракция частично окомкована, что четко проявлено на рисунках 3.29(б), 3.29(г), 3.30(б), 3.30(г). Наиболее равномерное распределение связующего вещества происходит при использовании лигносульфоната в качестве связующего. В случае применения в таком же качестве сульфата никеля отмечаются наиболее плохие результаты. Связующее не «связывает» частицы, а распределено в виде отдельных скоплений с наличием пустот между отдельными

частицами (рисунок 3.29). Использование в качестве связующего жидкого стекла позволяет получить промежуточные результаты по структуре брикетов, изготовленных из шихты просора песчаника с ЛСТ и сульфатом никеля.

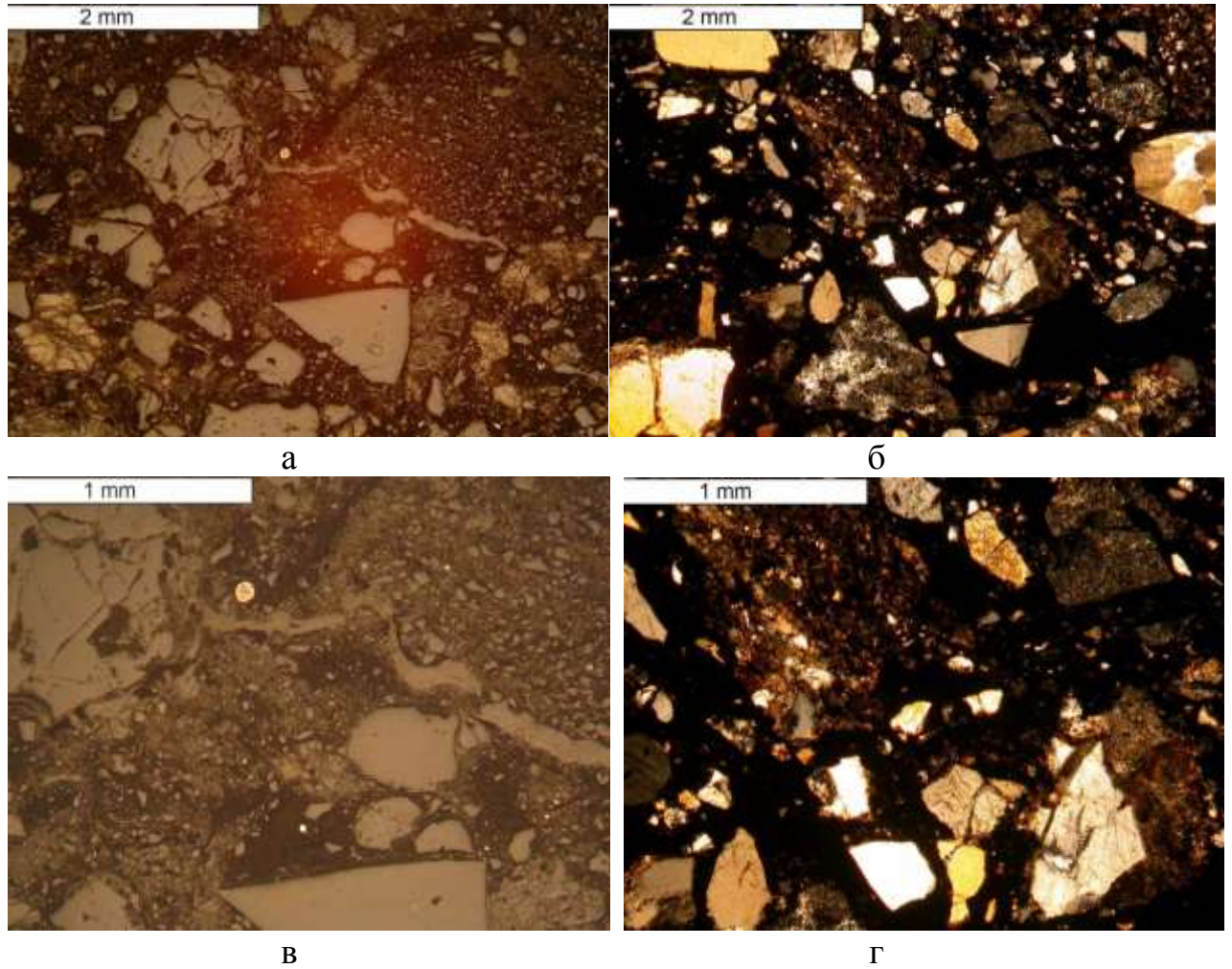


Рисунок 3.29 – Шлиф брикета с сульфатом никеля при 15 (а, б) и 30 кратном (в, г) увеличении; а, в – полированный шлиф, б, г – прозрачный шлиф

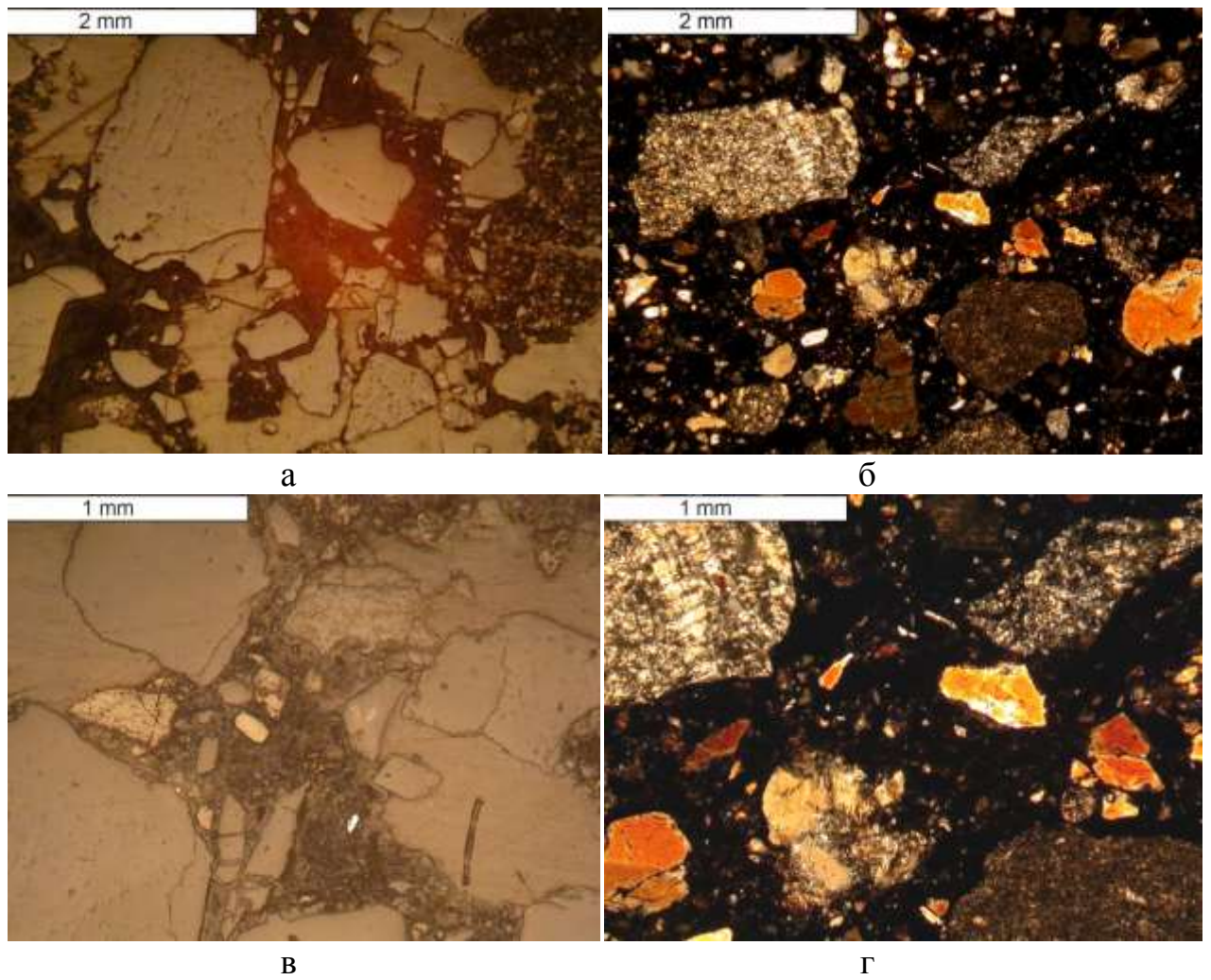


Рисунок 3.30 – Шлиф брикета с жидким стеклом при 15 (а, б) и 30 кратном (в, г) увеличении; а, в – полированный шлиф, б, г – прозрачный шлиф

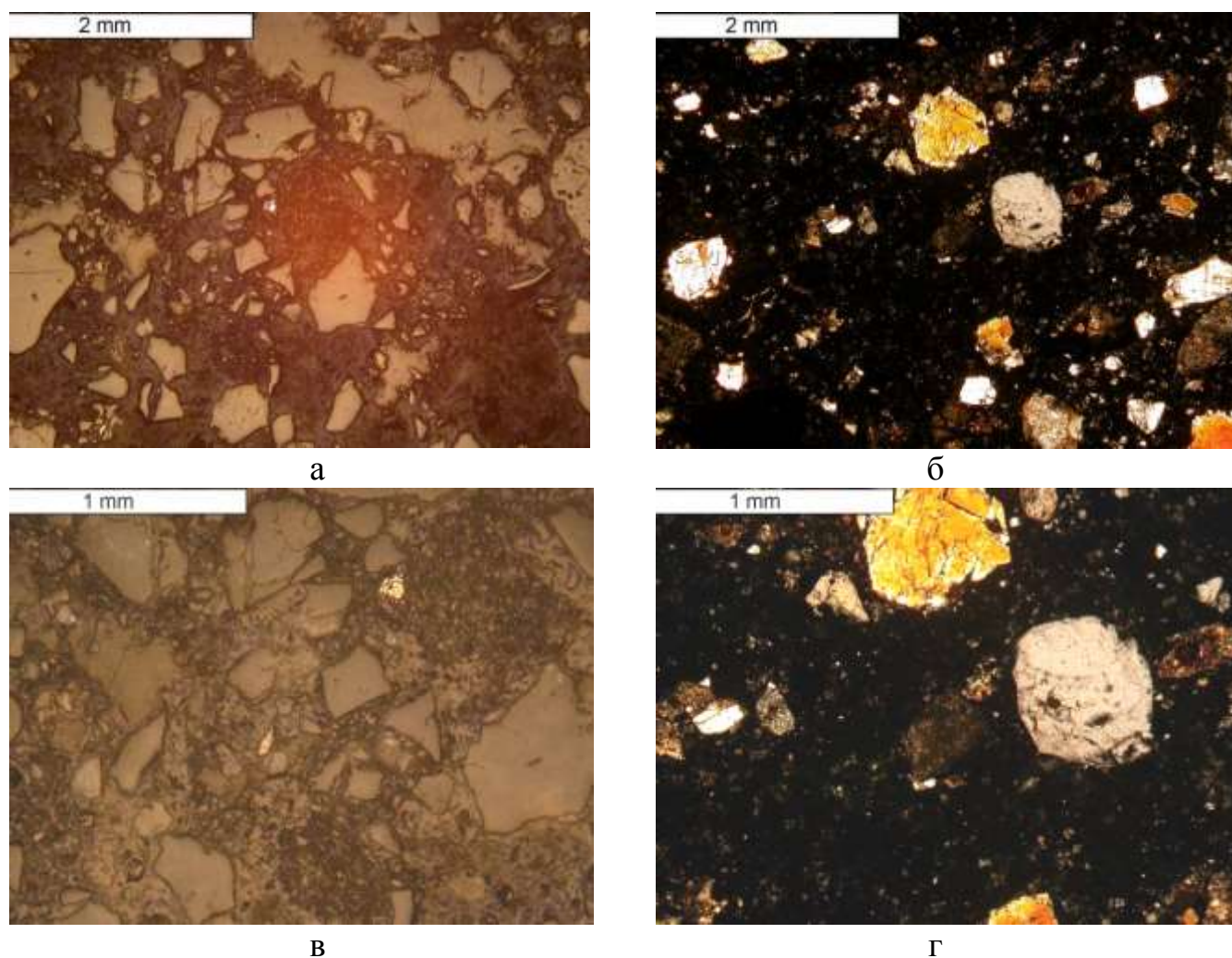


Рисунок 3.31 – Шлиф брикета с лигносульфонатом при 15 (а, б) и 30 кратном (в, г) увеличении; а, в – полированный шлиф, б, г – прозрачный шлиф

3.5 Выводы по разделу 3.4

1. Брикетирование просора песчаника месторождения КУР УНГП на валковом прессе в отсутствие связующего неэффективно вследствие низкой прочности, как текущей, так и после сушки, не превышающей 85 кгс/брикет в точке рациональной влажности, равной 5,0-5,5%. В связи с этим при брикетировании просора песчаника месторождения КУР УНГП необходимо использование связующих веществ.

2. Использование в качестве связующего ангидрита при брикетировании просора песчаника не приводит к существенному повышению прочностных свойств брикетов. Даже при 15% содержании связующего в диапазоне

рациональных значений влажности шихты (4,8-5,5%) прочность брикетов на сжатие после упрочнительной сушки не превышает 100-110 кгс/брикет. Изменение методики приготовления шихты, переход с подсушки шихты просора и связующего на подсушку одного просора с добавкой связующего «молочной» консистенции, использование в качестве связующего обожженного при 800⁰С ангидрита, а также введение в состав связующего активатора твердения (хлорида кальция) слабо сказывается на прочностных свойствах брикетов.

3. Брикетирование просора песчаника с использованием связующих, применяемых в строительной индустрии (гашеной извести, портландцемента, алебаstra и каолина) также не приводит к достижению брикетами нормативной прочности. Не помогает ни введение в состав связующего активатора твердения (хлорида кальция), ни изменение гранулометрического состава просора песчаника в сторону снижения его крупности. Частичная замена гашеной извести на ангидрит в количестве до 40-50% позволяет сохранить прочность брикетов на уровне, достигнутом брикетами, изготовленными с использованием чистой извести в качестве связующего при брикетировании просора песчаника.

Брикетирование просора песчаника с алебастром во многом аналогично брикетированию с ангидритом, как по прочности, достигаемой брикетами, так и по выходу возврата. То есть говорить о некачественной подготовке ангидрита к брикетированию, как связующего, не приходится.

В целом основной причиной получения брикетов неудовлетворительной прочности при брикетировании просора песчаника с помощью строительных связующих является недостаточная влажность шихты, что обусловлено безаварийной работой валкового пресса без зависания брикетируемого материала в его бункере и залипания рабочих ячеек. Другой причиной является необходимость длительной выдержки шихты перед брикетированием.

4. Прочность в 140 кгс/брикет достигают брикеты, полученные при брикетировании просора песчаника с использованием в качестве связующего жидкого натриевого стекла. Влажность шихты при этом должна составлять 4,3-5,0%, а содержание связующего в шихте быть не менее 5%. Выход возврата при

брикетировании просора песчаника с жидким стеклом весьма существенен и достигает ~35% в области рациональной влажности при требуемом содержании связующего в шихте. Высокий выход возврата обуславливает снижение общей производительности валкового пресса по готовому материалу.

Использование жидкого стекла в качестве связующего имеет ряд достоинств:

- повышение общего количества диоксида кремния в брикетах за счет использования силикатного связующего;

- снижение вязкости шлаков при плавке таких брикетов за счет повышения содержания в них оксида натрия, что способствует снижению потерь цветных металлов со шлаками;

К недостаткам следует отнести сложности в доставке и приготовлении к брикетированию (растворение силикат-глыбы) и более высокую агрессивность шлаков при повышенном содержании Na.

5. Использование при брикетировании просора песчаника растворов сульфатов никеля и меди, позволяет при упрочнительной сушке брикетов, полученных в области рациональной влажности шихты (4,0-4,5%) при содержании сульфата никеля в шихте 0,5% (в пересчете на сухой вес) достигать необходимой прочности в 140 кгс/брикет. Текущая прочность брикетов в тех же условиях невысока и не превышает 42 кгс/брикет. Выход возврата при брикетировании просора песчаника с сульфатами не превышает 18-20% и линейно снижается с повышением влажности шихты и увеличением содержания сульфата в брикетируемой шихте. Способ приготовления шихты к брикетированию: подсушка шихты просора с сульфатом до необходимой влажности или добавка раствора сульфата к подсушенному просору без подсушки шихты, особого влияния на процесс брикетирования и прочность готовых брикетов не оказывает.

При использовании в качестве связующего растворов сульфата меди брикеты из просора песчаника имеют меньшую прочность на сжатие, чем брикеты при использовании сульфата никеля.

Применение сульфатов меди и никеля имеет существенное преимущество – они являются промежуточными продуктами при металлургической переработке медно-никелевого сырья в ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» (на стадии получения электролитной меди и никеля соответственно). Однако использование сульфатов сопряжено с увеличением степени незавершенности производства.

6. Наиболее эффективно при брикетировании просора песчаника использование жидкого лигносульфоната. Его содержание в шихте для достижения брикетами после упрочнительной сушки необходимой прочности должно составлять 2,5%. Лигносульфонат является отходом целлюлозно-бумажной промышленности, и цена его сравнительно невелика. Кроме того, он недефицитен, может быть доставлен речным транспортом (если использовать лигносульфонат ОАО «Красноярский ЦБК»), прост в подготовке к использованию в процессах брикетирования.

Несмотря на возможность загрязнения атмосферы металлургических цехов и окружающей местности при применении лигносульфоната, следует отметить, что на ОАО «Медногорский Медно-Серный Комбинат», где в состав шихты вводят 10-12% лигносульфоната, а готовые брикеты проходят стадию рудной плавки, а так же при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК», где содержание лигносульфоната в шихте составляет 8-10%, превышение ПДК по фенолам, пиреновым и бензпиреновым соединениям, образующимся при сгорании лигносульфоната, входящего в состав брикетов, не выявлено.

7. Проведение упрочнительной операции – сушки брикетов необходимо как для упрочнения брикетов, так для предотвращения хлопков и взрывов в печи, приводящих к преждевременным остановкам печей, их авариям и возможным человеческим жертвам.

Таким образом, наиболее эффективным связующим при брикетировании просора песчаника является лигносульфонат. При его использовании в количестве 2,5-3% и последующей упрочнительной сушке можно получить брикеты нормативной прочности. Низкое количество мелочи при брикетировании

позволяет надеяться на незначительное количество возврата, повторно отправляемое на брикет-пресс, что не приведет к его перегрузке. По результатам проведенных исследований была разработана технологическая схема производства брикетов из просора песчаника месторождения КУР УНГП, представленная на рисунке 3.31.

3.6 Описание технологического процесса брикетирования

Технологическая схема производства брикетов из просора песчаника месторождения КУР УНГП представлена в приложении Г.

Просор песчаника самосвалами или думпкарами по железной дороге доставляется в отапливаемый склад исходного сырья, где он разгружается и ленточным конвейером подается в бункер просора песчаника.

Из бункера просор песчаника с влажностью 5-10% поступает на сушку, проводимую в сушильном барабане, отапливаемом газовой горелкой. Вместе с просором песчаника на сушку в сушильный барабан поступают продукты брикетирования с валкового пресса. Присутствующий в сушильном барабане песчаник выполняет роль подушки для брикетов при их пересыпке в сушильном барабане [169]. Сушка просора песчаника и продуктов брикетирования осуществляется до нулевой остаточной влажности (~0,2-0,5%). В концевой части барабана имеется цилиндрическое сито (бутара) с размером ячеек 10мм, где происходит отделение брикетов, осколков брикетов и частиц просора крупнее 10мм от общей массы сушеного материала и отправка их шнековым, а затем ленточным транспортером на склад готовой продукции. Просор песчаника мельче 10мм через бункер сухого материала отправляется на приготовление шихты для брикетирования, проводимое в шнековом смесителе.

В бункер сухого материала помимо просора песчаника из сушильного барабана поступает циклонная пыль и пыль электрофильтров, выделенная из отходящих газов сушильного барабана, а также аспирационная пыль от мест пересыпок.

Из бункера сухой материал поступает в шнековый смеситель. Для приготовления поступающей на брикетирование шихты в смеситель добавляется лигносульфонат и вода, так чтобы содержание связующего в шихте составляло 2,5-3,0%, а ее влажность – 3-4%.

Приготовленная в смесителе шихта ленточным транспортером подается в скребковый транспортер (редлер). Конструктивно редлер распределяет материал по обеим шахтам брикет-пресса, а излишки материала, образующиеся при переполнении шахт, транспортируются далее и выгружаются через разгрузочный лоток. Это обеспечивает гравитационную загрузку брикет-пресса брикетируемым материалом.

Брикетируемый материал по двум шахтам поступает на валки брикет-пресса. Использование двух шахт, а также наличие на них специальных шиберов позволяет равномерно распределить брикетируемый материал по всей рабочей длине валков брикет-пресса. На вращающихся навстречу друг другу валках закреплены сменные бандажи с ячейками в виде симметричных полуформ брикетов. В связи с тем, что просор песчаника обладает высокой абразивностью, бандажи необходимо изготавливать из специальной износостойкой стали. Шихта, поступающая на брикетирование, подается в пространство между валками, заполняет ячейки, которые при вращении валков точно совпадают друг с другом, и таким образом спрессовывается в брикеты. За зоной контакта ячеек готовые брикеты выпадают из них и вместе с неокускованным материалом (облоем) системой ленточных транспортеров направляются на сушку в сушильный барабан. Для предупреждения залипания рабочих ячеек валков брикетируемым материалом на валки брикет-пресса подается технологический пар. При работе в штатном режиме из брикет-пресса выходит не менее 90% готовых брикетов и их осколков крупностью более 10мм.

Температуру подаваемой шихты на брикетирование необходимо поддерживать на уровне 50-80⁰С. При повышенных температурах лигносульфонат обладает меньшей вязкостью и поэтому легче заполняет все неплотности между окусковываемым материалом, что улучшает качество брикетов.

Очистка отходящего из сушильного барабана газа производится в циклоне и электроfiltре. Пыль собирается в сборниках пыли и шнековым транспортером отправляется на приготовление шихты для брикетирования в шнековый смеситель. Очищенный от пыли газ через трубу выкидывается в атмосферу.

Аспирационная вентиляционная система объединяет местные отсосы от технологического оборудования: конвейеров, элеваторов, бункеров, а также укрытий с отсосами от мест перегрузки концентрата. В аспирационной системе конвейеров и мест перегрузок, задействованных при подготовке шихты до ее сушки в сушильном барабане, очистка удаляемого воздуха осуществляется в мокрых пылеуловителях. От конвейеров после сушильного барабана, мест перегрузок, бункеров брикет-пресса удаление аспирационного воздуха и его очистка от пыли производится в рукавных фильтрах и мокрых пылеуловителях. После очистки воздух собирается в коллекторах и для рассеивания оставшейся пыли выбрасывается через факел в атмосферу. После встряхивания сухая пыль из рукавных фильтров направляется в пылесборник и далее вместе с циклонной пылью в промежуточный бункер после сушильного барабана. Смывки после мокрых пылеуловителей объединяются, сгущаются, фильтруются и в виде кека периодически направляются в приемный бункер просора песчаника.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА АО «КОЛЬСКАЯ ГМК»

В настоящее время на АО «Кольская ГМК» в г. Заполярный Мурманской области освоена [92] технологии окускования коллективного медно-никелевого концентрата путем его брикетирования. Технология брикетирования концентрата с последующей плавкой брикетов в рудно-термических печах призвана заменить устаревшую технологию агломерационного обжига окатышей из концентрата на ОКМ, улучшить состояние окружающей среды и снизить выбросы диоксида серы на территориях близких к границе с Норвегией и Финляндией в соответствии с межправительственным соглашением о трансграничных переносах загрязняющих веществ.

Технология производства брикетов из медно-никелевого концентрата включает фильтрацию пульпы концентрата на пресс-фильтрах, шихтовку кека концентрата со связующим, производимую в смесителе интенсивного действия, сушку шихты в сушильном барабане, брикетирование подсушенной шихты на валковых прессах 92/10-8D 1225 DG 2E производства фирмы «Maschinenfabrik Koppert GmbH & Co. KG» (Германия). Отходящий из сушильного барабана газ очищается от пыли в рукавных фильтрах и выбрасывается в атмосферу. Пыль, возврат и подсушенная до влажности 0,3-0,5% шихта поступают на повторную шихтовку со связующим, производимую в двухваловом смесителе и далее через скребковый транспортер на валки брикет-пресса. Повторная добавка связующего огрубляет шихту, обеспечивает необходимую рабочую влажность брикетирования и придает пластичность получаемым брикетам, что положительно сказывается на их качестве. После разделения продуктов брикетирования готовые брикеты направляются на склад готовой продукции и далее в плавильный цех (рисунок 4.1).

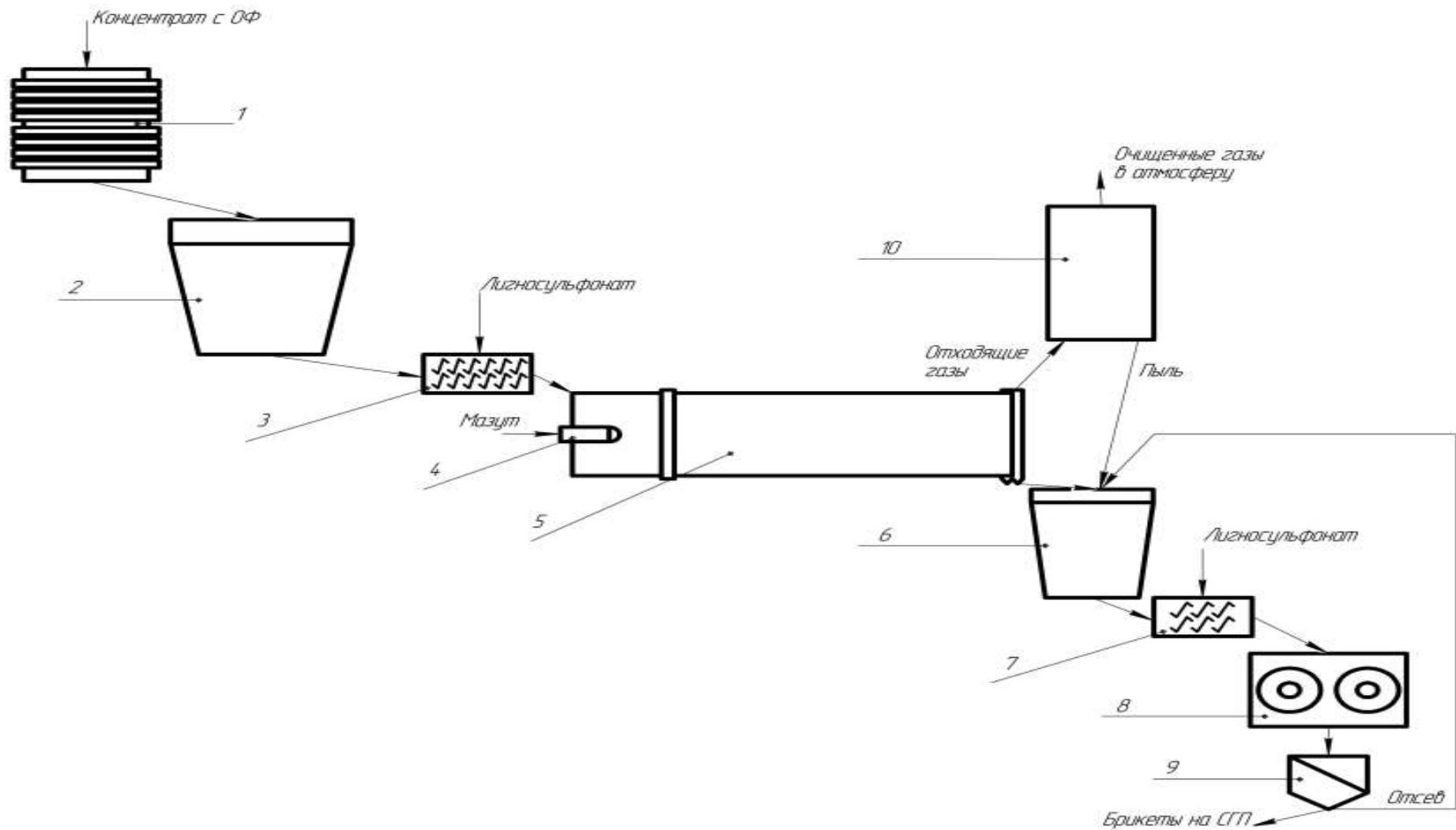


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема брикетирования коллективного медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК». 1– пресс-фильтр, 2 –бункер влажного материала, 3 – смеситель интенсивного действия, 4 – горелка, 5 – сушильный барабан, 6 – бункер сухого материала, 7 – двухваловый смеситель, 8 – брикет-пресс, 9 – грохот, 10 – рукавный фильтр.

В качестве связующего используется технический лигносульфонат жидкой консистенции. По разработанному ООО «Институт Гипроникель» регламенту до сушки шихты предусмотрена подача 10% лигносульфоната от массы брикетируемого концентрата и 2% после сушки шихты. В настоящее время в ходе совершенствования технологии брикетирования АО «Кольская ГМК» общее содержание лигносульфоната в шихте снижено до 8-10%. Снижение расхода лигносульфоната во многом обеспечено за счет использования брикет-прессов, имеющих высокое удельное усилие прессования, достигающее 30кН/см. Для сравнения, максимальное удельное усилие прессования лабораторного брикет-пресса – 13,2 кН/см.

Выбор лигносульфоната в качестве связующего при брикетировании концентрата на момент разработки технологии был обусловлен, с одной стороны, высокой эффективностью, определяющейся количеством связующего, необходимым для достижения требуемой прочности брикетов, и низкой стоимостью, включающей только транспортные издержки, с другой. В это же время серьезным недостатком использования технических лигносульфонатов является отсутствие стабильности их состава. Это подтверждается тем, что на целлюлозно-бумажных комбинатах приняты различные стандарты и технические условия, регламентирующие физико-химические свойства лигносульфонатов.

По мере освоения технологии брикетирования возник ряд проблем, связанных как с технологическими свойствами связующего, так и с необходимостью оптимизации эксплуатационных затрат. По данным производственного контроля установлено, что механические свойства брикетов (прочность на сжатие и ударная прочность) эпизодически ухудшаются без явных технологических отклонений при подготовке и брикетировании концентрата (рисунок 4.2). Одной из возможных причин этого является колебание вяжущих свойств лигносульфоната при смене поставщика. Основным поставщиком на текущий момент является филиал ОАО «Группа «ИЛИМ» в г. Коржма.

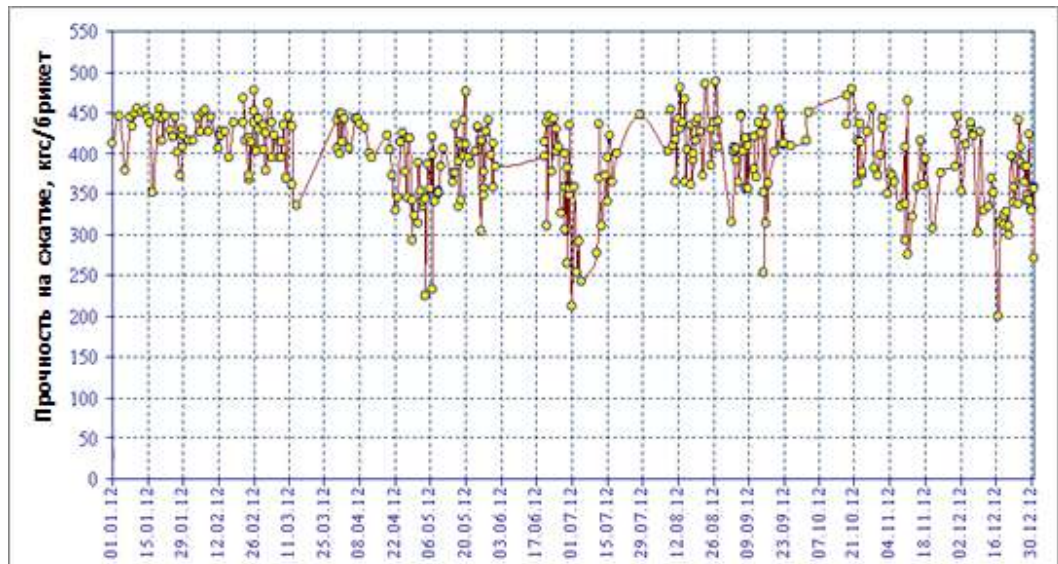


Рисунок 4.2 – Изменение прочности брикетов за период эксплуатации участка брикетирования в 2012 году

В последнее время лигносульфонаты перешли из категории дешевых и доступных отходов производства в категорию востребованных технических материалов (рисунок 4.3). В первую очередь этому способствовали следующие факторы[170]:

- снижение мощности целлюлозно-бумажной промышленности;
- повышение спроса как со стороны Российских, так и зарубежных предприятий;
- увеличение степени переработки отходов на ЦБК;
- развитие технологий получения биотоплива, в том числе на основе отходов ЦБК.

Все это привело к увеличению стоимости лигносульфоната жидкой консистенции до 250-300\$ за тонну. В таких условиях производство брикетов из медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» становится дорогостоящим.

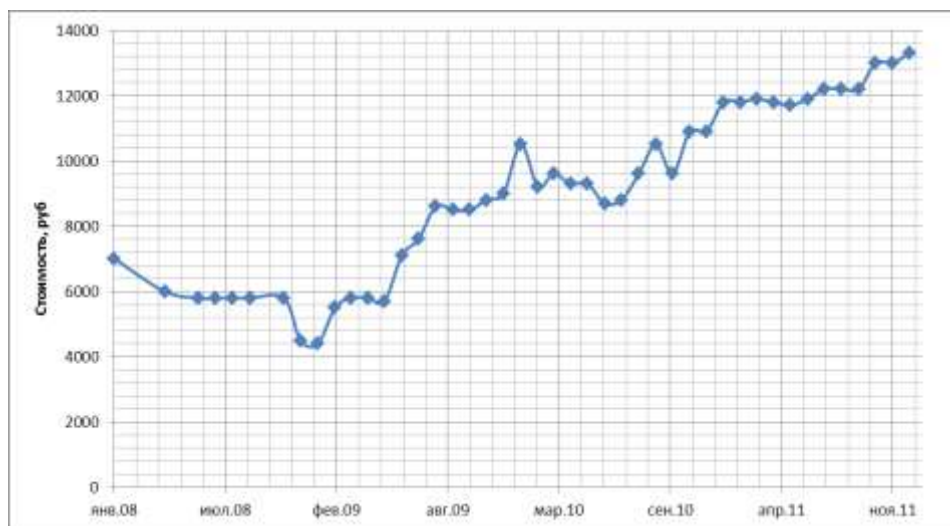


Рисунок 4.3 – Динамика изменения стоимости лигносульфоната порошкообразной консистенции [170]

В целях оперативного решения возникающих проблем проведены исследования по поиску альтернативных лигносульфонату связующих, потенциально повышающих рентабельность процесса брикетирования коллективного медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК».

4.1 Методика проведения исследований

Ниже приведены основные характеристики используемых в исследовании материалов и способы подготовки шихты к брикетированию. Конструкция и технологические характеристики брикет-пресса подробно описаны в разделе 3.1.

4.1.1 Характеристика исходных материалов

Медно-никелевый концентрат

В качестве объекта исследования использовался коллективный медно-никелевый концентрат АО «Кольская ГМК» в виде отжатого кека после фильтрации, проводимой на фильтр-прессах «Larox». Ниже в таблице 4.1 приведен химический состав проб медно-никелевого концентрата, используемого в исследовании.

Таблица 4.1 – Химический состав медно-никелевого концентрата

Номер пробы	Содержание, %								
	Ni	Cu	Fe	S _Σ	S _{SO4}	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
1	8,42	4,08	27,40	20,40	<0,10	19,50	0,60	0,90	10,90
2	8,05	3,30	30,20	20,20	<0,10	18,40	0,63	1,08	11,50
3	8,03	3,46	29,50	19,80	<0,10	18,00	0,70	1,02	11,00
4	8,36	3,26	28,00	19,60	<0,10	19,70	0,70	1,08	12,40

По данным рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН-4, основу фазового состава проб концентрата составляют: пентландит, халькопирит, пирротин (присутствуют обе модификации, с преобладанием гексагональной), тальк и серпентин. Кроме того, присутствуют первые проценты пирита, магнетита, а также, с большой вероятностью, следы минералов группы хлорита и амфибола. Имеющаяся на дифрактограмме слабоинтенсивная линия, соответствующая межплоскостному расстоянию $d=5,03\text{Å}$ может принадлежать Fe_9S_8 (макинавит). Сульфатные соединения металлов в пробах не обнаружены (возможные причины: либо отсутствуют, либо следовое содержание или рентгеноаморфны, т.е. размер кристаллитов менее 50Å). Существенных различий дисперсности фаз (размера ОКР – областей когерентного рассеяния, т.е. кристаллитов) в пробах также не замечено (см. таблицу 4.2).

По данным рентгеноспектрального анализа, проведенного методами РЭМ и РСМА с применением растрового электронного микроскопа Tescan 5130 MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов медно-никелевый концентрат представляет собой плотные образования, состоящие на 70-80 % из силикатов (рисунок 4.4а). Оставшаяся часть - это сульфидные и оксидные минералы (рисунок 4.4б, в).

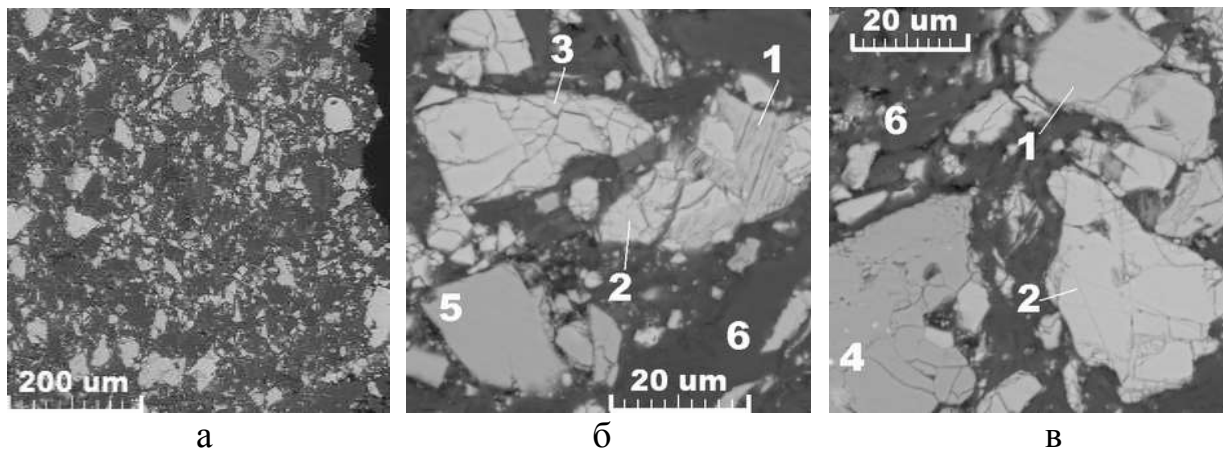


Рисунок 4.4 – Общий вид (а) и строение (б, в) медно-никелевого концентрата. 1 – пирротин; 2 – пентландит; 3 – халькопирит; 4 – магнетит; 5 – пирит; 6 – силикатная часть

Основными сульфидными минералами являются пирротин (в, основном, гексагональной сингонии); пентландит, который присутствует в пробе в форме пламенивидных прожилок в пирротине и самостоятельных частиц; свободные частицы халькопирита. В сростаниях с пирротинном халькопирит встречается существенно реже, чем пентландит. Кроме того, в концентрате диагностируются частицы пирита и магнетита общим объемом не более 2%. Также отмечаются единичные зерна хромсодержащих шпинелей и единичные зерна ильменита (FeTiO_3). Размеры зерен всех указанных минералов лежат в пределах 10-70 мкм. Состав силикатной части заметно варьируется. В силикатах диагностируются, %: 4-16 Fe; 17-29 Si; 1-6 Al; 13-23 Mg.

Таблица 4.2 – Средний состав основных минералов медно-никелевого концентрата

Структурная составляющая	Состав, % масс.									
	Mg	Al	Si	Ca	S	Fe	Co	Ni	Cu	O
Пирротин	-	-	-	-	37,7	60,7	0,05	1,5	0,07	-
Пентландит	-	-	-	-	33,6	31,8	1,1	33,4	0,14	-
Халькопирит	-	-	-	-	35,3	30,2	-	-	34,0	-
Пирит	-	-	-	-	53,2	45,2	1,6	-	-	-
Магнетит	0,4	0,2	0,2	-	0,26	70,0	0,96	-	-	28

Гранулометрический состав проб концентрата определялся с помощью лазерного анализатора размеров частиц S3500 фирмы «Microtrac Co.» (США) (таблица 4.3).

Таблица 4.3. – Гранулометрический состав медно-никелевого концентрата

Номер пробы	Содержание фракции (мкм), %					
	+100	-100 + 50	-50 +10	-10+5	-5+2	-2
1	2,64	7,58	56,87	20,61	11,29	1,01
2	3,35	11,39	62,09	15,61	7,10	0,46
3	0,24	3,83	47,98	20,61	17,50	9,84
4	1,05	9,39	73,01	12,24	3,88	0,43

Остаточное содержание влаги в концентрате, измеренное на влагомере МА-45 «Sartorius» (Германия), составляло 10,4-12,4%, а сам концентрат представлял собой однородную дисперсную рассыпчатую массу темно-серого цвета.

Связующие вещества

Поиск альтернативных связующих для брикетирования медно-никелевого концентрата проводился в нескольких направлениях:

1. Установлено [94], что в процессе хранения концентрата в естественных условиях под воздействием кислорода воздуха и водяных паров происходит окисление сульфидной составляющей медно-никелевого концентрата с образованием гидратов сульфатов железа и цветных металлов, в частности никеля. Наличие и увеличение содержания сульфатов в концентрате улучшает его брикетируемость, повышает прочностные характеристики брикетов, снижает расход связующего и выход возврата. Кроме того, ранее при проведении исследований по изучению брикетируемости просора песчаника месторождения КУР УНГП [156,157] сравнительно высокую эффективность применения в качестве связующих показали водные растворы сульфатов меди и никеля. Исходя из этого, перспективным направлением было признано исследование применимости в качестве связующих водных растворов сульфатов.

2. Другим направлением является разработка комбинированных связующих на основе лигносульфоната с его частичной заменой другими связующими. Перспективность данного направления подтверждается исследованиями, ранее [101] выполненными в ООО «Институт Гипроникель». По результатам исследований установлено, что при замещении 80-85% лигносульфоната мелассой, прочность получаемых брикетов на 60% больше чем при использовании чистого лигносульфоната и на 35% при использовании чистой мелассы. Применение смеси лигносульфонат-меласса в заданном соотношении позволяет снизить расход связующего на ~30%.

3. Третье направление – применение органических связующих, получаемых путем направленного синтеза или структурно-химической модификации. Такие связующие обеспечивают высокие прочностные характеристики брикетов при минимальном расходе. Однако стоит отметить, что они также отличаются и высокой стоимостью, которая является определяющим критерием целесообразности их использования.

Полный перечень используемых в исследовании связующих включает в себя:

- *лигносульфонат технический* жидкой консистенции марки А производства ОАО «Котласский ЦБК»;
- *алюминий сернокислый* $Al_2(SO_4)_3$ (Ч) приобретенный у ООО «Химснаб»;
- *натрий сернокислый* Na_2SO_4 (сульфат натрия природный) производства ОАО «Кучуксульфат»;
- *никель сернокислый семиводный* $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ (ХЧ) приобретенный у ООО «Реахим»;
- *медь сернокислая пятиводная* $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ЧДА) приобретенная у ООО «Реахим»;
- *закисное железо сернокислое семиводное* $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (ХЧ) приобретенное у ЗАО «Нева Реактив»;
- *окисное железо сернокислое девятиводное* $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ (Ч) приобретенное у ЗАО «Химреактив»;

- *гашеная известь* (известь строительная гидратная I-го сорта) производства ОАО «Угловский известковый комбинат»;

- «*Термопласт СВ*», связующие на основе полиметиленафталинсульфоната натрия производства ООО «Полипласт Новомосковск».

- *связующие* компании «*Kemira Oyj*» предоставленные ЗАО «Кемира Хим»;

- *модифицированные лигносульфонаты* жидкой консистенции серии *ЛСМ* производства компании ООО ПК «ХИМПЭК»;

- *COMPREX A12*, связующее на основе поливинилового спирта производства компании «Direct Technologies Ltd.»;

- *поливиниловый спирт (ПВС)*, марки PVA 088-50, производства компании «Sinopec Sichuan Vinylon Works» (Китай), предоставленный ООО «Торговая Компания «Сланцы-Хим»;

- *стоки карбонатного передела ЦЭН-1* АО «Кольская ГМК». Химический состав стоков, %: 30,90 Na; <0,10 K; 12,40 Cl; 0,95 C; 16,50 S_Σ;

- *раствор вскрытия железистого кека*. Раствор вскрытия железистого кека (РВЖК) представляет собой продукт нейтрализации отвального кека железоочистки ЦЭН-2 серной кислотой. По результатам химического анализа раствор вскрытия железистого кека содержит, г/дм³: 3,10 Ni; 2,61 Cu; 0,006 Co; 1,95 Fe²⁺, 142,4 Fe, 262,0 S_{SO4};

- *серная кислота* особой чистоты марки ОС.Ч. – «11-5», приобретенная у ООО «Сигма Тек».

Ниже в таблице 4.4 приведены основные характеристики связующих веществ, используемых в исследованиях.

Таблица 4.4. – Основные характеристики связующих веществ

Наименование связующего	Свойства			
	Массовая доля сухих веществ, %	Плотность, г/см ³	Вязкость при 20°С, сПз	рН
ЛСТ	50,00	1,255	430	4,80
Al ₂ (SO ₄) ₃	32,40	1,246	н/д	2,74
Na ₂ SO ₄	36,20	1,262	н/д	6,31
NiSO ₄	50,00	1,395	н/д	5,10
CuSO ₄	50,00	1,445	н/д	2,64
FeSO ₄	50,00	1,373	н/д	1,82
Fe ₂ (SO ₄) ₃	50,00	1,458	н/д	<0,10
H ₂ SO ₄	-	1,170	н/д	<0,10
РВЖК	42,00	1,449	н/д	<0,10
Термопласт 2СВ	55,00	1,300	699	5,57
Термопласт 4СВ	55,00	1,280	577	6,19
ЛСМ-1	60,38	1,301	2022	6,15
ЛСМ-2	61,40	1,303	2025	6,14
ЛСМ-3	62,48	1,297	1920	6,15
ЛСМ-4	58,84	1,290	2196	6,14
ЛСМ-5	56,25	1,294	1915	6,12
ЛСМ-6	56,89	1,287	1905	6,09
Comprex A12	10,00	1,025	1985	6,03
ПВС	10,00	1,018	1929	5,65
KemWet 250/1	24,00	1,115	1000	4,00
KemWet 250/2	24,00	1,115	950	5,50
KemWet 250/3	24,00	1,115	940	7,00
KemWetm50/30	30,00	1,220	300	8,00
KemBrick 830	0,50	1,260	н/д	6,00

При проведении исследований серная кислота разбавлялась водой до 24% крепости (по массе), сульфаты металлов и поливиниловый спирт использовались в виде водных растворов, остальные связующие использовались в товарном виде, предоставляемом поставщиком или производителем. Измерение коэффициента динамической вязкости осуществлялось с помощью ротационного вискозиметра DV-II+ производства фирмы «Brookfield Inc.» (США), плотность связующих определялась ареометрами общего назначения АОН-1 производства ПАО «Стеклоприбор» (Украина).

4.1.2 Способы подготовки шихты и контроль качества брикетов

В качестве основной определяемой характеристики брикетов была принята величина прочности брикетов на сжатие. Согласно параметрам, заложенным в технологический регламент, брикеты удовлетворительного качества должны иметь текущую прочность на сжатие не менее 140кгс/брикет. Определение прочности брикетов на сжатие проводилось на модифицированном лабораторном гидравлическом прессе согласно ГОСТ 24765-81. Суть модификации заключается в подключении к гидравлическому прессу датчика давления «Метран 100» и устройства сбора данных «DataTaker DT600», отображающего кривые разрушения на ПК. Контроль влажности на протяжении всех этапов исследований осуществлялся на влагомере MA-45 «Sartorius» (Германия).

При проведении исследований применялись следующие способы подготовки шихты, целью которых было получение брикетов нормативной прочности при минимальном расходе связующего, без существенного изменения текущей технологии брикетирования АО «Кольская ГМК»:

1. Используется **один тип** связующего вещества, вводимый в две стадии: на первой стадии медно-никелевый концентрат смешивается с $N\%$ связующего и направляется на сушку, после чего производится вторая добавка $n\%$ связующего, обеспечивающая влажность, необходимую для конкретно опыта, и после перемешивания шихта брикетируется;

2. При подготовке шихты по данному способу используется **один тип** связующего вещества, вводимый в одну стадию, предшествующую сушке шихты до рабочей влажности. После достижения рабочей влажности и перемешивания шихта брикетируется;

3. Используется смесь **двух типов** связующих веществ, вводимых *в виде гомогенной смеси* в одну стадию, предшествующую сушке шихты до рабочей влажности. После достижения рабочей влажности и перемешивания шихта брикетируется.

4. При подготовке шихты по данному способу используется **два типа** связующих веществ, вводимых *раздельно* в одну стадию, предшествующую сушке шихты до рабочей влажности. После достижения рабочей влажности и перемешивания шихта брикетуется.

Во время подготовки шихты к брикетированию производился контроль и замер температуры связующего, подаваемого на смешение с концентратом: во всех случаях температура находилась в пределах 60-70⁰С. Подсушка шихты осуществлялась в муфельном шкафу в воздушной среде при 150⁰С.

4.2 Результаты и их обсуждение

В данном разделе представлены результаты лабораторных исследований по брикетированию коллективного медно-никелевого концентрата со связующими альтернативными лигносульфонату, выполненные в следующих направлениях:

- исследование эффективности использования в качестве связующих водных растворов сульфатов;
- исследование эффективности комбинированных связующих;
- исследование эффективности органических связующих.

Обработка полученных результатов проводилась с помощью программы Microsoft Excel с использованием метода наименьших квадратов.

На начальном этапе исследований для проверки регламентных показателей проведена серия опытов с использованием технического лигносульфоната жидкой консистенции марки А производства ОАО «Котласский ЦБК» (далее ЛСТ), который в последующих исследованиях использовался в качестве компонента всех комбинированных связующих. Подготовка шихты к брикетированию осуществлялась по схеме, заложенной в регламент на технологию брикетирования АО «Кольская ГМК». Согласно полученным результатам (рисунок 4.5) влажность шихты, поступающей на брикетирование, для получения брикетов максимальной прочности должна составлять ~2%. При таких значениях

прочность брикетов на сжатие достигает 140 кгс/брикет, что хорошо согласуется с регламентными данными.

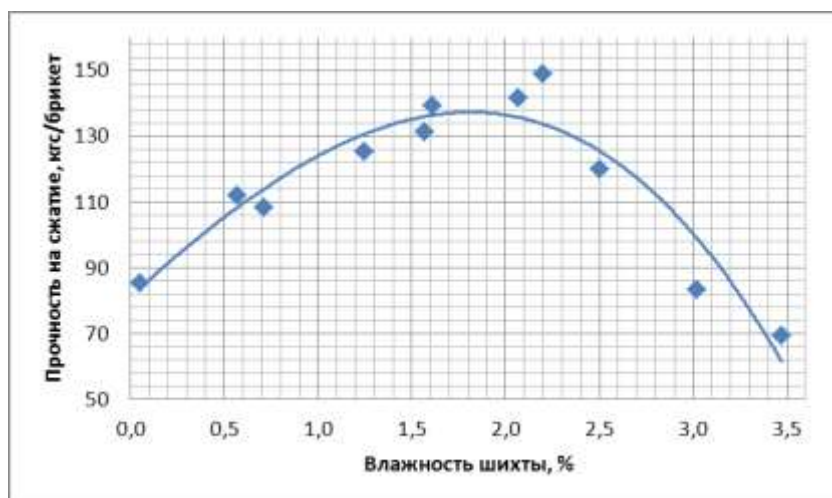


Рисунок 4.5 – Влияние влажности шихты на текущую прочность брикетов на сжатие. Связующее – ЛСТ; расход связующего – 12%

В дальнейшем исследовалась эффективность различных видов связующих и их расхода. Кроме того, исследовалось влияние срока вылеживания брикетов на их остаточную влажность и прочность. Результаты представлены в таблицах Приложения Д и на рисунках 4.6-4.75. Ниже приведено обсуждение полученных результатов.

4.2.1 Исследование эффективности использования в качестве связующих водных растворов сульфатов

Из литературных источников [85,156,157] хорошо известно о возможности применения сульфатов в качестве связующих при брикетировании различных мелкозернистых материалов. При производстве брикетов из рудных медных концентратов на брикетной фабрике ОАО «Медногорский Медно-Серный Комбинат» в случае дефицита лигносульфоната в качестве связующего используют водные растворы сульфата алюминия, которые готовят путем нейтрализации оксида алюминия серной кислотой. Сульфаты железа, никеля,

меди, натрия являются полупродуктами или отходами внутреннего производства ПАО «ГМК «Норильский Никель». В связи с этим представляет определенный интерес проверить вяжущие свойства водных растворов сульфатов при брикетировании медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК».

4.2.1.1 Сульфат алюминия

На рисунке 4.6 представлены кривые, характеризующие влияние влажности брикетируемой шихты на прочностные свойства брикетов, полученных при использовании сульфата алюминия в качестве связующего. Подготовка шихты к брикетированию осуществлялась по схеме, предложенной в технологическом регламенте: 10% раствора связующего до сушки шихты и 2% после.

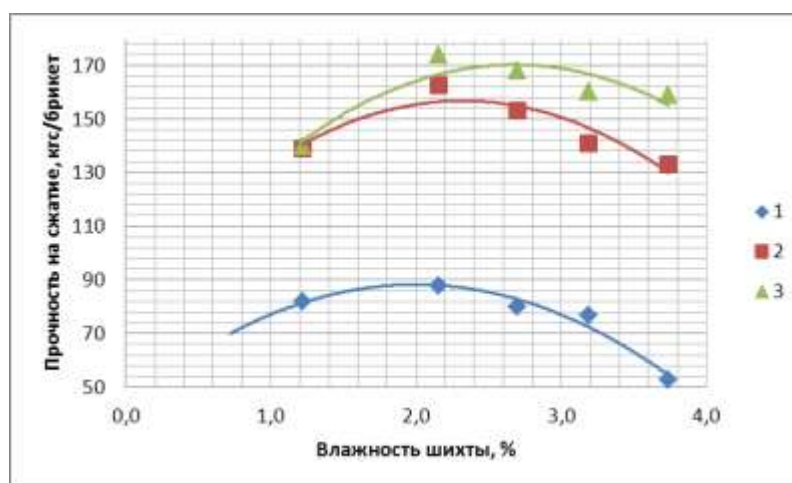


Рисунок 4.6 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего 12% сульфата алюминия, от влажности шихты. 1 – текущая прочность; 2 – через 3 суток; 3 – через 4 суток

Получаемые брикеты не обладали нормативной прочностью на сжатие: она не превышала 90 кгс/брикет. При вылеживании брикетов в течение 3 суток и более прочность брикетов резко возрастала и составляла 140-170 кгс/брикет. Влияние влажности брикетируемой шихты на текущую прочность брикетов проявляется незначительно, особенно при влажности до 3%. Рациональная

влажность шихты лежит в пределах 2-2,5% и с увеличением срока вылеживания имеет тенденцию к возрастанию.

В процессе вылеживания наблюдалось как снижение остаточной влаги в брикетах, так и ее возрастание в зависимости от исходной влажности брикетируемой шихты (рисунок 4.7). Как следует из полученных кривых, при 12% содержании сульфата алюминия в шихте остаточная влажность брикетов при значительном сроке вылеживания стабилизируется на уровне 1,9-2,3%.

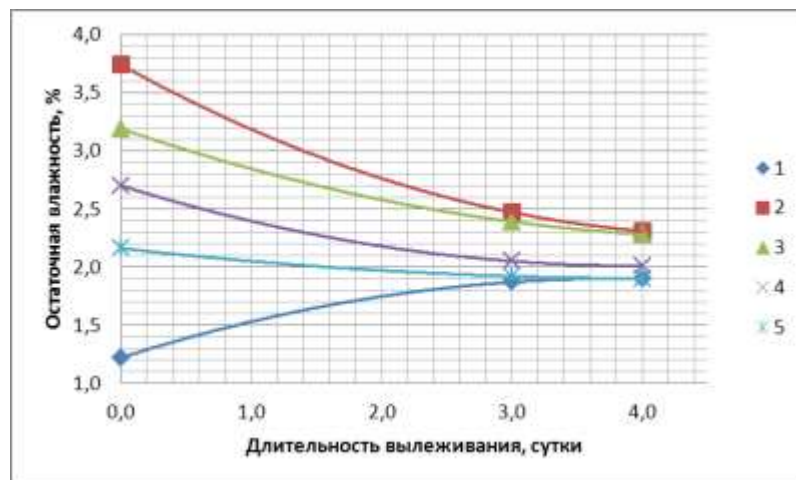


Рисунок 4.7 – Влияние длительности вылеживания брикетов на величину их остаточной влажности. Связующее – 12% $Al_2(SO_4)_3$; рабочая влажность, %: 1 – 1,22; 2 – 3,74; 3 – 3,19; 4 – 2,70; 5 – 2,16

При повышении общего содержания сульфата алюминия в шихте с концентратом наблюдается практически линейное возрастание прочности брикетов, как текущей, так и после вылеживания (рисунок 4.8). Увеличение содержания связующего вплоть до 20% не приводит к достижению текущей прочности на сжатие 140 кгс/брикет, в то время как после суточного вылеживания нормативная прочность достигается при общем содержании сульфата алюминия не более 16%.

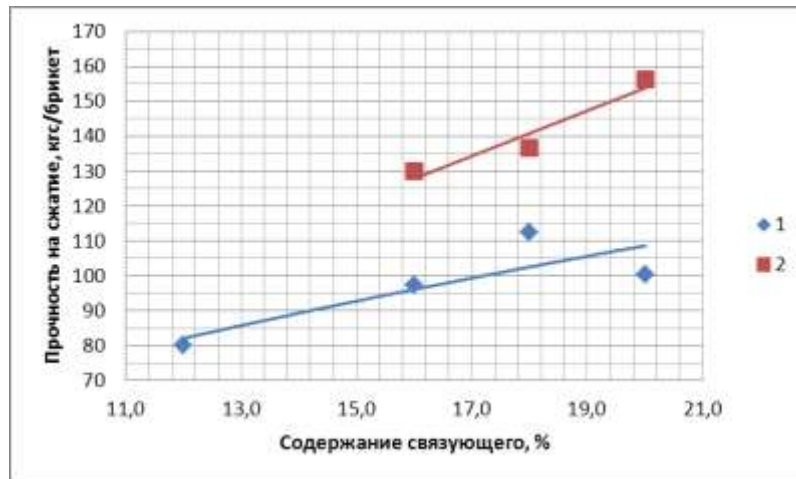


Рисунок 4.8 – Зависимость прочности брикетов от содержания $Al_2(SO_4)_3$ в шихте. Рабочая влажность – 3,0-3,2%; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Ряд экспериментов проводился с изменением количества связующего, подаваемого до и после подсушки шихты, но с сохранением общего количества связующего в шихте на постоянном уровне (рисунок 4.9).

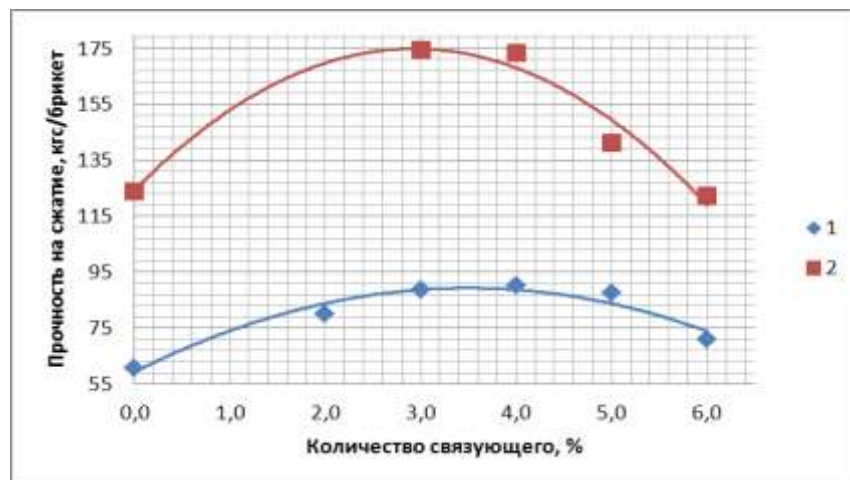


Рисунок 4.9 – Влияние количества сульфата алюминия, добавляемого после подсушки шихты, на прочность брикетов. Общее содержание связующего 12%; рабочая влажность – 2,8-3,1%. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

На рисунке 4.9 показано влияния количества сульфата алюминия, подаваемого после подсушки шихты при его общем 12% содержании в шихте на прочность брикетов. Зависимости носят экстремальный характер. Максимум прочностных свойств брикетов отвечает 2,5-3,0% сульфата алюминия, вводимого

в шихту после ее подсушки, однако текущая прочность вновь не достигает нормативной величины. Величину в 140 кгс/брикет возможно достичь

Следует отметить, что при увеличении количества связующего, вводимого после подсушки шихты, наблюдается конгломерация частиц концентрата под действием связующего, препятствующая его равномерному распределению и выражающаяся в получении «пятнистых» брикетов, вследствие чего наблюдается серьезная разрозненность прочностных характеристик брикетов.

4.2.1.2 Сульфат натрия

На рисунке 4.10 показано влияние влажности брикетируемой шихты на прочностные характеристики брикетов при использовании сульфата натрия в качестве связующего. Повышение влажности шихты в исследуемом интервале значений приводит к практически монотонному возрастанию прочности брикетов на сжатие. Исследования при более высоких значениях влажности шихты затруднены зависанием материала в бункере брикет-пресса, «заматыванием» шнека и залипанием ячеек, следствием чего является нестабильность режима процесса брикетирования. Текущая прочность брикетов, находящаяся в пределах 55-68 кгс/брикет, незначительно превышает прочность брикетов, полученных без использования связующего.

Повышение срока вылеживания брикетов, как и при брикетировании с сульфатом алюминия, приводит изменению их остаточной влажности с выходом на некоторый постоянный уровень, равный 0,5-0,7%, что значительно ниже, чем при брикетировании с сульфатом алюминия (рисунок 4.11). Из чего можно сделать вывод, что сульфат натрия повышает гидрофобность брикетов.

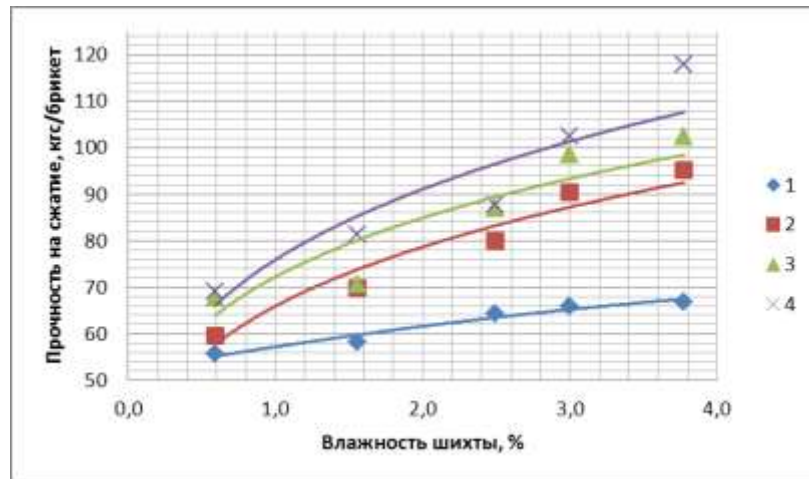


Рисунок 4.10 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего 12% Na_2SO_4 , от влажности шихты. 1 – текущая прочность; 2 – через сутки; 3 – через 2 суток; 4 – через 3 суток

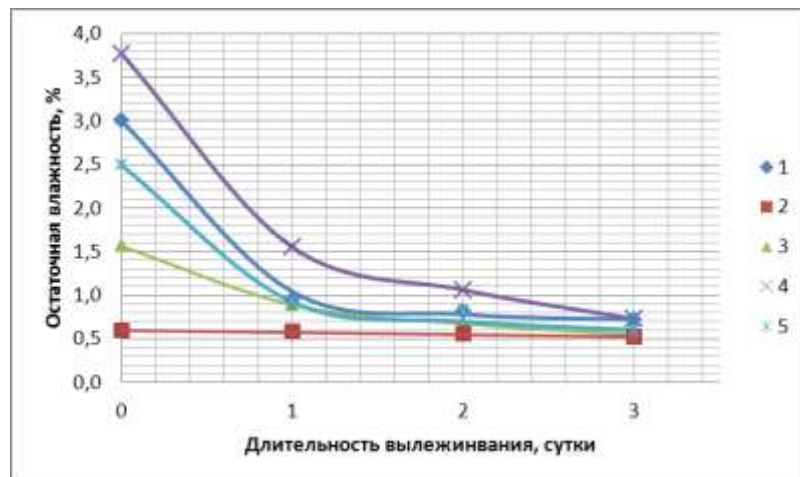


Рисунок 4.11 – Влияние длительности вылеживания брикетов на величину их остаточной влажности. Связующее – 12% Na_2SO_4 ; рабочая влажность, %: 1 – 3,00; 2 – 0,59; 3 – 1,56; 4 – 3,77; 5 – 2,49

С увеличением общего содержания связующего в брикетируемой шихте наблюдается некоторое возрастание прочностных характеристик, наиболее заметное у лежалых брикетов (рисунок 4.12). Так, повышение общего содержания сульфата натрия с 12 до 20% приводит к возрастанию текущей прочности на сжатие с 58 до 65 кгс/брикет, а для брикетов суточного вылеживания этот показатель возрастает с 67 до 99 кгс/брикет.

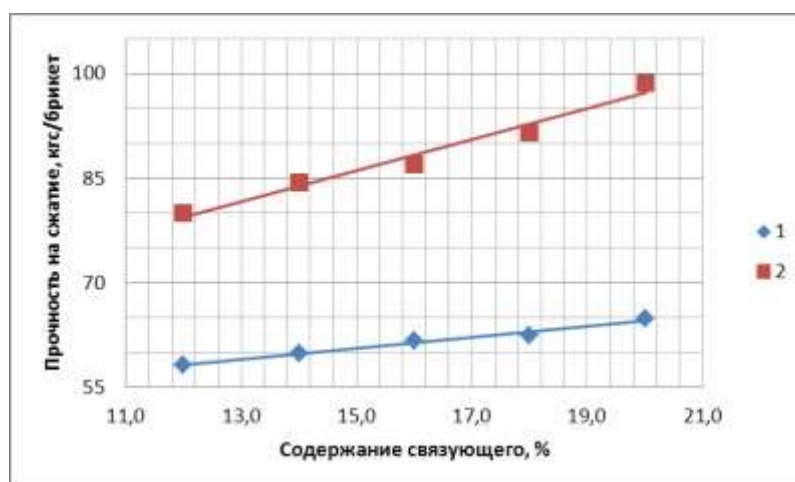


Рисунок 4.12 – Зависимость прочности брикетов от содержания Na_2SO_4 в шихте. Рабочая влажность – 1,6-2,3%; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Повышение количества сульфата натрия, вводимого в состав шихты после ее подсушки, при сохранении общего количества связующего в шихте на постоянном уровне способствует возрастанию прочности брикетов на сжатие (рисунок 4.13). Так, если повышение количества связующего с 0 до 2% приводит к незначительному возрастанию прочности брикетов с 52 до 58 кгс/брикет, то при повышении до 5% текущая прочность брикетов возрастает на 21% и составляет 65 кгс/брикет. Еще больше возрастает прочность у лежалых брикетов: с 63 кгс/брикет при отсутствии ввода связующего в шихту после ее подсушки до 95 кгс/брикет при ее 5% добавке.

Таким образом, при брикетировании медно-никелевого концентрата с водными растворами сульфата натрия нормативная прочность брикетов не достигается даже при 20% содержании связующего в шихте при любых пропорциях ввода связующего в шихту и при ее любой влажности в исследуемом интервале.

Необходимо также отметить, что при увеличении количества сульфата натрия, добавляемого в шихту после её подсушки, наблюдалась картина, схожая с описанной ранее (см. 4.2.1.1). Из-за невозможности в лабораторных условиях равномерного распределения связующего при его вторичной добавке и

разрозненности прочности брикетов было принято решение на текущем этапе исследований не использовать более данный способ подготовки шихты.

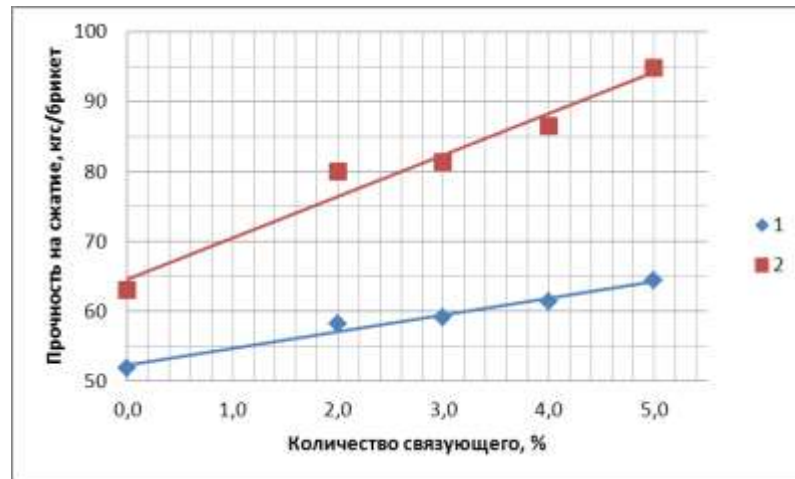


Рисунок 4.13 - Влияние количества сульфата натрия, добавляемого после подсушки шихты, на прочность брикетов. Общее содержание связующего 12%; рабочая влажность – 1,7-2,4%. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

4.2.1.3 Сульфат никеля

При изучении брикетируемости коллективного медно-никелевого концентрата с использованием в качестве связующего 50% водного раствора сульфата никеля установлено, что с повышением содержания связующего в брикетируемой шихте прочность брикетов возрастает практически линейно (рисунок 4.14).

Зависимости прочности брикетов от влажности шихты, приведенные на рисунке 4.15, носят экстремальный характер. В интервале влажности 3,0-3,6% и при 12% расходе сульфата никеля текущая прочность брикетов на сжатие составляет 142 кгс/брикет, что незначительно превышает нормативную величину. Обращает на себя внимание то, что при увеличении содержания связующего происходит сдвиг рационального значения влажности шихты в сторону ее увеличения. Более четко это проявляется после вылеживания брикетов.

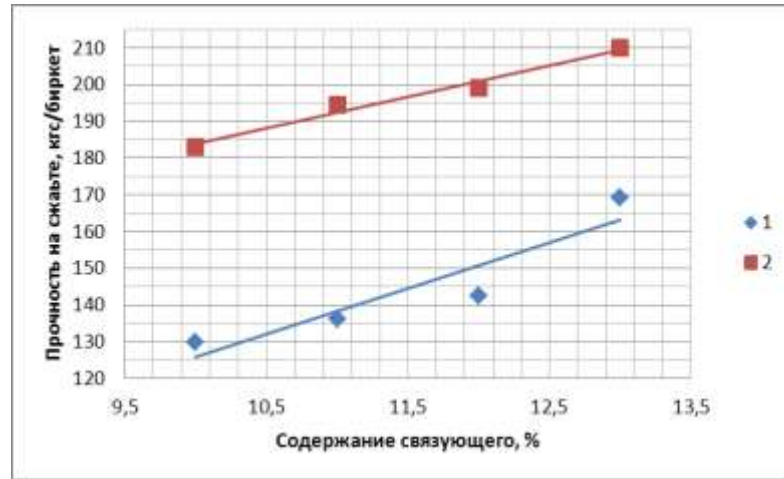


Рисунок 4.14 – Влияние содержания NiSO_4 на прочность брикетов. Рабочая влажность: 3,3-3,8%; 1 – текущая прочность; 2 – через сутки

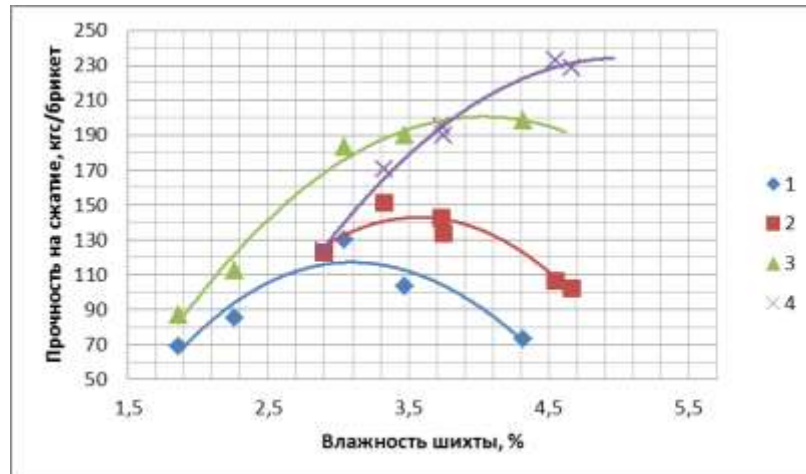


Рисунок 4.15 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего сульфата никеля, от влажности шихты. Содержание связующего, %: 1 – 10, 2 – 12; 1,2 – текущая прочность; 3, 4 – через сутки

На рисунках 4.16 и 4.17 показано как изменяется прочность и остаточная влажность брикетов. Наибольшие изменения происходят в первые сутки после получения брикетов. В дальнейшем в ходе вылеживания и прочность, и остаточная влажность практически не меняются.

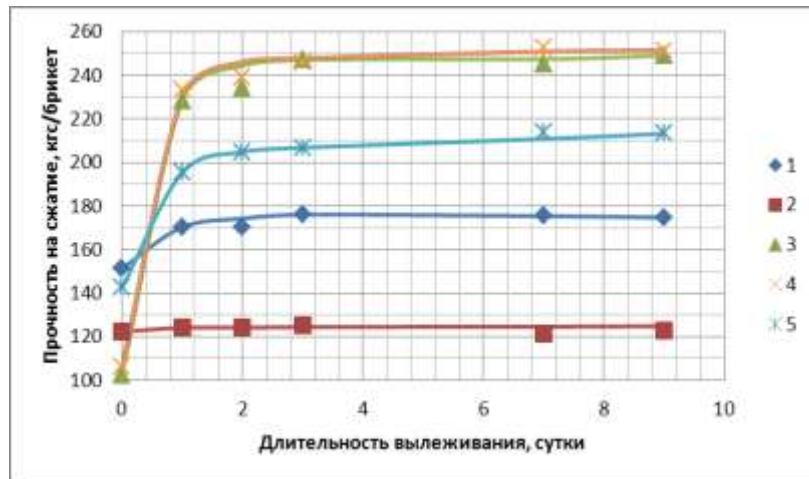


Рисунок 4.16 – Влияние длительности вылеживания брикетов, полученных с использованием 12% сульфата никеля, на прочность на сжатие. Рабочая влажность: 1 – 3,33%; 2 – 2,30%; 3 – 4,66%; 4 – 4,55%; 5 – 3,73%

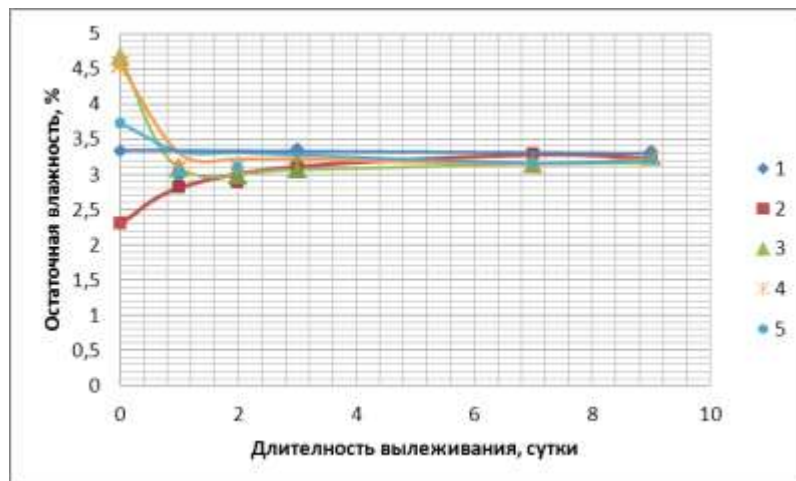


Рисунок 4.17 – Влияние длительности вылеживания брикетов, полученных с использованием 12% сульфата никеля, на их остаточную влажность. Рабочая влажность: 1 – 3,33%; 2 – 2,30%; 3 – 4,66%; 4 – 4,55%; 5 – 3,73%

Ранее [165] было установлено, что для безаварийной плавки брикетов в электропечах содержание остаточной влаги не должно превышать 3-3,5%. При более высоком содержании переворачивание откосов и соприкосновение их со штейном неизбежно приведет к выбросам расплава из печи со всеми вытекающими последствиями.

Несмотря на то, что использование сульфата никеля позволяет получить брикеты, отвечающие нормативной прочности, ключевым фактором в данном случае будет выступать высокая остаточная влажность брикетов, которая даже при длительном вылеживании имеет значения 3,0-3,3%, не обеспечивающая условия для безопасной переработки таких брикетов в рудно-термических печах.

4.2.1.4 Сульфат меди

С повышением содержания раствора сульфата меди в шихте с концентратом наблюдается монотонное возрастание прочностных свойств брикетов (рисунок 4.18). Однако в диапазоне 12-18% содержания сульфата меди выйти на регламентированное значение текущей прочности брикетов на сжатие не удалось. Нормативная прочность достигается только через сутки после получения брикетов.

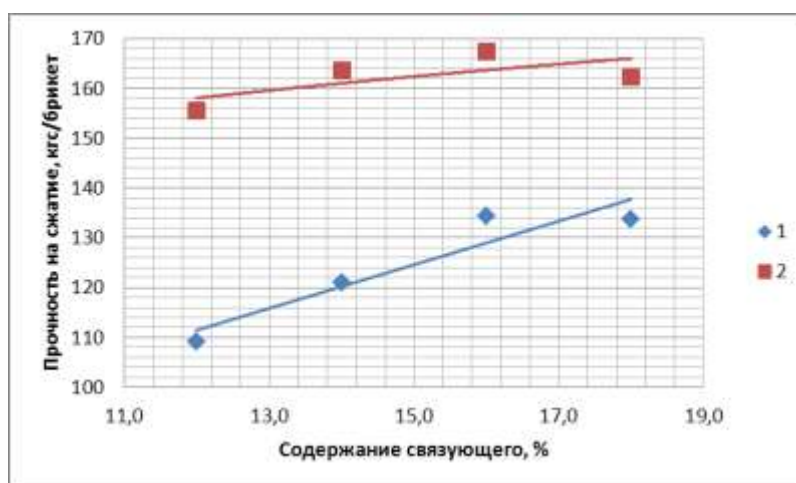


Рисунок 4.18 – Влияние содержания CuSO_4 на прочность брикетов.

Рабочая влажность – 2,8-3,2%. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Рациональная влажность брикетируемой шихты при использовании раствора сульфата меди в качестве связующего составляет 3,2-3,6% и с увеличением срока вылеживания имеет тенденцию к возрастанию (рисунок 4.19).

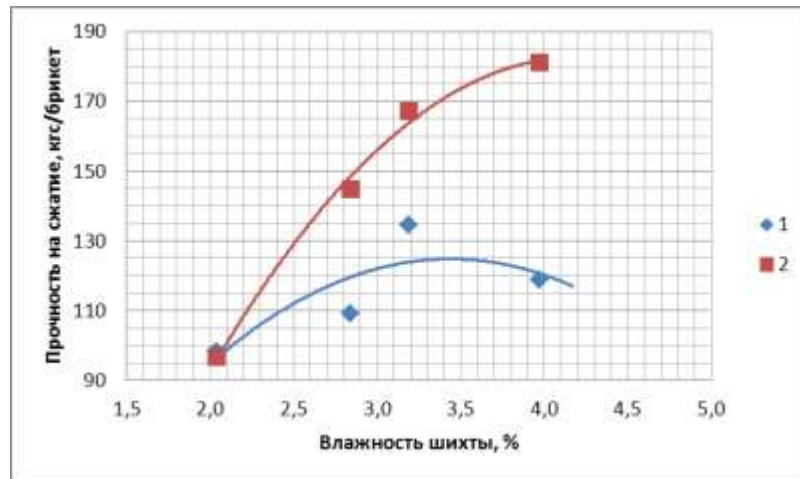


Рисунок 4.19 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего 16% сульфата меди, от влажности шихты.

1 – текущая прочность; 2 – через сутки

В процессе вылеживания, проводимого в естественных условиях, основное упрочнение брикетов происходит в течение первых двух суток (рисунок 4.20). Так, при 14% содержании сульфата меди в шихте и при влажности 3,2% прочность брикетов в ходе вылеживания в течение первых двух суток увеличивается с 121 до 178 кгс/брикет, т.е. в ~1,5 раза, а в ходе вылеживания в процессе последующих двух суток – до 189 кгс/брикет, т.е. в ~1,1 раза.

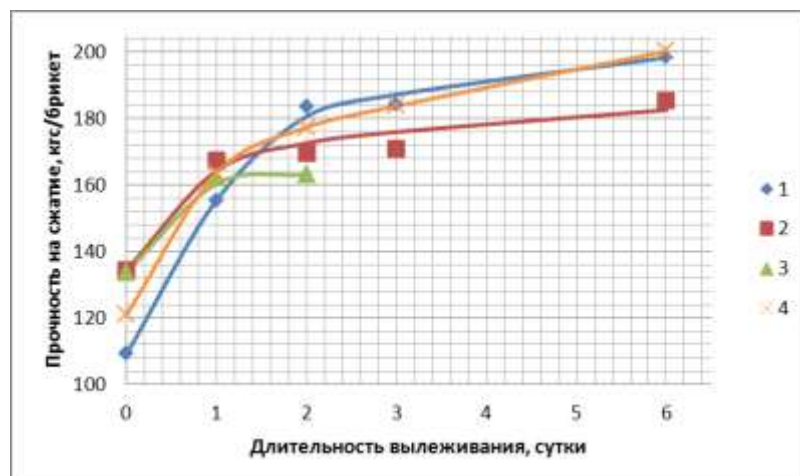


Рисунок 4.20 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов на сжатие, полученных с использованием сульфата меди, в качестве связующего.

Рабочая влажность: 2,8-3,2%; содержание связующего: 1 – 12%; 2 – 16%; 3 – 18%;

4 – 14%

Как показано на рисунке 4.21, в зависимости от рабочей влажности брикетирования изменяется и остаточная влажность брикетов, которая по мере вылеживания стремится к значению 2,7-2,9%.

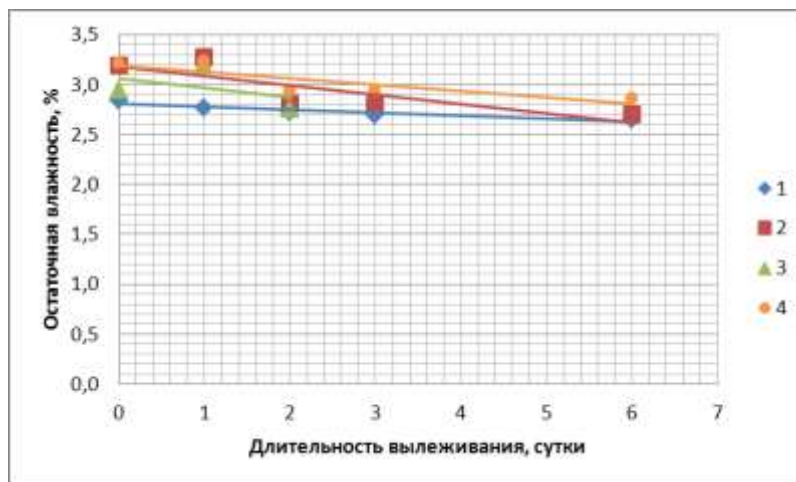


Рисунок 4.21 – Влияние длительности вылеживания брикетов, полученных с использованием сульфата меди, на их остаточную влажность. Рабочая влажность: 2,8-3,2%; содержание связующего: 1 – 12%; 2– 16%; 3 – 18%; – 14%

4.2.1.5 Сульфат железа (II)

Вид зависимостей прочности брикетов на сжатие от влажности шихты при использовании в качестве связующего раствора сульфата двухвалентного железа носит экстремальный характер (рисунок 4.22). Величина рациональной влажности шихты, отвечающей максимальной прочности брикетов, составляет 3,0-4,0%. Ранее отмеченная тенденция увеличения значения рациональной влажности шихты по мере вылеживания брикетов сохраняется.

Повышение содержания сульфата двухвалентного железа, используемого при брикетировании медно-никелевого концентрат в качестве связующего, приводит к линейному возрастанию прочностных характеристик брикетов (рисунок 4.23). Текущая прочность брикетов достигает нормативную величину при 20% расходе связующего от массы концентрата. Обращает на себя внимание незначительное увеличение прочности брикетов при их суточном вылеживании,

составляющие 10-20% от первоначальной величины, что в несколько раз меньше аналогичного значения для других образцов связующих.

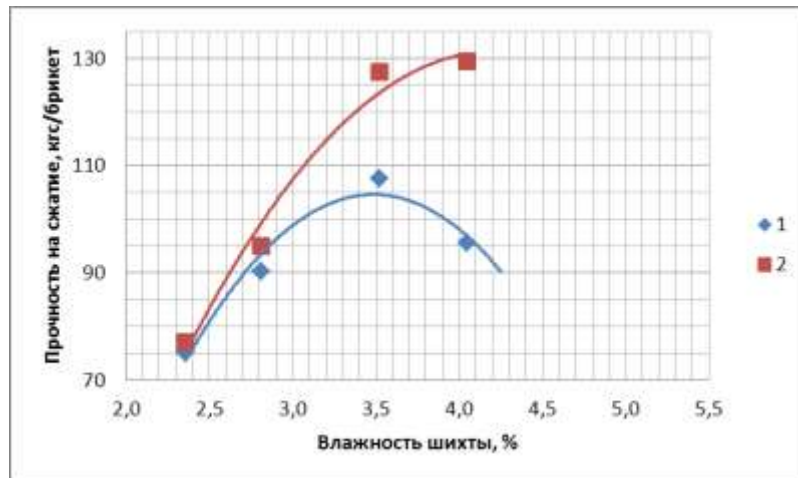


Рисунок 4.22 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием 14% сульфата железа (II) в качестве связующего, от влажности шихты. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

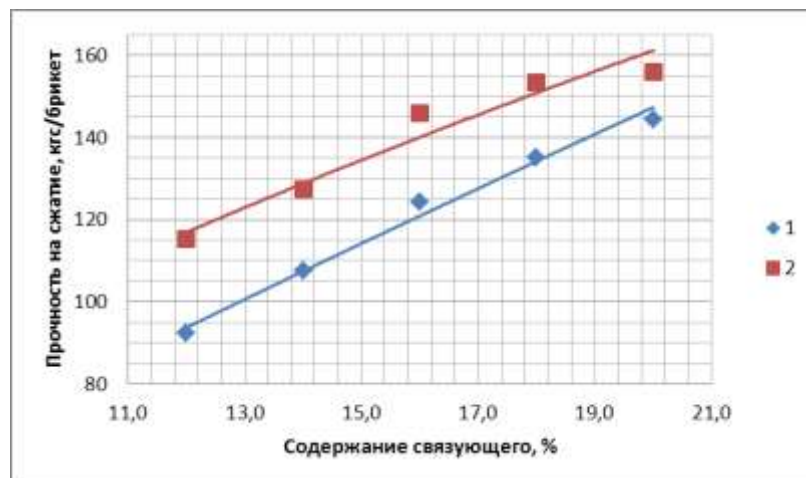


Рисунок 4.23 – Зависимость прочности брикетов от содержания FeSO_4 . Рабочая влажность: 3,2-3,7%; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Дальнейшее вылеживание брикетов не приводит к какому-либо существенному изменению их прочности. Если по истечению первых суток прочность возрастает на 18,5%, то за последующие трое суток всего на 6% (рисунок 4.24).

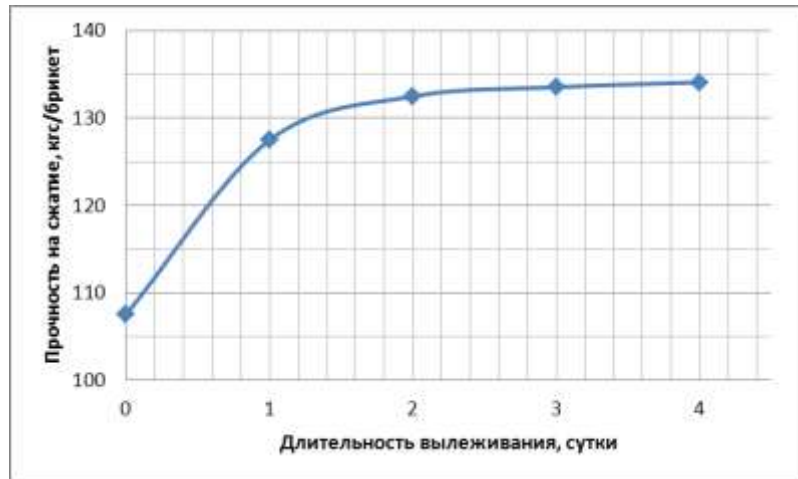


Рисунок 4.24 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов, полученных с использованием 14% FeSO_4 .

Рабочая влажность: 3,52%

Остаточная влажность брикетов по мере увеличения срока вылеживания снижается и выходит на равновесный уровень на 3-4 сутки после получения брикетов (рисунок 4.25).

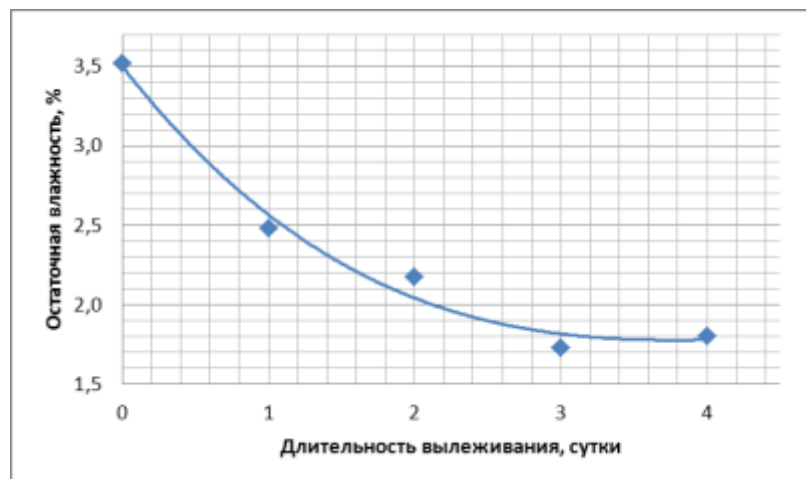


Рисунок 4.25 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием 14% FeSO_4 .

Рабочая влажность: 3,52%

4.2.1.6 Сульфат железа (III)

Брикетирование с водным раствором окисного железа во многом противоположно брикетированию с сульфатом закисного железа, однако есть и общие черты. Так, интервал рациональной влажности шихты, обеспечивающей получение брикетов максимальной прочности, имеет схожую ширину диапазона значений, но отличается по абсолютной величине. Если при брикетировании с сульфатом двухвалентного железа он равен 3,0-4,0%, то для трехвалентного – 2,1-3,3% (рисунок 4.26).

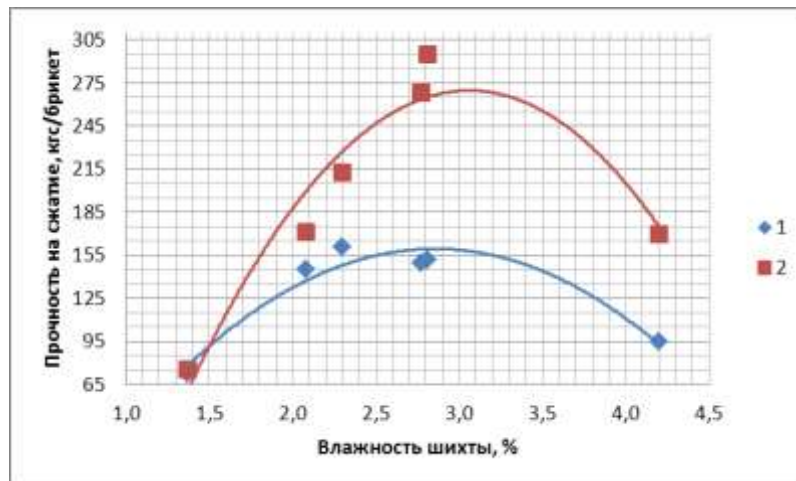


Рисунок 4.26 – Зависимость прочности брикетов, полученных с использованием 12% сульфата железа (III) в качестве связующего, от влажности шихты. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Увеличение содержания сульфата окисного железа приводит к более интенсивному возрастанию, как текущей прочности брикетов, так и после вылеживания (рисунок 4.27). При этом минимальное количество необходимое для достижения текущей прочности равной 140 кгс/брикет составляет 11-12%, что значительно ниже аналогичной величины для сульфата закисного железа.

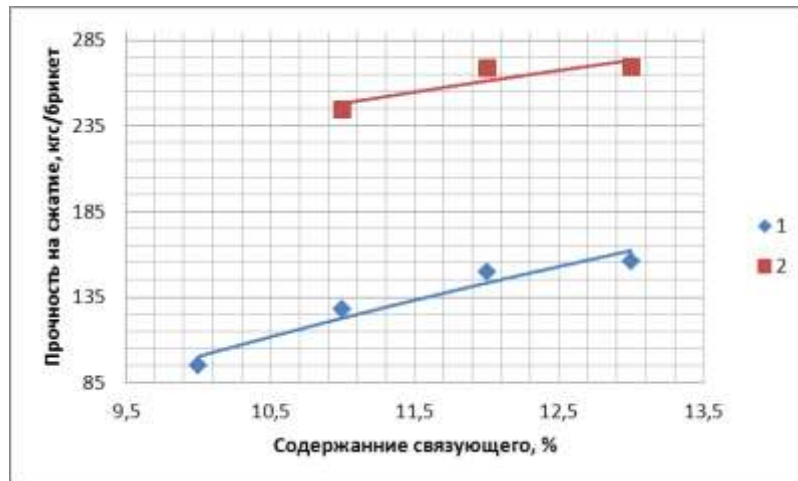


Рисунок 4.27 – Зависимость прочности брикетов от содержания сульфата окисного железа. Рабочая влажность: 2,4-3,0%;
1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Вылеживание брикетов способствует их упрочнению (рисунок 4.28). При этом выполняется общее условие упрочнения для всех видов связующих: чем выше влажность брикетируемой шихты, тем большее упрочнение брикетов достигается в итоге. Так, при добавке 12% связующего и рабочей влажности 2,77% прочность брикетов в течение пяти суток вылеживания возрастает в 2,45 раза, а при влажности 4,20% – 3,31 раза.

Для безопасного режима плавки в РТП влажность поступающих брикетов не должна превышать 3%, что обуславливает некоторое сужение интервала рациональной влажности шихты. Однако, при вылеживании брикетов остаточная влажность интенсивно снижается в течение первых 2 суток, выходя на равновесное значение 2,1-2,3%, в независимости от исходной влажности и содержания связующего (рисунок 4.29). Это позволяет при соблюдении сроков вылеживания вовлекать в переработку брикеты с более высокой рабочей влажностью.

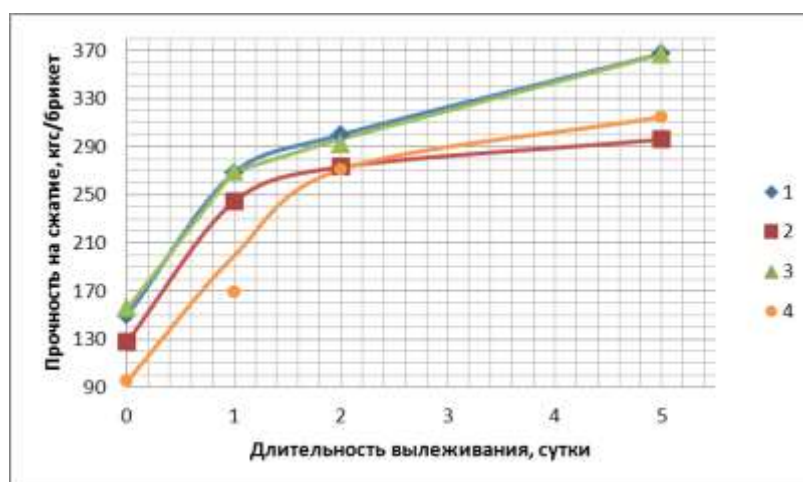


Рисунок 4.28 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов на сжатие, полученных с использованием $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ в качестве связующего. Содержание связующего: 1 и 4 – 12%; 2 – 11%; 3 – 13%; рабочая влажность: 1 – 2,77%; 2 – 2,45%; 3 – 2,94%; 4 – 4,20%

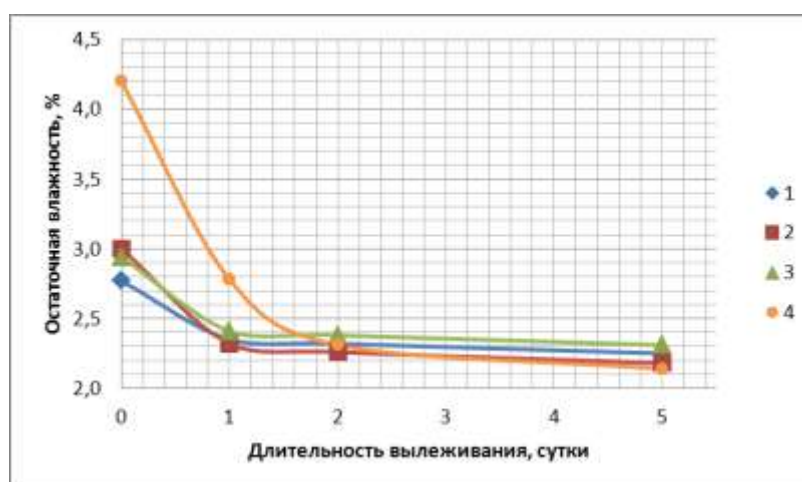


Рисунок 4.29 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием сульфата окисного железа в качестве связующего. Содержание связующего: 1 – 12%; 2 – 11%; 3 – 13%; 4 – 12%; рабочая влажность: 1 – 2,77%; 2 – 2,45%; 3 – 2,94%; 4 – 4,20%

4.2.1.7 Раствор вскрытия железистого кека

Раствор вскрытия железистого кека (РВЖК) представляет собой продукт нейтрализации отвального кека железочистки ЦЭН-2 серной кислотой. Железистый кек, образующийся при железочистке анолита и

отфильтровываемый на дисковом вакуумном фильтре, является отходом электролизного производства. В сухом виде он представляет собой рентгеноаморфную массу с размером частиц от 2 до 20-80 мкм, основными компонентами которой являются гётит и смешанный гидроксид железа-никеля, отвечающий общей формуле $Me(OH)_3$. Кроме того, кека содержит примесь сульфатов железа, никеля и меди, единичные включения оксида никеля и карбонаты железа. Использование продукта нейтрализации отвального кека железоочистки ЦЭН-2 серной кислотой преследует цель найти достойную замену сульфату окисного железа фабричного производства, ранее показавшему высокую эффективность при использовании в качестве связующего, и тем самым снизить расходы на приобретение и транспортировку связующего.

Брикетирование с использованием раствора железистого кека носит характер аналогичный брикетированию с использованием сульфата трехвалентного железа. Интервал рациональной влажности имеет близкие значения и лежит в пределах 1,8-2,8%, незначительно смещаясь в сторону больших значений при увеличении расхода связующего (рисунок 4.30).

Минимальное количество связующего необходимое для достижения нормативной величины составляет 17% (рисунок 4.31). В пересчете на сухой вес ~7%. Данная величина несколько выше, полученной при брикетировании с использованием сульфата окисного железа (6% в пересчете на сухой вес), однако необходимо учитывать, что в том случае использовался сульфат окисного железа, имеющий по классификации химических веществ индекс «Ч» (содержание основного компонента (без примесей) 98% и выше).

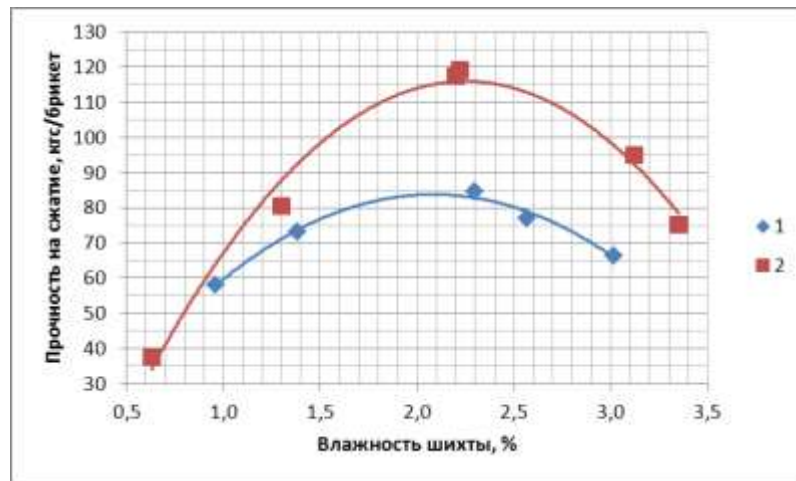


Рисунок 4.30 – Зависимость текущей прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего раствора вскрытия железистого кека, от влажности шихты. Содержание связующего, %:

1 – 7,5, 2 – 13

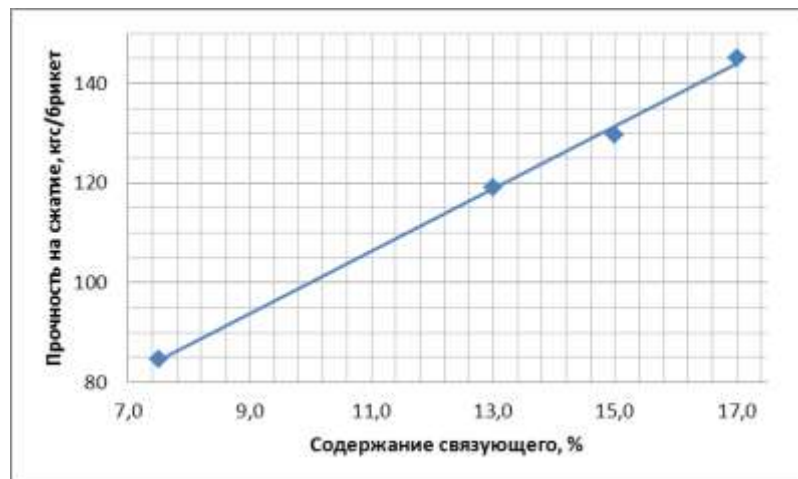


Рисунок 4.31 – Зависимость прочности брикетов от содержания раствора вскрытия железистого кека. Рабочая влажность: 2,1-2,3%

Главным отличием использования раствора вскрытия железистого кека от сульфата окисного железа фабричного производства является поведение брикетов при их хранении. Так, при использовании раствора вскрытия железистого кека увеличение прочности брикетов наблюдается только в первые сутки (рисунок 4.32). В дальнейшем прочность не претерпевает заметных изменений и стабилизируется в интервале значений 190-200 кгс/брикет.

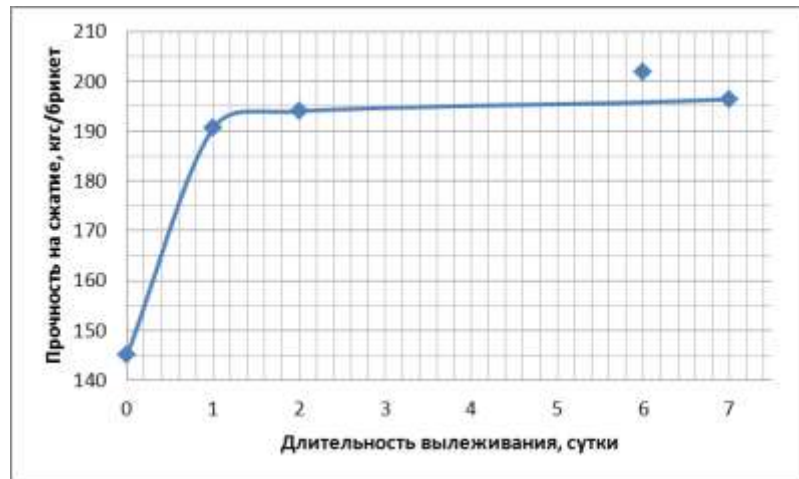


Рисунок 4.32 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов на сжатие, полученных с использованием 17% раствора вскрытия железистого кека в качестве связующего. Рабочая влажность: 2,08%

Как видно из рисунка 4.33, остаточная влажность брикетов в течение первых суток вылеживания возрастает до значения $\sim 3,5\%$. В дальнейшем так же наблюдается рост остаточной влажности, однако значительно менее интенсивный, чем в первые сутки.

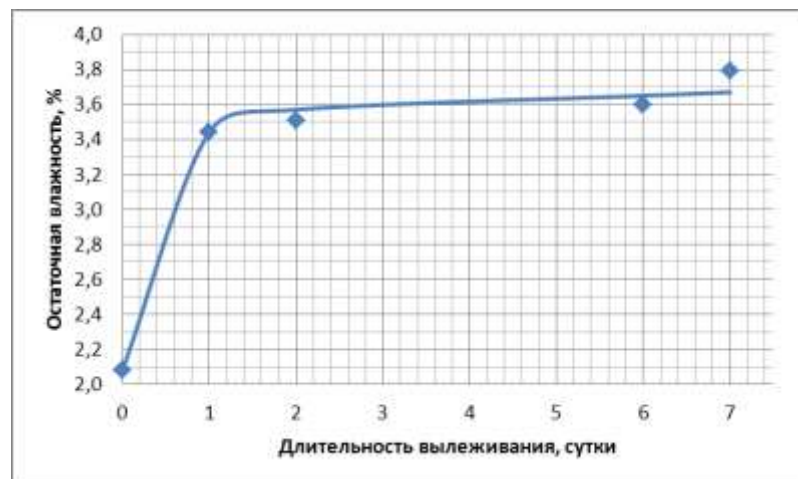


Рисунок 4.33 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием 17% раствора вскрытия железистого кека в качестве связующего.

4.2.1.8 Серная кислота

В качестве одного из связующих при брикетировании медно-никелевого концентрата использовался 24% (по массе) раствор серной кислоты. Содержание кислоты в растворе было выбрано исходя из крепости промывной кислоты, используемой на переделах цехов электролиза меди и никеля АО «Кольская ГМК».

Использование серной кислоты при брикетировании концентрата позволяет получать брикеты нормативной прочности. Выбор рабочей влажности, при которой проводились исследования, основывался на ранее полученных результатах при брикетировании с использованием водных растворов сульфатов, из которых четко прослеживается интервал рациональной влажности равный 2,5-3,5%. В этом случае минимальное количество связующего, необходимое для получения брикетов, обладающих прочностью 140 кгс/брикет, составляет 14% (рисунок 4.34).

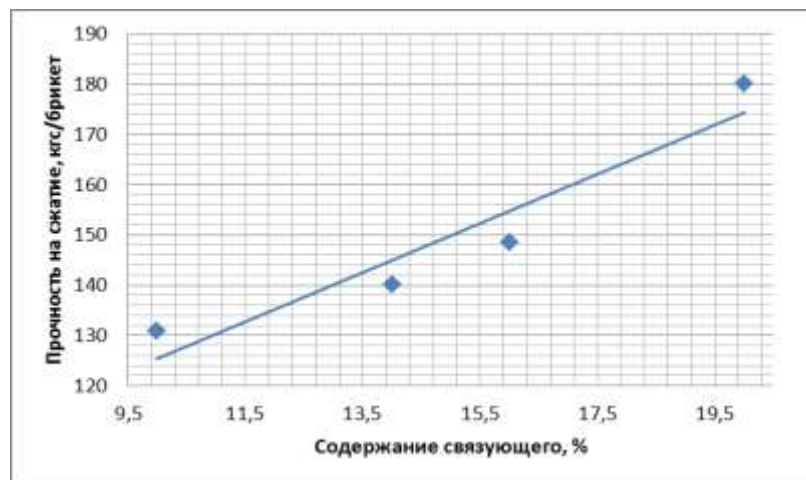


Рисунок 4.34 – Зависимость текущей прочности брикетов от содержания серной кислоты, используемой в качестве связующего.

Рабочая влажность – 2,8-3,6%

На рисунках 4.35 и 4.36 показано изменение прочности и остаточной влажности брикетов с течением времени. В процессе вылеживания происходит почти двукратное увеличение прочности брикетов со 160 до 305 кгс/брикет. Как и

во всех предыдущих случаях, наибольший рост прочности происходит на начальном этапе. За первые двое суток прочность возрастает до 297 кгс/брикет.

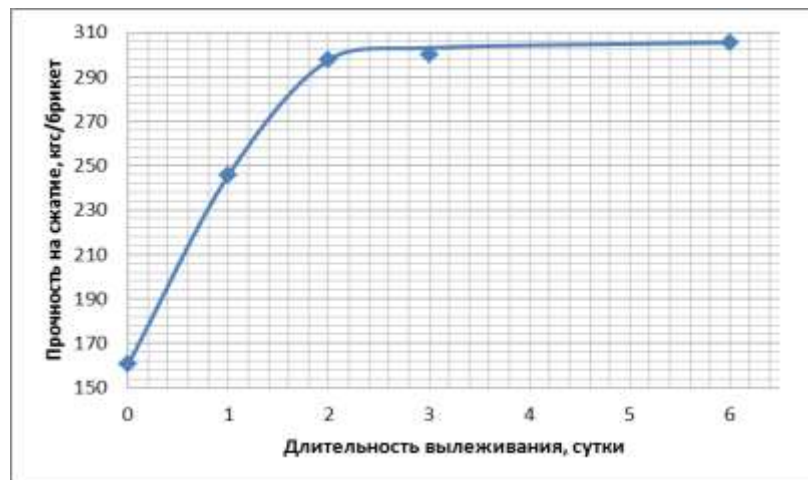


Рисунок 4.35 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов, полученных с использованием 14% H_2SO_4 в качестве связующего.

Рабочая влажность: 3,29%

Остаточная влажность по истечению первых суток стабилизируется в интервале значений 4,2-4,3%, значительно больших допустимой величины в 3%, превышение которой не обеспечивает безаварийную плавку брикетов в рудно-термических печах.

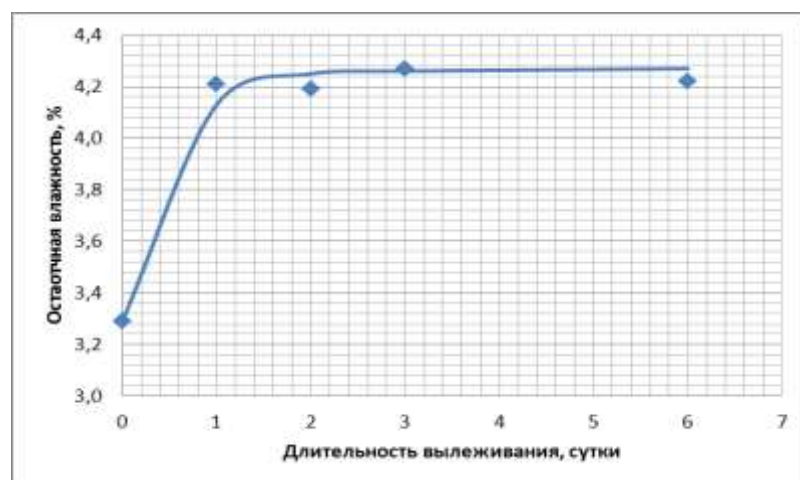


Рисунок 4.36 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием 14% H_2SO_4 в качестве связующего

4.2.1.9 Выводы по разделу 4.2.1

1. Брикетирование с использованием водных растворов сульфатов имеет ряд общих характерных черт:

- отсутствие огрубления шихты, при смешении концентрата и связующего;
- высокие значения интервала рациональной влажности шихты;
- характер разрушения брикетов при испытании прочности на сжатие.

Перечисленные черты, безусловно, имеют негативный характер. Отсутствие огрубления шихты на первой стадии добавки связующего приведет к увеличению пылевыноса на последующем этапе сушки и росту количества пыли, поступающего на вторую стадию добавки связующего. В свою очередь повышение количества тонкодисперсной пыли в составе брикетируемой шихты приводит к снижению прочности брикетов и увеличению расхода связующего.

Высокие значения интервала рабочей влажности в совокупности с отсутствием огрубления шихты создают благоприятные условия для зависания шихты в бункере брикет-пресса и залипания его ячеек, что может стать причиной внеплановых остановок одной из линий или же всего участка брикетирования.

Брикеты, полученные при использовании сульфатных связующих, под действием внешней нагрузки раскалываются на множество мелких осколков (рисунок 4.37). Это свидетельствует, о том, что при высокой прочности на сжатие брикеты представляют собой хрупкое тело и под воздействием вибраций при движении по ленте транспортера на склад готовой продукции, перегрузках и дальнейшей транспортировке будут ломаться и истираться, снижая качество материала поступающего в плавильный цех.



Рисунок 4.37 – Вид брикета, полученного при использовании 10% NiSO_4 после приложения внешней нагрузки

2. Брикетирование медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» с использованием водных растворов сульфатом алюминия, натрия, меди неэффективно. Во всем исследованном диапазоне расхода связующих в интервале рациональной влажности шихты текущая прочность получаемых брикетов не удовлетворяет нормативной требованиям.

3. При использовании в качестве связующего сульфата закисного железа брикеты обладают текущей прочностью на сжатие ≥ 140 кгс/брикет только при его 20% расходе. Более высокий расход, необходимый для получения качественных брикетов, и стоимость связующего по сравнению с лигносульфонатом делают применение при брикетировании сульфата закисного железа нецелесообразным.

4. Нормативная прочность брикетов 140 кгс/брикет и более достигается при брикетировании с использованием раствора серной кислоты, водных растворов сульфата никеля и окисного железа, а также раствора вскрытия железистого кека. Исходя из условий минимальной реконструкции существующей технологии брикетировании на АО «Кольская ГМК» и эксплуатационных характеристик оборудования, не позволяющих использовать материалы, имеющие значение водородного показателя pH менее 3,5 ед., использование в качестве связующего серной кислоты, сульфата окисного железа

и раствора вскрытия железистого кека невозможно, ввиду высокой коррозионной активности, ведущей к неминуемому выходу из строя существующего оборудования и остановке участка брикетирования. Несмотря на то, что водный раствор сульфата никеля имеет допустимое значение рН (~5 ед.), высокие значения, как рабочей влажности брикетирования, так и остаточной влажности брикетов, в обоих случаях превышающие 3%, не обеспечивают условия для безопасной переработки таких брикетов в рудно-термических печах.

4.2.2 Исследование эффективности комбинированных связующих

Использование при брикетировании мелкозернистых материалов комбинированных связующих это перспективное направление поиска высокоэффективных связующих, получившее распространение сравнительно недавно. Применение комбинированных связующих позволяет улучшить положительные и снизить негативные свойства составляющих компонентов. Как правило, основу составляет связующее, обладающее высокими вяжущими свойствами. Вторым компонентом являются вещества, обладающие невысокой эффективностью в чистом виде. В качестве второго компонента, обладающего меньшими вяжущими свойствами, чаще всего выступают продукты и отходы собственного производства или материалы, имеющие низкую стоимость. При условии сохранения нормативной прочности брикетов частичная замена лигносульфоната, используемого на текущий момент при брикетировании медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» позволит снизить затраты на связующее и повысить экономическую эффективность производства.

4.2.2.1 Лигносульфонат-Известь

Наиболее распространенным комбинированным связующим является смесь «органическое связующее-известь». Чаще всего органическим веществом

является либо лигносульфонат, либо меласса. При брикетировании медно-никелевого концентрата с использованием комбинированного связующего ЛСТ-известь в соотношении 9÷1 рациональная влажность шихты равна 1,8-2,2% (рисунок 4.38). Какого-либо увеличения прочности не происходит. Напротив, прочность брикетов несколько падает. Так, если при 10% добавке чистого лигносульфоната прочность брикетов равна 130 кгс/брикет, то при замещении одного процента ЛСТ на известь прочность снижается до 110-120 кгс/брикет.

Следует особо отметить, что при смешении лигносульфоната и извести наблюдается появление осадка и резкий запах аммиака, свидетельствующие о протекании химической реакции. По истечению суток смесь лигносульфоната и извести превращается в прочное камневидное тело, непригодное для использования в качестве связующего. При отдельной подаче связующих также наблюдается интенсивное выделение аммиака на стадии сушки шихты до рабочей влажности.

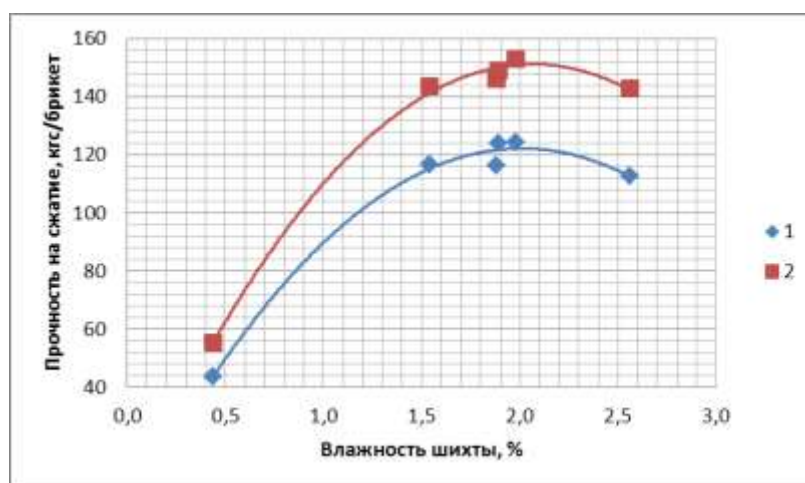


Рисунок 4.38 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов, полученных с использованием 10% комбинированного связующего ЛСТ-Известь. Состав связующего, %: 90 ЛСТ; 10 Ca(OH)₂. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

4.2.2.2 Лигносulfонат-Стоки ЦЭН-1

Использование в качестве связующего при брикетировании концентрата смесей стоков карбонатного передела ЦЭН-1 с лигносульфонатом не способствует получению брикетов приемлемой прочности (рисунок 4.39). Максимальная прочность брикетов ~130кгс/брикет достигается при 10-20% содержании стоков в смеси с лигносульфонатом. Предварительное смешение стоков с лигносульфонатом, очередность введения стоков и лигносульфоната в шихту с концентратом при отдельной подаче, предварительное упаривание стоков до сухого состояния практически не влияет на прочность получающихся брикетов. Регламентируемая прочность брикетов в 140 кгс/брикет достигается только при суточном вылеживании брикетов.

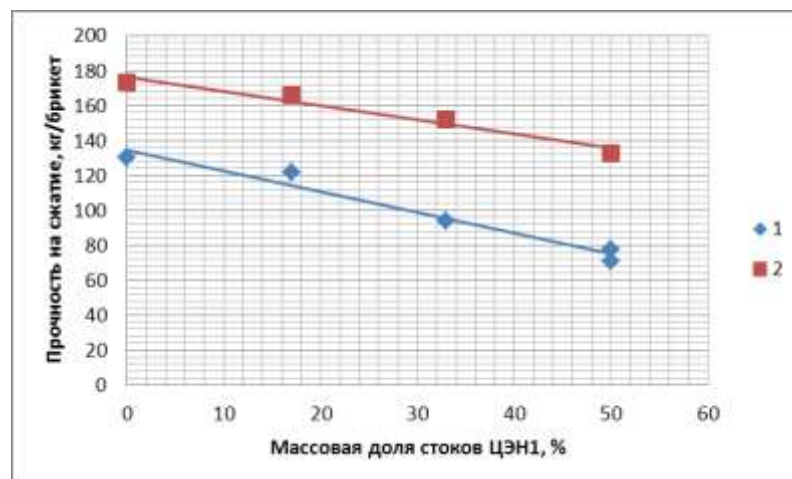


Рисунок 4.39 – Влияние содержания стоков ЦЭН-1 в смеси с лигносульфонатом на прочность брикетов при 12% содержании комбинированного связующего. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

4.2.2.3 Лигносulfонат-Сульфат никеля

Минимальное количество раствора сульфата никеля, необходимое для получения брикетов нормативной прочности, совпадает с регламентным расходом лигносульфоната и составляет 12%. Использование при брикетировании концентрата комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄ дает «эффект

суперпозиции» (рисунок 4.40). «Эффект суперпозиции» заключается в том, что при определенных пропорциях компонентов комбинированного связующего брикеты имеют более высокую прочность, чем при использовании составляющих компонентов по отдельности. Так, при 12% содержании комбинированного связующего в шихте, ее влажности 3,0-3,6% и массовой доле сульфата никеля 50% текущая прочность составляет 170 кгс/брикет, что превышает прочность брикетов при использовании чистого сульфата никеля и лигносульфоната в 1,2 и 2,2 раза соответственно¹.

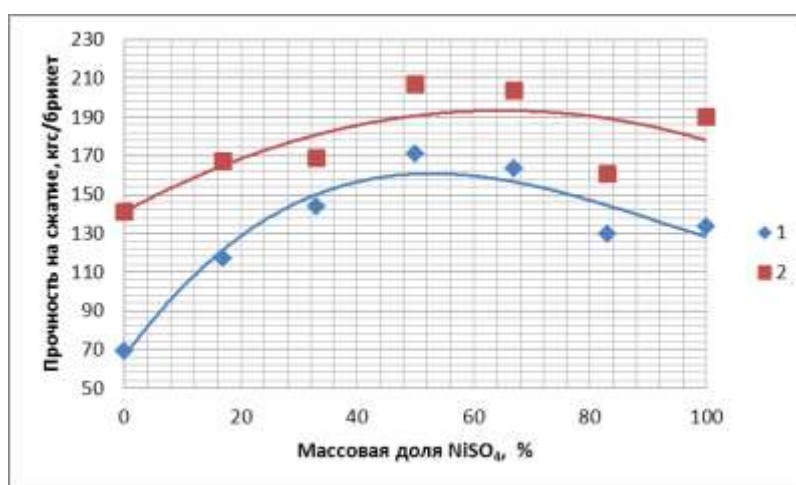


Рисунок 4.40 – Зависимость прочности брикетов от массовой доли сульфата никеля в составе комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄. Содержание связующего 12%; рабочая влажность: 3,0-3,6%. 1 – текущая прочность; 2 – через сутки

Величина рациональной влажности при брикетировании с использованием комбинированного связующего снижается по мере увеличения доли лигносульфоната (рисунок 4.41). Так, при его 30% содержании она составляет 3,2-3,8%, а при 70% - 2,9-3,3%.

¹ При брикетировании с использованием в качестве связующего лигносульфоната рациональная влажность равна ~2%. В этом случае текущая прочность брикетов составляет 140кгс/брикет, что меньше обсуждаемой величины в 1,2 раза.

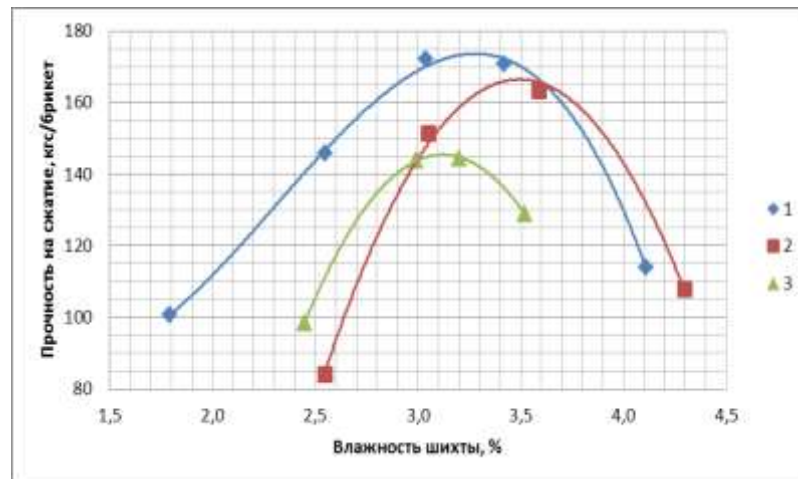


Рисунок 4.41 – Зависимость текущей прочности брикетов от влажности шихты при брикетировании с использованием различных составов комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄. Содержание связующего 12%; Состав связующего, %: 1 – 50 NiSO₄, 50ЛСТ; 2 – 67 NiSO₄, 33ЛСТ; 3 – 33 NiSO₄, 67ЛСТ

Как показано на рисунке 4.42, при весовом соотношении компонентов 1÷1 минимальное количество комбинированного связующего лигносульфонат-сульфат никеля, обеспечивающие получение брикетов, обладающей текущей прочностью 140 кгс/брикет, составляет 9%.

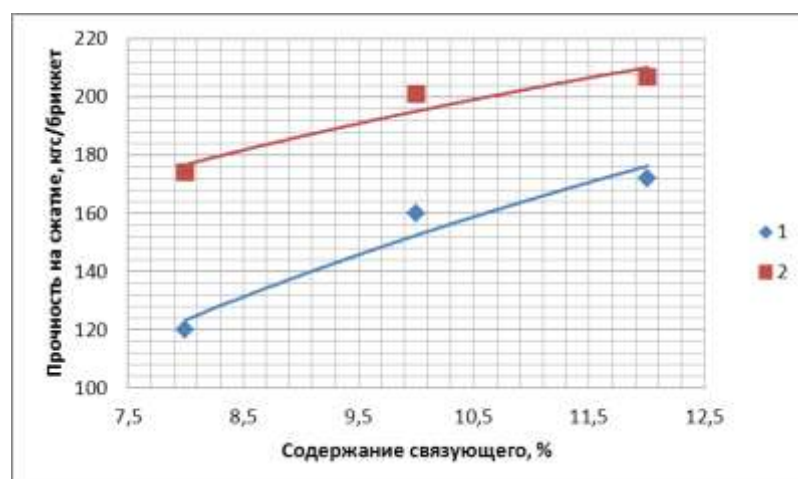


Рисунок 4.42 – Зависимость прочности брикетов от содержания комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄. Состав связующего, %: 50 NiSO₄, 50ЛСТ; рабочая влажность: 3,0-3,5%; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Увеличение прочности брикетов в процессе вылеживания в естественных условиях при брикетировании концентрата на смесях раствора сульфата никеля и лигносульфоната заканчивается по истечении вторых суток, после которых она стабилизируется (рисунок 4.43).

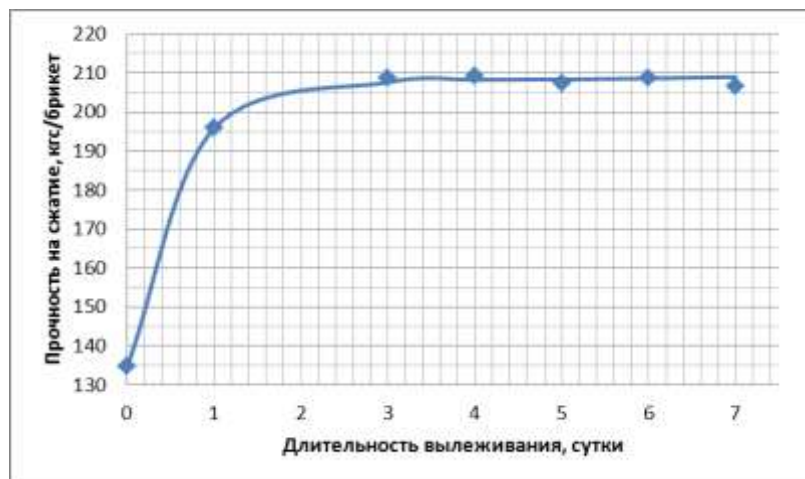


Рисунок 4.43 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов, полученных с использованием 10% комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄. Состав связующего, %: 50 NiSO₄, 50ЛСТ; рабочая влажность: 3,58%.

Остаточная влажность брикетов с увеличением продолжительности вылеживания уменьшается, причем, наиболее резкое снижение наблюдается в первые сутки. Через 6 суток после начала вылеживания наблюдается стабилизация значения остаточной влажности, составляющего ~2,2% (рисунок 4.44).

При смешении лигносульфоната с раствором сульфата никеля видимой реакции не происходит: отсутствует запах, выпадения осадка или загустения раствора не происходит. Прочность брикетов хорошо согласуется со значениями, полученными при раздельном введении связующих.

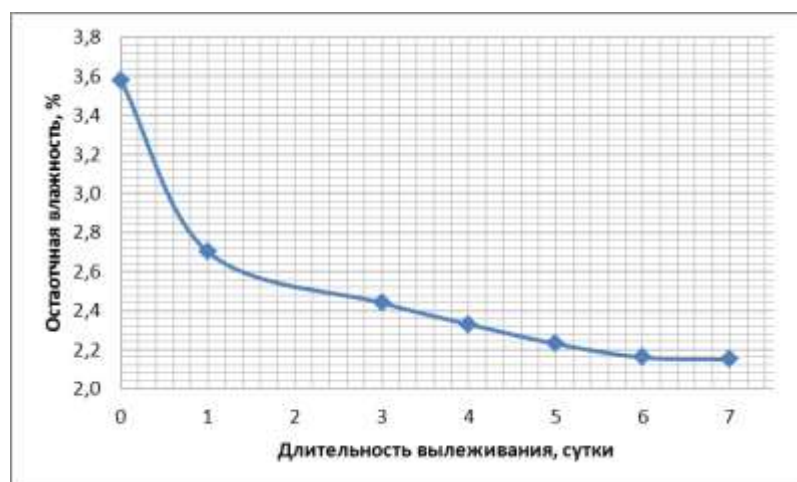


Рисунок 4.44 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием 10% комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄. Состав связующего, %: 50 NiSO₄, 50 ЛСТ

4.2.2.4 Лигносульфонат-Сульфат меди

Замена в составе комбинированного связующего сульфата никеля на сульфат меди приводит к существенному ухудшению прочностных характеристик брикетов. Отмеченный ранее «эффект суперпозиции» отчетливо проявляется только через сутки после получения брикетов. Максимальные значения прочности брикетов наблюдаются при массовой доле CuSO₄ равной 30-40% (рисунок 4.45).

Рациональная влажность при использовании 14% комбинированного связующего ЛСТ-CuSO₄ и весовом отношении 5÷2 составляет 2,4-2,8% (рисунок 4.46). В этом случае текущая прочность брикетов удовлетворяет нормативным требованиям. В целом, использование при брикетировании медно-никелевого концентрата комбинированного связующего ЛСТ-CuSO₄, как и в случае использования чистого раствора сульфата меди, характеризуется его повышенным расходом и низкой эффективностью.

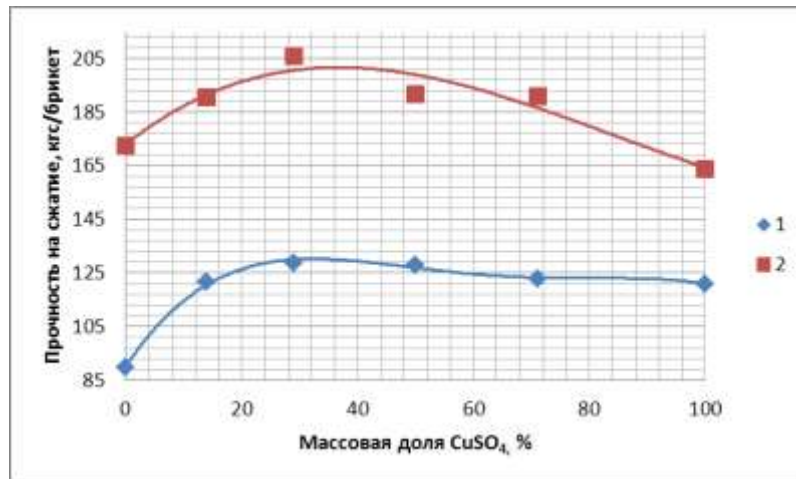


Рисунок 4.45 – Зависимость прочности брикетов от массовой доли сульфата меди в составе комбинированного связующего. Содержание связующего 14%; рабочая влажность: 3,1-3,3%. 1 – текущая прочность; 2 – через сутки

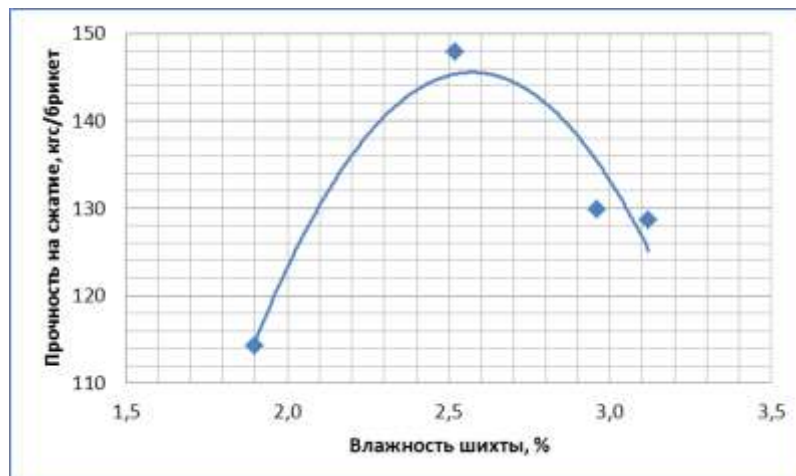


Рисунок 4.46 – Зависимость текущей прочности брикетов от влажности шихты при брикетировании с использованием 14% комбинированного связующего ЛСТ-CuSO₄. Состав связующего, %: 29 CuSO₄, 71ЛСТ

4.2.2.5 Лигносульфонат-Сульфат железа (II)

Ранее (см. 4.2.1.5), использование водного раствора сульфата двухвалентного железа в качестве связующего при брикетировании медно-никелевого концентрата показало низкую эффективность. При брикетировании с использованием комбинированного связующего лигносульфонат-сульфат железа(II), интервал рациональной влажности, имея соизмеримую ширину,

смещается в сторону меньших значений и составляет 1,8-2,8%. Через сутки после вылеживания прочность брикетов существенно увеличивается, что в совокупности со снижением интервала рациональной влажности шихты, свидетельствует о доминирующем влиянии лигносульфоната в составе комбинированного связующего (рисунок 4.47).

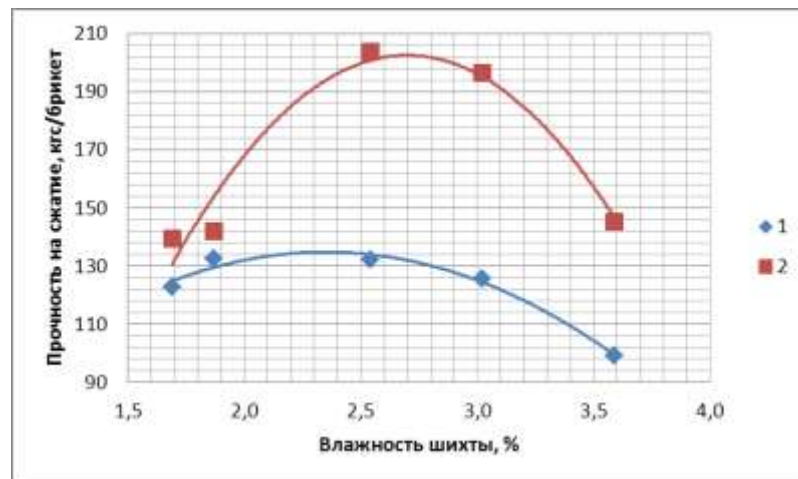


Рисунок 4.47 – Зависимость прочности брикетов от влажности шихты при брикетировании с использованием 14% комбинированного связующего ЛСТ-FeSO₄. Состав связующего, %: 50 FeSO₄, 50ЛСТ; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

«Эффект суперпозиции» при брикетировании с использованием комбинированного связующего отсутствует (рисунок 4.48). Прочность брикетов по мере увеличения массовой доли лигносульфоната, несмотря на его доминирующее влияние, монотонно снижается, что обусловлено высокой рабочей влажностью, значительно превышающей рациональные значения (см. сноску 1).

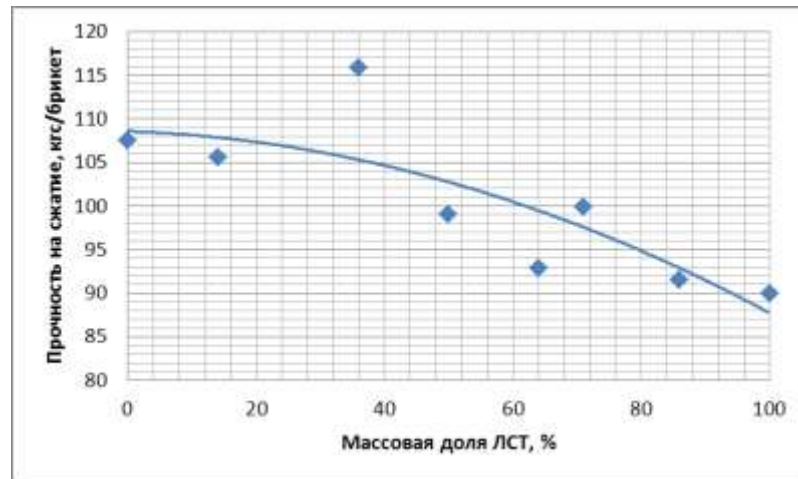


Рисунок 4.48 – Зависимость текущей прочности брикетов от массовой доли лигносульфоната в составе комбинированного связующего. Содержание связующего 14%; рабочая влажность: 3,0-3,5%

4.2.2.6 Лигносульфонат-Сульфат железа (III)

При брикетировании с использованием водного раствора сульфата окисного железа в качестве связующего нормативная прочность брикетов достигается при его расходе в количестве 11-12% от массы концентрата. Замена раствора сульфата трехвалентного железа на комбинированное связующее лигносульфонат-сульфат железа (III) не приводит к увеличению прочностных характеристик брикетов. Зависимость прочности брикетов от массовой доли сульфата трехвалентного железа в составе комбинированного связующего можно разделить на три этапа. На первом и третьем этапах, ограниченных массовыми долями сульфата окисного железа от 0 до 35% и от 75 до 100% соответственно, прочность брикетов монотонно возрастает. На втором этапе, отвечающем интервалу значений массовой доли сульфата окисного железа от 35 до 75%, прочность брикетов не изменяется. «Эффект суперпозиции», наблюдаемый в предыдущих случаях отсутствует. В исследуемом интервале влажности при любом весовом отношении компонентов комбинированного связующего получаемые брикеты имеют более низкую прочность, чем при использовании в

качестве связующего чистого раствора сульфата трехвалентного железа (рисунок 4.49).

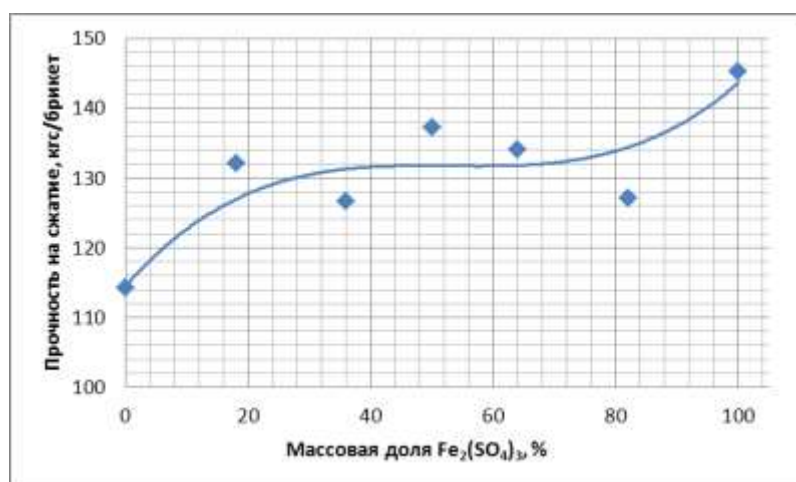


Рисунок 4.49 – Зависимость текущей прочности брикетов от массовой доли сульфата железа (III) в составе комбинированного связующего. Содержание связующего 11%; рабочая влажность: 2,4-2,7%

4.2.2.7 Лигносульфонат-Comprex A12

Связующее Comprex A12 специально разработано компанией «Direct Technologies Ltd.» (Великобритания) для окускования руд и концентратов цветных металлов. Основу связующего составляет поливиниловый спирт, получаемый омылением и гидролизом из поливинилацетата посредством его взаимодействия с раствором едкого натра. Кроме того, в его составе присутствуют поверхностно активные вещества, улучшающие условия смешивания связующего с брикетируемым материалом. В исследованиях Comprex A12 использовался в виде 10% водного раствора, представляющего собой бесцветную гелеобразную жидкость, имеющую высокую вязкость.

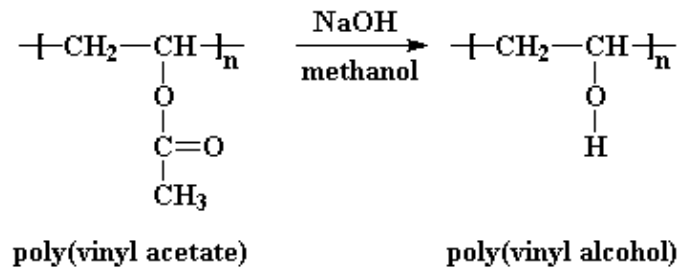


Рисунок 4.50 – Процесс получения поливинилового спирта

На рисунке 4.51 представлены зависимости, характеризующие изменение текущей прочности брикетов на сжатие с повышением содержания связующего Comprex A12. Так же для сравнения приведена зависимость прочности брикетов от расхода лигносульфоната. Как и следовало ожидать, повышение содержания Comprex A12 в шихте способствует получению более прочных брикетов. Полная замена лигносульфоната на связующее Comprex A12 не приводит к снижению расхода связующего, необходимого для получения брикетов нормативной прочности.

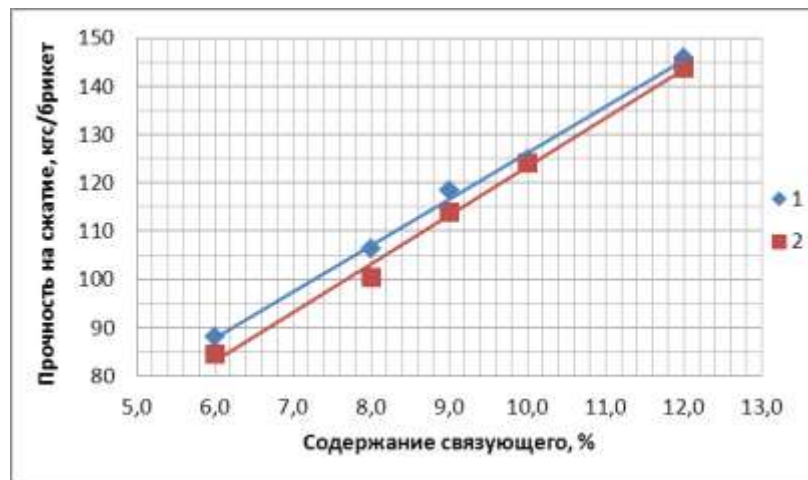


Рисунок 4.51 – Зависимость текущей прочности брикетов на сжатие от содержания связующего в шихте. 1 – Comprex A12, 2 – ЛСТ

Введение Comprex A12 в состав шихты в два этапа (до и после подсушки шихты) не способствует получению более прочных брикетов. Напротив, прочность брикетов при двукратном введении Comprex A12 в состав шихты, обеспечивает получение менее прочных брикетов. Так при единовременном введении 12% связующего брикеты имеют прочность на сжатие равную ~146

кгс/брикет, при введении 2% связующего после подсушки – ~114 кгс/брикет, а при введении 4% – ~100 кгс/брикет, что на 22 и 32% меньше, соответственно (рисунок 4.52).

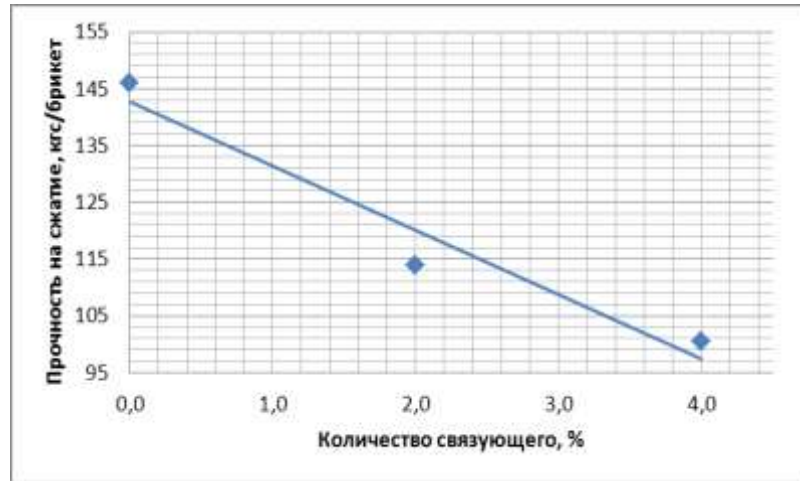


Рисунок 4.52 – Влияние количества Compreh A12, добавляемого после подсушки шихты, на прочность брикетов. Расход связующего – 12%

Несмотря на то, что применение Compreh A12 в количествах, соизмеримых с расходом лигносульфоната позволяет получать брикеты, обладающие текущей прочностью на сжатие, отвечающей нормативной величине в 140кгс/брикет, высокая стоимость – 5000\$ за тонну порошкообразного материала делает его использование при брикетировании экономически нецелесообразным. В данной ситуации единственным способом успешной реализации потенциала использования Compreh A12 в качестве связующего при брикетировании медно-никелевого концентрата является создание комбинированного связующего Compreh A12-ЛСТ.

На рисунке 4.53 показаны зависимости текущей прочности брикетов на сжатие от массовой доли Compreh A12 в состав комбинированного связующего ЛСТ-Compreh A12. Как и ранее в случаях брикетирования с использованием комбинированных связующих зависимости характеризуются появлением на

кривой точки максимума («эффект суперпозиции»)². Во всех случаях точка максимума прочности брикетов отвечает массовой доле Complex A12 равной 70-75%.

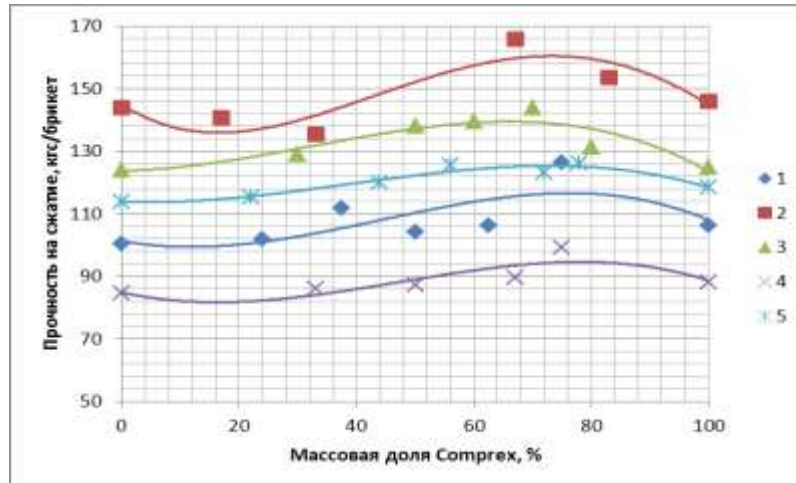


Рисунок 4.53 – Зависимость текущей прочности брикетов от массовой доли Complex A12 в составе комбинированного связующего. Содержание связующего: 1 – 8%; 2 – 12%, 3 – 10%, 4 – 6%, 5 – 9%

Если при использовании Complex A12 в чистом виде расход связующего для достижения нормативной прочности брикетов составлял 12%, то при использовании комбинированного связующего ЛСТ-Complex A12 он снижается до 10%, что в 1,2 раза меньше. Следует отметить, что брикетирование медно-никелевого концентрата при содержаниях Complex A12 в брикетируемой шихте, отличных от рациональных значений, не приводит к заметному снижению прочностных свойств брикетов, таковому как при использовании комбинированных связующих, имеющих в своем составе неорганические связующие.

Зависимости прочности брикетов на сжатие от влажности шихты при использовании комбинированного связующего ЛСТ-Complex A12, взятого в рациональном соотношении, носят экстремальный характер (рисунок 4.54). Точка

² Наличие на кривой №2 минимума, объясняется отклонением от рабочей влажности при проведении советующего эксперимента.

максимума имеет слабую тенденцию к снижению с повышением общего содержания комбинированного связующего в шихте. Так, при общем 6% содержании в шихте комбинированного связующего рациональная влажность, при которой брикеты имеют максимальную прочность, составляет ~1,7%, при 8% – ~1,5%, а при 10% – ~1,3%.

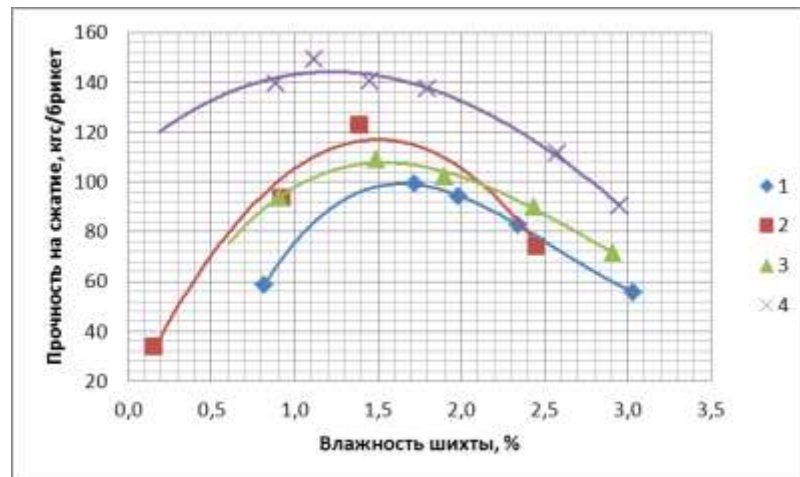


Рисунок 4.54 – Зависимость текущей прочности брикетов, полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Comprex A12, от влажности шихты. Состав связующего, %: 1 – 75 Comprex A12, 25 ЛСТ; 2 – 75 Comprex A12, 25 ЛСТ; 3 – 72 Comprex A12, 28 ЛСТ; 4 – 70 Comprex A12, 30 ЛСТ. Содержание связующего: 1 – 6%; 2 – 8%; 3 – 9%; 4 – 10%

Суточное вылеживание брикетов в естественных условиях приводит к значительному повышению их прочности, особенно для тех, которые получены при низком содержании комбинированного связующего: при 6% содержании связующего прочность брикетов в рациональном интервале влажности увеличивается с 99 до 214 кгс/брикет, т.е. в 2,1 раза, а при 10% содержании связующего – со 149 до 242 кгс/брикет, т.е. в 1,6 раза. Рациональная влажность при этом смещается в сторону больших значений и при всех содержаниях комбинированного связующего в шихте составляет ~1,8-2,0% (рисунок 4.55).

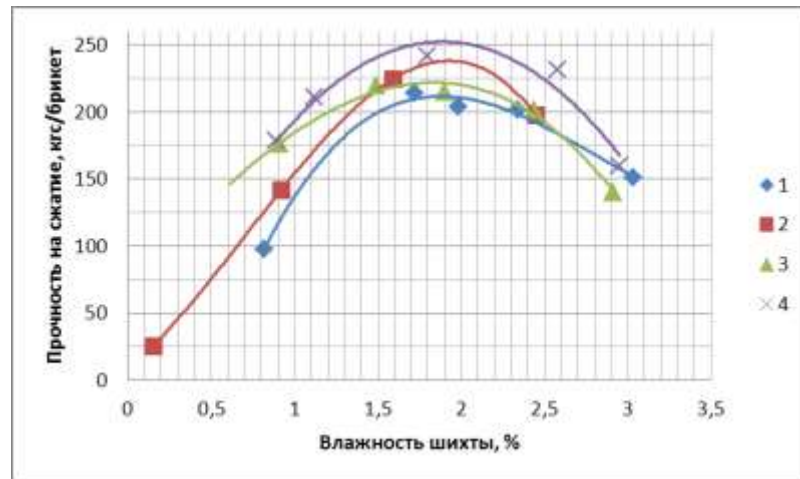


Рисунок 4.55 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов после их вылеживания в течение суток. Состав связующего, %: 1 – 70 Comprex A12, 30 ЛСТ; 2 – 72 Comprex A12, 28 ЛСТ; 3 – 75 Comprex A12, 25 ЛСТ; 4 – 75 Comprex A12, 25ЛСТ. Содержание связующего: 1 – 10%; 2 – 9%; 3 – 8%; 4 – 6%

Дальнейшее увеличение срока вылеживания приводит к гораздо большему увеличению прочности брикетов, причем при повышенных значениях влажности брикетируемой шихты наблюдается большее упрочнение брикетов, чем для шихты, где изначальная влажность была меньше, даже если при ее брикетировании текущая прочность брикетов была максимальной (рисунок 4.56). Так текущая прочность брикетов, полученных с использованием 9% комбинированного связующего ЛСТ-Comprex A12, взятого в рациональном соотношении, при влажности брикетируемой шихты 2,45 и 1,39% составляет 74 и 123 кгс/брикет, соответственно. Вылеживание в течение 4 суток приводит к тому, что их прочность возрастает до 266 и 253 кгс/брикет, соответственно. В том случае, если рабочая влажность ниже равновесного значения, определяемого влажностью окружающего воздуха (см. 2.7), прочность брикетов в процессе вылеживания практически не изменяется и остается на низком уровне. Необходимо отметить, что аналогичные результаты были получены при брикетировании со связующими серии Термопласт СВ.

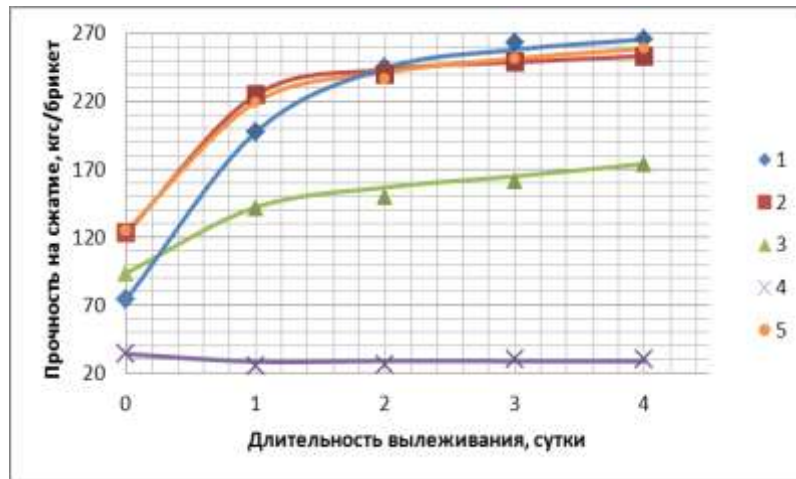


Рисунок 4.56 – Влияние длительности вылеживания на прочность брикетов на сжатие, полученных при использовании 9% комбинированного связующего Compreh A12-ЛСТ. Состав связующего, %: 72 Compreh A12, 28 ЛСТ. Рабочая влажность: 1– 2,45%, 2 – 1,39 %, 3 – 0,92%, 4 – 0,15%, 5 – 1,63%.

Остаточная влажность брикетов в процессе вылеживания в случае, если влажность шихты была больше равновесного значения, отвечающего влажности окружающего воздуха, снижается, стремясь выйти на свое предельное значение (рисунок 4.57).

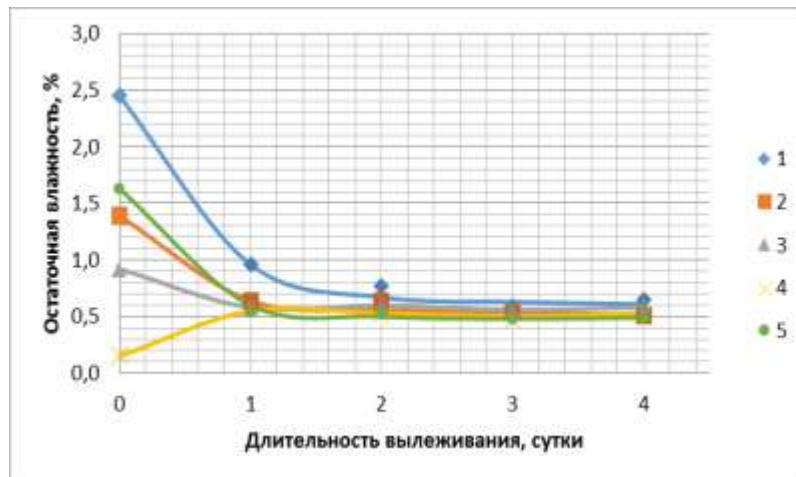


Рисунок 4.57 – Влияние длительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных при использовании 9% комбинированного связующего Compreh A12-ЛСТ. Состав связующего, %: 72 Compreh A12, 28 ЛСТ. Рабочая влажность: 1– 2,45%, 2 – 1,39 %, 3 – 0,92%, 4 – 0,15%, 5 – 1,63%.

Аналогично остаточная влажность брикетов повышается, если изначальное значение влажности брикетируемой шихты было меньше равновесной величины, определяемой влажностью окружающего воздуха. Предельное значение остаточной влажности брикетов достигается при вылеживании в течение 3 суток и составляет 0,5-0,6%, что удовлетворяет требования к безаварийной плавке брикетов в РТП.

4.2.2.8 Выводы по разделу 4.2.2

1. Эффективность применения комбинированных связующих при брикетировании полностью определяется вяжущими свойствами составных компонентов и условиями, в которых они получают максимальное развитие. Если составляющие комбинированного связующего имеют сильное различие в вяжущих свойствах, то использование такого связующего непродуктивно. Его эффективность всецело зависит от массовой доли компонента, обладающего более высокой вяжущей силой. Наиболее эффективно использовать в качестве компонентов комбинированного связующего вещества, имеющие приблизительно равные вяжущие свойства. В этом случае наблюдается «эффект суперпозиции». «Эффект суперпозиции» заключается в том, что при определенных пропорциях компонентов комбинированного связующего брикеты имеют более высокую прочность, чем при использовании составляющих компонентов по отдельности. Условия, в первую очередь значения рабочей влажности брикетирования, при которых такое комбинированное связующее будет проявлять наибольшую эффективность, зависят от массовой доли составляющих компонентов и условий брикетирования, характерных для каждого компонента в отдельности. Чем выше массовая доля компонента, для которого характерны более высокие значения рациональной влажности брикетирования нежели для другого составляющего, тем выше рациональная влажность брикетирования при использовании комбинированного связующего, и наоборот. При этом интервал рациональной влажности брикетирования присущий комбинированному связующему не может

иметь значения более высокие или более низкие, чем величины свойственные для соответствующих компонентов.

2. Использование при брикетировании медно-никелевого концентрата таких комбинированных связующих как ЛСТ-Стоки ЦЭН-1, ЛСТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ЛСТ- CuSO_4 , ЛСТ- FeSO_4 не эффективно. В этих случаях частичная замена лигносульфоната не приводит к снижению расхода связующего и увеличению прочности брикетов.

3. При использовании комбинированного связующего ЛСТ- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ так же не удастся достичь положительных результатов. При любом весовом отношении компонентов комбинированного связующего получаемые брикеты имеют более низкую прочность, чем при использовании в качестве связующего чистого раствора сульфата трехвалентного железа

4. Комбинированное связующее ЛСТ- NiSO_4 при брикетировании показало высокую эффективность. При массовом соотношении компонентов 1÷1 расход связующего, необходимый для достижения нормативной прочности брикетов, составляет 10%. На практике, оборотный электролит, который предполагалось использовать в качестве компонента связующего, содержит значительное количество примесей, а концентрация сульфата никеля не превышает 180 г/дм³, что потребует строительства выпарных установок для доведения его до необходимых кондиций. В таких условиях использование комбинированного связующего ЛСТ- NiSO_4 становится неоправданным.

5. Наиболее эффективно использование при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата, комбинированного связующего ЛСТ-Comprex A12. При массовом соотношении компонентов 3÷7 качественные брикеты удается получать при 10% расходе связующего. В этом случае снижение расхода связующего в пересчете на сухой вес составляет ~65%. Подача связующего может осуществляться как в виде предварительно приготовленной смеси, так и компонентами, последовательно друг за другом. Снижение расхода связующего, значения рН=4,8-6,0 ед., низкая остаточная влажность брикетов, не

превышающая критическую величину (3%), создают предпосылки для успешного применения данного связующего при брикетировании на АО «Кольская ГМК».

4.2.3 Исследование эффективности органических связующих

Огромный интерес вызывает возможность использования при брикетировании мелкозернистых руд и концентратов синтетических органических связующих. При разработке связующих для достижения максимальной эффективности используется индивидуальный подход с учетом всех специфических свойств мелкозернистого материала. Данные связующие обладают наивысшими вяжущими свойствами и лишены недостатков присущих широко распространенным как органическим, так и неорганическим связующим. Характерными чертами таких связующих помимо высокой вяжущей способности являются: стабильность состава, термическая устойчивость при высоких температурах, отсутствие токсичных веществ при разложении, стойкость при хранении. Обратной стороной большого количества неоспоримых преимуществ является высокая цена и монополия производителя связующего. В таких условиях брикетирование сопряжено с известными рисками, которые могут привести к остановке производства.

4.2.3.1 Связующие компании «Kemira Oyj»

Связующие производства финской компании «Kemira Oyj» серии KemWet и KemBrick имеют в своей основе полиакриловую кислоту, нейтрализованную каустиком, аммиаком или представляют собой сополимер акриловой и малеиновой кислот. Широко используется при окомковании железных концентратов и брикетировании порошкового никеля на заводе в г. Харьявалта.

Использование при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата в качестве связующего полиакрилатов щелочных металлов и полиакриламида производства компании «Kemira Oyj» не дало положительного

эффекта. Во всех случаях брикеты получались рыхлые, с пределом текущей прочности на сжатие, не превышающем 80-85 кгс/брикет (рисунок 4.58).

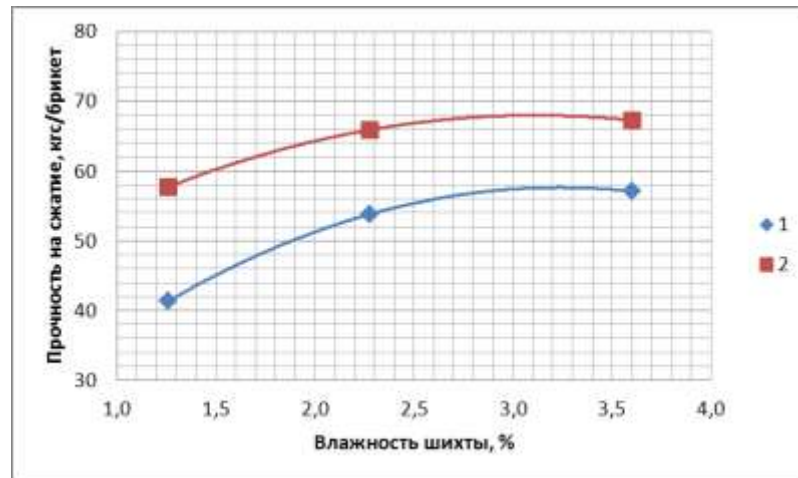


Рисунок 4.58 – Влияние влажности брикетируемой шихты на прочность брикетов при использовании 12% связующего KemBrick 830. 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

Следует отметить, что при подготовке шихты по схеме, заложенной в технологический регламент, после подсушки шихты в ряде экспериментов наблюдалось образование мелких прочных гранул, которые при повторном введении связующего не слипались, а давились при проведении операции брикетирования на валковом прессе. Кроме того, при использовании в качестве связующего гелеобразного вещества KemBrick 830 было установлено, что с повышением влажности брикетируемой шихты наблюдается возрастание прочностных свойств брикетов, но при влажности шихты более 3% происходит зависание материала в загрузочной воронке, заматывание шнека и залипание рабочих ячеек брикет-пресса.

В целом использование связующих производства компании «Kemira Oyj» при брикетировании медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК», как и других веществ, обладающих поверхностно активными свойствами и применяемыми при окатывании различных рудных концентратов, является неэффективным, не имеющим дальнейшего продолжения в исследованиях. Ранее,

аналогичная картина наблюдалась при изучении брикетированности концентрата с использованием такого ПАВ как «FLOFORM» [167].

4.2.3.2 Связующие ООО «Полипласт Новомосковск»

Связующие серии «Термопласт СВ» представляют собой смесь натриевых и полиалкиленоксидных производных полиметиленафталинсульфокислот направленного синтеза с различными функциональными добавками (рисунок 4.59) [171]. Физико-химические свойства производимых вяжущих регламентируются ТУ 5746-062-58042865-2011. Ориентировочный химический состав, %: ~30 С, 30-35 О, 20-22 S, 13-15 Na, 0,6-0,8 Al, ~0,1 Cl.

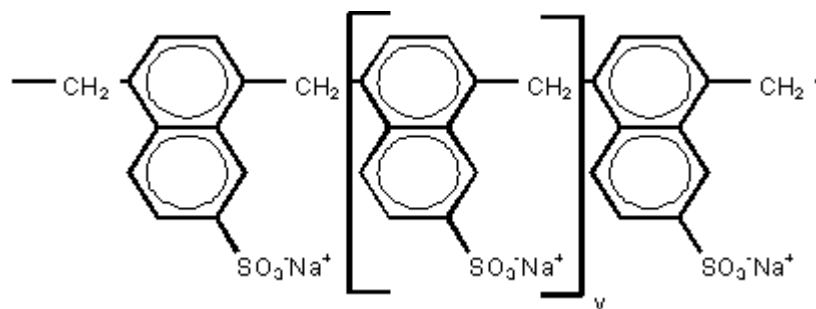


Рисунок 4.59 – Фрагмент молекулы полиметиленафталинсульфоната натрия

«Термопласт СВ» предназначены для использования вместо различных органических связующих – отходов производства (лигносульфонаты, меласса и т.п.), которые не обладают стабильным контролируемым составом, что сказывается на качестве получаемых брикетов. Кроме того, брикеты, изготовленные с использованием связующих «Термопласт СВ» обладают повышенной влагоустойчивостью, не слеживаются и не рассыпаются при хранении в естественных условиях. «Термопласт СВ» хорошо себя зарекомендовали при брикетировании на ОАО «Медногорский Медно-Серный Комбинат», ОАО «Уралэлектромедь», ОАО «Комбинат Южуралникель», АО «ТНК «Казхром» [124,126].

Для исследования эффективности связующих серии «Термопласт СВ» использовались образцы Термопласт 2СВ и Термопласт 4СВ.

С повышением содержания связующего в шихте наблюдается рост прочностных характеристик брикетов (рисунок 4.60). Ход полученных зависимостей монотонно возрастающий, более резкий для связующего Термопласт 4СВ.

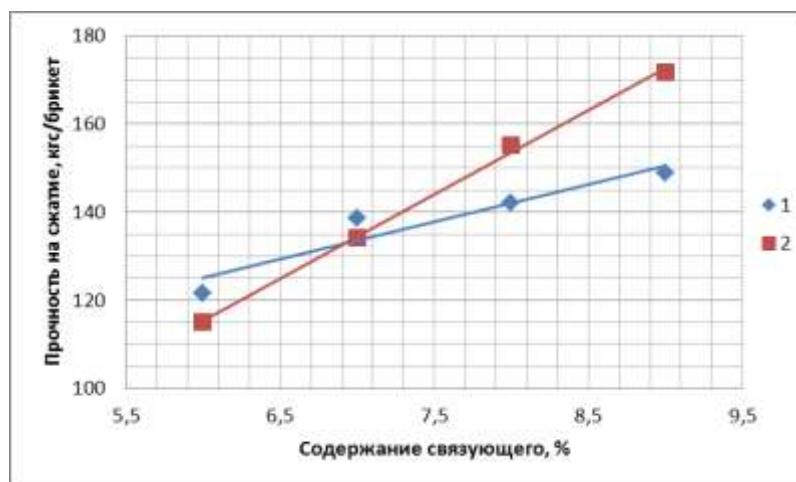


Рисунок 4.60 – Влияние содержания связующего на текущую прочность брикетов. Рабочая влажность: 1,0-1,4%; 1 – Термопласт 2СВ, 2 –Термопласт 4СВ

На рисунке 4.61 представлены зависимости, характеризующие влияние влажности шихты на прочностные свойства брикетов при использовании связующих Термопласт 2СВ и Термопласт 4СВ. Зависимости экстремального характера, точка максимума которых отвечает 1,1-1,5% влажности шихты. Переход при брикетировании концентрата со связующего Термопласт 2СВ на связующее Термопласт 4СВ при одном и том же содержании в шихте помимо повышения прочности брикетов приводит к незначительному росту величины рациональной влажности. Так, при 8% содержании связующего Термопласт 2СВ прочность брикетов на сжатие составляет ~140 кгс/брикет при рациональной влажности 1,2%. При том же содержании в шихте Термопласт 4СВ прочность брикетов составляет ~155кгс/брикет, а величина рациональной влажности равна

1,4 %. Обращает на себя внимание узкий диапазон влажности, в котором прочность брикетов превышает 140 кгс/брикет.

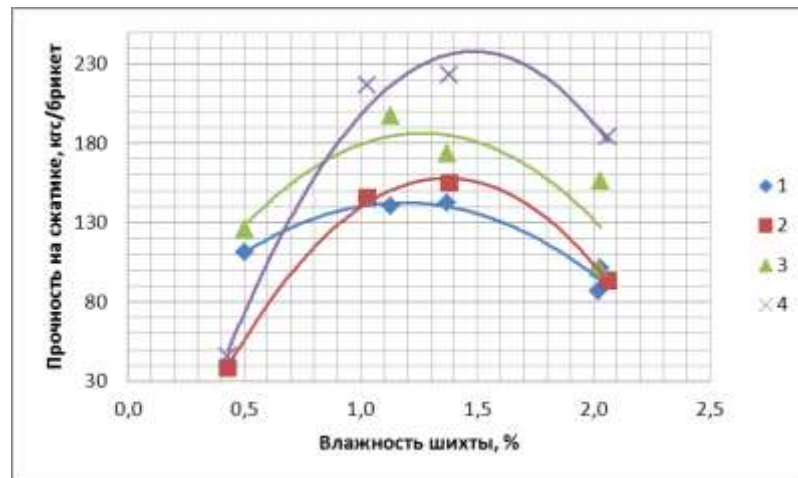


Рисунок 4.61 – Влияние влажности брикетируемой шихты на прочностные характеристики брикетов. Содержание связующего – 8%; 1,3 – Термопласт 2СВ, 2,4 – Термопласт 4СВ; 1,2 – текущая прочность, 3,4 – через сутки

На рисунке 4.62 показано как меняется остаточная влажность брикетов и их прочность в зависимости от продолжительности вылеживания при использовании в качестве связующего Термопласт 2СВ. Ход зависимости остаточной влажности брикетов от срока вылеживания монотонно возрастающий или монотонно убывающий в зависимости от рабочей влажности брикетирования. Остаточная влажность брикетов стремится выйти на предельное значение равное ~0,5%. Длительность вылеживания, в течение которого происходит выход остаточной влажности брикетов на предельное значение, увеличивается пропорционально росту рабочей влажности.

Повышение рабочей влажности брикетов приводит к более интенсивному возрастанию прочности с увеличением продолжительности их вылеживания в естественных условиях (рисунок 4.63). Так при 8% содержании связующего в шихте и ее влажности 1,1% увеличение срока вылеживания брикетов с 0 до 4 суток приводит к возрастанию их прочности на сжатие со 145 до 225 кгс/брикет. При том же содержании связующего в шихте и влажности 2,0% прочность

брикетов в том же диапазоне изменения продолжительности вылеживания увеличивается с 95 до 360 кгс/брикет.

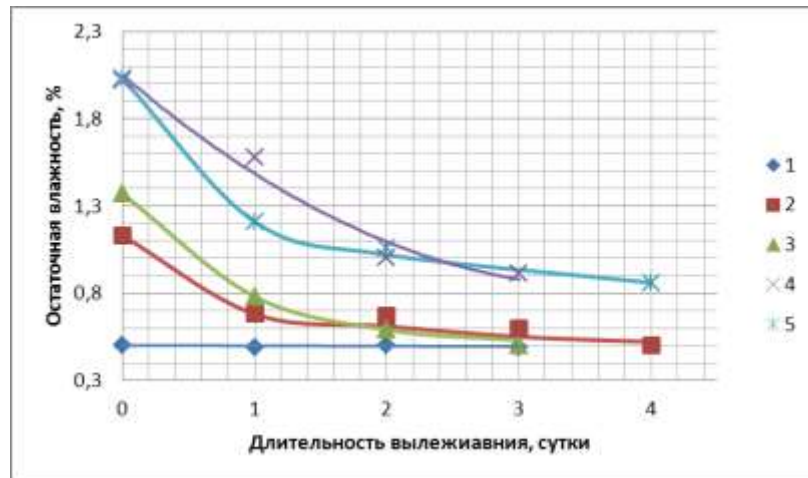


Рисунок 4.62 – Влияние продолжительности вылеживания на остаточную влажность брикетов. Связующее – Термопласт 2СВ; рабочая влажность, %:

1 – 0,50; 2 – 1,13; 3 – 1,37; 4 – 2,02; 5 – 2,03

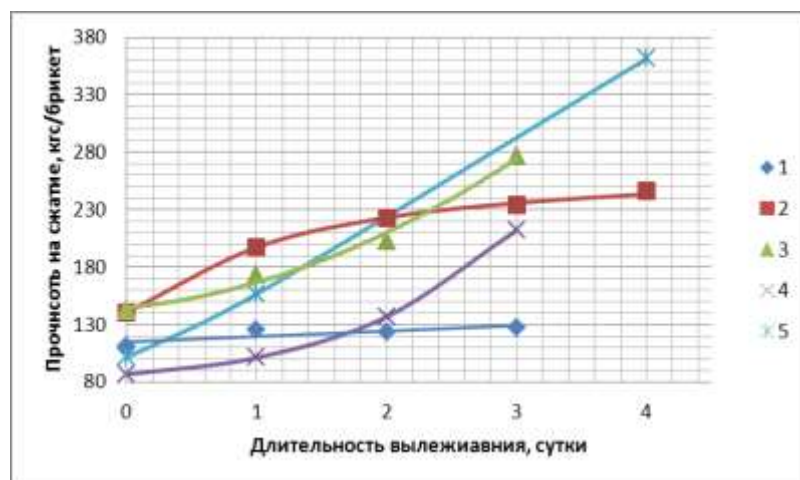


Рисунок 4.63 – Влияние продолжительности вылеживания на прочность брикетов. Связующее – Термопласт 2СВ; рабочая влажность, %: 1 – 0,50; 2 – 1,13;

3 – 1,37; 4 – 2,02; 5 – 2,03

Замена связующего Термопласта 2СВ на Термопласт 4СВ не приводит к изменению хода зависимостей остаточной влажности и прочности брикетов на сжатие от продолжительности вылеживания при различной рабочей влажности брикетируемой шихты (рисунки 4.64 и 4.65). В то же время предельное значение

остаточной влажности при 8% содержании связующего в шихте увеличивается с 0,5% (Термопласт 2СВ) до 0,6 % (Термопласт 4СВ).

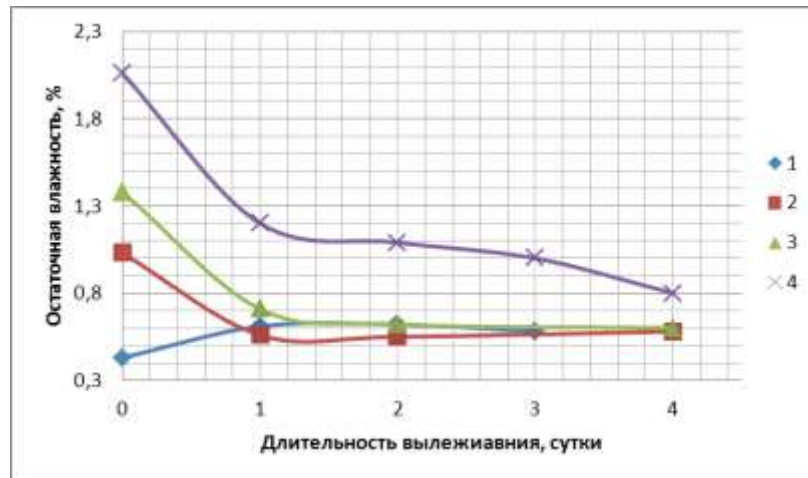


Рисунок 4.64 – Влияние продолжительности вылеживания на остаточную влажность брикетов. Связующее – Термопласт 4СВ; рабочая влажность, %: 1 – 0,43; 2 – 1,03; 3 – 1,38; 4 – 2,06

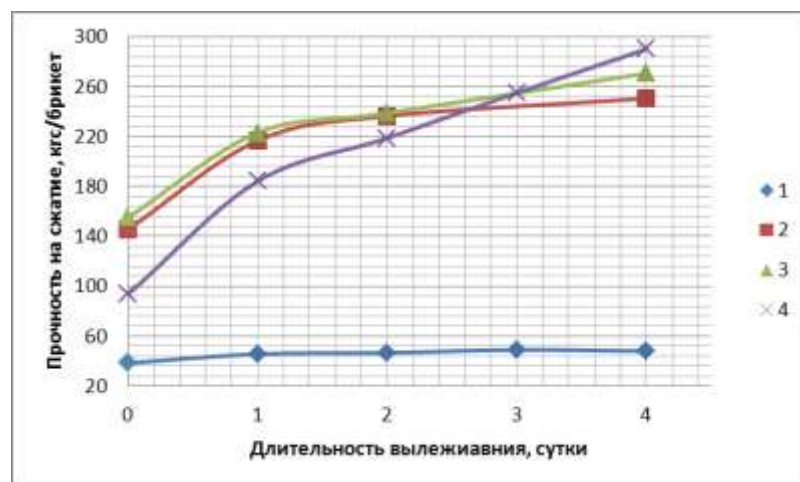


Рисунок 4.65 – Влияние продолжительности вылеживания на прочность брикетов. Связующее – Термопласт 4СВ; рабочая влажность, %: 1 – 0,43; 2 – 1,03; 3 – 1,38; 4 – 2,06

Увеличение продолжительности вылеживания брикетов, изготовленных с помощью связующего Термопласт 4СВ, приводит к меньшему возрастанию прочностных свойств брикетов. Так при 8% содержании связующего Термопласт 2СВ в шихте и ее влажности 2-2,1% увеличение продолжительности вылеживания

брикетов до 4 суток приводит, как говорилось выше, к повышению прочности с 95 до 360 кгс/брикет. Использование Термопласта 4СВ вместо Термопласта 2СВ при тех же условиях обеспечивает повышение прочности брикетов с 95 до 290 кгс/брикет. Аналогичная картина наблюдается и при другой рабочей влажности брикетирования, несмотря на то, что текущая прочность брикетов на сжатие при использовании связующего Термопласт 4СВ выше, чем при использовании Термопласт 2СВ.

При брикетировании с использованием связующих Термопласт 2СВ и Термопласт 4СВ наблюдается отрицательное влияние повышения количества связующего, вводимого в состав шихты после ее подсушки при общем неизменном расходе связующего (рисунок 4.66). Так при общем 8% содержании Термопласта 2СВ в шихте повышение количества вводимого в состав шихты связующего после ее подсушки с 0 до 3% от массы концентрата приводит к снижению прочности брикетов на сжатие со 140 до 86 кгс/брикет. Аналогичная картина наблюдается и при использовании связующего Термопласт 4СВ – прочность падает со 155 до 89 кгс/брикет.

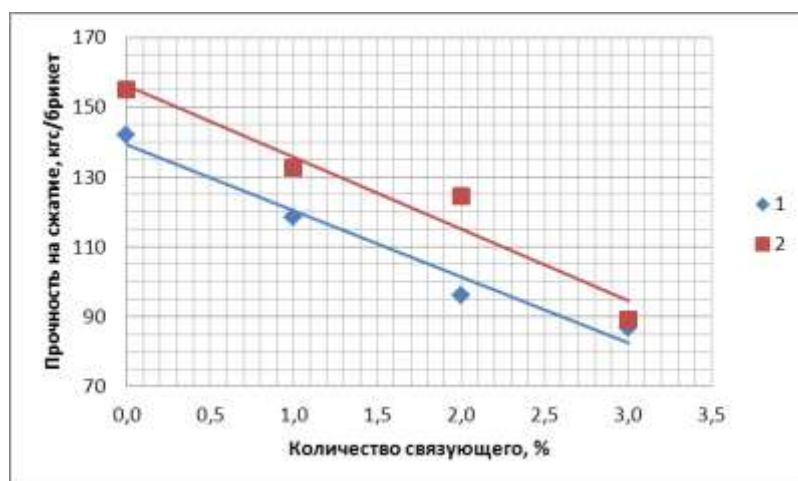


Рисунок 4.66 – Влияние количества связующего, добавляемого после подсушки шихты, на текущую прочность брикетов. Общее содержание связующего 8%; рабочая влажность – 2,8-3,1%. 1 – Термопласт 2СВ, 2 – Термопласта 4СВ

Использование связующих Термопласт 2СВ и 4СВ производства компании ООО «Полипласт Новомосковск» позволяет получать брикеты нормативной прочности при расходе в ~1,5 раза меньшем, чем при использовании в качестве связующего лигносульфоната. Остаточная влажность брикетов не превышает 0,5-0,7%, что позволяет сохранять условия для безопасного режима рудно-термической плавки брикетов. Связующие серии «Термопласт СВ» не выделяют при термическом воздействии в воздушной среде ядовитые канцерогенные вещества в количествах, превышающих ПДК. Их попадание в грунтовые воды не вызовет отравления людей и животных.

4.2.3.3 Модифицированные лигносульфонаты

Оценивалась возможность применения в качестве связующего при брикетировании медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» образцов модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ производства ООО ПК «ХИМПЭК». В таблице 4.4 представлены характеристики используемых в исследованиях модифицированных лигносульфонатов (МЛС). Для изменения свойств лигносульфонатов использовалось два типа модификаторов в различных количествах: тип №1 использовался для образцов ЛСМ 1-3, а тип №2 для образцов ЛСМ 4-6. Количество модификатора увеличивалось с ростом порядкового номера образца связующего и составляло 5,7 или 10%, то есть образец ЛСМ-1 содержал 5% модификатора №1, ЛСМ-6 – 10% модификатора №2 и т.д. Тип модификатора не разглашается.

Зависимость прочностных характеристик брикетов, полученных при использовании модифицированных лигносульфонатов, от влажности брикетируемой шихты носит экстремальный характер (рисунок 4.66). При равных расходах образцов связующих текущая прочность брикетов во всех случаях соизмерима и при 10% расходе в интервале рациональной влажности составляет 150-160 кгс/брикет.

Модификация лигносульфонатов сказывается не только на расходе связующего, но и на интервале рациональной влажности шихты. Если при брикетировании с техническим лигносульфонатом интервал рациональной влажности шихты равен 1,8-2,3%, то при использовании образцов серии ЛСМ он смещается в область более низких значений и находится в пределах от 0,7 до 1,3%. Так как значения рациональной влажности шихты при брикетировании с использованием образцов модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ, имеют близкую величину, можно предположить, что содержание и тип модифицирующего вещества мало влияют на этот параметр процесса брикетирования (рисунок 4.67).

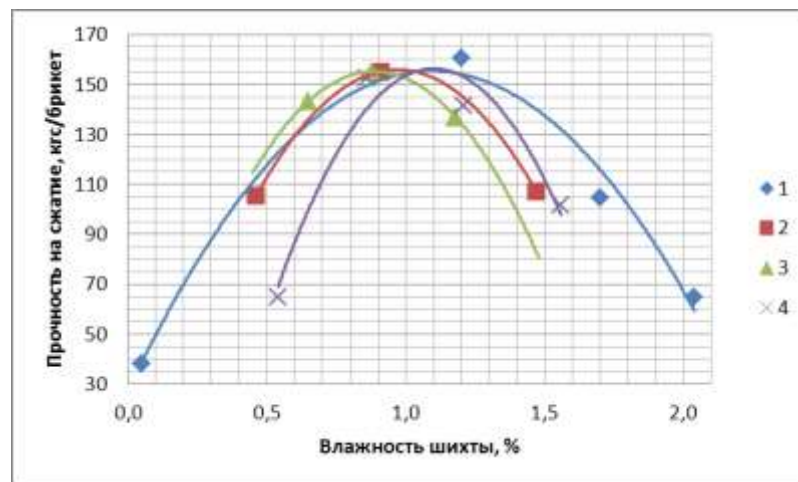


Рисунок 4.67 – Зависимость текущей прочности брикетов от влажности шихты. Связующее: 1 – 10% ЛСМ-3; 2 – 10% ЛСМ-4; 3 – 9% ЛСМ-5; 4 – 10% ЛСМ-6

Тип модификатора в значительной мере влияет на прочность брикетов после их вылеживания (рисунок 4.68). Брикеты полученные с использованием лигносульфонатов содержащих модификатор второго типа в независимости от его количества имеют примерно равную прочность после вылеживания – 210-220 кгс/брикет. Аналогичная величина для брикетов содержащих модифицированные лигносульфонаты первого типа составляет 280кгс/брикет, что на 30% выше.

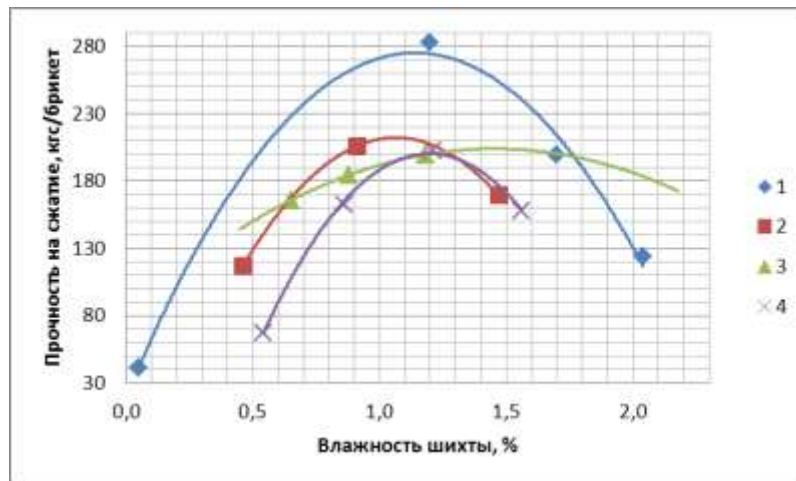


Рисунок 4.68 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов после их вылеживания в течение суток. Связующее: 1 – 10% ЛСМ-3; 2 – 10% ЛСМ-4; 3 – 9% ЛСМ-5; 4 – 10% ЛСМ-6

Минимальное количество связующих серии ЛСМ обеспечивающее текущую прочность, отвечающую нормативной величине, составляет 8-9% в зависимости от конкретного образца (рисунок 4.69). Расход для обеспечения нормативной прочности соизмерим с расходом связующих Термопласт 2СВ и 4СВ и на 25-30% ниже расхода ЛСТ.

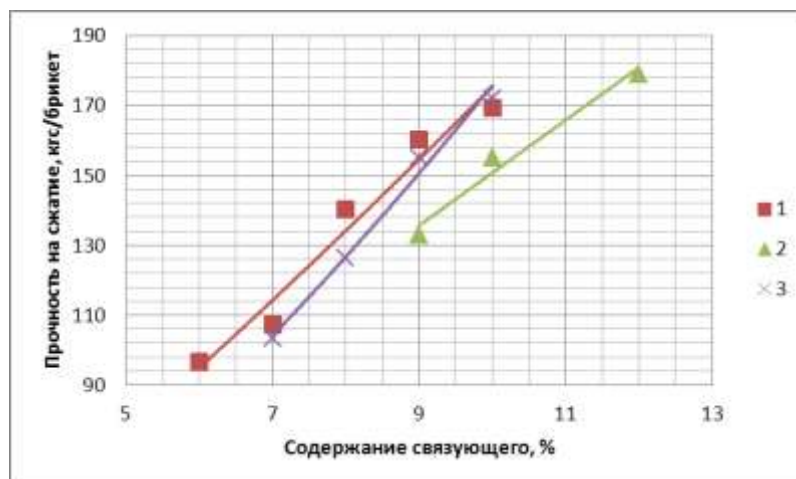


Рисунок 4.69 – Зависимость текущей прочности брикетов от содержания связующего. Рабочая влажность 0,7-1,1%; связующее: 1 – ЛСМ-2; 2 – ЛСМ-4; 3 – ЛСМ-5

Величина остаточной влажности брикетов во всем интервале рабочей влажности не превышает значения 1,2%, что позволяет предполагать о безаварийном режиме плавки в электропечах брикетов, полученных с использованием модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ.

Следует особо отметить, что в процессе подготовки шихты, а именно нагрева образцов серии ЛСМ с целью увеличения текучести и равномерности распределения, вследствие снижения вязкости, ощущался резкий одурманивающий запах, вызывающий головную боль и сухость во рту. Паспорт экологической безопасности использования связующих на горячем производстве предоставлен не был.

4.2.3.4 Поливиниловый спирт

Ранее (см. 4.2.2.7.) высокую эффективность при брикетировании медно-никелевого концентрата показало связующее Comprax A12, основу которого составляет поливиниловый спирт. Так как использование связующего Comprax A12 в чистом виде является нерентабельным ввиду его высокой стоимости, исследовалась возможность применения при брикетировании в качестве связующего его основной составляющей – поливинилового спирта. Выбор марки поливинилового спирта (ПВС) осуществлялся с позиций максимального соответствия характеристикам связующего Comprax A12. Наиболее близким аналогом является поливиниловый спирт марки PVA 088-50, производства компании «Sinopac Sichuan Vinylon Works» (Китай), который и использовался в исследованиях.

При брикетировании с использованием 10% раствора поливинилового спирта в качестве связующего интервал рациональной влажности находится в пределах 0,9-1,3% (рисунок 4.70). Не смотря на низкие значения рациональной влажности, следует отметить значительно меньшее пыление в сравнение с другими видами связующих, при усреднении шихты непосредственно перед брикетированием.

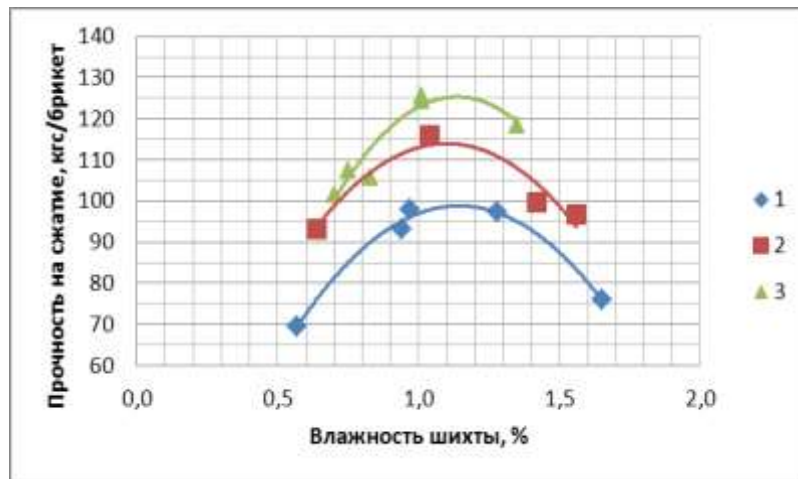


Рисунок 4.70 – Зависимость текущей прочности брикетов, полученных с использованием в качестве связующего ПВС, от влажности шихты. Содержание связующего, %: 1 – 8, 2 – 10, 3 – 12

После вылеживания брикетов в течение суток происходит существенное увеличение прочности брикетов в 1,5-1,7 раза и смещение интервала рациональной влажности в сторону более высоких значений (рисунок 4.71). В таких условиях нормативная прочность достигается уже при расходе связующего в количестве 8%.

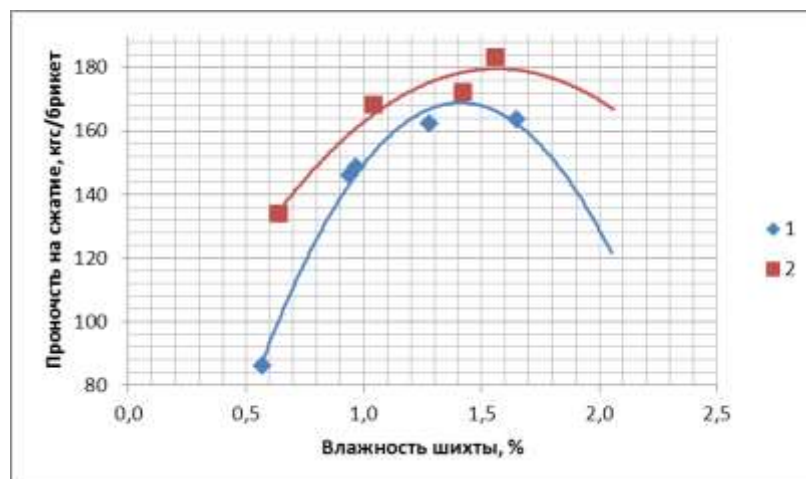


Рисунок 4.71 – Влияние влажности шихты на прочность брикетов после их вылеживания в течение суток. Содержание ПВС, %: 1 – 8, 2 – 10

Минимальное количество связующего, необходимое для достижения текущей прочности брикетов равной 140 кгс/брикет, как видно из рисунка 4.72, составляет 15%, что в пересчете на сухой вес равно 1,5%.

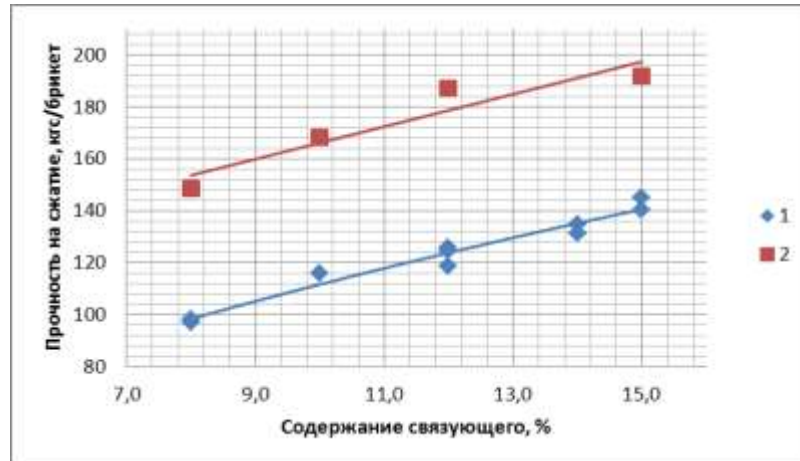


Рисунок 4.72 – Зависимость прочности брикетов от содержания ПВС.

Рабочая влажность: 1,0-1,4%; 1 – текущая прочность, 2 – через сутки

В результате вылеживания брикетов их прочность возрастает в ~2 раза, увеличиваясь к 9 суткам со 145 до 299 кгс/брикет (рисунок 4.73). Наиболее интенсивное возрастание прочности брикетов происходит в течение первых суток. За этот период происходит увеличение прочности брикетов на 80%, тогда как в последующие 8 суток – всего на 26%.

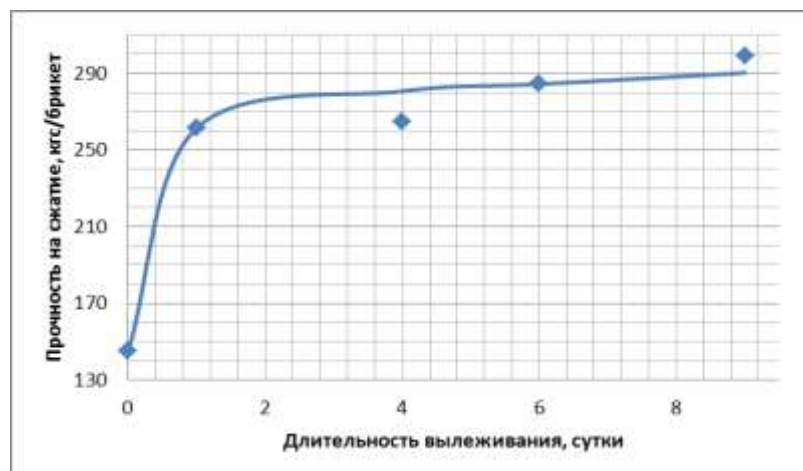


Рисунок 4.73 – Влияние продолжительности вылеживания на прочность брикетов, полученных с использованием 15% ПВС.

Рабочая влажность – 1,16%

Остаточная влажность брикетов в процессе их вылеживания снижается (наиболее интенсивно опять же в первые сутки), стремясь к значению $\sim 0,5\%$, что наряду с высокой прочностью создает необходимые условия для безопасного режима рудно-термической плавки (рисунок 4.74).

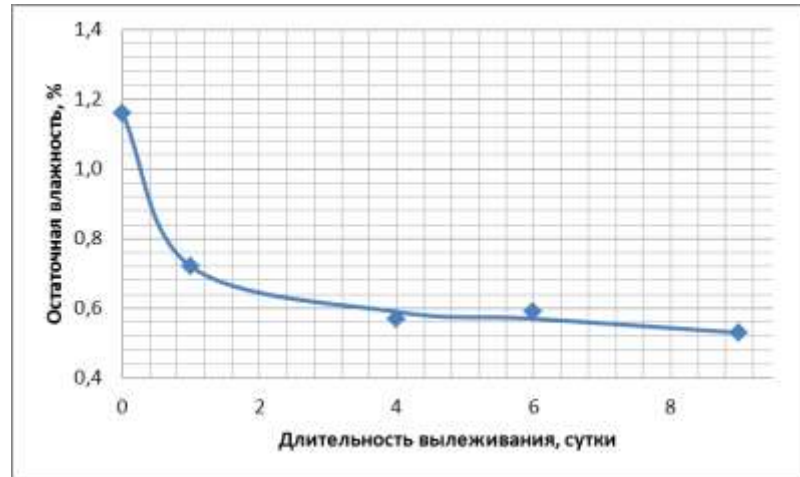


Рисунок 4.74 – Влияние продолжительности вылеживания на остаточную влажность брикетов, полученных с использованием 15% ПВС

Использование поливинилового спирта в твердом агрегатном состоянии – в виде порошка, не позволяет получать качественные брикеты. Даже при вылеживании шихты в течение суток брикеты после выхода из ячеек брикет-пресса сразу же разрушаются. Получить брикеты удалось только при повышенной рабочей влажности и вылеживании шихты в течение 2 суток, однако их прочность была соизмерима с прочностью брикетов, полученных в отсутствие связующего.

4.2.3.5 Выводы по разделу 4.2.3

1. Несомненно, что эффективность органических связующих определяется их составом, пространственным строением и наличием тех или иных функциональных групп. Брикеты, получаемые при использовании органических связующих, в отличие от применения минеральных связующих, под действием внешней нагрузки, не разрушаются, а только «расползаются», что

свидетельствует о том, что они являются пластичными телами. За счет пластичности брикеты в меньшей степени подвергаются ударным и истирающим воздействиям, что позволяет им сохранять качественные характеристики при большом количестве перегрузок и длительных транспортировках.



Рисунок 4.75 – Вид брикетов, полученных при использовании 10% ПВС после приложения внешней нагрузки

2. Использование при брикетировании медно-никелевого концентрата связующих производства компании “Kemira Oyj” (Финляндия) не позволяет получать брикеты приемлемой прочности.

3. При использовании образцов 2СВ и 4СВ связующих серии Термопласт СВ производства ООО «Полипласт Новомосковск» минимальный расход связующего, обеспечивающий получение качественных брикетов, в обоих случаях равен 8%. Снижение расхода связующего в пересчете на сухой вес составляет ~30%. Значение рН и величина остаточной влажности брикетов удовлетворяют условиям безаварийного протекания процессов брикетирования и плавки в рудно-термических печах.

4. При брикетировании с использованием модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ, производства компании ООО ПК «ХИМПЭК»,

нормативная прочность брикетов достигается при расходе связующего равном 8-10%. Рациональные дозировки при использовании в качестве связующего технического лигносульфоната жидкой консистенции и модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ в пересчете на сухой вес практически совпадают друг с другом. В целом значимых преимуществ перед техническим лигносульфонатом жидкой консистенции, используемым при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата на УБ АО «Кольская ГМК», не выявлено.

5. Наивысшей эффективностью из всех исследованных образцов органических связующих обладает поливиниловый спирт. В пересчете на сухой вес его количество необходимое для получения качественных брикетов составляет 1,5%. Снижение расхода связующего в этом случае составляет 75%. Используемый в качестве связующего 10% раствор поливинилового спирта имеет значения рН и остаточной влажности брикетов, удовлетворяющие установленным на производстве нормам.

4.3 Выбор перспективных видов связующих и условий брикетирования

На основании лабораторных исследований по поиску альтернативных техническому лигносульфонату связующих и всестороннего рассмотрения характеристик исследованных связующих (доступность, значения рН, стоимость и др.) рекомендовать для проведения промышленных испытаний по брикетированию коллективного медно-никелевого концентрата на следующие связующие:

1. 10% водный раствор поливинилового спирта марки PVA 088-50. Рекомендуемый общий расход связующего – 15%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 14%, на второй – 1%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,5-1,5%.

2. Комбинированное связующее ЛСТ-Comprex A12. Массовая доля сухих

веществ в техническом лигносульфонате – 50%, водном растворе связующего Comrex A12 – 10%. Массовое соотношение компонентов 3÷7. Рекомендуемый расход связующего – 10%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 8%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,8-1,8%.

3. Связующее Термопласт 4СВ производства ООО «Полипласт Новомосковск». Массовая доля сухих веществ – 55%. Рекомендуемый расход связующего – 8%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 6%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,9-1,9%.

При участии автора на участке брикетирования АО «Кольская ГМК» были проведены промышленные испытания в рабочих условиях, которые полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой в полной мере решены поставленные задачи разработки технологии брикетирования просора песчаника КУР и совершенствования технологии брикетирования АО «Кольская ГМК».

Основные выводы и рекомендации:

1. На основании анализа научно-технической литературы и результатов лабораторных исследований установлено, что качественные характеристики брикетов зависят от широкого спектра параметров процесса, ключевым из которых является выбор связующего.

2. При изучении микроструктуры брикетов из просора песчаника Кайерканского угольного разреза оптическими методами в отраженном свете, установлено, что наиболее равномерное распределение связующего по телу брикета наблюдается при использовании технического лигносульфоната.

3. На основании результатов лабораторных исследований разработана технология брикетирования просора песчаника Кайерканского угольного разреза, включающая в себя сушку просора в сушильном барабане, смешение его с лигносульфонатом и брикетирование шихты на валковом прессе с последующей упрочняющей сушкой брикетов. Технология позволяет получить прочные с требуемой влажностью брикеты, которые можно использовать на различных переделах металлургического производства. Разработанный технико-экономический регламент показал высокую эффективность данной технологии.

4. Проведено экспериментальное сравнение влияния различных связующих на брикетируемость медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» (водные растворы сульфатов, комбинированные связующие на основе лигносульфоната, модифицированные лигносульфонаты, поливиниловый спирт, синтетические органические связующие). Установлено, что:

- использование в качестве связующего водных растворов сульфатов характеризуется отсутствием огрубления шихты, при смешении концентрата и

связующего, а также высокими значениями интервала рациональной влажности шихты, что негативно сказывается на процессе брикетирования;

- наибольшей эффективностью обладают комбинированные связующие, полученные из компонентов, обладающих соизмеримыми вяжущими свойствами.

В данном случае наблюдается «эффект суперпозиции»;

- характер разрушения брикетов, полученных при использовании неорганических связующих, свидетельствует о том, что они представляют собой хрупкие тела, которые под воздействием вибраций при движении по ленте транспортера, перегрузках и дальнейшей транспортировке будут разрушаться, снижая качество готовой продукции. Напротив, органические связующие, за счет своего пространственного строения, обеспечивают получение более пластичных брикетов, менее подверженных ударным и истирающим воздействиям.

5. В качестве альтернативных лигносульфонату связующих предложены:

- 10% водный раствор поливинилового спирта марки PVA 088-50. Рекомендуемый общий расход связующего – 15%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 14%, на второй – 1%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,5-1,5%;

- комбинированное связующее ЛСТ-Comprex A12. Массовая доля сухих веществ в техническом лигносульфонате – 50%, водном растворе связующего Comprex A12 – 10%. Массовое соотношение компонентов 3÷7. Рекомендуемый расход связующего – 10%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 8%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,8-1,8%;

- связующее Термопласт 4СВ производства ООО «Полипласт Новомосковск». Массовая доля сухих веществ – 55%. Рекомендуемый расход связующего – 8%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 6%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности 0,9-1,9%.

При участии автора на участке брикетирования АО «Кольская ГМК» были проведены промышленные испытания в рабочих условиях, которые полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство металлов за полярным кругом. Под ред. Н.Г. Кайтмазова. – Норильск, 2006. – 178 с.
2. Лурье Л.А. Брикетирование в черной и цветной металлургии. М.: Металлургиздат. – 1963. – 324с.
3. Данилова Ю.С., Перистый М.М. Производство железорудных брикетов – перспективный способ подготовки металлургических отходов // Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів / Збірка доповідей XXI Всеукраїнської наукової конференції аспірантів і студентів. Т.1. Донецьк: ДонНТУ, ДонНУ. – 2011. – с.67-68
4. Хорошавин Л. Металлургические брикеты нового поколения сокращают продолжительность плавки металлов // Уральский рынок металлов. – 2006. – №7. – с.39-42.
5. Котенев В. И, Барсукова Е. Ю. Технология и экономика производства брикетов из мелкодисперсных отходов металлургических и коксохимических производств для экономически выгодной замены ими традиционной шихты сталеплавильного, доменного и ферросплавного переделов и способ его производства // 7-й Международный Конгресс сталеплавильщиков. – Москва, 2002, 14 ноября.
6. Ожогин В.В., Томаш А.А., Ковалевский И.А. Брикетирование как полноправный метод окускования металлургического сырья // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – №2. – с.54-58.
7. Ожогин В.В. Основы теории и технологии измельченного металлургического сырья. – Мариуполь: ПГТУ. – 2010. – 442с.
8. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. Одесса: Лидыбь. – 1990. – 296с.
9. Менковский М.А., Равич Б.М., Окладников В.П. Связующие вещества в процессах окускования горных пород. М.: Недра. – 1977. – 183с.
10. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М.: Металлургия. – 1975. – 232с.
11. Равич Б.М. Брикетирование руд. М.: Недра. – 1982. – 183с.
12. Ушаков К.И., Фельман Р.И., Садыков В.И. Брикетирование в цветной металлургии // Обзорная информация института ЦНИИцветмет экономики и информации. – 1979. - № 11. – 83 с.

13. Носков В.А., Баюл К.В. Обзор исследований процесса брикетирования мелкофракционных материалов в валковых прессах. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – 2005. – №11.– с.289-293.
14. Мащенко В.Н., Книсс В.А., Кобелев В.А., Полянский Л. И. Подготовка окисленных никелевых руд к плавке. Екатеринбург: УрО РАН. – 2005. – 316с.
15. Смирнов В.И., Худяков И.Ф., Набойченко С.С. Выбор способа подготовки окисленных никелевых руд к шахтной плавке. // Цветная ме-таллургия. – 1967. – №3. – с.24-26.
16. Johanson J.R. Factors influencing the design of roll-type briquetting presses // Proceedings of the 9th Biennial Conference: The International Briquetting Association. – 1965. – p.17-31.
17. Johanson, J.R. A Rolling theory for granular solids // Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME. – 1965. – p.842-848
18. Johanson J.R. The use of laboratory tests in the design and operation of briquetting presses // Proceedings of the 11th Biennial Conference: The International Briquetting Association. – 1969 . – p.135-144
19. Johanson J.R. Predicting limiting roll speeds for briquetting presses // Proceedings of the 13th Biennial Conference: The International Briquetting Association. – 1973 . – p.89-99.
20. Математическая модель очага деформации шихты в валковом брикетировочном прессе / О.Н.Кукушкин, В.И.Головко, И.Г.Муравьева, К.П.Лопатенко // Порошковая металлургия. – 1993. – №8. – с.24-30.
21. Носков В.А. Особенности захвата порошкообразной шихты валками при брикетировании // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – № 4. – с.102-104.
22. Носков В.А., Большаков В.И. Оценка динамических нагрузок привода брикетного валкового пресса // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – с.88-90.
23. Pietsch W. Agglomeration Processes. Phenomena, technologies, equipment. Wiley-VCH, Weinheim – 2002. – 719p.
24. Pietsch W. Size enlargement by agglomeration. Wiley-VCH, Weinheim – 1991. – 531p.
25. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия. – 1966. – 151с.

26. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. М.: Metallurgy. – 1978. – 208с.
27. Пузанов А.П., Полянский Л.И., Машенко В.Н., Кобелев В.А. Прочность брикетов в зависимости от давления прессования при переменных линейных размерах частиц и влажности. // Новые Огнеупоры. – 2007. – №8. – с.31-36.
28. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. Екатеринбург. – 2001. – 634с.
29. Полянский Л.И., Пузанов А.П., Кобелев В.А. Математическая модель прочности брикетов в зависимости от крупности и влажности материала // Новые огнеупоры. – 2007. – №4. – с.44-50.
30. Буркин С.П., Бабайлов А.Н., Логинов Ю.Н., Щипанов А.А. Оптимальное размещение ячеек валков брикетировочного пресса. // Сталь. – 1997. – №5 – с.68-70.
31. 171. Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А. Моделирование валкового брикетирования сыпучих материалов. // Сталь. – 1997. – №11. – с. 65-67.
32. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Объемные деформации при валковом брикетировании отходов металлургического производства. // Металлы. – 2000. – №1. – с.48-52.
33. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Влияние формы инструмента на граничные условия и уплотнение при валковом брикетировании. // Сталь. – 2000. – №9 – с.87-91.
34. Capes C.E. Particle size enlargement. Handbook of powder technology, vol.1, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. – 1980. – 193 p.
35. Елишевич А.Т. Теоретические и экспериментальные исследования, разработка и внедрение технологии брикетирования углей. Автореф. дис. на соискание учен. степ. д.т.н.: Днепропетровск, ДТГП. – 1978. – 37с.
36. Еремин А.Я., Бабанин В.И. Изменение физико-механических свойств смесей мелкозернистых материалов со связующими на стадиях подготовки и прессования в процессе брикетирования // Кокс и химия. – 2003. – №4. – с.17-26.
37. Рывкин И.Ю., Еремин А.Я., Литвин Е.М., Бабанин В.И. Брикетирование мелкозернистых и тонкодисперсных материалов со связующим // Кокс и химия. – 2000. – №10 – с.36-43
38. Носков В.А., Маймур Б.Н., Петренко В.И., Ващенко С.В., Крюков В.В., Лебедь А.Т. Разработка и исследование связующих добавок для брикетирования отсеков силикомарганца // Фундаментальные и прикладные проблемы черной

металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск.:ИЧМ НАН Украины. – 2005. – №.10. – с. 321-327.

39. Gill P.M. Environmentally Safe Binders for Agglomeration // IBA Conference. – 1997. – Vol.25. – p.3-7.

40. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа. – 1980. – 472с.

41. Пашенко А.А., Сербии В.П., Старчевская В.А. Вяжущие материалы. Киев: Вища школа. – 1975. – с.440.

42. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат. – 1979. – 476с.

43. Лотош В.Е., Окунев А.И. Безобжиговое окускование руд и концентратов. М.: Наука. – 1980. – 216с

44. Тиль В.В., Шашкин В.Н., Бабанин В.И., Еремин А.Я., Козлова С.Я. Брикетирования хромитового концентрата на Донском ГОКе. // Горный журнал. – 2003. – №3. – с.46-50.

45. Шашкин В.Н., Логинов Н.М., Багаутдинов Т.А., Фурсенко А.Ф., Утемисов Б.К. Технология обогащения руд и брикетирования концентратов на фабриках ОАО «Донской ГОК». // Горный журнал. – 2001. – №11. – с.32-34.

46. Бездежский Г.Н., Смоляков В.П., Бабанин В.И., Еремин А.Я., Тиль В.В., Шашкин В.Н. Освоение брикетирования хромитового концентрата на Донском горно-обогатительном комбинате // Цветная металлургия. – 2002. – №8-9. – с.7-10.

47. Абдулабеков Е.Э., Каскин К.К., Нурумгалиев А.Х. Теория и технология производства хромистых сплавов. Металлургия. Алматы. –2010. – 280с.

48. Полянский Л.И., Кобелев В.А., Пузанов В.П. Технология и оборудование для брикетирования тонкодисперсных материалов и отходов производства // Новые технологии и материалы в металлургии. Под ред. Л.А. Смирнова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С.39-44.

49. Ленёв Л.А. Разработка технологии брикетирования железной руды с варьированием связующей добавки и времени сушки брикетов // Материалы Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург: УГГУ. – 2006. – с.124-125.

50. Ленёв Л.А. Разработка комплексной технологии получения красного железоокисного пигмента и железорудных брикетов из железных мартито-гематитовых руд: Автореф. Дисс. кан.тех.наук. – Санкт-Петербург. – 2006. – 20с.

51. Борисов В.М., Вегман Е.Ф., Карабасов Ю.С., Валавин В.С., Рябов В.А., Рыбаков В.М. Влияние жидкого стекла на прочность железорудных брикетов при сушке // Бюллетень ЦНИИ. – 1971. – № 23 (667). – с.17-20.
52. Rieschel H. Present state of sponge iron briquetting in consideration of the selection of the binding agent // Metallurgical Plant and Technology. – 1981. – № 2. – p.14-24.
53. Кожевников И.Ю., Равич Б.М. Окускование и основы металлургии. - М.: Металлургия, 1991. - 300 с.
54. Urabe Y., Kobayashi M. Method of preparing a briquette batch // United States Patent US5100840. – 31.03.1992. – 5p.
55. Генералов Б.В., Павлов В.Л., Крифукс О.В. Смесь для получения керамического изделия и способ его изготовления // Патент России RU 2096376. – 20.11.1997. – 4с.
56. Федоренко Н.В., Дубровин А.С., Хякиннен В.И. Рациональное использование некондиционных и дисперсных фракций сплавов кремния // Электromеталлургия. –1999. – № 2. – с.28-33.
57. Мащенко В.Н., Набойченко С.С., Книсс В.А., Жуков В.П., Полянский Л.И. Производство брикетов с высокими технологическими свойствами из окисленной никелевой руды // Цветные металлы. – 2006. - №8. – С.17-24.
58. Киселев Б.К., Ломагин Ф.Е. Состояние и перспективы развития окускования руд и концентратов в цветной металлургии // Обзорная информация института ЦНИИцветмет экономики и информации. – 1982. – №6. – 49с.
59. Бабанин В.И., Еремин А.Я., Бездежский Г.Н. Разработка и внедрение новой технологии брикетирования мелкофракционных материалов с жидким стеклом. Часть 1. // Металлург. – 2007. – № 1. – с.68-71.
60. Лотош В.Е., Жунев А.Г., Златин Е.В. Методы упрочнения окатышей на цементных связках гидрационного твердения // Обзорная информация института Черметинформация. – 1974. – №6. – с.1-20.
61. Singh M. Studies on the cement-bonded briquettes of iron and steel plant by-products as burden materials for blast furnaces. Doctoral thesis. Department of chemical and metallurgical engineering division of process metallurgy. Division of process metallurgy Luleå university of technology. – Luleå. – 2003. – 41p.
62. Duselis S., Gleeson J., Goodwin P., Kirby N., Najt B., Nquyen A., Sloane B., Stitt D. Building products // United States Patent US6506248. – 17.07.2001. – 11p.
63. Furui T., Sato K. Agglomerates for use in a blast furnace and method of making the same // United States Patent US4168966. – 25.09.1979. – 8p.

64. Петров А.В., Евтехов В.Д., Евтехов Е.В., Рева А.В., Долина Н.П., Беспояско Э.А. Методы упрочнения брикетов железорудного концентрата с добавкой цементного клинкера // Геолого-минералогический вестник. – 2008. - № 2 (20). – с.12-23.
65. Гуревич Б.И. Вяжущее из хвостов обогатительной фабрики комбината «Печенганикель». – Л.: Наука, – Химия и технология силикатного сырья. – 1975. – с.43-45.
66. Кофейников Ю.Ф. Реконструкция металлургического цеха Медногорского медно-серного комбината / Кофейников Ю.Ф., Мурашко Л.И., Курбатов В.Н., Шепелев Ю.И. // Цветные металлы. – 2001. – № 12. – с.16-18.
67. Mihok L., Demeter P., Baricova D., Seilerova K. Utilization of ironmaking and steelmaking slags // Metalurgija (Sofija). – 2006. - V.45. – No. 3. – p.163-168.
68. Летимин В.Н. Брикетирование железорудных материалов для плавки в доменных печах // Металлург. – 1997. - № 12. – с.25-27.
69. Ozbayoglu G., Tabari K.R. Briquetting of Iran-Angouran smithsonite fines // Physicochemical problems of mineral processing. – 2003. – № 37. – p.115-122.
70. Нефедов П.Я., Матвиенко В.А., Тютюнников Ю.Б. Брикетирование шихтовых материалов для выпуска высокоуглеродистого феррохрома // Сб. «Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для бескоксового производства». – Днепропетровск. – 1990. – с.228-230.
71. Окунев А.И., Лотош В.Е. Испытание способа грануляции сульфидных шихт с известняком и серной кислотой // Цветные металлы. – 1964. – №5. – с.53-57.
72. Grigorova I., Kyzev L. Briquetting of brown coals with a binding agent modified amyllum with soluble colophony// Mining and mineral processing. – vol. 46, part II. – Sofia, 2003. – p.127-129.
73. Юсфин Ю.С., Каменов А.Д., Буткарев А.П. Управление окускованием железорудных материалов. М.: Металлургия. – 1990. – 280с.
74. Абдулабеков Е.Э., Каскин К.К., Нурумгалиев А.Х. Теория и технология производства хромистых сплавов. Металлургия. Алматы. –2010. – 280с.
75. Евстюгин С.Н., Усольцев Д.Ю., Минеев В.И., Бормотова И.Г., Шаврин С.В. Сравнительный анализ использования различных видов связующего при производстве окатышей в ОАО «Михайловский ГОК» // Сталь. – 2005. – №2 – с.12-15.
76. Колобов Г.А., Поплавский Ю.В., Парфенюк И.Г., Шкляр В.В., Криворучко В.В. Подготовка концентратов ильменитовых руд коренных месторождений к руднотермической плавке // Международная научно-практическая конференция

«Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы». – М.: МИСиС. – 2009. – 366с.

77. Плотников С.В. Исследование механизма фазообразования при окислительном обжиге и металлизации окатышей из руд железистых кварцитов: Автореф. Дисс. кан.тех.наук. – Москва. – 2013. – 28с.

78. Колобов Г.А. Поплавский Ю.В., Парфенюк И.Г., Шкляр В.В., Криворучко В.В. О подготовке ильменитовых концентратов к плавке// *Металургія. Збірник наукових праць ЗДІА.* – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – Вип. 19. – с.28-31.

79. G. Fedorko, A. Pribylova, P. Futas, D. Baricova, P. Demeter. Compacting of fly dusts from cupola and electric arc furnace // *Metalurgija.* – 2012. –№51. – p.63-66.

80. Ильинков Д.В., Вольпин П.И., Румянцев В.П., Армтеманко С.А., Аливойводич М.Х., Задорожный В.Г., Варэн В.В., Рагулина Р.И., Емлин Е.И., Гасик М.И., Хитрик С.И., Климович Н.С., Новиков А.Я., Гасик Л.И. Брикет для получения силикоалюминия // Патент СССР SU454839. – 25.11.1977. – 3с.

81. Воробьев Х.С. Гипсовые вяжущие и изделия. – М.: Стройиздат, 1983. – 200с.

82. Гончарик В.Н., Губская А.Г., Коньков В.В. Разработка технологии производства гипсового вяжущего и изделий их природного и техногенного сырья в республике Беларусь// *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий.* – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук. НИИСФ, 2002. – с.57-62.

83. Касимов А.М., Леонова О.Е., Меняйло В.П., Кононов Ю.А. Утилизация фосфогипса с получением материала для производства гипсовых вяжущих. // *Экология и промышленность.* – 2007. – № 1. – с.24-27.

84. Бажов П. С., Свиридова М. Н., Танутров И. Н. Совершенствование технологии пирометаллургического получения германиевого концентрата из продуктов сжигания углей // *Цветные металлы.* – 2009. – № 2. – с.69-72.

85. Долганин Н.М. Вяжущие вещества на основе нитратов и сульфатов безобжигового окускования железных руд и концентратов. Автореф. дисс. кан.тех.наук. – Ленинград. – 1973. – 18с.

86. Вольхин А.И., Елисеев Е.И. Опытнo-промышленные испытания технологии брикетирования медьсодержащей шихты с естественным связующим – ангидритом // *Цветная металлургия.* – 2001. - № 2-3. – с.43-46.

87. Пивинский Ю.Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. М.: Металлургия, 1990. – 272с.

88. Беленко Е.В., Вахрушев Л.П., Воеводин Л.И., Горбачев В.А., Усольцев Д.Ю. Теоретические основы механизма формирования качества сырых окатышей с полимерными добавками в составе комплексного связующего // *Сталь*. – 2005. – №2. – с.15-17.
89. Guanzhou Qiu, Tao Jiang, Hongxu Li, Dianzuo Wang. Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. – 2003. – V.224. – No.8. – p.11-22.
90. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М. и др. Переработка сульфатного и сульфитного шёлоков. М.: Лесная промышленность, 1989. 360с.
91. Фельман Р.И., Скотникова Г.Н., Астафьев Ю.М. Брикетирование мелкозернистых материалов // *Цветная металлургия*. – 1990. - № 4. – с.17-18.
92. Машьянов А.К., Игумнов А.Н., Лебедев Д.А. Освоение технологии брикетирования Cu-Ni - концентрата обогатительной фабрики // *Цветные металлы*. – 2013. – № 10. – с.46-48.
93. Машьянов А.К. Влияние влажности шихты и содержания в ней связующего на прочностные характеристики брикетов / А.К. Машьянов., А.В.Голов, В.Ф. Козырев, А.Б. Портов, Л.Ш. Цемехман // *Цветные металлы*, 2007. – № 8. – с.34-38.
94. Машьянов А.К. Влияние химического и гранулометрического состава медно-никелевого концентрата на его брикетируемость / А.К. Машьянов, А.Н. Голов, В.Ф. Козырев, А.Б. Портов, Л.Ш. Цемехман // *Цветные металлы*. – 2007. – № 10. – с.41-46.
95. Машьянов А.К. Отработка технологии брикетирования рудного медно-никелевого концентрата на промышленных брикет-прессах / А.К. Машьянов, А.Н. Голов, В.Ф. Козырев, А.Б. Портов, Л.Ш. Цемехман // *Цветные металлы*. – 2007. – № 12. – с.37-42.
96. Машьянов А.К. Изучение влияния влажности шихты и содержания в ней связующего на прочностные характеристики и выход возврата при брикетировании рудного медно-никелевого концентрата комбината “Печенганикель” / А.К. Машьянов, Ю.А. Чумаков, А.Н. Голов, В.Ф. Козырев, А.Б. Портов, Л.Ш. Цемехман // *Неделя металлов в Москве. 13-17 ноября 2006 г. Сборник трудов конференций и семинаров. Москва, 2007. С.425-432.*
97. Фридман С.Э., Щербаков О.Н., Еремин Н.Я. Основы обогащения руд и углей и окускования концентратов. – М.: Недра, 1991. – 270с.
98. Бездежский Г.Н., Новокрещенова З.В., Сибирцев Ю.А., Уймин В.А., Шестакова Л.А. Исследование процесса холодного брикетирования пылей шахтной плавки окисленных никелевых руд // *Комплексное использование минерального сырья*. – 1990. – № 7. – с.43-47.

99. Яценко В.Н., Портов А.Б., Цемехман Л.Ш. Исследование брикетированности пирротиновых концентратов // Цветные металлы. – 2005. – № 2. – с.20-25.
100. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства: Учебник для ВУЗов. – М.: Колос, 1999. – 495 с.
101. Машьянов А.К., Игумнов А.Н., Портов А.Б., Цемехман Л.Ш. Брикетирование рудного медно-никелевого концентрата с использованием в качестве связующего водных растворов меляссы // Цветные металлы. – 2011. – №8-9. – с.145-150.
102. El-Hussiny N.A., Shalabi M.E.H. Studying the pelletization of rosseta ilmenite concentrate with coke breeze using molasses and reduction kinetics of produced pellets at 800-1150°C // Science of Sintering. – 2012. – №44. – p. 113-126.
103. Hala H., Abd El-Gawad, El-Hussiny N. A. , Wassf M. A., Kalifa M. G. , Iskander B. A., Shalabi M. E. H. Briquetting of Rosetta ilmenite ore with different organic binder and reduced it in hydrogen in the temperature range 800–1200°C // Gornictwo i Geoinzynieria (Poland). – 2009. – Vol. 33, № 4. – p.25-39.
104. Lopez F.A., Lopez-Delgado A. Enhancement of electric arc furnace dust by recycling to electric arc furnace // Journal of environment engineering. – 2002. – Vol.128, № 12. – p.1169-1174.
105. Маймур Б.Н., Носков В.А., Петренко В.И., Соколов В.М. Изучение процесса брикетирования пылеобразных никельсодержащих отходов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины. – 2007. – №.15. – с. 265-271.
106. Lask G.-W. Method of producing silicon using an electric arc low shaft furnace // United States Patent US5284641. – 08.02.1994. – 4p.
107. Lask G.-W. Apparatus for making green briquettes for forming Si, SiC or ferrosilicon // United States Patent US5073107. – 17.12.1991. – 5p.
108. Lask G.-W. Process for making green briquettes for forming Si or SiC // United States Patent US4975226. – 12.04.1990. – 7p.
109. Евменова Г.Л. Окускование угольной мелочи. Кемерово: КузГТУ. – 2012. – 54с.
110. Филиппенко Ю.Н., Складар П.Т., Харлова Е.В., Моисеенко О.В. Процессы агломерации, окускования, брикетирования и обогащения полезных ископаемых. // Збагачення корисних копалин. – 2012. – Вип. 50 (91). – с.50-56.
111. Александрова Т.Н., Рассказова А.В., Прохоров К.В. Разработка технологии брикетирования буроугольной мелочи на основе связующей композиции из

отходов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 9. – с.284-289

112. Солодов В.С., Папин А.В., Косинцев В.И., Сечин А.И. Технологические аспекты брикетирования дисперсных твердых углесодержащих материалов // Вестник КузГТУ. – 2013. – №3. – с.110-113.

113. Елишевич А.Т. Исследование диффузионных процессов при брикетировании угля // Обогащение полезных ископаемых. – 1973. – №13. – с.73-77.

114. Елишевич А.Т., Сальников В.Е. Влияние поверхностно-активных веществ на свойства нефтесвязующих и прочность каменноугольных брикетов // Обогащение полезных ископаемых. – 1972. – №11. – с.37-40.

115. Виничук Б.Г., Беленко Е.В., Шевченко В.М. Перспективы развития производства связующих добавок для железорудной отрасли России // Сталь. – 2005. – № 2 – с.17-18.

116. Горбачев В.А., Усольцев Д.Ю., Бормотова И.Г., Шаврин А.В., Сапожникова Т.В. Роль бентонито-полимерной композиции в формировании металлургических свойств окатышей // Сталь. – 2005. – № 2 – с.19-21.

117. Шаврин А.В., Бормортова И.Г., Шаврин С.В., Сапожникова Т.В. Использование бентонито-полимерных композиций – резерв улучшения металлургических свойств окатышей // Сталь. – 2005. – № 2 – с.21-23.

118. Kawatra S.K., Eiselle T.C., Gurtler J.A., Hardison C.A., Lewandowski K. Novel Binders and Methods for Agglomeration of Ore // Report of Michigan Technological University No. DE-FC26-03NT41924. – Houghton. – April 2004. – 24 p.

119. Lewandowski K.A., Kawatra S.K. Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching // International Journal of Mineral Processing. – 2009. – V.91. – No.3-4. – p.88-93.

120. Benner B.R., Goetzman H.E. Reagent use in the U.S. iron ore industry // Reagents for Better Metallurgy. Littleton (Colorado, USA). – 1994. – Ch.15. – p.569-581.

121. Heino J., Koskenkari T. Industrial ecology in the metallurgy industry. The Harjavalta industrial ecosystem // Proceedings of the Waste Minimization and Resources Use Optimization Conference. Ed. E. Pongracz. – University of Oulu (Finland). – 2004. – p.143-151.

122. Qiu G., Jiang T. Characterization of preparing cold bonded pellets for direct reduction using an organic binder // ISIJ International. – 2003. – V.43. – No.1. – p.20-25.

123. Qiu G., Jiang T. Interfacial characterizations of iron ore concentrates affected by binders // Powder Technology. – 2004. – V.139. – No.1. – P.1-6.
124. Кийк А.А., Пономаренко А.А., Маркова С.В., Кормина И.В. Опыт применения полимерных связующих в металлургическом производстве. // Сталь. – 2013. – № 7. – с.10-13.
125. Земляной К.Г., Кийк А.А., Маркова С.В., Кормина И.В. Инновационные органические связующие для металлургии и огнеупорного производства // Новые огнеупоры. – 2012. – № 11. – с.17-20.
126. Кийк А.А., Маркова С.В., Кормина И.В., Маркова Ж.С. Применение полимеров в производстве металлургических брикетов // Новые огнеупоры. – 2013. – № 3. – с.29-20.
127. Коновалов И.С. Совершенствование тепловой и газодинамической работы шахтных и медеплавильных печей: Автореф. Дисс. кан.тех.наук. – Екатеринбург. – 2012. – 24с.
128. Кийк А.А., Маркова С.В., Кормина И.В. Внедрение полимерных связующих в производство металлургических брикетов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. - № 57 (1030). – с.31-37.
129. Блехштейн Б.Л., Цемехман Л.Ш., Рябушкин М.И., Фомичев В.Б. Применение органических связующих в технологии переработки малосернистых никелевых концентратов методом агломерации // Цветные металлы. – 2011. – № 8-9. – с.150-155.
130. Вольхин А.И., Ермилов В.И., Серебренников Ю.Г., Елисеев Е.И., Матюхин В.И. Термообработка брикетов на торфяном связующих // Цветная металлургия. – 2010. - № 10. – с.25-29.
131. Sah R., Dutta S.K. Effects of binder on properties of iron ore-coal composite pellets // Mineral processing and extractive metallurgy review. – 2010. – Vol.31, № 2. – p.73-85.
132. Shoko N.R., Malila N.N. Briquetted chrome ore fines utilization in ferrochrome production at Zimbabwe alloys // Proceedings in tenth international ferroalloys congress INFACON X. – Cape Town, South Africa. – 2004. – p.291-299.
133. Singh A.K. Preparation and characterization of sponge iron: A thesis on Master of technology. – Patiala, Thapar University. – 2009. – 65p.
134. Major B.J., Radu G. Briquette binder composition // United States Patent US6013166. – 11.01.2000. – 9p.
135. Тютников Ю.Б., Орехов В.Н. Исследование процесса брикетирования мелких классов хромитовой руды и получения коксорудных брикетов с

применением термореактивного связующего // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – № 9 (67). – с.39-47.

136. Белкин А.С., Цейтлин М.А., Зуев Г.П., Загайнов Л.С., Мурат С.Г., Ситнов А.Г. Дорофеев Г.А. Брикет для металлургического производства // Патент России RU 2142018. – 27.11.1999.

137. Rieschel H. Present state of sponge iron briquetting in consideration of selection of the binding agent // Metallurgical plant and technology. – 1981. – № 2. – p.14-24.

138. Winship W.D. Briquetting – an economic solution for production of Ferrochrome in South Africa // Proceedings of 15 Biennial conference of Instate of briquetting and agglomeration. – Montreal. – 1977. – p.139-152.

139. Sarma B., Downing K.B., Aukrust E. Recovery of iron, carbon and zinc steel plant waste oxides using the AISI-DOE post combustion smelting technology // Conference: 79. steelmaking and 55th ironmaking conference, Pittsburgh, PA. – 1996. – p.24-27.

140. Ahmed Y.M.Z., Mohamed F.M. Variation in physic-chemical properties of iron oxide pellets using bentonite with calcium hydroxide as binder // Metallurgia Italiana. – 2005. – vol.97, №11-12. – p.31-37.

141. Носков В.А., Тогобицкая Д.Н., Маймур Б.Н., Мороз В.Ф., Петренко В.И. Оценка влияния химического состава шихты и технологических параметров брикетирования на процесс уплотнения и свойства брикетов с учетом параметров межатомного взаимодействия // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІСМ НАН України. – 2007. – № 15. – с.272-278.

142. Носков В.А. Механизм формирования очага деформации при брикетировании мелкофракционных шихт в валковых прессах. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – №2. – с.137-139.

143. Зиборов К.А., Ванжа Г.К., Максименко Е.В. Исследование факторов, влияющих на активный износ формирующих элементов бандажей вальцовых прессов // Материалы Международной научно-практической конференции. – 2011. – с.245-253.

144. Виноградов Г.А., Каташинский В.Л. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. М.: Машиностроение. – 1979. – 223с.

145. Притыкин Д.П. Механическое оборудование заводов цветной металлургии в 3-ч частях. Часть 1. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов. М.: Металлургия. – 1988. – 392с.

146. Виноградов Г.А., Радомысельский И.Д. Прессование и прокатка металлокерамических материалов. М.: Машгиз. – 1963. – 200с.
147. Цукерман С.А. Порошковая металлургия. М.: Издательство Академии Наук СССР. – 1958. – 158с.
148. Носков В.А., Ващенко С.В. Об использовании принципа многоступенчатого уплотнения при брикетировании мелкофракционных шихт // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. –1999. – №4. – с.281-285.
149. Озеров С.С., Портов А. Б., Цемехман Л. Ш. Брикетирование мелкозернистых материалов // Цветные металлы. – 2014. – №. 7 – с.26-31.
150. Борок Б. А., Ольхов И. И, Порошковая металлургия. М: Металлургиздат. – 1948. – 144с.
151. Яценко В.Н., Блатов И.А., Зудин Ю.Г., Клементьев В.В., Портов А.Б., Цемехман Л.Ш. О брикетировании богатых медно-никелевых флотоконцентратов // Цветные металлы. – 2001. – № 2. – с.56- 61.
152. Фризен В.Г. Исследование и разработка технологий брикетирования марганцевых и никелевых продуктов с учетом влияния тонких классов: Автореф. Дисс. кан.тех.наук. – Магнитогорск. – 2004. – 22с.
153. Маерчак П. Производство окатышей. М: Металлургия. – 1982. – 232с.
154. Hirsch U. Roller-press agglomeration // Metal and Wood Recovery. – 2011. – №.1. – р.65-70.
155. Ленёв Л.А. К вопросу об энергетических закономерностях брикетирования // Материалы Уральской горнопромышленной декады. - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. – с.306-307.
156. Озеров С.С., Портов А.Б., Блехштейн Б.Л., Цемехман Л.Ш., Фомичев В.Б. Исследование брикетируемости заскладированного просора песчаника Кайерканского угольного разреза. Сообщение 1. // Цветные металлы. – 2013. – №.3 – с.27-30.
157. Озеров С.С., Портов А.Б., Блехштейн Б.Л., Цемехман Л.Ш., Фомичев В.Б. Исследование брикетируемости заскладированного просора песчаника Кайерканского угольного разреза. Сообщение 2. // Цветные металлы. – 2013. – №.4 – с.42-46.
158. Скрипник Е.С., Золотов М.С. Работа адгезии и адгезионная прочность акриловых клеев // Науково-технічний збірник. – 2011 – №101. – с.41-46.

159. Кобец Л.П., Деев И.С. Структурообразование в термореактивных связующих и матрицах композиционных материалов на их основе // ЖРХО им. Д. И. Менделеева. – 2010. – Т.54, №1. – с.67-78.
160. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. Москва: МГУ имени М. В. Ломоносова. – 2010. – 68с.
161. Москва В.В. Понятие кислоты и основания в органической химии // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 12. – с.33-40.
162. Pauling L. The nature of chemical bond. Cornell University press – Ithaca, NY. – 1966. – 644p.
163. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. М.: Химия. – 1991. – 240с.
164. Лыков А.В. Теория сушки. Энергия. – 1968. – 472с.
165. Машьянов А.К. Разработка технологии брикетирования сульфидного высокомагнезимального медно-никелевого сырья: Диссертация на соискание ученой степени кан. тех. наук. – СПб, НМСУ «Горный» – 2011. – 159с.
166. Еремин А.Я., Бабанин В.И., Козлова С.Я. О формировании требований к показателям механической прочности брикетов со связующим // Metallurg. – 2003. – №11. – с.32-38.
167. Разработка технологии брикетирования медно-никелевых концентратов: Отчет / ОАО «Институт Гипроникель»; руководитель работы А.Б. Портов. – СПб., 2006. – 159с.
168. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: ИПК. Издательство стандартов. – 2001. – 8с.
169. Lask G.-W. Apparatus for making green briquettes for forming Si, SiC or ferrosilicon // United States Patent US5073107. – 17.12.1991. – 5p.
170. Земляной К.Г. Временные технологические связующие в промышленности // Сборник опубликованных статей и материалы научно-практических конференций. ООО «Полипласт Новомосковск» - Новомосковск. – 2012. – с.54-63.
171. Маркова С.В., Кормина И.В., Земляной К.Г. Инновационные вспомогательные материалы для горнодобывающей, металлургической и огнеупорной промышленности // Материалы 4-го международного конгресса «Цветные металлы 2012». – Москва. – 2012. – с.640-651.

Приложение А

Таблица А.1 – Влияние давления прессования на прочность брикетов

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность, %	Давление прессования, кН
		ЛСТ	Comprex		Текущая	Через сутки		
1	3	3	7	1,22	149,12	277,76	0,77	50
2					135,04	274,13	0,60	48,1
3					115,84	236,80	0,68	46,2
4					96,64	192,64	0,68	42,5
5					83,84	180,80	0,72	37,8
6					69,12	104,53	0,83	35

Приложение Б

Таблица Б.1 – Изменение высоты брикетов в процессе их вылеживания в естественных условиях³

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Высота брикета, мм				
		ЛСТ	Comprex		Текущая	Через 3 часа	Через сутки	Через 2 суток	Через 3 суток
1	4	2,5	6,5	1,39	13,032	13,012	12,976	12,964	12,962
2				0,92	13,406	13,386	13,376	13,366	13,366
3				2,45	14,600	14,582	14,537	14,513	14,503
4				1,63	13,800	13,790	13,750	13,736	13,730
5				0,15	12,524	-	12,590	12,602	12,602

³ Измерение высоты брикетов проводилось с помощью микрометра «тип МК; модель 102» производства завод «Калибр» (СССР). Отбиралась произвольная проба из 5 брикетов, у каждого из которых измерялась высота. Далее брикеты отправлялись на хранение, и после заданного промежутка времени измерения повторялись.

Приложение В

Таблица В.1 - Результаты брикетирования просора песчаника месторождения КУР УНГП с различными связующими

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
1	1	Без связующего	-	7,92	20,07	72,64	-	Залипание ячеек
2				4,76	38,16	80,32	21,72	
3				2,91	19,89	48,64	31,25	
4				4,00	34,71	72,00	23,00	
5				5,61	35,82	80,24	17,00	
6	1	Ангидрит	5	2,43	22,24	59,52	18,81	Ангидрит обожжен при 800 ⁰ С в течение 4 часов
7				3,85	38,72	79,68	17,38	
8				4,20	32,96	77,44	14,52	
9				4,53	40,32	80,00	14,19	
10	2	Ангидрит + 3%CaCl ₂	5	3,07	31,36	75,52	18,33	Консистенция «молоко»
11			10	3,86	66,56	96,32	18,41	
12	2	Ангидрит	10	4,30	34,24	88,64	17,27	Консистенция «молоко»
13	1	Ангидрит	10	5,00	57,6	81,83	12,95	
14				7,17	39,68	77,6	5,55	
15				2,81	33,92	75,02	19,77	
16				4,04	37,28	82,24	17,73	
17	1	Ангидрит	10	2,67	38,40	78,08	19,55	Ангидрит обожжен при 800 ⁰ С в течение 4 часов
18				3,99	38,08	76,16	18,18	
19				6,22	42,24	89,60	9,86	
20				4,49	39,68	88,00	14,77	
21	1	Ангидрит	15	5,87	48,32	89,28	8,04	
22				3,63	62,72	92,16	25,17	
23				5,28	75,20	107,84	15,22	
24				4,05	74,56	110,72	15,87	

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
25	2	Ангидрит	15	3,98	74,24	105,12	17,61	
26	3	Ангидрит + 3% CaCl ₂	15	1,51	32,32	83,84	26,52	Сильное пыление
27	1	Ангидрит	15	3,70	33,60	68,48	19,57	Ангидрит обожжен при 800 ⁰ С в течение 4 часов
28				4,65	34,56	99,20	15,22	
29				3,01	49,82	92,41	-	
30				6,32	56,06	96,34	-	
31	1	Ангидрит	20	3,87	101,44	129,28	16,67	
32	1	Гашеная известь	5	2,74	32,32	77,12	22,62	
33				3,84	35,52	91,44	17,62	
34				4,88	41,80	90,56	18,33	
35				5,31	38,08	95,36	17,14	
36	1	Гашеная известь	10	4,03	43,60	109,76	17,95	
37				2,83	32,76	85,12	19,32	
38	2	Гашеная известь	10	5,92	44,08	115,52	17,95	Консистенция «молоко»
39	1	30% Известь + 70% Ангидрит	10	2,95	27,64	74,31	-	
40				5,14	29,44	85,12	-	
41				3,81	32,64	83,52	-	
42	1	50% Известь + 50% Ангидрит	10	4,06	42,56	107,84	-	
43				5,32	30,72	108,16	-	
44				2,15	22,32	76,48	-	
45				3,23	35,52	91,20	-	
46	1	Гашеная известь	15	4,03	55,68	119,64	19,30	
47				3,05	44,88	100,48	17,83	
48				4,71	58,52	129,60	18,74	
49	2	Гашеная известь	15	3,93	56,00	124,12	20,87	Консистенция «молоко»
50	1	Гашеная известь	10	3,01	54,72	-	-	Измельченный просор

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
51	1	Гашеная известь	10	3,40	36,82	94,72	-	30% измельченного просора + 70% грубого просора
52				3,64	35,20	84,16	17,73	
53				6,66	39,68	84,16	19,55	
54				4,93	51,80	108,80	18,41	
55				6,44	38,72	101,76	21,14	
56	1	Гашеная известь	10	4,98	48,00	99,60	17,65	20% измельченного просора + 80% грубого просора
57				3,67	37,12	93,76	17,65	
58				4,36	42,56	93,40	17,73	
59				3,60	35,52	70,08	17,95	
60	1	Гашеная известь	10	3,40	32,02	68,81	27,00	10% измельченного просора + 90% грубого просора
61				5,62	44,20	89,92	24,00	
62				4,75	42,56	87,36	15,91	
63				3,77	33,60	85,76	15,45	
64	1	Гашеная известь	10	3,20	62,12	-	-	65% измельченного просора + 35% грубого просора
65	1	Гашеная известь + 3% CaCl ₂	10	4,31	45,44	107,2	15,91	
66				3,46	39,04	101,68	14,32	
67				3,83	42,16	112,80	15,68	
68				4,36	45,44	115,76	15,00	
69				5,12	44,68	119,52	11,59	
70	1	Портландцемент	10	2,91	24,64	52,70	24,09	
71				4,26	30,00	70,30	15,91	
72				4,74	26,70	66,48	14,32	
73				4,59	29,10	67,00	14,77	
74				2,72	22,70	45,00	17,50	

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
75	1	Портландцемент + 3% CaCl ₂	10	4,72	28,3	79,68	14,64	
76				4,32	33,10	79,68	18,64	
77				2,93	35,20	70,08	19,68	
78				4,09	32,8	62,72	13,64	
79				3,51	28,16	86,08	18,18	
80				2,20	27,20	51,2	24,36	
81	1	Портландцемент	15	3,72	31,36	72,00	17,61	
82				2,78	24,96	46,72	24,13	
83				4,60	21,76	70,00	16,65	
84				3,30	27,52	64,32	20,65	
85				3,97	32,00	72,70	17,39	
86				4,66	28,80	70,40	16,00	
87	1	Портландцемент + 3% CaCl ₂	15	3,90	44,96	74,24	18,00	
88				4,84	26,56	75,52	16,26	
89				2,81	33,28	68,80	22,61	
90				4,05	44,48	86,08	19,57	
91				3,61	32,64	83,20	20,00	
92	1	Портландцемент	20	4,11	32,00	73,70	19,38	
93				3,67	32,00	70,60	22,08	
94				1,89	22,40	30,60	26,46	Сильное пыление
95				3,74	32,60	76,00	21,04	
96	1	Портландцемент + 3% CaCl ₂	20	3,84	38,68	87,68	21,88	
97				2,88	35,16	74,56	24,17	

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
98	1	Каолин	10	4,44	51,20	75,20	17,95	
99				1,81	26,24	40,64	22,95	Сильное пыление
100				3,52	47,32	73,24	20,02	
101				2,87	41,04	61,36	25,00	
102				5,86	48,82	72,36	14,86	
103	3	Алебастр	10	3,98	33,02	68,16	16,59	
104	1			2,77	27,20	50,24	21,14	
105	1			5,69	31,73	69,76	12,41	
106	3			4,62	32,32	75,52	15,45	
107	3			4,02	28,80	76,48	17,09	
108	3			5,11	36,16	84,80	14,32	
109	1	10% водный раствор сульфат никеля	1	4,36	33,62	89,92	-	
110				2,72	29,76	78,72	-	
111				4,34	35,21	96,02	-	
112				4,16	39,68	102,40	-	
113				5,24	34,56	89,92	-	
114	1	16% водный раствор сульфат никеля	2	6,36	25,52	92,48	10,50	
115				2,63	33,60	95,04	18,50	
116				4,21	41,42	126,42	14,25	
117				4,11	40,20	134,72	13,75	
118				4,80	33,28	132,48	14,75	
119				4,60	41,28	136,32	13,75	
120				3,63	32,96	118,08	15,00	
121				4,49	39,20	136,02	18,25	
122				3,36	29,44	120,02	16,00	

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание	
					Текущая	После сушки			
123	1	20% водный раствор сульфат никеля	2,5	4,34	42,31	143,24	18,00		
124				3,56	37,76	144,96	20,00		
125				3,12	37,70	126,60	14,50		
126	2	50% водный раствор сульфат никеля	2,5	5,11	35,82	138,82	13,00		
127				4,52	46,08	155,28	16,00		
128				3,69	35,80	141,12	19,50		
129	1	50% водный раствор сульфат меди	2,5	2,50	27,84	92,48	20,00		
130				3,61	39,68	132,48	16,50		
131				3,78	36,48	129,28	15,75		
132				3,19	33,92	114,56	18,00		
133				2	4,73	29,44	132,80	15,25	
134					5,38	33,92	113,92	12,25	
135	1	38,9% водный раствор жидкого стекла	5	4,21	32,32	148,16	34,75		
136	2			6,20	27,52	113,12	18,62		
137	1			3,13	23,36	108,02	46,00		
138	1			3,20	20,16	126,94	41,33		
139	2			5,81	24,32	131,84	19,00		
140	2			5,26	26,38	126,90	25,84		
141	2			6,03	24,96	79,68	16,50		
142	1	38,9% водный раствор жидкого стекла	3	3,93	25,80	84,04	33,60		
143	1			3,35	22,72	69,12	39,25		
144	1			4,77	26,88	90,24	27,80		
145	1			3,81	27,20	110,40	32,40		
146	2			5,80	23,80	116,60	18,00		
147	1			38,9% водный раствор жидкого стекла	7	4,35	31,04	164,80	40,67
148	2	5,33	30,02			152,02	34,00		

Продолжение таблицы В.1

Номер опыта	Методика подготовки шихты	Вид связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Выход возврата, %	Примечание
					Текущая	После сушки		
149	1	49% водный раствор жидкого стекла	7	2,55	17,72	119,60	60,00	
150	2			4,60	30,72	158,08	33,50	
151	1	50% водный раствор лигносульфоната	5	3,49	87,04	220,48	11,00	
152			7	3,61	109,44	252,02	10,33	
154			3	3,55	46,08	160,00	21,47	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

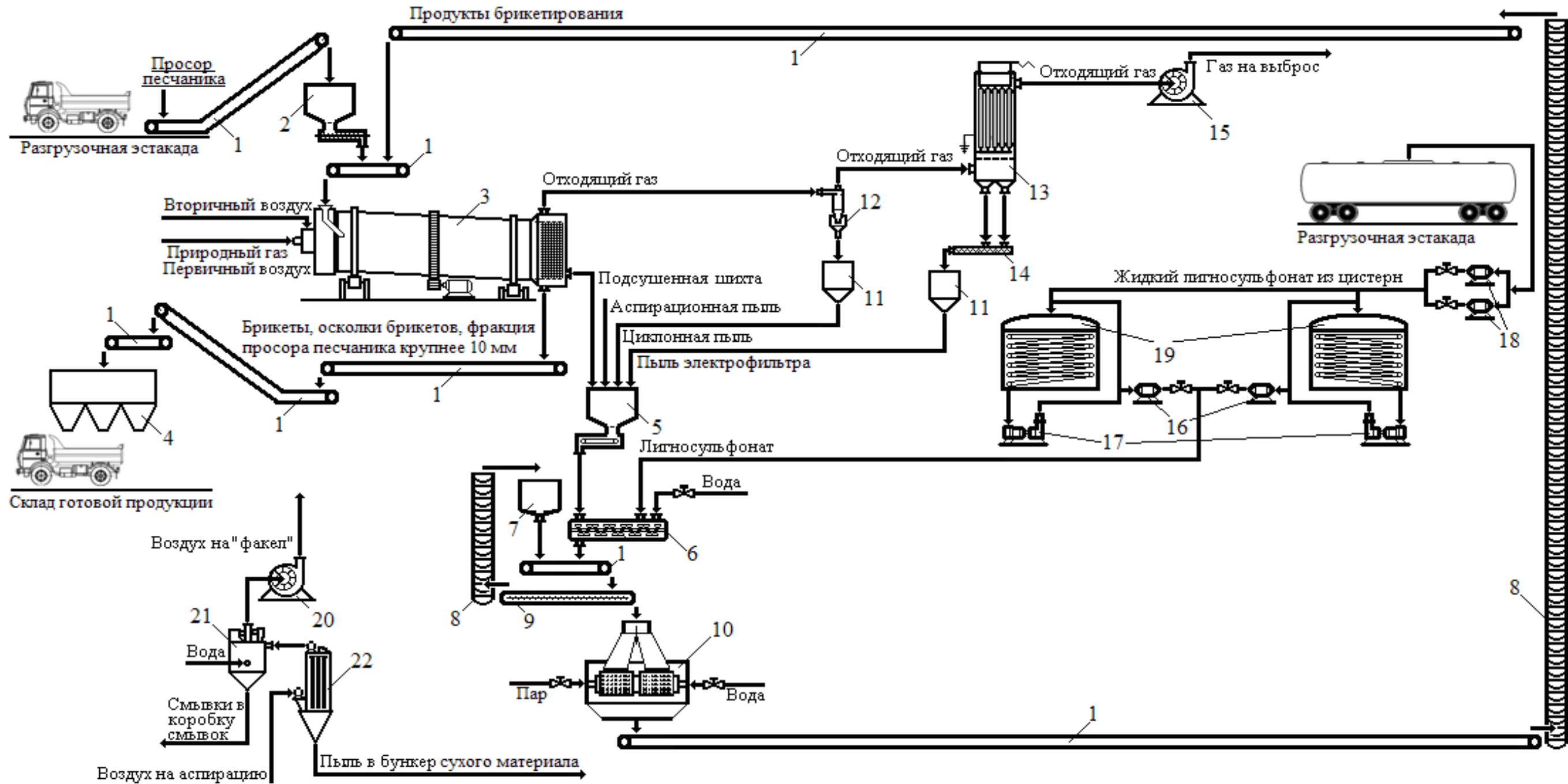


Рисунок Г.1 – Технологическая схема производства брикетов из просора песчаника месторождения КУР УНГП.

1 – ленточные транспортеры, 2 – приемный бункер просора песчаника со шнековым дозатором, 3 – сушильный барабан с газовой горелкой и бутарой, 4 – бункер готовой продукции, 5 – бункер сухого материала, 6 – шнековый смеситель, 7 – бункер готовой шихты, 8 – ковшовые элеваторы, 9 – скребковый транспортер (редлер), 10 – валковый брикет-пресс, 11 – пылевые бункера, 12 – циклон, 13 – электрофильтр, 14 – шнековый транспортер, 15 – дымосос, 16 - насос-дозатор для подачи лигносульфоната, 17 – центробежный насос кольцевой линии подачи лигносульфоната, 18 - насосы для откачки связующего из цистерн, 19 - приемные баки жидкого лигносульфоната, 20 – вентилятор, 21 - рукавный фильтр, 22 – «мокрый» пылеуловитель

Приложение Д

Таблица Д.1 – Результаты брикетирования медно-никелевого концентрата с использованием водных растворов сульфатов в качестве связующего

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
1	-	-	-	3,55	42,24	100,48	2,24	Чистый концентрат
2	1	Al ₂ (SO ₄) ₃	10+2	1,22	81,96	-	-	
3	1			3,74	52,89	-	-	Зависание материала
4	1			3,19	76,80	-	-	
5	1			2,70	80,04	-	-	
6	1			2,16	87,70	-	-	
7	2			12	2,77	60,82	124,32	1,60
8	1		14+2	3,10	97,30	136,52	2,95	
9	1		16+2	2,97	112,30	156,20	2,79	
10	1		18+2	3,18	100,20	167,74	2,48	
11	1		9+3	2,86	88,85	174,70	1,82	
12	1		8+4	2,85	90,20	173,45	1,96	
13	1		7+5	2,79	87,73	141,41	2,42	
14	1		6+6	3,08	71,00	122,50	2,26	
15	1		Na ₂ SO ₄	10+2	3,00	65,92	90,58	0,94
16	1	0,59			55,70	59,51	0,58	Сильное пыление
17	1	1,56			58,20	69,72	0,89	
18	1	3,77			66,96	95,16	1,55	Нестабильный режим
19	1	2,49			64,34	80,02	0,92	
20	1	14+2		2,13	61,63	86,90	1,03	
21	1	12+2		1,72	59,86	84,34	0,83	
22	1	16+2		2,38	62,46	91,50	0,95	
23	1	18+2		2,16	64,80	98,64	0,99	
24	1	8+4		1,72	61,42	86,49	0,64	

Продолжение таблицы Д.1

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
25	1	Na ₂ SO ₄	7+5	2,07	64,33	94,80	1,19	
26	2		12	1,85	51,80	63,10	0,79	
27	1		9+3	2,44	59,16	81,41	1,66	
28	2	NiSO ₄	10	2,26	85,44	112,64	2,68	
29	2			3,47	103,36	190,08	2,65	
30	2			4,32	72,96	198,08	2,92	
31	2			1,86	69,12	87,04	2,66	
32	2			3,04	129,92	183,04	2,48	
33	2		11	3,54	136,08	194,40	2,87	
34	2		12	3,33	151,36	170,24	2,97	
35	2		13	3,81	169,28	209,92	3,12	
36	2		12	2,30	122,24	124,16	2,81	
37	2			4,66	102,40	204,48	3,09	
38	2			4,55	106,56	212,96	3,08	
39	2			3,73	142,48	199,20	3,03	
40	2			3,75	133,44	190,08	3,11	
41	2		CuSO ₄	12	2,64	109,12	155,43	2,77
42	2	18		2,95	133,76	162,40	3,30	
43	2	14		3,21	120,96	163,66	3,23	
44	2	16		3,97	118,72	181,03	2,99	
45	2			2,04	98,24	96,91	3,20	
46	2			3,19	134,40	167,31	3,27	
47	2			2,84	109,12	144,86	2,67	
48	2	FeSO ₄	12	3,56	92,48	115,32	2,52	
49	2		16	3,67	124,16	145,92	2,54	
50	2		18	3,20	135,04	153,28	2,36	

Продолжение таблицы Д.1

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
51	2	FeSO ₄	20	3,35	144,32	155,96	2,37	
52	2		14	3,52	107,52	127,36	2,48	
53	2			4,05	98,68	129,36	2,83	
54	2			2,81	90,24	95,04	2,28	
55	2			2,36	75,20	77,12	2,12	
56	2	Fe ₂ (SO ₄) ₃	10	2,41	94,72	-	-	
57	2		11	2,45	145,28	-	-	
58	2			3,00	128,00	244,48	2,32	
59	2		13	2,94	155,22	269,44	2,41	
60	2		12	4,20	95,04	169,28	2,78	Зависание материала
61	2			2,30	160,64	212,62	2,39	
62	2			2,08	145,07	171,12	1,88	
63	2			1,37	72,32	75,20	1,80	
64	2			2,81	151,68	294,68	2,67	
65	2		2,77	149,76	268,48	2,35		
66	2	Раствор вскрытия железистого кека	7,5	0,96	58,14	-	-	
67	2			1,38	73,07	-	-	
68	2			2,57	77,03	-	-	
69	2			3,02	66,20	-	-	
79	2			2,30	84,67	-	-	
71	2		13	2,20	117,44	-	-	
72	2			3,35	75,20	-	-	
73	2			2,22	119,20	-	-	
74	2			3,12	95,04	-	-	

Продолжение таблицы Д.1

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
75	2	РВЖК	13	1,30	80,50	-	-	
76	2			0,63	37,56	-	-	
77	2		15	2,16	129,66	162,60	3,49	
78	2		17	2,08	145,10	190,56	3,44	
79	2			2,24	144,31	-	-	
80	2	Серная кислота	10	2,75	130,88	178,56	3,67	
81	2		20	2,99	180,16	224,00	4,36	
82	2		14	3,16	140,16	251,84	3,76	
83	2		16	3,59	148,48	275,84	4,12	
84	2		14	3,29	160,58	245,76	4,21	

Таблица Д.2 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием водных растворов сульфатов в качестве связующего на их прочность

Номер опыта	Прочность, кгс/брикет								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
2	81,90	-	-	138,90	139,90	-	-	-	-
3	52,80	-	-	133,10	159,00	-	-	-	-
4	76,80	-	-	141,10	160,30	-	-	-	-
5	80,00	-	-	153,00	167,90	-	-	-	-
6	87,70	-	-	162,40	173,80	-	-	-	-
15	65,92	90,58	98,62	102,41	-	-	-	-	-
16	55,70	59,51	67,85	69,20	-	-	-	-	-
17	58,20	69,72	70,63	81,35	-	-	-	-	-
18	66,96	95,16	102,40	117,89	-	-	-	-	-
19	64,34	80,02	87,02	87,72	-	-	-	-	-
34	151,36	170,24	170,24	176,00	-	-	-	175,36	174,72
36	122,24	124,16	124,16	125,44	-	-	-	121,60	122,88
37	102,40	204,48	234,24	247,04	-	-	-	245,36	248,96
38	106,56	212,96	239,08	245,76	-	-	-	252,80	251,32
39	142,48	199,20	204,80	206,72	-	-	-	213,76	213,12
41	109,12	155,43	183,67	184,23	-	-	198,40	-	-
42	133,76	162,4	163,20	-	-	-	-	-	-
43	120,96	163,66	177,37	183,77	-	-	200,32	-	-
46	134,40	167,31	169,60	170,97	-	-	185,60	-	-
52	107,52	127,46	132,48	133,12	134,08	-	-	-	-
58	128,00	244,48	273,28	-	-	296,00	-	-	-
59	155,52	269,44	291,52	-	-	366,72	-	-	-
60	95,04	169,28	271,20	-	-	314,84	-	-	-
65	149,76	268,48	300,00	-	-	367,36	-	-	-
78	145,10	190,56	194,00	-	-	-	201,80	196,4	-
84	160,58	245,76	297,60	298,88	-	-	305,41	-	-

Таблица Д.3 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием водных растворов сульфатов в качестве связующего на их остаточную влажность

Номер опыта	Остаточная влажность, %								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
2	1,22	-	-	1,87	1,90	-	-	-	-
3	3,74	-	-	2,47	2,31	-	-	-	-
4	3,19	-	-	2,39	2,28	-	-	-	-
5	2,70	-	-	2,05	2,01	-	-	-	-
6	2,16	-	-	1,92	1,90	-	-	-	-
15	3,00	0,94	0,81	0,72	-	-	-	-	-
16	0,59	0,58	0,56	0,52	-	-	-	-	-
17	1,56	0,89	0,67	0,55	-	-	-	-	-
18	3,77	1,55	1,06	0,73	-	-	-	-	-
19	2,49	0,92	0,83	0,60	-	-	-	-	-
34	3,33	2,97	3,08	3,36	-	-	-	3,24	3,33
36	2,30	2,81	2,89	3,11	-	-	-	3,28	3,23
37	4,66	3,09	2,98	3,07	-	-	-	3,15	3,26
38	4,55	3,08	3,10	3,25	-	-	-	3,15	3,23
39	3,73	3,03	3,11	3,28	-	-	-	3,16	3,20
41	2,64	2,67	2,72	2,69	-	-	2,65	-	-
42	2,95	3,20	2,76	-	-	-	-	-	-
43	3,21	3,23	2,94	2,93	-	-	2,86	-	-
46	3,19	3,27	2,81	2,80	-	-	2,70	-	-
52	3,52	2,48	2,17	1,73	1,8				
58	3,00	2,32	2,26	-	-	2,18	-	-	-
59	2,94	2,41	2,38	-	-	2,31	-	-	-
60	4,20	2,78	2,31	-	-	2,14	-	-	-
65	2,77	2,35	2,32	-	-	2,25	-	-	-
78	2,08	3,44	3,51	-	-	-	3,60	3,79	-
84	3,29	4,21	4,19	4,27	-	-	4,22	-	-

Таблица Д.4 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Известь

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Известь		Текущая	Через сутки		
1	4	9	1	1,54	116,48	143,68	1,56	
2	4			1,89	123,84	149,12	1,56	
3	4			2,56	112,64	142,72	1,65	
4	4			1,98	124,16	152,96	1,48	
5	4	13,5	1,5	2,08	127,68	149,12	1,79	
6	4	9	1	2,32	80,64	117,12	1,71	Предварительная выдержка шихты в течение 3 часов
7	4			0,44	43,84	55,36	0,79	Известковое молоко
8	4			1,88	116,16	146,24	1,68	Известковое молоко

208

Таблица Д.5 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Стоки ЦЭН-1

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Стоки ЦЭН-1		Текущая	Через сутки		
1	4	10	2	2,26	121,92	166,08	1,48	
2	4	8	4	1,86	93,76	152,00	1,04	
3	3	10	2	2,01	132,16	170,24	0,97	
4	3	6	6	1,47	77,76	132,48	1,09	
5	3			2,55	71,04	-	-	
6	3	10	2	2,40	131,52	-	-	
7	3	9	0,1	2,17	131,20	169,92	1,58	Стоки в твердом виде

Таблица Д.6 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	NiSO ₄		Текущая	Через сутки		
1	4	6	6	3,04	172,16	198,40	2,58	
2	4			1,79	100,68	110,08	1,83	
3	4			4,11	113,92	184,80	2,98	
4	4			2,55	145,80	149,76	2,58	
5	4			3,42	170,88	206,72	2,83	
6	4	4	8	3,59	163,20	203,84	3,22	
7	4	8	4	2,99	144,00	168,96	2,53	
8	4	4	8	3,05	151,36	185,28	2,95	
9	4			2,55	84,16	112,00	2,69	
10	4			4,30	107,84	205,44	3,13	
11	4	2	10	3,30	129,60	160,64	3,25	
12	4	10	2	3,55	117,12	167,04	2,38	
13	4	8	4	3,52	128,96	179,52	2,37	
14	4			2,45	98,56	104,32	2,59	
15	4			3,20	144,32	172,48	2,77	
16	4	5	5	3,58	134,72	195,84	2,70	
17	4	4	4	3,03	121,28	174,08	2,31	
18	4	3,5	7	3,37	128,00	152,96	2,64	
19	4	3	6	3,30	114,24	135,04	2,85	
20	4	2,5	5	3,61	95,36	111,36	2,26	
21	4	5,5	5,5	3,34	149,76	188,80	2,81	
22	4	5	5	3,94	120,96	174,72	2,59	
23	4			2,84	143,44	166,32	2,48	
24	4			2,26	106,88	139,96	2,26	
24	4			3,51	162,24	200,96	2,67	
26	4			3,66	145,60	191,36	2,60	
27	3			3,53	158,72	204,16	2,66	

Таблица Д.7 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄ на их прочность

Номер опыта	Прочность, кгс/брикет						
	Текущая	Через сутки	Через 3 суток	Через 4 суток	Через 5 суток	Через 6 суток	Через 7 суток
16	134,72	195,84	208,64	209,28	207,36	208,64	206,72

Таблица Д.8 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-NiSO₄ на их остаточную влажность

Номер опыта	Остаточная влажность, %						
	Текущая	Через сутки	Через 3 суток	Через 4 суток	Через 5 суток	Через 6 суток	Через 7 суток
16	3,58	2,70	2,54	2,43	2,33	2,26	2,27

Таблица Д.9 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-CuSO₄

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	CuSO ₄		Текущая	Через сутки		
1	4	7	7	3,26	127,84	191,68	2,11	
2	4	4	10	3,05	122,88	190,72	2,84	
3	4	12	2	3,06	121,60	190,40	2,20	
4	4	10	4	2,52	147,84	-	-	
5	4			2,96	129,92	-	-	
6	4			3,12	128,64	205,76	1,96	
7	4			1,90	114,24	-	-	

Таблица Д.10 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-FeSO₄

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	FeSO ₄		Текущая	Через сутки		
1	4	2	12	3,01	105,60	-	-	
2	4	5	9	3,51	105,84	-	-	
3	4	9	5	3,28	92,80	-	-	
4	4	12	2	3,01	91,52	-	-	
5	4	10	4	3,51	99,84	-	-	
6	4	7	7	3,02	125,56	-	-	
7	4			3,59	99,20	-	-	
8	4			2,54	112,32	-	-	
9	4			1,69	122,88	-	-	
10	4			1,87	132,48	-	-	

211

Таблица Д.11 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Fe₂(SO₄)₃

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Fe ₂ (SO ₄) ₃		Текущая	Через сутки		
1	4	5,5	5,5	2,38	137,28	209,60	1,95	
2	4	2	9	2,68	127,04	208,88	2,46	
3	4	9	2	2,53	132,16	263,36	1,79	
4	4	4	7	2,41	134,08	199,77	2,54	
5	4	7	4	2,49	126,72	230,40	1,82	

Таблица Д.12 – Брикетирование с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Сорпех А12

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Сорпех		Текущая	Через сутки		
1	1	-	12	2,76	145,92	242,56	1,00	
2	1	-	8+4	4,53	100,48	191,36	0,99	
3	1	-	10+2	2,89	113,92	186,88	0,92	
4	4	2	6	1,47	126,40	200,96	0,89	
5	4	4	4	1,19	104,32	183,68	0,55	
6	4	6	2	1,28	101,76	182,40	0,86	
7	2	-	8	1,67	106,24	167,68	0,51	
8	4	3	5	1,43	106,24	-	-	
9	4	5	3	1,28	111,65	195,20	0,94	
10	4	10	2	1,93	140,80	-	-	
11	4	6	6	2,88	127,68	202,24	1,42	
12	4	8	4	2,56	135,36	207,36	1,48	
13	4	4	8	1,88	165,76	224,64	0,93	
14	4	2	10	2,16	153,60	243,20	0,92	
15	4	3	7	1,89	144,00	238,10	1,11	
16	4	4	6	1,92	139,52	203,50	1,05	
17	4	2	8	1,87	131,20	-	-	
18	2	-	10	1,56	124,80	269,44	0,58	
19	4	5	5	1,39	138,12	231,68	0,69	
20	4	7	3	0,93	128,96	172,80	0,71	

Продолжение таблицы Д.12

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Сопрех		Текущая	Через сутки		
21	4	4	2	1,22	86,04	167,68	0,67	
22	4	3	3	1,21	87,12	168,32	0,66	
23	4	2	4	1,20	89,60	170,40	0,52	
24	2	-	6	1,25	88,00	169,52	0,46	
25	4	1,5	4,5	1,72	99,20	213,76	0,66	
26	4			2,34	82,96	201,6	0,57	
27	4			1,98	94,24	204,16	0,61	
28	4			3,03	55,80	151,52	0,64	
29	4			0,82	58,56	97,92	0,61	
30	4			7	2	1,41	115,42	
31	4	5	4	1,11	120,00	-	-	
32	4	4	5	1,49	125,48	-	-	
33	4	2	7	1,24	126,08	-	-	
34	2	-	9	1,06	118,40	-	-	
35	4	2,5	6,5	2,45	74,24	197,28	0,96	
36	4			1,39	123,20	224,64	0,64	
37	4			0,92	93,76	142,08	0,58	
38	4			1,63	124,80	219,36	0,54	
39	4			0,15	34,24	25,60	0,59	
40	4			2	6	2,91	71,36	140,16
41	4	2,44	90,16			201,60	0,87	
42	4	1,90	102,40			215,20	-	
43	4	1,49	108,80			219,52	-	
44	4	0,91	93,76			176,00	-	

Продолжение таблицы Д.12

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Расход связующего, %		Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
		ЛСТ	Сомрех		Текущая	Через сутки		
45	4	3	7	2,95	90,24	160,00	1,35	
46	4			2,58	111,36	231,04	0,80	
47	4			1,80	137,28	241,92	0,71	
48	4			1,12	149,12	211,20	0,66	
49	4			0,89	139,44	178,56	0,71	
50	3			1,45	140,16	-	-	

Таблица Д.13 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Сомрех А12 на их прочность

Номер опыта	Прочность, кгс/брикет				
	Текущая	Через сутки	Через 2 суток	Через 3 суток	Через 4 суток
35	74,24	197,28	244,48	263,04	265,6
36	123,20	224,64	239,36	248,80	253,28
37	93,76	142,08	149,76	161,92	174,08
38	124,80	219,36	236,32	251,53	258,83
39	34,24	25,60	26,24	30,08	30,08

214

Таблица Д.14 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием комбинированного связующего ЛСТ-Сомрех А12 на их остаточную влажность

Номер опыта	Остаточная влажность, %				
	Текущая	Через сутки	Через 2 суток	Через 3 суток	Через 4 суток
35	2,45	0,96	0,77	0,59	0,65
36	1,39	0,64	0,64	0,54	0,51
37	0,92	0,58	0,60	0,56	0,60
38	1,63	0,54	0,52	0,48	0,49
39	0,15	0,59	0,53	0,47	0,53

Таблица Д.15 – Результаты брикетирования медно-никелевого концентрата с использованием органических связующих

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
1	1	ЛСТ	10+2	2,20	148,90	-	-	
2	1			0,05	85,40	77,20	0,05	
3	1			3,47	69,40	140,80	-	
4	1			3,02	83,20	153,60	-	
5	1			1,57	131,40	-	-	
6	1			0,71	108,20	122,30	-	
7	1			0,57	112,10	102,50	-	
9	1			1,25	125,20	-	-	
10	1			1,61	139,40	-	-	
11	1			2,07	141,67	-	-	
12	1		2,56	135,04	-	-		
13	2		10	2,64	130,04	173,12	1,38	
14	2		14	3,47	89,92	172,56	1,76	
15	2		11	2,67	114,24	-	-	
16	2		8	1,50	100,48	179,20	0,99	
17	2		10	1,77	124,16	205,44	1,35	
18	2		9	1,21	113,96	-	-	
19	2		6	0,79	84,56	108,72	0,78	
20	2		12	1,82	143,84	-	-	
21	2		KemWet 250/1	1	1,55	48,82	-	-
22	1	1+0,2		1,54	76,35	-	-	
23	2	KemWet 250/2	1	1,52	55,68	-	-	
24	2	KemWet 250/3	1	1,55	58,40	-	-	
25	1		1+0,2	1,57	63,22	-	-	
26	1	KemBrick 830	10+2	1,26	41,32	57,73	-	
27	1			2,28	53,82	65,91	-	
28	1			3,60	57,07	67,27	-	Заматывание шнека

Продолжение таблицы Д.15

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
29	2	КемWet м50/30	1	1,50	44,63	-	-	
30	2	Термопласт 2СВ	6	0,71	71,34	83,39	0,58	
31	2			1,13	120,54	175,59	0,69	
32	2			1,17	81,56	169,21	0,72	
33	2			1,62	85,12	196,69	0,68	
34	2			2,09	70,76	144,39	0,74	
35	1		5+1	0,54	102,23	109,06	0,50	
36	1		4+2	0,94	60,46	120,46	0,76	
37	1		4+2	1,56	77,26	123,10	0,62	
38	1		3+3	1,34	64,12	115,17	0,62	
39	2		7	0,19	72,43	107,42	0,40	
40	2			0,98	138,65	206,01	0,62	
41	2			1,14	120,36	201,47	0,64	
42	2			1,90	86,49	163,17	0,71	
43	2		8	0,50	111,21	125,58	0,49	
44	2			1,13	140,56	197,26	0,68	
45	2			1,37	142,18	173,48	0,78	
46	2			2,02	86,60	101,11	1,58	
47	2		2,03	101,41	156,59	1,21		
48	1		7+1	0,97	118,44	115,18	0,44	
49	1		6+2	0,83	96,02	98,69	0,42	
50	1		5+3	1,34	86,63	109,72	0,72	
51	2		9	0,82	148,83	206,25	0,57	
52	1		8+1	1,10	153,12	208,69	0,59	
53	2		Термопласт 4СВ	6	1,34	110,48	147,15	0,67
54	2	1,36			115,06	151,84	0,74	
55	2	7		0,82	101,16	161,71	0,65	
56	2			1,45	134,19	188,69	0,82	

Продолжение таблицы Д.15

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание
					Текущая	Через сутки		
57	2	Термопласт 4СВ	8	0,43	38,48	45,71	0,61	
58	2			1,03	145,53	216,58	0,46	
59	2			1,38	155,18	222,94	0,71	
60	2			2,06	93,59	184,12	1,20	
61	1		7+1	1,16	132,81	139,00	1,05	
62	1		6+2	1,13	124,53	139,54	0,95	
63	1		5+3	1,21	89,18	120,05	1,03	
64	2		9	1,20	171,69	239,06	0,77	
65	2	ЛСМ-1	10	1,60	71,68	130,56	0,60	
66	2		8	1,88	55,36	123,84	0,72	
67	2		6	1,72	48,00	98,88	1,08	
68	2		10	2,99	35,32	64,96	2,05	Залипание ячеек и шнека
69	2		10	1,92	83,52	131,84	1,17	
70	2		10	0,66	128,96	131,52	0,70	
71	2		ЛСМ-2	8	0,84	140,28	206,72	0,90
72	2	7		0,91	107,2	187,52	0,76	
73	2	6		0,69	96,64	169,6	0,66	
74	2	10		1,06	169,32	241,68	1,08	
75	2	10		0,71	153,6	188,16	0,81	
76	2	9		0,90	160,32	228,16	0,91	
77	2	ЛСМ-3	10	0,05	38,08	40,96	0,51	
78	2			1,20	160,64	282,56	0,71	
79	2			2,04	64,96	123,52	1,22	
80	2			1,70	104,64	199,36	1,01	
81	2	ЛСМ-4	10	1,47	107,20	168,96	1,39	
82	2		9	1,00	133,12	186,88	1,13	

Продолжение таблицы Д.15

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание	
					Текущая	Через сутки			
83	2	ЛСМ-4	12	0,95	178,88	219,52	1,26		
84	2		10	0,91	155,22	205,76	1,05		
85	2			0,46	105,28	116,48	1,09		
86	2	ЛСМ-5	10	0,95	172,16	230,40	1,11		
87	2		8	0,98	126,40	189,76	0,91		
88	2		9	0,65	143,36	165,44	1,06		
89	2				1,18	136,96	199,36	1,01	
90	2				0,88	155,20	184,32	1,06	
91	2		7	0,86	103,36	161,92	0,96		
92	2		ЛСМ-6	10	0,86	152,32	162,24	0,84	
93	2	8		1,25	91,52	162,88	0,86		
94	2	10		1,21	141,44	202,56	1,02		
95	2				0,54	64,64	67,20	0,85	
96	2				1,56	101,44	157,76	1,21	
97	2	ПВС	8	0,97	98,00	148,48	0,57		
98	2			1,28	97,15	162,14	0,74		
99	2			0,57	69,56	86,17	0,52		
100	2			1,65	75,90	163,71	0,57		
101	2			0,94	93,12	146,11	0,57		
102	2		10	1,56	96,64	183,31	0,53		
103	2				0,64	93,21	133,86	0,47	
104	2				1,42	99,67	172,24	0,63	
105	2				1,04	115,95	168,29	0,63	
106	2		12	0,75	107,63	171,29	0,54		
107	2				0,70	101,79	-	-	
108	2				1,01	125,64	-	-	
109	2				1,01	124,55	187,16	0,64	Добавка 1 % ПАВ
110	1			10+2	0,83	105,70	143,22	0,74	

Продолжение таблицы Д.15

Номер опыта	Способ подготовки шихты	Тип связующего	Расход связующего, %	Рабочая влажность, %	Прочность на сжатие, кгс/брикет		Остаточная влажность через сутки, %	Примечание	
					Текущая	Через сутки			
111	1	ПВС	9+3	1,35	118,67	219,00	0,63		
112	2		14	0,83	131,17	-	-		
113	2			1,29	134,54	-	-		
114	2		15	0,92	136,64	161,63	0,75		
115	2			1,08	140,16	191,88	0,79		
116	1		14+1	1,16	145,00	261,44	0,72		
117	1		13+2	2,38	134,10	289,60	0,54		
118	2		1		1,36	Брикеты не образуются			Связующее в твердом виде.
119	2				1,46	Брикеты не образуются			Связующее в твердом виде; вылеживание шихты в течение суток
120	2				2,53	47,41	-	-	Связующее в твердом виде; вылеживание шихты в течение 2 суток;

Таблица Д.16 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием органических связующих на их прочность

Номер опыта	Прочность, кгс/брикет								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
30	71,34	83,39	87,11	95,25	-	-	-	-	-
31	120,54	175,59	-	-	225,94	-	-	-	-
32	81,56	169,21	193,24	-	-	-	-	-	-
33	85,12	196,69	-	-	273,72	-	-	-	-
34	70,76	144,39	179,11	200,82	-	-	-	-	-
35	102,23	109,06	-	-	124,90	-	-	-	-
36	60,46	120,46	125,63	-	-	-	-	-	-
37	77,26	123,10	178,88	-	-	-	-	-	-
38	64,12	115,17	136,12	140,51	-	-	-	-	-
39	72,43	107,42	64,64	73,01	-	-	-	-	-
40	138,65	206,01	-	-	241,00	-	-	-	-
41	120,36	201,47	218,49	-	-	-	-	-	-
42	86,49	163,17	207,04	236,38	-	-	-	-	-
43	111,21	125,58	123,31	127,27	-	-	-	-	-
44	140,56	197,26	223,06	233,73	246,46	-	-	-	-
45	142,18	173,48	203,00	276,87	-	-	-	-	-
46	86,60	101,11	136,73	212,05	-	-	-	-	-
47	101,41	156,59	-	-	361,34	-	-	-	-
48	118,44	115,18	117,69	118,93	-	-	-	-	-
49	96,02	98,69	100,16	-	-	-	-	-	-
50	86,63	109,72	109,83	120,20	-	-	-	-	-
51	148,83	206,25	232,69	266,06	280,73	-	-	-	-
52	153,12	208,69	238,27	246,57	-	-	-	-	-
53	110,48	147,15	-	-	170,65	-	-	-	-
54	115,06	151,84	152,32	152,65	-	-	-	-	-
55	101,16	161,71	286,11	-	223,16	-	-	-	-
56	134,19	188,69	200,66	-	230,72	-	-	-	-

Продолжение таблицы Д.16

Номер опыта	Прочность, кгс/брикет								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
57	38,48	45,71	46,63	49,06	48,03	-	-	-	-
58	145,53	216,58	236,41	-	250,47	-	-	-	-
59	155,18	222,94	238,81		270,54	-	-	-	-
60	93,59	184,12	218,68	254,93	290,44	-	-	-	-
61	132,81	139,00	177,53	204,73	-	-	-	-	-
62	124,53	139,54	140,53	148,73	-	-	-	-	-
63	89,18	120,05	137,18	143,26	-	-	-	-	-
64	171,69	239,06	256,03	262,53	296,51	-	-	-	-
116	145,00	261,44	-	-	264,67	-	284,33	-	299,20

Таблица Д.17 – Влияние длительности вылеживания брикетов полученных с использованием органических связующих на их остаточную влажность

Номер опыта	Остаточная влажность, %								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
30	0,71	0,58	0,57	0,51	-	-	-	-	-
31	1,13	0,69	-	-	0,47	-	-	-	-
32	1,17	0,72	0,67	-	-	-	-	-	-
33	1,62	0,68	-	-	0,51	-	-	-	-
34	2,09	0,74	0,50	0,47	-	-	-	-	-
35	0,54	0,50	-	-	0,50	-	-	-	-
36	0,94	0,76	0,57	-	-	-	-	-	-
37	1,56	0,62	0,72	-	-	-	-	-	-
38	1,34	0,62	0,57	0,53	-	-	-	-	-
39	0,19	0,40	0,50	0,52	-	-	-	-	-
40	0,98	0,62	-	-	0,53	-	-	-	-
41	1,14	0,64	0,61	-	-	-	-	-	-
42	1,90	0,71	0,64	0,58	-	-	-	-	-
43	0,50	0,49	0,50	0,49	-	-	-	-	-
44	1,13	0,68	0,67	0,60	0,50	-	-	-	-
45	1,37	0,78	0,59	0,50	-	-	-	-	-
46	2,02	1,58	1,00	0,91	-	-	-	-	-
47	2,03	1,21	1,06	-	0,86	-	-	-	-
48	0,97	0,44	0,46	0,48	-	-	-	-	-
49	0,83	0,42	0,49	-	-	-	-	-	-
50	1,34	0,72	0,58	0,58	-	-	-	-	-
51	0,82	0,57	0,53	0,57	0,50	-	-	-	-
52	1,10	0,59	0,69	0,58	-	-	-	-	-
53	1,34	0,67	-	-	0,59	-	-	-	-
54	1,36	0,74	0,68	0,64	-	-	-	-	-
55	0,82	0,65	-	-	0,65	-	-	-	-
56	1,45	0,82	0,65	0,63	0,63	-	-	-	-

Продолжение таблицы Д.17

Номер опыта	Остаточная влажность, %								
	текущая	сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток	6 суток	7 суток	9 суток
57	0,43	0,61	0,62	0,58	0,60	-	-	-	-
58	1,03	0,46	0,45	-	0,58	-	-	-	-
59	1,38	0,71	0,62	-	0,60	-	-	-	-
60	2,06	1,20	1,09	1,00	0,80	-	-	-	-
61	1,16	1,05	1,20	0,92	-	-	-	-	-
62	1,13	0,95	0,71	0,79	-	-	-	-	-
63	1,21	1,03	0,67	0,62	-	-	-	-	-
64	1,20	0,77	0,74	0,71	0,68	-	-	-	-
116	1,16	0,72	-	-	0,57	-	0,59	-	0,53