

На правах рукописи



ВЕТЮГОВ ДАНИИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА
ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НА
ОСНОВЕ БЕНТОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Специальность 2.8.9 – «Обогащение полезных ископаемых
(технические науки)»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)

Научный руководитель:

Матвеева Тамара Николаевна, доктор технических наук, заведующий отделом «Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья», ИПКОН РАН.

Официальные оппоненты:

Пелевин Алексей Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского Государственного Горного Университета.

Опалев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории №32 Новых технологических процессов и аппаратов, заместитель директора по научной работе Горного института ФИЦ КНЦ РАН.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Защита состоится 17 марта 2026 г. в 14 час 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.096.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте [ипконран.ру](http://ipkonran.ru)

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

 Гольберг Г.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Железорудная промышленность имеет важнейшее значение для экономики страны, обеспечивая сырьем тяжелую промышленность, в том числе машиностроение, строительную отрасль и многие другие промышленные секторы. Современные проблемы отрасли связаны с истощением богатых месторождений и необходимостью переработки труднообогатимых руд. Российским предприятиям требуется постоянно совершенствовать технологический процесс для поддержания конкурентоспособности на мировом рынке высококачественных концентратов и окатышей. Новая технология окомкования с бентополимерными композициями направлена на улучшение свойств окатышей и снижение затрат при их производстве. Несмотря на значительный объем исследований по разработке альтернативного связующего, бентонит остается основным связующим веществом на всех фабриках окомкования железорудных концентратов в РФ. Разработка высокоэффективного метода окомкования для улучшения качества отечественной железорудной продукции является актуальной задачей.

Большой вклад в совершенствование процессов обогащения железных руд и окускования железорудных концентратов внесли: Чижикова В.М.; Никитченко Т.В.; Журавлев Ф.М.; Павловец В. М.; Пелевин А.Е.; Гзоян Т.Н.; Kawatra S.K.; De Moraes S.L.; Sivrikaya O.; Zhang X и др.

Цель работы: заключается в разработке высокоэффективного метода окомкования железорудных концентратов с применением бентополимерных композиций для повышения массовой доли железа и снижения содержания кремния, модификации структуры, оптимизации гранулометрического состава и прочностных характеристик железорудных окатышей.

Идея работы заключается в создании и использовании рациональных составов бентополимерных композиций, позволяющих снизить расход основного связующего - бентонита, повысить качество железорудных окатышей по содержанию железа и кремния и улучшить их физические и механические свойства, что в целом обеспечит технологическое преимущество и экономическую эффективность работы железорудных горно-обогатительных комбинатов.

Объектом исследования является процесс окомкования

железорудных концентратов с использованием бентополимерных композиций различного состава.

Предметы исследования: физико-химические свойства железорудных концентратов, бентонитовых глин и созданных на их основе бентополимерных композиций, технологические параметры процесса окомкования, физико-химические, физические и механические свойства железорудных окатышей, полученных с применением бентополимерных композиций различного состава.

Научная новизна работы

Получены новые научные данные о механизме формирования высококачественных железорудных окатышей с применением новых бентополимерных композиций на основе бентонитовой глины, полиакриламида, высоковязкой полианионной целлюлозы и ксантановой камеди. Максимальный эффект достигается с использованием БПК-1А, что приводит к формированию структуры окатышей с меньшей степенью оплавленности, перераспределению эквивалентных диаметров пор с увеличением в 2 раза количества мелких пор (до 1 мкм) по сравнению с базовым связующим бентонитом и обеспечивает повышенные металлургические свойства готовых окатышей. Механизм действия ксантан-модифицированной бентонитовой глины заключается в формировании пластичной структуры сырых окатышей за счет повышения реологических свойств связующего благодаря внутримолекулярным взаимодействиям и электростатическому отталкиванию между слоями полимера и монтмориллонита.

Научное значение работы

На основе выявленного механизма формирования высококачественных железорудных окатышей с применением новых бентополимерных композиций разработан высокоэффективный метод окомкования железорудных концентратов, обеспечивающий повышение массовой доли железа и снижение содержания кремния, оптимизацию гранулометрического состава и прочностных характеристик железорудных окатышей.

Практическая значимость работы

Разработанный способ окомкования железорудных концентратов с применением БПК-1А обеспечивает повышение качества железорудных окатышей за счет увеличения содержания Fe на 0,2% и снижения содержания SiO₂ на 0,19% при снижении на 30% расхода бентонита и улучшении прочностных характеристик сырых

окатышей по сравнению с базовыми показателями при использовании бентонита. Экономический эффект от внедрения новой технологии ожидается за счет снижения потребления бентонита и повышения качества железорудных окатышей. Улучшение металлургических свойств окатышей повысит производительность доменных печей и снизит расход кокса.

Ожидаемый экономический эффект от увеличения выхода чугуна и снижения расхода кокса при использовании БПК-1А в составе железорудных окатышей Стойленского ГОКа при производительности НЛМК 13,6 млн. т. составит 1,58 млрд. руб. в год.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, представленных в работе, обеспечивается научным подходом, использованием современных методов исследований, непротиворечивостью полученных результатов и выводов.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора научно-технической литературы по современному состоянию технологий и методов обогащения железных руд и окомкования железорудных концентратов, постановке цели и задач, разработке методик исследований, разработке оптимальных составов бентополимерных композиций (БПК) и их успешной апробации в лабораторных исследованиях, экспериментальном доказательстве преимуществ использования БПК перед традиционными бентонитовыми связующими, анализе и обобщении полученных результатов, обосновании выводов и подготовке публикаций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм действия ксантан-модифицированной бентонитовой глины заключается в формировании пластичной структуры сырых окатышей за счет повышения реологических свойств связующего благодаря внутримолекулярным взаимодействиям и электростатическому отталкиванию между слоями полимера и монтмориллонита.

2. Состав бентополимерных композиций (БПК) на основе высококачественных бентонитовых глин и синтетических полимеров – полиакриламида, высоковязкой полианионной целлюлозы и ксантановой камеди обеспечивает повышение эффективной вязкости связующего более чем на 50%, что приводит к увеличению выхода контрольного класса крупности сырых окатышей -12,5+10 мм в процессе окомкования.

3. Применение БПК-1А в качестве связующего приводит к формированию структуры окатышей с меньшей степенью оплавленности, перераспределению эквивалентных диаметров пор с увеличением в 2 раза количества мелких пор (до 1 мкм) по сравнению с базовым связующим бентонитом и обеспечивает повышенные металлургические свойства готовых окатышей.

4. Способ окомкования железорудных концентратов с применением бентополимерной композиции БПК-1А обеспечивает повышение содержания Fe на 0,2%, снижение содержания SiO₂ на 0,19% при снижении на 30% расхода бентонита в процесс окомкования с сохранением прочностных свойств обожженных окатышей.

Реализация результатов работы: разработанная технология окомкования железорудного концентрата с применением бентополимерной композиции может быть использована на Стойленском ГОКе, Михайловском ГОКе им. А.В.Варичева, Соколовско-Сарбайском ГПО и других железорудных комбинатах.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПКОН РАН, международной школе «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 2022), международных совещаниях «Плаксинские чтения» (г. Москва, 2023; г. Екатеринбург, 2025), научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2023), Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2023; 2025), Международной научно-практической конференции «Леоновские чтения» (г. Иркутск, 2024), Международный металлургический саммит «Металлы и Сплавы» (г. Алматы, 2023; г. Екатеринбург 2023).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, из них: в рекомендованных ВАК РФ изданиях – 3, в журналах, индексируемых в WoS, Scopus - 3, зарубежных изданиях – 2, в материалах российских и международных конференций – 7.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 170 наименований, содержит 157 страниц машинописного текста, 8 приложений, 31 рисунок и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель, идея и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, методология и методы научных исследований и сведения об апробации работы и публикациях автора.

В главе 1 представлены результаты литературного обзора по современному состоянию технологий производства железорудных концентратов и окатышей. Традиционные технологии используют бентонитовые связующие, которые формируют прочные окатыши из измельченных концентратов. Вместе с тем, применение бентонита увеличивает содержание вредных примесей, таких как оксиды кремния и алюминия.

Анализ существующих методов повышения качества железорудных окатышей показал необходимость поиска новых, более эффективных решений. Установлено, что использование бентополимерных композиций способно улучшить качество окатышей без существенных изменений в производственном цикле.

Рассмотрена практика производства железорудных окатышей в ведущих странах-производителях, таких как Швеция и Бразилия. Отмечено, что высокие международные стандарты качества железорудных окатышей ставят перед отечественными предприятиями задачу повышения качества продукции для уверенной конкуренции на мировом рынке.

В связи с этим, разработка новых технологических решений с целью снижения расхода бентонита в процесс окомкования железорудных концентратов является актуальной задачей.

В главе 2 описаны объекты и методы экспериментальных исследований, которые проводились на трех железорудных концентратах (Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева, Стойленского ГОКа, Соколовско-Сарбайского ГПО), бентонитах трех месторождений (10-й Хутор, Даш-Салахлинское, Таганское) и трех полимерных добавках (полианионная целлюлоза, ксантановая камедь, полиакриламид).

Для указанных железорудных концентратов определен их минералогический состав, выявлены особенности их переработки и качества. Изучены бентониты, применяемые в текущем производстве, способы их активации и их влияние на качество окатышей.

Приведены способы получения бентополимерных композиций (БПК), их физико-химические свойства и влияние на

процесс окомкования с последующей оценкой качества окатышей, определяемого гранулометрическим составом, прочностью на сжатие и на удар, химическим составом, а также комплексом металлургических свойств.

Методы исследований шихтовых материалов включали: определение удельной поверхности на аппаратах ПСХ и Блейна, скорости капиллярного всасывания и радиуса капилляра в слое концентрата, изменение краевого угла смачиваемости поверхности магнетита при увеличении концентрации связующего на приборе DSA25 (KRUSS), определения индекса набухания, набухаемости и эффективной вязкости связующего.

Фазовый состав порошкообразных образцов БПК определяли на дифрактометре AXRD (Proto manufacturing, Canada) с использованием программного комплекса Jade 6 (Material Data Inc.) и базы данных PDF-2, 2003 г.

ИК-спектроскопию образцов БПК проводили с использованием ИК-спектрометра Spectrum One FT-IR (Perkin Elmer Inc., USA) с полупроводниковым детектором InGaAs.

В главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность разработанных БПК и демонстрирующих улучшение физико-химических и металлургических свойств железорудных окатышей при их применении.

Результаты экспериментального исследования процесса окомкования доизмельченного железорудного концентрата Стойленского ГОКА с применением БПК-1Х

В ходе испытаний определялась возможность снижения расхода бентонита на 20, 30 и 50% путем ввода в шихту БПК-1Х и выборе наиболее эффективных составов БПК для дальнейших исследований.

При использовании БПК-1Х (Бентонит м-ния «10-ый Хутор», Хакасия + полианионная целлюлоза) в различных соотношениях расходов полимера и бентонита наблюдалось улучшение характеристик сырых окатышей: увеличение массовой доли класса - 12,5+8мм до 90-94%, эквивалентного диаметра ($D_{экв}$) до 10-11 мм, прочности на раздавливание до 1,51 кг/ок (на 24% выше базовой), прочности на сбрасывание до 6,9 раз (на 48% выше базовой) (таблица 1). Прочность сухих окатышей повышалась в результате сушки при 300°C до 8,18 кг/ок (на 13% выше базовой).

Таблица 1. Качественные характеристики сырых окатышей с применением в качестве связующих БПК-1Х.

Наименование связующего	БАЗА		Снижение расхода бентонита на 20%	Снижение расхода бентонита на 30%	Снижение расхода бентонита на 50%
	бентонит	0,72	БПК-1Х		
Расход, %	БПК	-	0,58	0,50	0,36
Качество сырых окатышей:					
Массовая доля влаги, %		8,44	8,32	8,39	8,20
Эквивалентный диаметр окатышей ($D_{\text{экв.}}$), мм		9,81	10,49	10,65	11,17
Прочность на раздавливание, кг/ок		1,23	1,43	1,44	1,51
Прочность на удар, раз		4,65	5,35	6,9	6,8

Благодаря связующим свойствам БПК-1Х с расходом 0,5% при снижении расхода бентонита на 30% (6,09 кг/т против базового 8,7 кг/т), ее использование в процессе окомкования обеспечивает получение окатышей с более однородным гранулометрическим составом и с улучшенными прочностными характеристиками по сравнению с базовыми значениями.

Изучение механизма интенсификации процесса окомкования и улучшения качества сырых окатышей

Изучение смачиваемости магнетита при использовании БПК-1Х показало, что увеличение дозировки БПК-1Х от 0,1 до 5% снижает краевой угол смачивания поверхности магнетита Стойленского месторождения с 53,9 до 36,5 град. (на 32%) в отличие от бентонита (рисунок 1). Повышение гидрофильтрности магнетита в условиях БПК-1Х благоприятно отражается на процессе окомкования, способствуя равномерному распределению связующего и формированию прочных связей между частицами комкуемого материала.

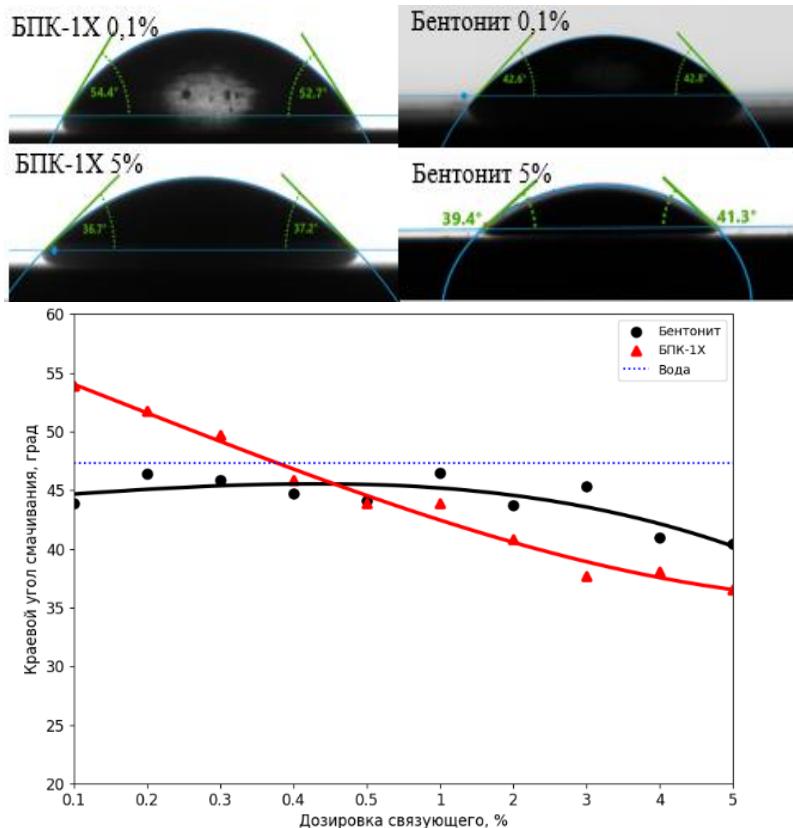


Рисунок 1. Изменение краевого угла смачивания (КУС) в зависимости от концентрации связующего

Влияние БПК-4Х (Бентонитовая глина м-ния «10-ый Хутор» + 0,5% ксантановой камеди) на свойства DR-grade окатышей для прямого восстановления

Относительно рядовых, DR окатыши обладают более высоким содержанием железа и низким уровнем вредных примесей – кремния и серы. Идея применения БПК при работе с суперконцентратами особенно актуальна, т.к. в первую очередь направлена на снижение расхода бентонита.

Рецептура исследуемых связующих отличалась как по типу применяемой полимерной добавки, так и незначительно по дозировке

кальцинированной соды Na_2CO_3 в исходную глину до достижения достаточного уровня реологических свойств активированного бентонита. Дозировка полимерной добавки одинаковая для всех типов БПК. Анализ полученных данных показал, что эффективная вязкость увеличивается при использовании полимерных соединений. Улучшение набухаемости продемонстрировал только состав с ксантановой камедью.

Установлен механизм действия ксантан-модифицированной бентонитовой глины, который заключается в формировании пластичной структуры сырых окатышей за счет повышения реологических свойств связующего благодаря внутримолекулярным взаимодействиям и электростатическому отталкиванию между слоями полимера и монтмориллонита.

Использование эффекта совместного действия бентонитовой глины и полимерной добавки, представленной ксантановой камедью, позволяет улучшить каждый из контролируемых показателей при производстве железорудных окатышей (таблица 2).

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований БПК-4Х

Вид связующего	Выход контрольного класса, %	Прочность сырых окатышей на раздавливание, кг/ок	Прочность сырых окатышей на сбрасывание, раз	Прочность обожженных окатышей, кг/ок	Пористость обожженных окатышей
Бентонит	▼ 58,3	▼ 1,34	▼ 6,2	▼ 282	▼ 21,4
БПК с Ксантановой камедью	▲ 65,4	▲ 1,78	▲ 6,9	▲ 341,5	▲ 22,4

Кроме улучшения прочностных свойств окатышей, БПК модифицирует поровую структуру, что приводит к интенсификации процесса восстановления окатышей как в доменном процессе, так и при производстве горячебрикетированного железа.

Рост пористости окатышей предполагает повышение их восстановимости в печи за счет увеличения реакционной поверхности.

В главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований влияния состава БПК на структуру и металлургические свойства железорудных окатышей.

Взаимосвязь прочности и пористости обожженных окатышей

Особая роль в формировании качества окатышей принадлежит пористости, которая определяет, как их механические свойства, так и скорость восстановления в условиях прямого восстановления или доменной печи. Однако увеличение пористости не всегда приводит к улучшению восстановимости.

Тем не менее, ряд проведенных исследований демонстрирует возможность увеличения прочности окатышей с одновременным увеличением их пористости при использовании полимерных добавок. Механизм такого упрочнения может включать следующие факторы:

- ускорение процесса окисления магнетита при термоупрочнении за счет увеличения реакционной поверхности благодаря модификации поровой структуры;
- повышение однородности структуры окатыша, что противодействует негативному явлению формирования зональной структуры при обжиге, включающей гематитовую оболочку и магнетитовое ядро;
- достижение максимальной прочности окатышей при окомковании, что подразумевает наиболее плотную упаковку, при которой количество контактов между зернами магнетита максимально;
- улучшение пластичности сырого окатыша, что напрямую влияет на его конечную прочность, уменьшая количество трещин и дефектов макроструктуры, которые могут возникнуть на этапах окомкования и транспортировки на обжиговую машину.

Прочность окатышей на раздавливание является ключевым параметром, и с годами требования к этому показателю только возрастают. Кроме того, важными для потребителей характеристиками являются гранулометрический состав готового продукта (как по контрольному классу, так и по содержанию мелочи). Эти параметры качества, наряду с содержанием общего железа ($Fe_{общ}$), определяют контрактную цену окатышей. Применение бентополимерной композиции с ксантановой камедью позволило повысить прочность окатышей и оптимизировать их гранулометрический состав.

Стоит отметить, что на сегодняшний день прочностные свойства окатышей уже не являются единственным критерием, определяющим их ценность как металлургического сырья.

Для опытных проб окатышей определялись металлургические свойства для печей прямого восстановления (таблица 3).

Таблица 3. Результаты анализа металлургических характеристик окатышей для прямого восстановления

Применяемое связующее	ISO 11257		ISO 11258		
	Определение показателя восстановления-измельчения при низкой температуре и показателя металлизации		Определение показателя восстановимости, конечной степени восстановления и степени металлизации, %		
Определяемый параметр	RDI _{DR} (<3,15мм)	M	dR/dt(40)	M _R	R(90)
Бентонит	1,03	92,55	1,25	83,1	88,2
БПК-4Х (с ксан.камедью)	0,84	92,86	1,15	80,8	86,6
БПК-6Х	1,76	91,43	1,39	88,7	92,1
БПК-7Х	0,71	93,2	1,24	84,4	89,1

Как видно из таблицы 3, с применением БПК-7Х удалось получить повышение всех фиксируемых по ISO 11257 и ISO 11258 параметров. Полимерная добавка в БПК-6Х и БПК-7Х представлена высоковязкой полианионной целлюлозой от разных производителей. Из негативных последствий применения БПК-6Х: значительно увеличился показатель восстановления-измельчения при низкой температуре с 1,03 до 1,76; показатель металлизации снизился с 92,55 до 91,43%. При этом показатель восстановимости, конечной степени восстановления и степени металлизации были значительно увеличены относительно базовых значений.

Ключевым фактором, определяющим поведение окатышей в процессе восстановления, является их структура, которая влияет на скорость восстановления. Чем больше удельная поверхность и средний размер пор, тем выше скорость восстановления, что снижает прочность и увеличивает вероятность разрушения окатышей.

Таким образом, установлено, что, применяя БПК в составе шихты на окомкование, удается воздействовать на металлургические свойства окатышей для ПВЖ, при этом параметр скорости восстановления имеет свои оптимальные границы, обеспечивающие

сохранность окатышей при увеличении производительности печи ПВЖ.

Исследование влияния БПК-1А (Бентонит Да-Салахлинского месторождения + 0,5% полиакриламида) на металлургические свойства окатышей СГОКа для доменной печи

Температура начала размягчения и температурный интервал размягчения (ТИРП), восстановимость, горячая прочность были оценены по стандартам ГОСТ 26517-85, ГОСТ 17212-84 и ISO 13930-2015 в лаборатории НПВП «ТОРЭКС».

Наиболее узкий гранулометрический состав (выход класса - 12+10 мм составил 75,6% против базовых 69,8%) окатышей получен с применением связующего БПК-1А в дозировке 7 кг/т (таблица 4). При этом пористость увеличилась до 22,07. Прочность сырых, сухих и обожженных окатышей снизилась при всех дозировках БПК-1А, оставаясь в пределах технологических норм и регламентов при снижении расхода связующего.

Таблица 4. Физические характеристики обожженных окатышей

Применяемое связующее	Гран. состав -12+10 мм	N ₅₀₀	P _{сыр}	P _{сух}	Пористость	P _{об}	W
Бентонит 8 кг/т	69,8	3,1	0,89	3,52	20,46	291	8,33
БПК-1А 6 кг/т	68,1	2,5	0,69	2,26	21,31	282	8,62
БПК-1А 7 кг/т	75,6	2,4	0,71	1,82	22,07	279	8,72
БПК-1А 8 кг/т	36,2	2,2	0,67	2,01	22,72	212	8,47

Показатель прочности LTD +6,3 растет при использовании трех дозировок БПК-1А, причем наибольшее значение в 97,16% достигнуто при дозировке 7 кг/т (таблица 5).

Таблица 5. Результаты исследования индекса низкотемпературного разрушения LTD (ISO 13930-2015)

Показатель	Бентонит 8кг/т	БПК-1А 6кг/т	БПК-1А 7 кг/т	БПК-1А 8кг/т
LTD +6,3	95,16	96,26	97,16	96,14
LTD +3,15	2,57	2,48	1,87	2,56
LTD -0,5	1,81	2,07	1,72	1,91

Минимальная истираемость окатышей (выход фракции -0,5 мм) 1,72% также достигнута при дозировке 7 кг/т.

Восстановимость проб окатышей с БПК-1А возрастает по сравнению с бентонитом при всех расходах связующего (таблица 6).

Таблица 6. Результаты исследований восстановимости опытных окатышей (ГОСТ 17212-84)

Показатель	Бентонит 8 кг/т	БПК-1А 6кг/т	БПК-1А 7кг/т	БПК-1А 8кг/т
Класс крупности, мм	-12+10	-12+10	-12+10	-12+10
Масса пробы перед восстановлением, г	500	500	500	500
Масса пробы после восстановления, г	381,7	375,04	375,52	379,4
Восстановимость, %	83,67	88,14	87,97	85,42

Для окатышей с применением БПК-1А 7 кг/т температурный интервал размягчения-плавления стремится к минимуму 177°C по сравнению с базовым значением, составившим 242°C.

Таким образом, БПК представляет собой новый вид связующего, состав которого позволяет регулировать характеристики самого связующего и получаемых окатышей, что значительно расширяет возможности управления и выбора оптимального режима производства высококачественных железорудных окатышей.

БПК-1А в дозировке 7 кг/т окатышей рекомендована к промышленным испытаниям на Стойленском ГОКе.

Исследование влияния БПК-1А на структуру окатышей

Анализ изображений СЭМ показывает (рисунок 2), что в масштабе 1...10 мкм наблюдаются различия структуры: в пробе №2 присутствует большое количество мелких зерен, размером менее 1 мкм, которые агрегированы друг с другом, в пробе №1 подобные частицы (микронного или субмикронного размера) ассимилированы структурой окатыша. Вероятно, это связано с условиями сушки.

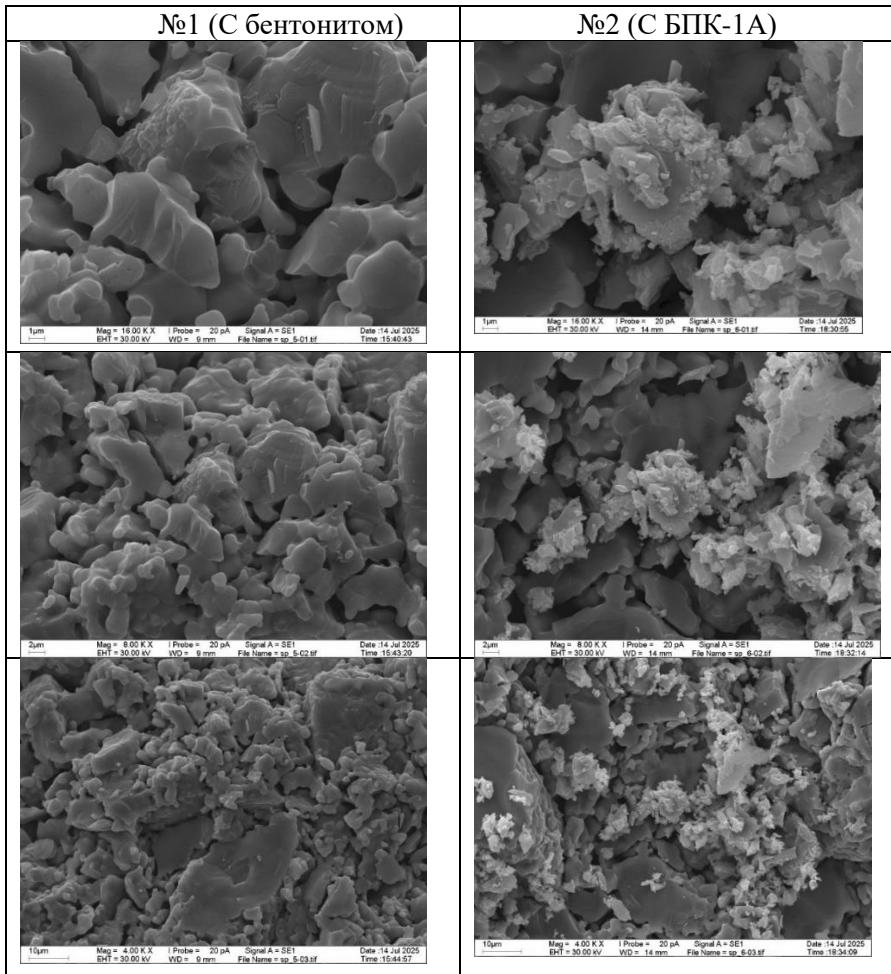


Рисунок 2. Фотографии СЭМ в масштабе 1...10 мкм

Известно, что нагрев окатыша и его упрочнение при обжиге происходит после завершения удаления влаги. Соответственно, изменение кинетики сушки (например, за счет свойств связующих) может привести к более позднему достижению окатышем заданной температуры обжига, что при фиксированном времени термообработки приводит к уменьшению как времени на спекание,

так и степени его завершенности. Из полученных данных следует, что проба №2 имеет указанные особенности термообработки.

Из распределения пор по эквивалентным диаметрам отчетливо наблюдается смещение в сторону увеличения доли мелких пор при использовании БПК-1А по сравнению с бентонитом (рисунок 3), что доказывает модификацию пористой структуры при применении БПК.

Также при использовании БПК, помимо перераспределения пор по размерам, наблюдается значительное увеличение общей объемной пористости окатышей с 20,2 до 24% абсолютных, что составляет относительный прирост около 19%.

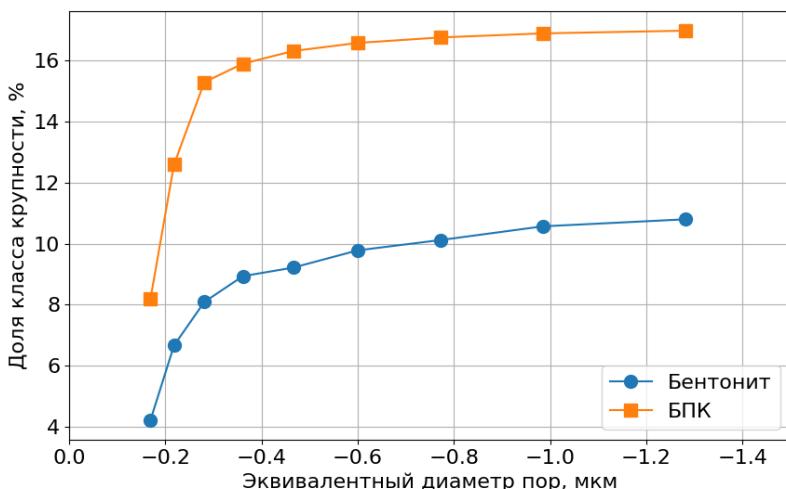


Рисунок 3. Распределение пор по размерам.

Полученные данные свидетельствуют, что использование БПК-1А приводит к более медленному удалению влаги при сушке окатышей, что позволяет сформировать структуру с меньшей степенью оплавленности (Рис.3) и более развитой пористостью (как по объему, так и по величине удельной поверхности). Именно меньшая степень оплавленности, вероятно, положительно сказывается на температурном интервале размягчения-плавления, которое завершается раньше.

Таким образом, использование БПК-1А сопровождается некоторым снижением прочности окатышей, но при этом позволяет существенно модифицировать их структуру и обеспечить их

повышенные металлургические свойства. Сниженная в результате применения БПК прочность сырых и обожженных окатышей находится в пределах технологических норм и регламентов.

Результаты промышленных испытаний опытной партии БПК-1А на Стойленском ГОКе

В октябре 2025 года были проведены опытно-промышленные испытания партии комового бентонита с введенным в его состав полимером по рецептуре БПК-1А, суммарным объемом 483 т БПК.

В ходе проведения опытно-промышленных испытаний отклонений в работе узлов и агрегатов на участке бентоподготовки не выявлено. Температура на входе в сушильный барабан составляла 490-510 °С, на входе в вертикальную валковую мельницу 135-145 °С, производительность вертикальной валковой мельницы составляла в пределах базового значения – 12-13 т/ч, перепад давления на главном рукавном фильтре продукта составлял 16-22 мбар, давление в трубопроводе транспортировки бентопорошка составляло не более 0,7 бар, токовая нагрузка на приводной электродвигатель вертикальной валковой мельницы составляла 385-405 А (77-82%).

Таким образом, в промышленном масштабе подтверждено отсутствие технологических препятствий к применению БПК в качестве связующего при производстве железорудных окатышей.

Оценка экономической эффективности применения БПК-1А при производстве железорудных окатышей из концентрата Стойленского ГОКа

В основе расчета экономического эффекта от внедрения наиболее перспективной композиции БПК-1А (бентонитовая глина Даш-Салахлинского месторождения + 0,5% полиакриламида) лежит общая производительность всех доменных печей Новолипецкого металлургического комбината в 2025 г. 13632,39 тыс. тонн чугуна при использовании в производстве окатышей СГОК базового связующего бентонита Даш-Салахлинского месторождения.

В расчете принято, что при замене связующего объем производства агломерата и окатышей остается постоянным, изменяется химический состав окатышей в результате снижения расхода бентонита на 30% или на 3 кг/т в абсолютных числах (с 9,04 для бентонита до 6 кг/т окатышей для БПК-1А) и замещения его железорудным концентратом.

Консолидированный экономический эффект при работе доменных печей НЛМК по увеличению выхода чугуна и снижению расхода кокса при внедрении БПК-1А в составе железорудных окатышей Стойленского ГОКа составит 1,58 млрд. руб./год.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании комплекса выполненных исследований и полученных новых научных результатов предложены технологические решения по применению новых составов бентополимерных композиций в процессе окомкования железорудных концентратов, обеспечивающие повышение массовой доли железа и снижение содержания кремнезема в готовых железорудных окатышах, что приводит к снижению расхода кокса и в целом себестоимости производства чугуна и стали, имеющих существенное значение для железорудной отрасли.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе комплекса исследований физико-химических, физических и механических свойств бентонитовых глин, железорудных концентратов и бентополимерных композиций установлен механизм действия ксантан-модифицированной бентонитовой глины, заключающийся в формировании пластичной структуры сырых окатышей за счет повышения реологических свойств связующего благодаря внутримолекулярным взаимодействиям и электростатическому отталкиванию между слоями полимера и монтмориллонита.

2. Разработан новый состав бентополимерных композиций (БПК) на основе высококачественных бентонитовых глин и синтетических полимеров – полиакриламида, высоковязкой полианионной целлюлозы и ксантановой камеди, обеспечивающий повышение эффективной вязкости связующего более чем на 50%, что приводит к увеличению выхода контрольного класса крупности сырых окатышей -12,5+10,0 мм в процессе окомкования.

3. С использованием БПК-1А достигнут максимальный эффект, сформирована структура окатышей с меньшей степенью оплавленности, отмечено перераспределение эквивалентных диаметров пор с увеличением в 2 раза количества мелких пор (0,1-0,3 мкм) по сравнению с базовым связующим бентонитом, что

обеспечивает повышенные металлургические свойства готовых окатышей.

4. На основе проведенного комплекса исследований и выявленного механизма действия бентополимерных композиций разработан способ окомкования железорудных концентратов с применением БПК-1А, обеспечивающий повышение содержания Fe на 0,2%, снижение содержания SiO₂ на 0,19% при снижении на 30 % расхода бентонита в процесс окомкования с сохранением прочностных свойств обожженных окатышей.

БПК-1А в дозировке 7 кг/т окатышей рекомендована к опытно-промышленным испытаниям на Стойленском ГОКе.

5. Проведенными в октябре 2025 года опытно-промышленными испытаниями по приготовлению связующей добавки БПК-1А в объеме 483 т на ФОК АО «СГОК» подтверждена технологическая возможность использования бентополимерной композиции в качестве связующего при производстве железорудных окатышей на Стойленском ГОКе.

На основании положительных результатов опытно-промышленных испытаний запланирован второй этап с применением БПК-1А в объеме 3000 т для определения влияния данного материала на процессы окомкования и обжига окатышей, металлургические свойства обожженных окатышей, производительность обжиговой машины Стойленского ГОКа и доменных печей ПАО «НЛМК».

Ожидаемый экономический эффект от применения БПК-1А в составе железорудных окатышей Стойленского ГОКа за счет снижения расхода бентонита, увеличения выхода чугуна и снижения расхода кокса составит 1,58 млрд. руб. в год.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Экспериментальное исследование процесса окомкования доизмельченного железорудного концентрата Стойленского ГОКа с применением новых составов бентополимерных связующих // Черные металлы. 2023. № 3. С. 4-10. doi: 10.17580/chm.2023.03.01

2. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Применение ксантановой камеди в составе бентополимерного связующего при окомковании

железорудного концентрата // Черные металлы. 2024. № 5. С. 4-9. doi: 10.17580/chm.2024.05.01

3. Vetyugov D.A., Matveeva T.N. The application of a bentopolymer composition as a binder to improve the metallurgical properties of iron ore pellets // CIS Iron and Steel Review. Vol. 29 (2025), pp. 28-32. doi:10.17580/cisisr.2025.01.05

Публикации в других изданиях

4. Vetyugov D.A., Matveeva T.N. Research for Industrial Application of Bentonite-Polymer Material in Ferrous Metallurgy // Recent Advances in Montmorillonite. Chapter 6. Edited by G. M. Do Nascimento. IntechOpen. 2024. PP. 87-101. doi:10.5772/intechopen.1005393.

5. Рожкова О.В., Ковалева О.О., Лебедева В.И., Ветюгов Д.А., Рожков В.И. Исследование процесса окомкования высококачественного железорудного концентрата с применением новых связующих добавок // Вестник КазУТБ, т.2, вып. 27. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-954>

6. Ветюгов Д.А., Русский А.В., Жигарев В.В. Бентонит – минеральное сырье для производства железорудных окатышей // Сб. трудов 5 Межд. научн. школы «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» / Под ред. академика РАН К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2022. - С. 186-190.

7. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Применение новых составов бентополимерных композиций для производства высококачественных железорудных окатышей // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного сырья (Плаксинские чтения–2023).М.: Изд.«Спутник +», 2023. - С. 146-149.

8. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Применение новых составов бентополимерных композиций для производства высококачественных железорудных окатышей // Материалы 16-ой Межд. науч. школы мол. уч. и спец. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». 23-27 окт. 2023 г. – М: ИПКОН РАН, 2023 – С. 232-235.

9. Ветюгов Д.А. Применение бентополимерных композиций для повышения качества брикетов из отходов металлургического производства // Актуальные проблемы эффективного использования полезных ископаемых и сохранения

окружающей среды (Леоновские чтения–2024). 01.02.2024 г. – Сб. мат. Иркутск: ИРНИТУ. - С.28-33.

10. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Влияние состава бентополимерной композиции на качественные характеристики железорудных окатышей // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025) С. 347-350.

11. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Применение бентополимерной композиции при окомковании поликомпонентной железорудной шихты // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 17 Межд. науч. школы мол. уч. и спец. 27-31 окт. 2025 г. – М. ИПКОН РАН, 2025 – С. 203-206.

12. Ветюгов Д.А., Матвеева Т.Н. Повышение эффективности процесса окомкования железорудного концентрата с использованием бентополимерных связующих. Тезисы Моск. Межд. Конгр. Обогатителей (ММКО-2025). – М.: Изд. Дом «Графит», 2025. – С. 170-171.