

На правах рукописи

Ильина Татьяна Николаевна

**Физико-химические основы процессов
агломерации дисперсных материалов
и их аппаратное обеспечение**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты
химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Севостьянов Владимир Семенович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сваровский Александр Яковлевич

доктор технических наук, профессор
Красовицкий Юрий Владимирович

доктор технических наук, профессор
Сиваченко Леонид Александрович

Ведущая организация: Московский государственный
университет инженерной экологии

Защита диссертации состоится «25» октября 2011 г. в 14.30 час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 2, ауд.117.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО НИ ТПУ.

Автореферат разослан « » сентября 2011 г.

Учёный секретарь совета
канд. техн. наук, доцент

Т.С. Петровская

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Реальным требованием настоящего времени является совершенствование и развитие технологических процессов при максимальной экономии сырья, топлива, материалов и выполнении мероприятий по охране окружающей среды. Это в полной мере относится к агломерации - как совокупности физических и физико-химических процессов, обеспечивающих формирование тел и частиц определённых размеров, формы, необходимой структуры и физических параметров. Для обозначения процесса агломерации в различных областях её реализации используют такие определения, как гранулирование, брикетирование, прессование, окомкование, таблетирование и др. Агломерацию дисперсных материалов осуществляют с целью улучшения качества как промежуточных, так и готовых продуктов во многих отраслях промышленности.

В настоящее время накоплен значительный научный и практический опыт в области комплексной переработки и формования дисперсных систем с получением коллоидно-капиллярно-пористых тел. Значительный вклад в научное развитие этого направления внесли ученые В.И. Коротич, Н.Н. Бережной, В.М. Витюгин, П.В. Классен, И.Г. Гришаев, М.Б. Генералов, Л.М. Сулименко, В.И. Назаров, В.С. Севостьянов, Л.А. Сиваченко, В.А. Лотов, Н. Rumpf, Kortman, M. Wada и др. Однако существующие проблемы процессов агломерации дисперсных материалов в настоящее время еще недостаточно изучены и требуют решения. Это обусловлено тем, что существует широкий спектр полидисперсных материалов, требующих агломерации, а также разработки способов их реализации. Отсутствие универсальных методик оценки способности материалов к агломерации, подбора технологических связок в шихты затрудняют выбор способа их рационального компактирования, разработку аппаратурных средств и технологических режимов работы оборудования. Особую актуальность решение вышеуказанных задач приобретает при вовлечении в производство техногенных полидисперсных материалов с различными физико-химическими свойствами с целью их утилизации способом агломерации.

Актуальной задачей является также разработка способов использования процессов агломерации для защиты окружающей среды от загрязнений.

В данной работе рассмотрены процессы агломерации, наиболее часто используемые в технологии строительных материалов и изделий, а также в горнорудном производстве при получении железорудных окатышей. Особое внимание уделено решению проблемы выбора и снижения

расхода балластных технологических связок в готовом продукте, особенно при гранулировании концентратов полезных минералов, например, магнетита.

Работы, положенные в основу диссертации, выполнялись в рамках государственных бюджетных тем «Изыскание заменителей бентонитов и способов снижения связующих добавок» (1980–1981 гг., ГР № 79018644), «Разработка методов оценки технологических свойств связующих материалов для окомкования» (1981–1983 гг., ГР № 1.82.8054665), «Разработка технологии использования щелочноземельных бентонитов для производства окатышей» (1983–1987 гг., ГР № 1.84.0013864, № 01.86.0023172), а также хозяйственных НИР по разработке способов снижения поверхностного пыления дисперсных материалов (1991–1999 гг., ГР № 1.90.0046493, № 01.99.0005604 и др.).

Цель работы – разработка физико-химических основ процессов агломерации полидисперсных материалов с различными физико-химическими свойствами, их конструктивно-технологического и аппаратного обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выявить общие закономерности процесса агломерации полидисперсных материалов с учетом механизма адгезионно-когезионного взаимодействия компонентов гетерогенных систем. Разработать рекомендации по снижению пылеуноса в дисперсных системах за счет использования процессов агломерации.

2. Исследовать процесс структурообразования гранул при их поэтапном формировании, установить теоретические закономерности процессов фильтрации газообразной и жидкой фазы при уплотнении порошкообразных материалов, условия микрогранулирования и упругой релаксации шихты при ее предварительном уплотнении.

3. Разработать реологическую модель гранулообразования в дисперсных системах и математическое описание процессов по отдельным стадиям, выработать рекомендации по рациональной организации процесса агломерации дисперсных материалов с учетом их физико-химических свойств.

4. Провести комплексные реологические исследования моделей коллоидно-капиллярно-пористых тел с различными связующими добавками, установить закономерности адсорбционно-коагуляционного взаимодействия компонентов гранулируемых шихт. Разработать методологию оценки и выбора связующих добавок для гранулирования дисперсных материалов.

5. Изучить общие закономерности и специфические особенности процессов агломерации техногенных полидисперсных материалов различных производств с разработкой практических рекомендаций по организации способов их утилизации с получением гранулированной продукции.

6. Провести исследования по моделированию процесса постадийного гранулообразования в дисперсных системах с различными физико-химическими свойствами материалов, разработать патентно-защищенную конструкцию вибрационно-центробежного гранулятора постадийного действия с определением его кинематических и конструктивно-технологических параметров.

7. С использованием регрессионных математических моделей исследовать технологические режимы работы опытно-промышленного вибрационно-центробежного гранулятора и выработать рекомендации по его практическому использованию.

8. Разработать технологический комплекс многофункционального действия и отдельные технологические модули для агломерации природных и техногенных материалов различных производств. Провести опытно-промышленные испытания научных разработок и дать технико-экономическую оценку эффективности их использования.

Научная новизна

1. Установлены основные закономерности процесса уплотнения дисперсных материалов различного химического, минералогического составов, удельной поверхности, которые заключаются в наличии трех характерных областей изменения степени уплотнения от давления формования. Протяженность каждой стадии зависит от поверхностных свойств дисперсных материалов, для оценки которых предлагается усредненная характеристика дисперсности (K_d , м^{-1}), представляющая собой произведение истинной плотности материала и удельной площади поверхности частиц дисперсного материала, зависящей от способа его подготовки. Предложена классификация материалов по величине усредненной характеристики дисперсности: на низкодисперсные ($K_d < 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$), среднедисперсные $K_d = (2 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1})$, высокодисперсные ($K_d > 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$). Установлено, что для низкодисперсных материалов первая стадия прироста степени уплотнения от давления формования практически отсутствует. Для среднедисперсных материалов характерно наличие всех трех стадий, причем наибольшую протяженность имеет первая стадия уплотнения (50–60%) при малых нагрузках (0,1 – 0,5 МПа). Для материалов высокодисперсных требуются большие усилия для достижения такой же степени уплотнения.

2. Разработана реологическая модель процесса агломерации дисперсных систем под действием внешних сил, дано аналитическое описание всего цикла структурной перестройки порошкообразной смеси. Установлено, что на второй и третьей стадиях гранулообразования наряду с прочностью каркасообразующей части формируемого материала важное значение имеет вязкость поровой жидкости. Результатами реологических исследований моделей коллоидно-капиллярно-пористых тел подтверждена роль вязкости поровой жидкости в обеспечении пластических деформаций при гранулировании низкодисперсных непластичных материалов. Получено уравнение для расчета пластической вязкости сформованного тела в зависимости от истинной плотности каркасообразующей части уплотненного тела, его влажности, а также плотности и вязкости поровой жидкости.

3. Предложен реологический показатель (R), характеризующий способность связующих материалов к коагуляционному структурообразованию, использование которого позволяет осуществлять подбор, оценку качества и расчет расхода минеральных и органических связующих добавок для гранулирования низкодисперсных непластичных материалов (железорудных шихт).

4. Установлен комплекс физико-химических параметров компонентов взаимодействующих фаз дисперсной системы при агломерации без воздействия внешних сил, включающий поверхностное натяжение ($\sigma_{жсг}$), вязкость (η) жидкой фазы, а также смачиваемость твердой составляющей ($\cos\theta$). Показана определяющая роль вязкости связующего раствора при агломерации поверхностного слоя полидисперсной системы, которая должна быть не более $10 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ для образования защитного покрытия с целью снижения поверхностного пыления.

5. Установлено, что при введении полимерных связующих в сырьевые смеси для производства цементного клинкера происходит изменение кинетики сушки шламов, увеличение прочности агломерата на стадии сушки и возрастание аутогезионных свойств пылей, что приводит к снижению пылеуноса из холодного конца клинкерообжиговой печи на 15–25 %.

6. Установлено, что при предварительном уплотнении увлажненной порошкообразной смеси происходят процессы фильтрации газообразной и жидкой фазы с последующим образованием микрогранул. Получены уравнения, позволяющие рассчитать конструктивно-технологические параметры уплотняющего устройства для обеспечения условий микрогранулирования и релаксации упругих деформаций в уплотненном материале.

7. Получены математические модели в виде уравнений регрессии, описывающих зависимости физико-механических характеристик гранул от скоростных и конструктивно-технологических параметров разработанного вибрационно-центробежного гранулятора.

Практическая ценность работы

1. Разработаны технические условия на глинистые связующие материалы для производства железорудных окатышей (ТУ 14-9-364-89), которые внедрены на фабриках окомкования горно-обогатительных комбинатов России и Украины. По результатам реологических исследований суспензий связующих материалов различного происхождения и состава разработана и внедрена методика оперативного контроля качества связующего сырья для производства гранул в лабораторную практику ЗАО «Белмеханобр» (А.с.1404898, 1592778, 1636822).

2. Разработаны и прошли опытно-промышленную апробацию новые виды комплексных связующих добавок для окомкования руд и концентратов с целью повышения качественных показателей и снижения себестоимости выпускаемой продукции (А.с. 901313, 954464, 1063850,1392132, 1330197,1601159,1632994).

3. Предложены новые способы защиты окружающей среды от загрязнения (А.с. № 1710777, патент РФ № 2151205) при хранении, открытой перевозке и складировании пылевидных материалов методом их агломерации.

4. Предложены технологии утилизации техногенных материалов цементного производства и вскрышных пород железорудных месторождений КМА (А.с.1594161, патенты РФ 1781194,1813771).

5. Разработана конструкция вибрационно-центробежного гранулятора (патент РФ № 2412753) и проведены его опытно-промышленные испытания при гранулировании дисперсных материалов с различными физико-химическими свойствами (известково-глинистые, калийно-известковые, перлитосодержащие и другие композиционные смеси).

6. Разработан и апробирован технологический комплекс многофункционального действия и его модули для производства теплоизоляционных композиционных смесей с использованием поризованных гранулированных заполнителей, разработан технологический регламент на процесс получения гранулированной продукции.

7. Результаты проведенных исследований и научно-технических разработок реализованы на промышленных предприятиях: ЗАО «Белмеханобр», ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат», ООО «Бентопром», ООО «Чистовод», ООО «Рецикл-Интех». Суммарный

экономический эффект от выполненных разработок составляет более 50 млн. рублей.

8. Материалы диссертационной работы апробированы и внедрены в учебный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова при изучении дисциплин «Процессы и аппараты химической технологии», «Машины и оборудование для комплексной переработки техногенного сырья». Основные положения диссертации отражены в монографиях и учебных пособиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность научных положений, закономерностей и механизмов формирования капиллярно-пористых тел в зависимости от физико-химических свойств дисперсных материалов.

2. Аналитические зависимости, характеризующие процессы фильтрации газообразной и жидкой фазы при уплотнении порошкообразной шихты, условия ее микрогранулирования и упругой релаксации сформированных тел.

3. Научно- обоснованные принципы рациональной организации постадийного процесса гранулообразования дисперсных материалов, представленные в виде реологической модели и ее аналитического описания.

4. Методологические основы эффективного процесса формирования коллоидно-капиллярных тел в зависимости от реологических свойств дисперсионной среды и физико-химических свойств дисперсной фазы.

5. Технологические рекомендации по обеспечению рациональных способов агломерации техногенных полидисперсных материалов с различными физико-механическими характеристиками.

6. Основополагающие закономерности постадийного процесса гранулообразования дисперсных материалов в патентно-защищенной конструкции вибрационно-центробежного гранулятора, методика расчета кинематических и конструктивно-технологических параметров аппарата.

7. Результаты регрессионного анализа влияния скоростных и конструктивно-технологических параметров гранулятора на физико-механические характеристики гранул и технологические показатели работы агрегата.

8. Анализ результатов опытно-промышленных испытаний и внедрения выполненных научно-технических разработок, технологический комплекс многофункционального действия и его модули, технологический регламент на процесс получения гранулированной продукции.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-практических конференциях регионального, всероссийского и международного уровня: XI Всесоюзный симпозиум по рео-

логии (Москва, 1981); III научно-техническая конференция «Молодые учёные – научно-техническому прогрессу» (Донецк, 1982); Всесоюзная научно-техническая конференция «Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке» (Днепропетровск, 1985); Всесоюзная научно-техническая конференция «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении» (Белгород, 1989); Всесоюзная научно-практическая конференция «Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для доменного процесса и бескоксовой металлургии» (Днепропетровск, 1990); Всесоюзная конференция «Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии» (Белгород, 1991); Международная научно-практическая конференция «Проблемы охраны производственной и окружающей среды» (Волгоград, 1997); Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии» (Белгород, 2003, 2005); VI Международная конференция «Сотрудничество для решения проблемы отходов» (Харьков, 2009); X международный симпозиум «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» (Белгород, 2009); XIV Международная научно-практическая конференция «Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения» (Белгород, 2010); Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Беларусь, Минск, 2010); Международная научно-практическая конференция «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов» (Белгород, 2010).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 71 работе, в том числе 14 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, двух монографиях, 13 авторских свидетельствах СССР, четырех патентах на изобретения Российской Федерации.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, семь глав, выводы, список использованной литературы из 291 наименований. Работа изложена на 397 страницах, содержит 61 рисунок, 51 таблицу, приложения с документами, подтверждающими практическую значимость полученных результатов.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований. Изложены научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены области использования процессов агломерации в различных отраслях народного хозяйства, их роль в интенсификации технологических процессов за счёт сближения частиц, увеличения межчастичных контактов, активизации их взаимодействия. Дана классификация связей между частицами при агломерации, которая включает более широкий спектр процессов по сравнению с классическим понятием агломерации, как «термического способа окускования мелких материалов, чаще всего рудной шихты для улучшения их металлургических свойств, осуществляемого обычно путём сжигания мелкого топлива в самом материале за счёт непрерывного прососа воздуха». В данной работе рассматривается направленное сближение частиц тонкодисперсных материалов с образованием капиллярно-пористых тел при гранулировании под действием центробежных и вибрационных сил, пластическом формовании, а также стихийная агломерация с помощью технологических связей, изменяющих аутогезионное и адгезионное взаимодействие частиц в скоростных потоках и статических условиях.

Рассмотрены проблемные задачи использования процессов агломерации при утилизации техногенных материалов предприятий по производству строительных материалов, горно-обогатительных комбинатов и других производств, технологические процессы которых основаны на дроблении, измельчении и обжиге больших количеств минерального сырья. Обоснованы выбор объектов исследования, цель и основные задачи работы.

Во второй главе рассмотрена роль поверхностных явлений в дисперсных системах при агломерации, дана классификация процессов и аппаратов для их осуществления, представлены методологические подходы к рассмотрению процессов агломерации.

Исследуемые в данной работе дисперсные системы состоят из тонкоизмельчённого твёрдого компонента (дисперсной фазы) и дисперсионной среды. В качестве последней является газообразная фаза (воздух) в сухих порошках (Т/Г) или капельная жидкость во влажных пастообразных материалах или суспензиях (Т/Ж). В процессе агломерации образуются пористые тела, в которых дисперсионной средой становится твёрдый компонент, а дисперсной фазой - газ (Г/Т). С точки зрения поверхностных явлений, поверхностная энергия системы всегда стремится к минимуму ($E_s = \sigma dS \rightarrow \min$). Поэтому процесс агломерации можно рассматривать как переход системы из свобододисперсного (текучего) в связнодисперсное состояние (гранулы, брикеты и т.п.). Формирование структур в дисперсных системах при различных внешних воздействиях на них представлено на рис.1.



Рис.1. Классификация структур в дисперсных системах при агломерации.

Прочность связи (F) и прочность на сжатие ($\sigma_{сж}$) сформованного капиллярно-пористого тела зависят от внешних воздействий на систему и свойств исходных дисперсных систем: геометрических параметров частиц порошка, шероховатости поверхности, распределения частиц по размерам и др.

Для оценки способности дисперсных материалов к агломерации существуют различные методы, которые заключаются в оценке уплотняемости материала под действием определенного давления или определении нагрузки, при которой происходит разрушение уплотненного образца. Известен критерий комкуемости, рассчитанный по значениям характеристических влагоемкостей, определенных по кинетике пропитки жидкостью слоев дисперсного материала различной плотности. До сих пор не существует универсальных показателей, которые наиболее полно отражали бы характер взаимодействия твердой, жидкой и газообразной фаз при уплотнении с учетом физико-химических свойств дисперсных материалов, их кристаллического строения и минералогического состава. Все это затрудняет разработку рекомендаций по выбору способа агломерации, его аппаратного оформления и применения технологических связей. Необходимы более глубокие исследования механизма взаимодействия компонентов дисперсных систем при стихийной агломерации, а также под действием внешних сил.

В третьей главе представлены экспериментальные и теоретические исследования процессов структурообразования гранул при их постадийном формировании. Известно, что процесс формирования гранул зависит от множества факторов: пластических свойств порошкообразной смеси, ее дисперсности и гранулометрического состава, влажности, вида связующих добавок и др.

Совокупное влияние факторов (пластичности, дисперсности, влажности, силового воздействия и др.) на процесс уплотнения исследуемых порошкообразных смесей наглядно можно представить с помощью «кривых уплотнения» (рис.2) $E_i = f(P_i)$, где E_i – степень уплотнения полидисперсного материала, %; P_i – давление формования материала,

МПа. При этом $E_i = \rho_i / \rho_w * 100 \%$, где ρ_i - плотность сформованного тела при P_i , ρ_w - предельная плотность тела с учётом влажности и наличием технологической связи, кг/м^3 . Анализ полученных экспериментально кривых уплотнения полидисперсных материалов с различными физико-химическими характеристиками и минералогическим составом показывает их общую закономерность: наличие достаточно протяжённой первой стадии уплотнения (участок $A B$), характеризующейся наибольшим приростом степени уплотнения E_i при минимальных значениях давления формования P_i .

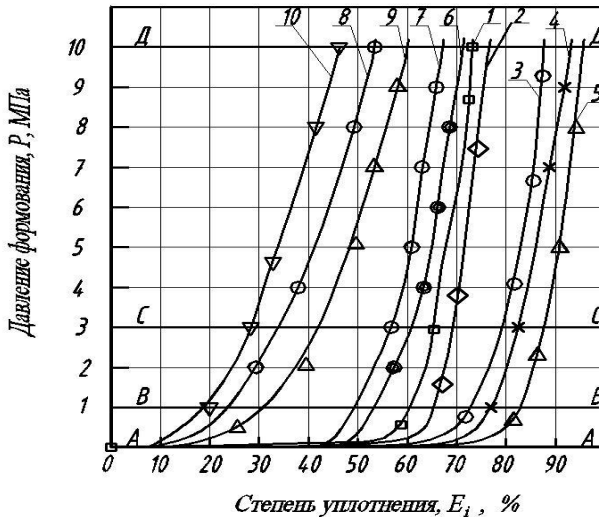


Рис.2. Компрессионные кривые уплотнения исследуемых материалов: 1 – пылеунос вращающихся печей цементного производства, ($w = 12\%$); 2 – пылеунос + сырая известняково-глинистая смесь, ($w = 12\%$); 3 – пылеунос вращающихся печей известкового производства, ($w = 18\%$); 4 – сырая смесь (известняк+глина+шлак), ($w = 12\%$); 5 – известняково-глинистая смесь, ($w = 12\%$); 6 – магнетитовый концентрат, ($w = 10\%$); 7 – магнетитовый концентрат + 1% бентонита, ($w = 10\%$); 8 – вспученный перлитовый песок, ($w = 50\%$); 9 – пылеунос производства вспученного перлита (ППП) ($w=50\%$); 10-ППП +3% бентонита ($w = 50\%$)

Далее наблюдается пропорциональный прирост степени уплотнения E_i при возрастании значений P_i (участок $B C$), соответствующий второй стадии уплотнения. Минимальный прирост значений E_i при повышенных энергозатратах – (участок $C D$), характерен для третьей стадии уплотнения. Следует отметить, что на участках $B D$ для уплотнения тяжёлых железорудных шихт ($\rho_{ум} = 4570 \text{ кг/м}^3$, кривые 6,7) требуются большие усилия, чем для уплотнения известняково-глинистых сырьевых

смесей ($\rho_{уст}=2650 \text{ кг/м}^3$), пыли цементного ($\rho_{уст}=1950 \text{ кг/м}^3$) и известкового производств (кривые 1-5). Для уплотнения легких тонкодисперсных материалов (вспученный перлитовый песок и ППП, $\rho_{уст}=1450 \text{ кг/м}^3$) с низкой насыпной плотностью ($\rho_0=150 \text{ кг/м}^3$) до значений $E=10-50\%$ (кривые-8-10) требуется приложить давления от 5 до 10 МПа. Дисперсные материалы с высокой плотностью, например, магнетитовый концентрат ($\rho_{уст}=4900 \text{ кг/м}^3$), уплотняются в указанной области давлений под действием сил тяжести.

Из приведённых данных можно сделать вывод о целесообразности организации постадийного процесса гранулирования дисперсных материалов, особенно материалов с низкой насыпной плотностью, с обязательной стадией обезвоздушивания порошкообразной смеси. Техническим решением указанного технологического приёма может служить вибровалковый способ предварительного уплотнения шихты, позволяющий сочетать удаление газообразной фазы и получение микророздышей (микрогранулята), являющихся центрами гранулообразования.

Исследования и расчет процессов уплотнения порошкообразных материалов вибро-валковым способом показали, что скорость удаления газовой фазы из порошков ($v_{г.ф.}=0,14 \text{ м/с}$) значительно меньше скорости витания частиц ($v_s=1,0 \text{ м/с}$), и через зазоры уплотняющего устройства будет удаляться воздух. Однако, учитывая, что за стадией предварительного уплотнения шихты и ее микрогранулирования следует стадия окончательного формирования гранул с приложением динамического воздействия, то целесообразно знать значения скорости уплотнения материалов с различными физико-механическими характеристиками: для материалов с высокой плотностью (магнетитового концентрата и железорудных шихт) $\rho_0>3000 \text{ кг/м}^3$; карбонатно-глинистых материалов $\rho_0=(2...3)10^3 \text{ кг/м}^3$; а также техногенных материалов с насыпной плотностью $\rho_0=800-2000 \text{ кг/м}^3$ и композиционных смесей ($\rho_0<800 \text{ кг/м}^3$), включающих легкие материалы с невысокой насыпной плотностью (вспученный вермикулит, перлит и др.).

Проведенные нами теоретические исследования процесса постадийного уплотнения влагонасыщенных материалов свидетельствуют о необходимости определенной выдержки формуемой шихты под давлением. Это способствует не только созданию благоприятных условий для окончательного удаления газообразной фазы из формуемого материала, но и обеспечивает необходимые условия для фильтрации жидкой фазы в межпоровом пространстве. Для изучения процесса миграции жидкой фазы в порошкообразной шихте использовано уравнение Дарси, после интегрирования которого и соответствующих преобразований получено

аналитическое выражение для определения необходимого времени фильтрации жидкости через зернистый слой формуемой смеси

$$\tau_{\phi} = 0,5 \cdot \eta_{\text{жс}} \cdot r_0 \cdot X_0 \frac{V_{\text{жс}}^2}{S^2 \Delta P}, \quad (1)$$

где r_0, X_0 - удельное сопротивление и приведенная толщина слоя зернистой среды соответственно, м^{-1}

Изучение процессов деформации порошкообразных материалов и их релаксации после снятия напряжения позволило установить выражение для определения необходимого времени упругой релаксации материала

$$\tau_{\text{упр.р.}} = \frac{(\ln \sigma_0 - \ln \sigma_{\tau}) \theta}{\ln \ell}, \quad (2)$$

где σ_0 - начальное напряжение, Н/м^2 ; σ_{τ} - текущее напряжение в слое формуемого материала, Н/м^2 ; θ - период упругой релаксации формуемого материала, с; ℓ - длина площади контакта между формирующими валками, м.

С учетом свойств материала формирующих валков ($E_{\phi.в}$ - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона), радиуса валков ($R_{\phi.в}$) получено выражение для расчета времени уплотнения и деформации порошкообразного материала в зависимости от сжимающего усилия $F, \text{Н/м}$

$$\tau_{\text{упл.д.}} = \frac{2}{\pi \cdot n_{\phi.в.}} \sqrt{\frac{F(1-\mu^2)}{\pi \cdot E_{\phi.в.} \cdot R_{\phi.в.}}}. \quad (3)$$

При условии $\tau_{\text{упр.р.}} \leq \tau_{\text{упл.д.}} \geq \tau_{\phi}$, с учетом выражений (1)-(3) для обеспечения упругой релаксации материала частота вращения формирующих валков, $n_{\phi.в.}, \text{с}^{-1}$:

$$n_{\phi.в.} \leq \frac{2 \cdot \ln \ell \sqrt{F(1-\mu^2)}}{\pi (\ln \sigma_0 - \ln \sigma_{\tau}) \theta \cdot \sqrt{\pi \cdot E_{\phi.в.} \cdot R_{\phi.в.}}}, \quad (4)$$

для обеспечения условий фильтрации жидкой фазы

$$n_{\phi.в.} \leq \frac{2 \sqrt{F(1-\mu^2)} S^2 \cdot \Delta P}{0,5 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{жс}} \cdot r_0 \cdot X_0 \cdot V_{\text{жс}}^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot E_{\phi.в.} \cdot R_{\phi.в.}}}. \quad (5)$$

Для обеспечения заданной производительности гранулятора, кроме того, необходимо учитывать производительность уплотняющего устройства (q) при получении качественной продукции.

На базе основополагающих теоретических положений формирования упруговязкопластичных структур и результатов изучения их напряжённо-деформированного состояния разработана реологическая модель процесса гранулирования полидисперсных смесей (рис.3), составленная

из элементов (тел) Гука (H), Ньютона (N), Сен-Венана (SV). Постадийный процесс упруговязкопластического деформирования материала описывается выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}$, – относительная деформация слоя деформируемого материала на 1, 2 и 3 стадиях его формирования соответственно.

Учитывая, что в исходном состоянии гранулируемый материал находится в разрыхлённом состоянии, не требующем для уплотнения значительных динамических усилий, то на первой стадии (участок А-В) (рис.2 и 3) для равномерного и эффективного уплотнения материала может быть использовано вибровоздействие. При этом упругий элемент с модулем E_0 (тело Гука), характеризующий капиллярную жидкость, мгновенно передаёт деформацию на амортизатор Ньютона с постоянной вязкостью η_0 . Капиллярная жидкость демпфирует и мигрирует в межпоровом пространстве, обеспечивая при этом межчастичное уплотнение и удаление газообразной фазы.

Так как для модели Максвелла на первой стадии уплотнения слоя $P_H^D = P_N^D = \bar{P}_1$, то относительная деформация имеет вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{P}_1}{E_0} + \frac{\bar{P}_1}{\eta_0} t_1, \quad (7)$$

Процесс деформирования частиц на второй стадии может быть представлен телом Гука, характеризующим упругую деформацию частиц формуемой смеси (E_2). Упруговязкое деформирование частиц при их микро-гранулировании описывается моделью Максвелла ($M=H-N$). Силы межчастичного трения и взаимного перемещения частиц могут быть описаны элементом Сен-Венана ($\bar{\tau}_2$). Вторую стадию можно представить в виде комбинированной модели Пойнтинга-Томпсона ($PT = H/M$) с элементом Сен-Венана (PT/SV_1). После преобразований и решения основополагающих уравнений окончательно относительная деформация материала при микрогранулировании (II стадия) имеет вид:

$$\varepsilon_{II} = \frac{\bar{P}_2 - \bar{\tau}_2}{E_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t_2}{\eta_1}\right) \right], \quad (8)$$

где $\bar{P}_2$ – давление формирования микрогранул, Па; E_1, E_2 – модули упругости микрогранулята и поровой жидкости, Па, соответственно; η_1 – вязкость поровой жидкости, Па · с; $\bar{\tau}_2$ – предел текучести микрогранул, Па; t_2 – время формирования материала на второй стадии, с.

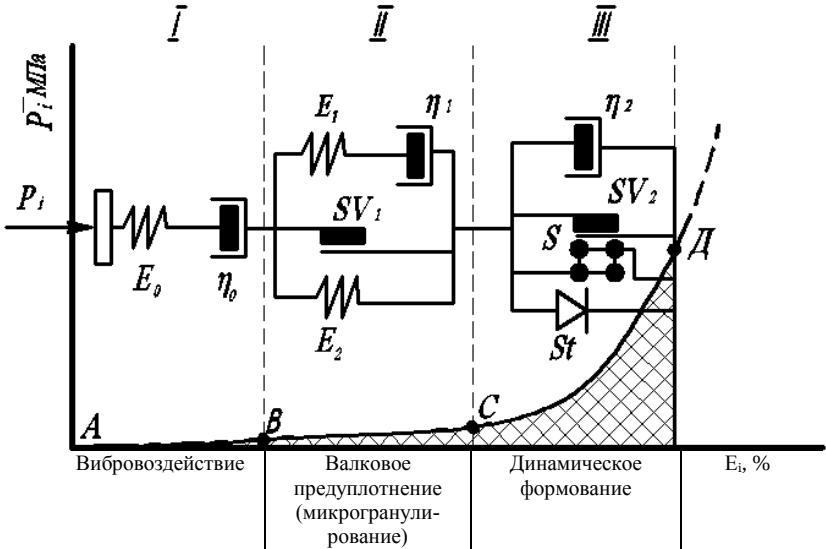


Рис.3. Реологическая модель постайдного процесса гранулирования порошкообразной смеси

На третьей стадии реализуется основной процесс гранулирования при более высоких динамических нагрузках. Прочность связи каркасообразующих частиц учитывается элементом Сен-Венана (SV_2). Вязкостные свойства поровой жидкости (η_2) оцениваются элементом Ньютона. Данное сочетание тел Сен-Венана и Ньютона характерно для модели Бингама.

На процесс гранулообразования существенное значение оказывает переориентация частиц и микрогранул в пространстве, которые учитываются с помощью нелинейно-деформированного структурного элемента S . Одновременно с образованием новых гранул при динамических нагрузках наблюдается также и их разрушение, которое учитывается телом St - стопор. При организации процесса гранулирования необходимо, чтобы количество вновь образованных гранул превышало количество разрушенных.

Динамический процесс гранулообразования на третьей стадии можно представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{e^p (\bar{P}_3 - \bar{P}_\kappa) \cdot t_3}{2\eta_2 \sin \lambda_s}, \quad (9)$$

где e^p – сдвиговая деформация при полной перекомпоновке частиц; $\bar{P}_3$ – предельное давление уплотнения гранул, Па; $\bar{P}_x$ – напряжение сдвига частиц в грануле, Па; η_2 – вязкость коагуляционно-структурированной поровой жидкости, Па·с; λ_s – предельный угол перекашивания элемента S; t_3 – время гранулирования на третьей стадии, с.

Аналитическое выражение, описывающее весь цикл структурной перестройки порошкообразной системы – постадийного процесса гранулирования, имеет вид:

$$\varepsilon_{(t)} = \left(\frac{\bar{P}_1}{E_0} + \frac{\bar{P}_1}{\eta_0} t_1 \right) + \frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_2}{E_1} \left[1 - \exp \left(- \frac{E_2 t_2}{\eta_1} \right) \right] + \frac{e^p (\bar{P}_3 - \bar{P}_K) \cdot t_3}{2 \eta_2 \sin \lambda_s} . \quad (10)$$

Согласно полученным аналитическим выражениям процесс гранулирования целесообразно осуществлять по трём стадиям:

стадия I – удаление газообразной фазы и формирование уплотнённой структуры частиц; II стадия – дальнейшее уплотнение материала при микрогранулировании; III стадия – динамическое гранулообразование в водопадном или водопадно-каскадном режиме с последующим упрочнением поверхностного слоя гранул в каскадном режиме.

Таким образом, используя вибровалковый способ предварительного уплотнения материала, обеспечиваются условия для удаления газообразной фазы, перемещения поровой жидкости внутри формируемого слоя, а также релаксации упругих напряжений на первой стадии гранулообразования в дисперсных системах. Как следует из реологической модели, на второй и третьей стадиях определяющую роль играют структурно-механические свойства каркасообразующей части формируемого материала и пластическая вязкость поровой жидкости. Для подтверждения и развития гипотезы о разделении формируемых материалов на каркасную составляющую и структурированную поровую суспензию нами проведены реологические исследования моделей коллоидно-капиллярно-пористых тел и модельных дисперсионных сред на примере железорудных шихт, содержащих низкодисперсный магнетитовый концентрат и высоконабухающий бентонит. Результаты исследований представлены в главе 4.

Нами исследованы магнетитовые концентраты различных горно-обогатительных комбинатов (ГОКов), содержащие более 90% частиц размером менее 40 мкм. Минералогический анализ рядовой пробы железорудного концентрата Лебединского ГОКа показал, что содержание магнетита в нём составляет 86,4 мас.%, гематита – 0,5 мас.%, кварца – 13,2 мас.%. Магнетит имеет зёрна размером 3х3 – 12х39 мкм, гематит 6х8 – 6х8 мкм. Кварц представлен зёрнами размером 3х3 – 26х34 мкм.

Магнетит имеет частицы неправильной формы, в основном пластинчатой вытянутой формы с острыми краями.

Комкуемую шихту, и в дальнейшем окатыши, можно рассматривать как совокупность дисперсной фазы и дисперсионной среды. К последней, естественно, относится вода и ионы солей. Расчет частичной концентрации компонентов в единице объема влажного окатыша показал, что содержание частиц бентонита на 1,5-2 порядка выше, чем концентрата, что обусловлено диспергированием бентонита до частиц коллоидного размера. Последнее позволяет считать бентонитовую суспензию дисперсионной средой.

Для выяснения вопроса о существовании поровой бентонитовой суспензии нами были проведены специальные микроструктурные исследования сечения промышленных сырых окатышей Лебединского ГОКа по специальной методике мгновенного замораживания образцов при температуре жидкого азота с последующей их сушкой путем вакуумной сублимации (рис.4).

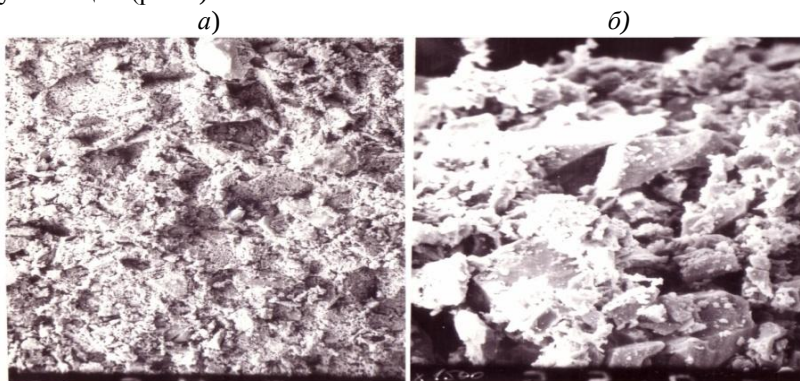


Рис.4. Электронно – микроскопические снимки внутренней структуры окатыша при увеличении: а – х200, б - х1500

Сравнивая микроструктуру окатышей при различных увеличениях, следует отметить ее неоднородность. Частицы бентонита в виде сетки располагаются между кристаллическими частицами магнетита. В зонах локализации бентонита во влажном концентрате обязательно будет происходить его набухание с образованием суспензий различной концентрации. Поэтому целесообразно оценивать связующую добавку по интенсивности изменения ее реологических показателей, а именно вязкости, как наиболее ответственной за процесс гранулообразования в комкуемых шихтах, особенно на второй и третьей стадиях.

Реологические исследования бентонитовых суспензий показали, что в исследованной области скоростей деформации ($48,6-1312 \text{ с}^{-1}$) все реологические кривые адекватно описываются моделью Бингама-Шведова при уровне значимости 0,05. Расход бентонитов в комкуемых железорудных шихтах составляет от 0,5 до 1,3 % при влажности концентратов 9,0-11,5%. Поэтому рабочий диапазон концентрации бентонитовых суспензий составляет 5-15 мас. %.

Установлено, что зависимость вязкости бентонитовых суспензий от ее концентрации имеет экспоненциальный характер

$$\eta = \eta_0 \exp(KC); \ln \eta = \ln \eta_0 + KC. \quad (11)$$

Показатель K характеризует интенсивность изменения вязкости от концентрации и предложен нами для качественной характеристики бентонитов, как реологический показатель R :

$$K = R = \frac{\ln \eta}{C}, \quad (12)$$

где C – концентрация суспензии в д.ед.

Бентониты одного и того же отбора имеют близкие значения реологического показателя, определенного по эффективной и пластической вязкости. Это обусловлено тесной зависимостью между значениями эффективной (η) и пластической (η^*) вязкости:

$$\eta = 0,4353 + 1,2674\eta^* \quad r_{\chi\eta} = 0,9943. \quad (13)$$

Таким образом, для оценки качества связующего достаточно определить пластическую (η^*) или эффективную (η) вязкость, при градиенте скорости сдвига $= (600 \dots 650) \text{ с}^{-1}$, суспензии глинистого связующего материала концентрации $C = 10$ мас. % и рассчитать реологический показатель.

Разработанный метод оценки связующих материалов для производства железорудных окатышей пригоден для исследования как набухающих, так и ненабухающих материалов минерального происхождения, а также водорастворимых полимеров (А.с. №1636822).

Ориентировочно оценить расход новой связующей добавки можно по соотношению реологических показателей

$$\frac{r_{on}}{r_{баз}} = \frac{R_{баз}}{R_{on}} \quad \text{или} \quad r_{on} = r_{баз} \frac{R_{баз}}{R_{on}}, \quad (14)$$

где $r_{on}, r_{баз}$ – расход исследуемого материала (опытного) и базового (бентонит) соответственно; $R_{on}, R_{баз}$ – реологические показатели исследуемого и базового связующего материала соответственно.

Для оценки технологических свойств добавок и гранул использованы косвенные методы, которые включают исследование моделей и перенесение установленных закономерностей на реальные объекты. Наиболее рациональным является реологический метод исследования концентрированных дисперсных систем, в которых дисперсионной средой является бентонитовая суспензия, дисперсной фазой – магнетитовый концентрат и флюсующая добавка. Объемную долю наполнителя (φ) изменяли от 0,24 до 0,52. Исследования проводили на ротационном вискозиметре Реотест-2. Для расчета использовали уравнение Муни:

$$\eta_{см} = \eta_{д.с.} \frac{2,5\varphi}{(1-K\varphi)}, \quad K = \frac{1}{\varphi} - \frac{2,5}{\ln\left(\frac{\eta_{см}}{\eta_{д.с.}}\right)}, \quad (15)$$

где $\eta_{см}, \eta_{д.с.}$ – вязкость наполненной системы (смеси) и дисперсионной среды (д.с.) соответственно.

Установлено, что в системе, где дисперсионной средой являются неньютоновские жидкости (бентонитовые суспензии), наполнителем – магнетитовые концентраты различных ГОКов, коэффициент заполнения не является постоянной величиной и зависит (рис.5) от объемной доли наполнителя:

$$K = A + B \cdot 1/\varphi, \quad r_{xy} = 0,9988. \quad (16)$$

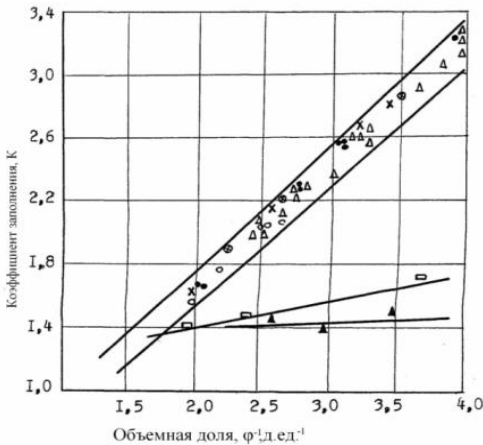


Рис. 5. Зависимость коэффициента заполнения от объемной доли наполнителя. Состав системы: дисперсионная среда (д.с.) – бентонитовая суспензия, наполнитель (н):

- – концентрат, известняк ПГОКа;
- Δ – концентрат, известняк МГОКа;
- × – концентрат ЛГОКа;
- ⊗ – концентрат ОЭМК;
- – кремнезем;
- – раствор полиэлектролита (д.с.), концентрат (н);
- ▲ – глицерин (д.с.), концентрат (н)

Из рис.5 видно, что концентраты Лебединского, Полтавского, Михайловского ГОКов, Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК) имеют близкие значения коэффициентов, что объясняется

одинаковой природой магнетитовых концентратов и близкими значениями их удельной поверхности ($S=220-260 \text{ м}^2/\text{кг}$).

Для более крупных частиц кремнезема ($S = 105 \text{ м}^2/\text{кг}$) наблюдается менее тесная корреляционная связь коэффициента от объемной доли. Это может быть обусловлено уменьшением частичной концентрации твердой фазы.

Объемная доля твердой составляющей в окатышах (φ) зависит от влажности (W), истинной плотности материала (концентрата и известняка, ρ_m) и дисперсионной среды ($\rho_{ж}$). Проведенные аналитические исследования позволили получить уравнение для расчета пластической вязкости окатышей:

$$\eta_{ок} = \eta_{д.с.} \cdot \exp \left[\frac{2,5(100 - W)}{\left[100 + W \left(\frac{\rho_m}{\rho_{ж}} - 1 \right) \right] \cdot (1 - B) - A(100 - W)} \right]. \quad (17)$$

Расчетные значения вязкости окатышей по модельным представлениям составляют $0,17 - 0,25 \text{ МПа} \cdot \text{с}$, что согласуется с результатами определения вязкости окатышей в промышленных условиях.

Исследованы также кривые течения коллоидно-капиллярно-пористых тел (ККПТ), полученных виброуплотнением из магнетитового концентрата с различной добавкой щелочного бентонита до пористости образца (32 ± 2)%, что соответствует степени заполнения твердым компонентом реальных окатышей. Испытания проводили на сдвиговом приборе П10-С при нормальных напряжениях $\sigma = (0,1 \dots 0,5) \text{ МПа}$.

Установлена линейная зависимость предела текучести (τ_0) от нормального напряжения σ вида:

$$\tau_0 = B + D \sigma. \quad (18)$$

Таблица 1

Реологические параметры ККПТ и его дисперсионной среды

% бент.	Характеристика ККПТ				Дисперсионная среда ККПТ		
	B , МПа	D	τ_0 , МПа	$\eta^* \cdot 10^{-5}$, Па*с	C , %	η_0 , Па*с	$\eta_{0 \text{ расч.}}$, Па*с
0	0,50	1,12	0,51	0,22	0	0,0042	0,001
1	0,75	0,60	0,81	0,52	9	0,011	0,012
2	1,25	0,55	1,30	1,01	15	0,0196	0,021
3	1,60	0,25	1,62	1,33	23	0,0258	0,038

Из табл. 1, видно, что увеличение количества связующей добавки приводит к возрастанию прочности связи частиц, оцениваемой коэффициентом B , и снижению коэффициента D , характеризующего силы трения между частицами материала сформованного тела.

Динамический предел текучести окатышей составляет $\tau_{ок}=0,29$ МПа. Для диапазона касательных напряжений $\tau=\tau_0-\tau_{ок}$ в области малых скоростей деформации рассчитана пластическая вязкость η^* по уравнению

$$\eta^* = \frac{\tau_0 - \tau_{ок}}{\dot{\gamma}} . \quad (19)$$

Сравнение расчетных и действительных значений пластической вязкости бентонитовых суспензий показывает их удовлетворительную сходимость, особенно в области рабочих концентраций.

Проведенные реологические исследования позволили разработать методологические принципы подбора связующих материалов для гранулирования низкодисперсных непластичных материалов. Для оценки пригодности связующего материала предлагаются следующие понятия: тождественный расход заменителя – расход, обеспечивающий свойства окатышей, тождественные свойства окатышей с высококачественным щелочным бентонитом; эквивалентный расход заменителя, приводящий к одинаковому химическому составу, что и базовый расход щелочного бентонита. Приближенной оценкой пригодности связующей добавки может служить соответствие эквивалентного и тождественного расходов. Исследования природных связующих материалов показали, что эквивалентный расход мергеля превышает расход бентонита для условий ЛГОКа в 3,4 раза; для МГОКа - 3,3 раза, по результатам реологических исследований в 3,4-3,6 раз. Превышение расхода нонтронитов по сравнению с бентонитом - 2,0 раза. Это подтверждено результатами опытно-промышленных испытаний.

Актуальной задачей повышения качества железорудных окатышей является снижение расхода балластных технологических связок минерального происхождения. Перспективными в этом плане являются полимерные добавки органического происхождения, образующие коагуляционные структуры на стадии окомкования и выгорающие при высокотемпературном переделе окатышей. Нами исследованы водорастворимые полимеры (ВРП), образующие анион- и катионактивные полиэлектролиты в воде. Реологические и адсорбционные исследования растворов ВРП показали, что анионактивные полиэлектролиты по своему действию аналогичны щелочным бентонитам и являются их перспективными заменителями. Установлены тождественные расходы полимера в железорудных шихтах, которые составляют 0,4-0,6 кг/т.

Для внесения небольших количеств полимеров разработан способ подготовки шихты, включающий совместное измельчение и введение полимера с флюсующей добавкой (А.с. 1601159, 1632994).

Наиболее перспективными являются многокомпонентные связующие материалы, включающие бентонит и водорастворимый полимер. Добавка 0,2-0,5% ВРП к бентониту позволяет снизить их расход в комкуемых шихтах на 30-50 %. На многокомпонентные связующие добавки получены авторские свидетельства (№901313, №954464, №1063850).

Щелочноземельные бентониты являются связующими материалами минерального происхождения, использование которого возможно после модифицирования. Исследования суспензий бентонитов с добавками соды показали, что максимум вязкости проявляется при добавке соды, соответствующей полному замещению щелочноземельных катионов на натрий. Зависимость вязкости бентонитовых суспензий щелочноземельных бентонитов от добавки к ним соды положена в основу определения обменной емкости (А.с. №1592778) и монтмориллонита в глинистых породах (А.с. №1404898).

Для оценки способности щелочноземельных бентонитов к модифицированию и последующему использованию в качестве связующей добавки при гранулировании дисперсных материалов нами предложен коэффициент модифицируемости M :

$$M = \frac{0,053E}{C}(R - R_0), \quad (20)$$

где C – добавка соды к бентониту, %; R, R_0 – реологический показатель модифицированного и немодифицированного бентонита соответственно.

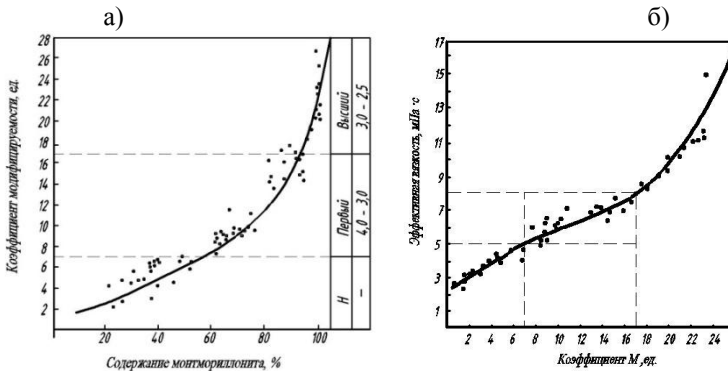


Рис.6. Классификация щелочноземельных бентонитов по коэффициенту модифицируемости (а); зависимость вязкости бентонитовых суспензий ($C_T = 10\%$) от коэффициента M (б)

Разработана классификация щелочноземельных бентонитов по коэффициенту модифицируемости, позволяющая разделить бентониты на несколько сортов (рис.6). Первый ($M=7-17$) и высший ($M>17$) с добавками соды к бентониту 4,0-3,0% и 2,5 – 3,0% соответственно. Некондиционные бентониты имеют коэффициент $M<7$.

Для получения экспрессной информации о качестве бентонитов определяют вязкость 10% суспензий с добавкой 3,0% карбоната натрия к бентониту. По графику, изображенному на рис.6,б, определяют его коэффициент модифицируемости, по классификационному графику (рис.6, а) определяют сорт щелочноземельного бентонита и оптимальную добавку к нему щелочного модификатора. Эффективным модификатором щелочноземельных бентонитов является также содовый плав – отход производства капролактама (А.с №1392132). Таким образом, с использованием микрореологического подхода к исследованию дисперсных систем, на уровне изобретений, разработаны различные технологические способы повышения качественных показателей гранул за счет использования связующих добавок минерального и органического составов.

Исследования процессов агломерации показали, что вязкость связующих растворов играет важную роль не только в процессах динамического гранулообразования, но и при агломерации открытых поверхностей полидисперсных материалов в статических условиях с целью снижения пылеуноса.

В главе 5 представлены различные способы агломерации порошкообразных материалов с целью снижения их пыления, а также специфические особенности процессов утилизации техногенных материалов.

Одним из способов снижения пылеуноса является агломерация поверхностного слоя полидисперсных материалов с образованием защитного слоя из твёрдых частиц, скреплённых связующим материалом. Исследования процессов смачивания и пропитки слоя дисперсных материалов растворами высокомолекулярных полиэлектролитов показали, что прочность образующегося покрытия зависит от комплекса параметров, характеризующих физико-химические свойства компонентов дисперсной системы, а именно:

$$A = \frac{\sigma_{\text{жс}} \cdot \cos \theta}{\eta} \quad (21)$$

Комплекс параметров A условно можно считать адгезионной характеристикой, которая имеет размерность скорости (м/с) и косвенно характеризует способность связующей добавки смачивать дисперсный материал и проникать в поры поверхностного слоя. Установлено, что при увеличении значения параметра A более 10 м/с значительно снижа-

ется прочность покрытия толщиной 1 см, высушенного в естественных условиях (рис. 7).

Анализ факторов, влияющих на агломерацию поверхностного слоя дисперсной системы, показал, что для равномерного распределения и пропитки слоя дисперсного материала, а также с целью получения прочного покрытия вязкость связующих растворов должна составлять не более 10 мПа*с. Для подтверждения вышеуказанных закономерностей нами исследованы различные дисперсные материалы: шламы железистого титана, фосфогипс, уголь, хвосты магнитной сепарации при получении железорудных концентратов на фабрике обогащения ЛГОКа. Все эти материалы складываются (шлам железистого титана, фосфогипс), перевозятся (уголь) или хранятся открытым способом и нуждаются в поверхностном закреплении с целью снижения пылеуноса.

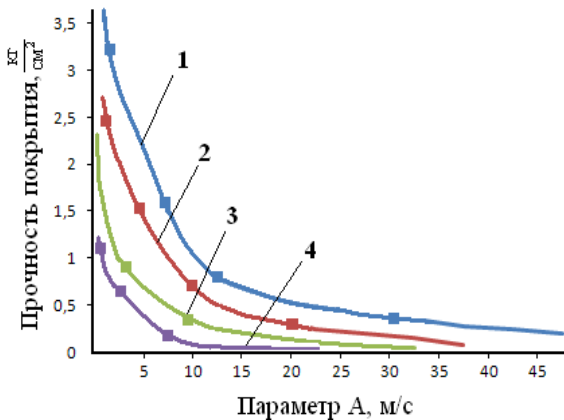


Рис.7. Зависимость прочности покрытия различных дисперсных материалов от физико-химических свойств закрепляющей композиции: 1- песок + растворы карбамидоформальдегинных смол; 2 - слюда; 3 - песок; 4 - хвосты магнитной сепарации, обработанные растворами ПАА: ЛСТ = 1:10.

В качестве компонентов закрепляющих растворов выбраны лигно-сульфонаты технические, латекс, Na-КМЦ, полиакриламид (ПАА). Для закрепления пляжей хвостохранилищ на длительный период (более 1,5 лет) использованы фенолформальдегидные смолы (ФФС). Толщина слоя обрабатываемого материала составляла 30-50 мм, после сушки в естественных условиях определяли прочность покрытия воздействием на него струей воздуха со скоростью 10-15 м/с. Водостойкость оценивали по изменению свойств после многократного (7-10 раз) увлажнения и высушивания. Оптимальные составы и поверхностный расход раствора для образования защитного покрытия толщиной 10-15 мм представлены в табл.2 (А.с. № 1710777, патент 2151205). Исследования показали, что определяющим параметром является вязкость и состав закрепляющего раствора. Для кратковременной защиты (1-3 месяца) пылящие поверхности дисперсных материалов целесообразно обрабатывать растворами

полимеров с вязкостью до 5 мПа*с, для более длительного периода - с вязкостью 5-10 мПа*с.

Установлено, что коагуляционная структура ВРП при высыхании образует полимер-дисперсную композицию с твердым веществом, прочность которой коррелируется с вязкостью пылесвязующих растворов.

При повышенных температурах агломерация сопровождается химическими превращениями и определяется условиями тепло- и массообмена. Исследована агломерация на стадии сушки шламов в клинкерообжиговой печи цементного производства с целью снижения пылеуноса.

Таблица 2

Расходные нормы связующих растворов

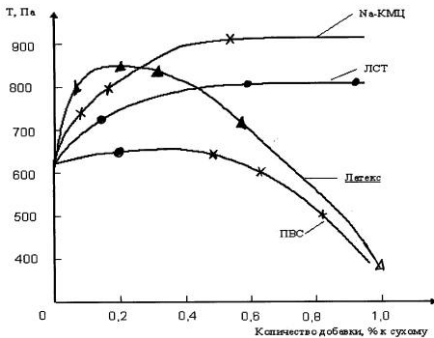
Дисперсный материал	Компоненты пылесвязующих растворов	Содержание, мас. %	Поверхностный расход раствора, л/м ²	Вязкость раствора, мПа·с
Фосфогипс	ЛСТ	5-7	3-5	1,0-3,0
	Латексная смесь	3-5	2-4	2,5-4,0
	ЛСТ и латексная смесь	1-3 0,5-1,0	3-5	2,7-5,0
Шлам железистого титана	Латексная смесь	5-7	3-5	1,0-3,0
Уголь	ЛСТ	10-15	3-5	2,0-5,0
	Na-КМЦ	1-2	1-3	3,5-7,4
	Латексная смесь	2-4	4-6	1,5-3,0
Хвосты магнитной сепарации	ЛСТ	2-3	4-6	6,5-8,5
	ПАА	0,25-0,5		
	ПАА ФФС	0,15-0,20 15-20	4-6	7,8-9,5

Снизить запыленность газов на холодном конце клинкерообжиговой печи возможно за счёт использования добавок, пластифицирующих шлам и способствующих образованию более прочных гранул в зоне сушки.

Установлено, что введение в сырьевые шламы небольших количеств водорастворимых полимеров приводит к увеличению прочности агломератов и слипаемости пылей (рис.8).

Для пылей с добавкой оптимального количества ВРП получена зависимость слипаемости (Т) от уплотняющей нагрузки. По результатам исследований кинетики сушки, механических характеристик агломератов и аутогезионных свойств пылей установлено, что оптимальная добавка в шламы составляет: лигносульфонатов технических – 0,2-0,5 %;

латексной смеси – 0,05-0,2 %; натрий КМЦ – 0,1-0,3 % к сухому веществу.



На основании проведенных опытов по пылеуносу прогнозируется снижение концентрации пыли на выходе из холодного конца печи на 15-25% при введении в шлам оптимального количества водорастворимых полимеров на стадии подготовки шламов.

Рис. 8. Влияние добавок полимеров в сырьевые смеси на автогезионную прочность пылей (Т)

Из техногенных материалов предприятий стройиндустрии, с целью их утилизации, исследованы уловленные пыли клинкерообжиговой печи Белгородского цементного завода (ПБЦ), производства извести (ППИ), обжига перлитов (ППП), а также вскрышные попутно добываемые породы железорудных месторождений КМА. Материалы отличаются плотностью (истинной и насыпной), площадью удельной поверхности, дисперсностью, химическим составом (табл. 3). Уловленная пыль ПБЦ содержит около 40% K_2O и по данным БелНИИСХ является бесхлорным калийно-известковым удобрением с микроэлементами. Для повышения потребительских свойств пыль необходимо превратить в гранулированное калийно-известковое удобрение (КИУ) с размером гранул не более 5мм. Влажность гранулированных удобрений должна быть не выше 2%, прочность при сжатии - не менее 1,0 МПа.

Для получения гранул заданного качества разработана технология окомкования в барабанном грануляторе диаметром 1,5 м, длиной 4,5 м при частоте вращения барабана 12-20 об/мин и угле наклона 4-10 град. Связующей и упрочняющей добавкой является насыщенный водный раствор калия, полученный при затворении водой запечной пыли и некондиционных гранул в соотношении Т:Ж=1:5, вязкость связующего раствора составляет 1,5-2,0 мПа·с. Влажность шихты составляет 20±2%. Прочность сухих гранул на сжатие достигает (1,2-1,6) МПа.

Попутно добываемыми вскрышными породами ГОКов являются мела. По своим химическим свойствам мела относится к мелиорантам высшей категории, но вследствие высокой гигроскопичности и слипаемости сухомолотый мел не может использоваться без соответствующей подго-

товки. Разработана технология гранулирования мелов окатыванием на тарельчатом грануляторе с использованием в качестве связующих материалов бентонитовых глин (0,2-0,3%) или жидких комплексных удобрений (ЖКУ) (2-4%). Оптимальная температура сушки меловых гранул с бентонитом составляет 250-300 °С, с добавкой ЖКУ – 100-120 °С. Статическая прочность сухих гранул составляет 1,0-1,4 МПа, динамическая прочность 66,1-68,8%. Рабочая влажность шихты составляет 23-25%, вязкость суспензий связующих 2,0-2,5 мПас. Связующее, как и при гранулировании ПБЦ, в виде раствора подаётся в шихту на тарель в виде капель, что приводит к образованию зародышей гранул с последующим их ростом и уплотнением.

Предлагается также подготовка жидкого мелиоранта в виде устойчивой меловой суспензии концентрации 40-55%, что достигается при добавке в качестве стабилизатора 0,4-1,4% бентонита к мелу (А.с.№1594161) или ЛСТ – 0,55-0,75% (патент №1813771), или УЦР – 0,55-0,75% (патент №1781194).

Актуальной задачей комплексной переработки минерального сырья является разработка технологии утилизации уловленной пыли при производстве вспученного перлитового песка на ООО «Бентопром». Пылевидная фракция (ППП) с размером частиц менее 0,16 мм, согласно ГОСТ 10832-91, является некондиционным продуктом. Ее использование в качестве теплоизоляционного материала наиболее целесообразно в гранулированном виде.

Установлено, что гранулирование перлитосодержащих шихт необходимо осуществлять в несколько стадий. Сначала производится уплотнение шихты с образованием зародышей, затем формирование гранул в динамичном режиме и на последней стадии - упрочнение поверхностного слоя. Экспериментально установлено, что процесс получения гранул размером 3 – 7 мм стабилен при следующем составе шихты, масс. %: перлит 15-20; бентонит 2,5-4,0; гипс 2,5-4,0; жидкое стекло (товарное) 20-22; вода – остальное.

Гранулы, полученные из шихты оптимальных составов, были испытаны в соответствии с требованиями к заполнителям пористым неорганическим для строительных работ (ГОСТ 9758-86). Насыпная плотность гранул составляет 190 – 270 кг/м³, предел прочности на сжатие в цилиндре 0,26-0,31 МПа.

Таким образом, исследованные материалы отличаются химическим, минералогическим составом, дисперсностью, слипаемостью и др. Для сравнительной оценки комплекса свойств дисперсных материалов в настоящей работе предлагается использовать усредненную характеристику дисперсности (K_d) в виде произведения истинной плотности

($\rho_{уст.}, \text{кг/м}^3$), учитывающей природу дисперсного материала, и удельной площади поверхности частиц дисперсного материала ($S, \text{м}^2/\text{кг}$), зависящей от способа его подготовки:

$$K_0 = \rho_{уст.} * S. \quad (22)$$

Показатель (K_0) имеет такую же размерность, как и удельная поверхность ($S_{уд}, \text{м}^{-1}$) и может быть использован для сравнительной характеристики поверхностных свойств порошкообразных материалов различного минералогического и химического составов. Для дисперсных материалов рассчитан также максимальный коэффициент уплотнения, показывающий их способность к агломерации:

. Как видно из табл. 3, чем выше характеристика дисперсности материала, тем ниже его насыпная плотность и выше оптимальная влажность формирования.

Таблица 3

Сравнительная характеристика дисперсных материалов

Ма- териал	—	—		—	$K_0 10^{-6}$,	,%	Способ агломера- ции
Магне- тито- вый концен- трат	4580	2500	1,8	220 ± 20	$1,02 \pm 0,12$	9-11	Окомкова- ние с пла- стичным связующим материалом
Мел	2650	970	2,7	140 ± 20	$3,05 \pm 0,02$	21-23	Экструзия, окатывание с жидким связующим
ППИ	2750	700	3,9	1200 ± 15	$3,3 \pm 0,05$	18-19	То же
ПБЦ	2050	480	5,3	2120 ± 30	$4,4 \pm 0,02$	20-22	>>
ППП	1500	100	15	7200 ± 530	$10,8 \pm 0,8$	50-70	Постадий- ный про- цесс грану- лообразо- вания с предуплот- нением
Перлитовый песок	1550	150	10	6200 ± 320	$9,3 \pm 0,5$	50-60	То же

С учетом результатов проведенных исследований, а также существующих данных по агломерации различных дисперсных систем, предложена классификация дисперсных материалов на: низкодисперсные ($K_d < 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$), среднелдисперсные ($K_d = 2 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$) и высокодисперсные ($K_d > 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$).

В процессах агломерации могут участвовать как лиофильные дисперсные системы, содержащие твердые частицы, самопроизвольно диспергирующиеся в водной среде, так и лиофобные, инертные по отношению к воде. В состав шихты могут входить также растворимые или кристаллизующиеся компоненты. Следует отметить, что предложенная усредненная характеристика дисперсности применима к оценке лиофобных материалов, образующих, согласно классификации П.А.Ревбиндера, термодинамически и агрегативно неустойчивые дисперсные системы. В соответствии с предложенным показателем дисперсности разработаны рекомендации по выбору способа организации процессов агломерации в дисперсных системах различной устойчивости (рис.9).

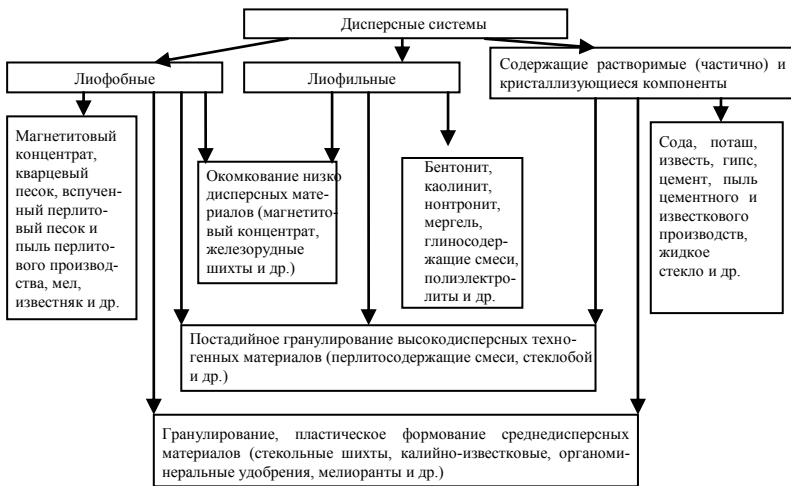


Рис. 9. Рекомендации по организации процессов агломерации в различных дисперсных системах

Исследования показали, что низкодисперсные тяжёлые материалы, имеющие $K_d < 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, например, магнетитовый концентрат, гранулируют в присутствии влагеёмких пластификаторов, которые подают в шихту на стадии смешения для связывания свободной влаги материала.

Всё это способствует образованию коагуляционно-структурированной системы для обеспечения пластических деформаций гранул в процессе их формирования. Рабочая влажность шихты находится в пределах 9-11%, коэффициент уплотнения ниже 2.

Из материалов средней дисперсности $K_0 = (2 \dots 6) 10^6 \text{ м}^{-1}$, можно получать гранулы методом экструзии или окатывания при влажности 18-23%. Коэффициент уплотнения этих материалов составляет от 2 до 6. При гранулировании в поле действия гравитационно-центробежных сил технологическую связку целесообразно подавать разбрызгиванием на материал, окатываемый в грануляторе. Если согласно технологии в состав смеси входят растворимые и кристаллизующиеся компоненты, например в стекольных шихтах, то еще на стадии смешения влажной шихты происходит растворение и кристаллизация компонентов с образованием коагуляционно-конденсационно-кристаллизационной структуры сырой гранулы в результате ее окатывания.

Наибольшие значения величин, характеризующих дисперсность материала ($K_{\text{упл.}} = 10-15$ и $K_0 > 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$), имеют перлитовый песок и пыль перлитового производства (ППП). Исследования показали, что для высокодисперсных материалов с низкой насыпной плотностью обязательной является стадия предварительного уплотнения шихты для удаления газообразной фазы и образования микрогранул. Для обеспечения пластических свойств гранулируемая смесь должна содержать лиофильные материалы (бентонит), а также кристаллизующиеся (гипс) и растворимые (жидкое стекло) компоненты.

В главе 6 представлены научно-технические разработки по созданию агрегата для постадийного процесса гранулирования полидисперсных материалов, исследованию его конструктивных и технологических параметров.

Для моделирования постадийного процесса гранулообразования полидисперсных систем нами разработан стендовый аппарат, обеспечивающий выполнение следующих технологических функций: предварительное уплотнение увлажненной порошкообразной смеси и ее микрогранулирование, вибрационное упрочнение формируемого гранулята и его классификация, вибрационно-центробежное формование и упрочнение гранулята при его водопадно-каскадном режимах в цилиндрических камерах, поверхностное упрочнение полученных гранул в торообразных камерах при повышенной степени свободы формируемого материала. Возможность плавного варьирования частоты вращения эксцентрикового вала, величины эксцентриситета вала, геометрических параметров цилиндрических камер позволяет изменять характер постадийного вибрационно-центробежного воздействия на гранулируемый материал.

Конструкция вибрационно-центробежного гранулятора (ВЦГ, рис. 11) защищена патентом РФ (№ 2412753).

Проведены исследования кинематических, и конструктивно-технологических параметров ВЦГ (рис.10, 11).

Конструкция ВЦГ позволяет изменять характер динамического воздействия на гранулируемый материал в зависимости от его характеристик (дисперсности, влагоемкости, пластичности и др.) на каждой стадии. Изменение положения среднего барабана (т.В) относительно первого (т. А) позволяет варьировать соотношение нормальных и касательных напряжений, возникающих при контактном взаимодействии гранулируемых частиц: при перемещении т.В к т.С – усиливаются нормальные напряжения при контактном взаимодействии частиц, при перемещении т. В к т. А – касательные напряжения (окапывающее действие).

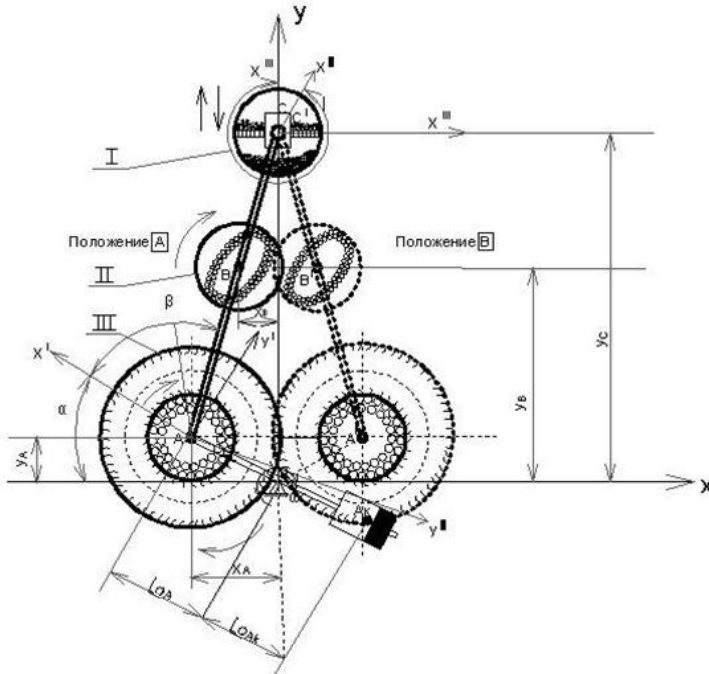


Рис. 10. Структурно-расчетная схема ВЦГ для определения его кинематических параметров

Получены значения аналогов скоростей и ускорений для т.В среднего барабана, положение которого определяет характер динамического воздействия на процесс гранулообразования (преобладаю-

щий водопадный, водопадно-каскадный или каскадный режимы гранулообразования):

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (23)$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (24)$$

где e – величина эксцентриситета эксцентрикового вала, м;
 β – углы поворота кинематических звеньев (кривошипа, шатуна), град. соответственно;
 μ_n – коэффициенты нормальных и касательных напряжений при контактном взаимодействии гранулируемых частиц соответственно;
 ω , $\ddot{\varphi}$ – аналоги угловой скорости и углового ускорения кинематического звена АС соответственно.

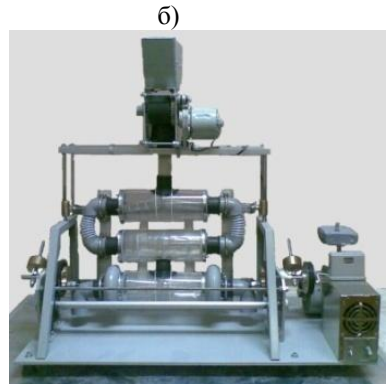
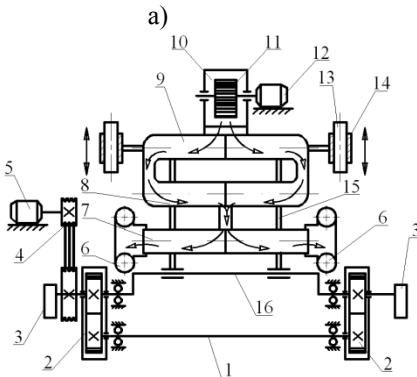


Рис.11. Кинематическая схема (а), общий вид вибрационно-центробежного гранулятора (б): 1 - промежуточный вал; 2 - зубчатая пара; 3 - противовесы; 4 - клиноременная передача; 5 - электродвигатель основного привода; 6 - торообразные камеры; 7, 8, 9,- барабаны гранулирования материала; 10 - виброжелоб; 11 - упругий уплотняющий валок микро-гранулирования; 12 - электропривод устройства предуплотнения и микрогранулирования материала; 13 - направляющие стойки; 14 - ползун; 15 - подвижная рама; 16 - эксцентриковый вал.

Для определения энергосиловых параметров ВЦГ установлены значения момента сопротивления M от сил тяжести, инерции кинематических звеньев, приведенных к входному звену механизма (эксцентриковому

валу), а также дополнительных сопротивлений в узлах механизма, подшипниковых опорах и трансмиссии привода.

Потребляемая мощность привода ВЦГ, Вт:

$$P_{\text{ВЦГ}} = \frac{M_{\text{ВЦГ}} \cdot \omega}{\eta_{\text{ВЦГ}}}, \quad (25)$$

где ω – угловая скорость эксцентрикового вала, рад/с.

Подтвержденные экспериментально расчеты показывают, что при реальных значениях параметров: $\eta_{\text{ВЦГ}} = 0,5$; $\eta_{\text{ш}} = 0,5$, потребляемая мощность привода ВЦГ составляет 0,8-1,2 кВт.

Проведенные теоретические исследования условий гранулирования полидисперсных материалов на последней стадии показали, что для обеспечения равномерного распределения значений скорости сдвиговых деформаций по ширине камеры и обеспечения большей степени свободы гранул наиболее целесообразен торообразный профиль камеры.

Различные варианты организаций технологических процессов гранулирования и схем установки ВЦГ позволяют обеспечивать: интенсивное динамическое воздействие на гранулируемый материал в его водопадном-каскадном или каскадном режимах, усиление классифицирующего эффекта на первой стадии и вибрационно-центробежного на последующих стадиях; реализацию упрочнения поверхностного слоя гранул при повышенной степени свободы их движения в торообразных камерах и др.

В главе 7 представлены результаты опытно-промышленной апробации и внедрения научно - исследовательских разработок.

Опытно-промышленные испытания различных связующих добавок при окомковании железорудных шихт показали правомочность использования реологического показателя для оценки качества связующих материалов и их пригодности для окомкования железорудных концентратов. Научно-исследовательские разработки положены в основу технических условий на глинистые связующие материалы для производства железорудных окатышей (ТУ 14-9-364-89). Пригодными являются природные щелочные бентониты, имеющие реологический показатель более 16; щелочноземельные бентониты с коэффициентом модифицируемости более 7 и реологическим показателем более 16; рыхлые мергели, содержащие 38 – 44% оксида кальция, с реологическим показателем более 5,5; элювий по ультрабазитам с содержанием оксида железа 13 – 43% с реологическим показателем более 6.

Для реализации результатов экспериментальных исследований, подтверждения установленных закономерностей процесса гранулирования, а также для обеспечения конструктивно – технологического совершенствования аппаратного оформления нами проведены опытно – про-

мышленные испытания вибрационно – центробежного гранулятора (патент РФ № 2412753).

Диаметр уплотняющего валкового устройства микрогранулирования составляет $D_v=0,25\text{ м}$; диаметры (D_k) и длины (L_k) камер гранулятора: $D_{k1}=0,15\text{ м}$; $D_{k2}=0,15\text{ м}$; $D_{k3}=0,15\text{ м}$; $D_{k.\text{тор}}=0,24\text{ м}$; $L_{k1}=L_{k2}=0,5\text{ м}$; $L_{k3}=0,6\text{ м}$; $L_{k.\text{тор}}=0,24\text{ м}$. Для обеспечения условий для удаления газообразной фазы, микрогранулирования и упругой релаксации в уплотненном материале частота вращения формирующих валков составляет $n_e=(1,1-2,0)\text{ с}^{-1}$ при производительности ВЦГ $G_{\text{зр}}=50-100\text{ кг/час}$. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала $e=20\cdot 10^{-3}\text{ м}$; установочная мощность привода блока формирующих барабанов $N_{\text{учм}}=1,2\cdot 10^3\text{ Вт}$ при частоте их вращения $n=(3,5-7,5)\text{ с}^{-1}$.

По результатам проведенного многофакторного планирования эксперимента получены уравнения регрессии, характеризующие зависимости выхода кондиционных гранул ($q_{\text{гр}}$), прочности гранул на сжатие ($\sigma_{\text{сж}}$), насыпной плотности гранул ($\rho_{\text{нас}}$) в высушенном состоянии от степени заполнения барабана материалом (φ), частоты вращения эксцентрикового вала (n), коэффициента предварительного уплотнения смеси ($K_{\text{упл}}$), а также влажности перлитосодержащей смеси (W).

Установлено, что для обеспечения заданных выходных параметров: $\sigma_{\text{сж}}=0,6-0,8\text{ МПа}$, $\rho_{\text{нас}}=250-350\text{ кг/м}^3$, $Q_m=50-100\text{ кг/ч}$, необходимо соблюдать следующие значения варьируемых параметров: $n=(5-6)\text{ с}^{-1}$; $\varphi=0,10-0,12$;

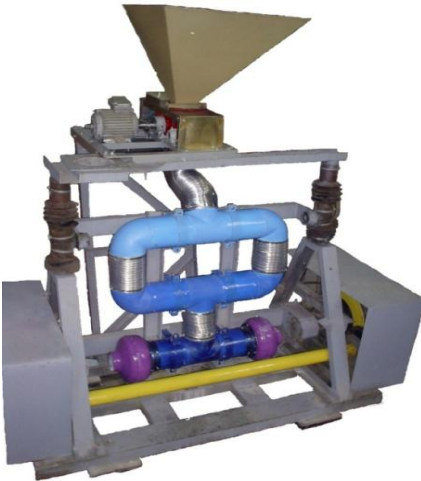


Рис. 12. Опытно промышленный вибрационно-центробежный гранулятор

$W=52-56\%$, $K_{\text{упл}}=2,5-3,0$.

Установленные закономерности процесса постадийного гранулообразования полидисперсных материалов с различными физико-механическими характеристиками реализованы в технологическом комплексе многофункционального действия (рис.13). Технологический комплекс, исходя из поставленных задач, позволяет получать сформованную продукцию: экструдированные (поз. 13), окатанные виброцентробежным способом (поз. 14) или поризованные полистирольные

(поз.17) гранулы, а также гранулы из полидисперсных материалов с различными физико - химическими свойствами: карбонатно - глинистых, алюмо-иликатных, перлитосодержащих материалов, мелкозернистых материалов органического происхождения, а также уловленной пыли сушильных и обжиговых агрегатов различных производств: цементного, известкового, керамзитового и др.

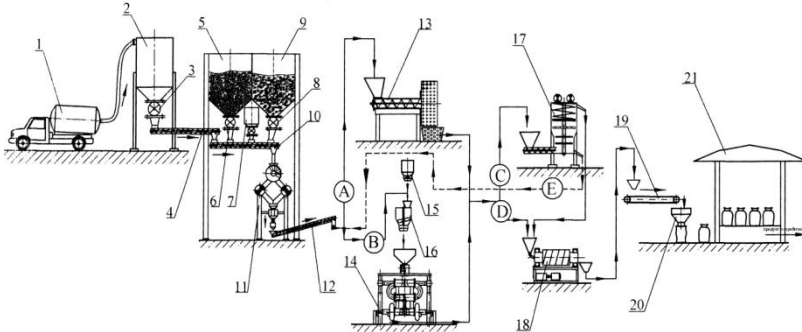


Рис.13. Технологический комплекс для производства гранулированных поризованных заполнителей: 1 – автотранспорт; 2 – бункер для компонентов гранулируемых смесей; 3, 6, 8 – ячейковые питатели; 4, 12 – конвейер шнековый; 5 – бункер вяжущего; 7- бункер связующих добавок; 9 – бункер техногенных фиброапполнителей; 10 – питатель шнековый; 11 – роторно-циркуляционный смеситель; 13 – пресс - валковый экструдер; 14 – вибрационно – центробежный гранулятор; 15 – бункер жидкого компонента; 16 – вертикальный лопасной смеситель; 17 - агрегат для поризации полистирольных гранул и их классификации; 18 – барабанно – винтовой СВЧ -сушильный агрегат (БВСА); 19 – ленточный конвейер; 20 – дозатор – упаковщик; 21 – склад продукции.

Полученная гранулированная продукция может быть использована как в основном технологическом производстве (получение вяжущих; сухих строительных смесей различного технологического назначения, в том числе теплоизоляционных смесей с использованием перлитосодержащих материалов и фиброапполнителей из целлюлозно - бумажных отходов, и др.), так и во вспомогательных производствах при утилизации различных техногенных полидисперсных материалов.

Разработанный технологический комплекс многофункционального действия является базовой основой для создания малотоннажных технологических комплексов по производству различных видов компактированной продукции. Разработан технологический регламент на процесс гранулирования материалов с различными физико - механическими свойствами. Техничко - экономическая эффективность от выполненных научных исследований подтверждена актами промышленных испытаний и внедрения научно – технических разработок на ООО «Бенто-пром», ООО «Чистовод», ООО «Рецикл-Интех», ЗАО «Белмеханобр»,

ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Экономический эффект от выполненных научно-технических разработок составляет 51,12 млн.рублей.

Общие выводы

1. Для решения проблемы выбора способа агломерации дисперсных материалов с учетом их физико-химических свойств используется предложенная классификация порошкообразных материалов по величине усредненной характеристики дисперсности на: низкодисперсные ($K_d < 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$), среднедисперсные ($K_d = 2 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$) и высокодисперсные ($K_d > 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$) с рекомендациями по технологии их агломерации и подбору связующей добавки.

2. Для гранулирования низкодисперсных непластичных материалов выбор связующей добавки проводится по величине реологического показателя (R). Пригодными связующими материалами для производства железорудных окатышей являются щелочные бентониты с реологическим показателем $R > 16$; щелочноземельные бентониты с коэффициентом модифицируемости $M > 7$ и $R > 16$; мергели, содержащие 38 – 44% оксида кальция и $R > 5,5$; нонтронит с содержанием оксида железа 43% и $R > 6$. Разработанные патентно-защищенные многокомпонентные связующие материалы, включающие бентонит и анионоактивные полиэлектролиты, позволяют улучшить качество товарных окатышей на 15 – 30%.

3. Для материалов средней дисперсности ($K_d = 2 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$) разработана технология утилизации техногенных материалов цементного, перлитового производств, а также вскрышных пород железорудных месторождений (мел, фосфорит) с производством гранулированных калийно-известковых и органоминеральных удобрений. Введение жидкой связующей добавки осуществляется непосредственно в формуемый материал на стадии окатывания, что приводит к образованию зародышей гранул с последующим их ростом и уплотнением.

4. Гранулирование высокодисперсных материалов ($K_d > 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$) происходит постадийно в разработанной патентно защищенной конструкции вибрационно-центробежного гранулятора. Предварительное уплотнение порошкообразной смеси осуществляется в пресс-валковом устройстве с профильной поверхностью валков. Частота вращения формирующих валков составляет 1,1–2,0 с⁻¹. Последующее гранулообразование происходит в формирующем блоке из трех цилиндрических барабанов. Для упрочнения поверхностного слоя гранулированной продукции используются торообразные камеры. Частота вращения эксцентриково-

го вала формующего блока составляет $n = (3,5 - 7,5)c^{-1}$, величина эксцентриситета $e = 20$ мм, потребляемая мощность привода $N = 0,8 - 1,2$ кВт.

5. Проведенные испытания опытно-промышленного вибрационно-центробежного гранулятора показали преимущество разработанного аппарата по сравнению с барабанными и тарельчатыми грануляторами и перспективность их использования для получения гранулированной продукции из техногенных материалов с низкой (менее 200 кг/м^3) насыпной плотностью. Для перлитосодержащих смесей получены уравнения регрессии зависимости выхода кондиционных гранул (q_{cp}), насыпной плотности ($\rho_{нас.}$) и прочности сухих гранул на сжатие ($\sigma_{сж.}$) от частоты вращения эксцентрикового вала (n), коэффициента предварительного уплотнения смеси ($K_{упл.}$), степени заполнения барабана по объему (φ) и влажности шихты (W). Для получения кондиционных гранул с насыпной плотностью $\rho_{нас.} = 250 - 350 \text{ кг/м}^3$, прочностью $\sigma_{сж.} = 0,6 - 0,8$ МПа частота вращения эксцентрикового вала должна составлять $n = (5 - 6)c^{-1}$ при заполнении барабана $\varphi = 0,10 - 0,12$, коэффициенте предварительного уплотнения шихты $K_{упл.} = 2,5 - 3,0$ и влажности смеси $W = 52 - 56\%$.

6. Для агломерации поверхностного слоя открытых дисперсных систем с целью предотвращения пылеуноса, с учетом разработанных требований к связующим растворам, предложены составы с использованием экологически безопасных компонентов (лигносульфонатов технических, натрий-карбоксиметилцеллюлозы, латекса, полиакриламида и др.) и определен их поверхностный расход. При этом для кратковременной защиты (1 – 3 месяца) пылящие поверхности дисперсных материалов целесообразно обрабатывать растворами полимеров с вязкостью до $5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при расходе $3 - 5 \text{ л/м}^2$. Для более длительного периода закрепления – вязкость растворов полимеров составляет $5 - 10 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при их расходе $4 - 6 \text{ л/м}^2$.

7. Агломерация дисперсных частиц на стадии сушки сырьевых шламов в клинкерообжиговой печи при добавке к сухой части шлама лигносульфонатов технических $0,2 - 0,5\%$, латексной смеси $0,05 - 0,2\%$ или $0,1 - 0,3\%$ натрий-карбоксиметилцеллюлозы приводит к снижению пылеуноса из холодного конца печи на $15 - 25\%$.

8. Разработанный технологический комплекс многофункционального действия и отдельные технологические модули для получения гранулированной продукции позволяют осуществлять процесс агломерации природных и техногенных материалов различных производств. Представлен технологический регламент на производство гранулированной продукции. Экономический эффект от использования выполненных научных разработок составляет более 50 млн. руб.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:
Монографии

1. **Ильина, Т.Н.** Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография / Т.Н. Ильина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 229с.

2. Обеспыливающая вентиляция : монография / В.А.Минко, И.Н.Логачев, **Т.Н. Ильина** и др.; под общ. ред. В.А.Минко.—Белгород: Изд-во БГТУ, 2010,Т.2. –565с.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

3. **Витюгин, В.М.** О комплексной оценке влагоемкости и реологических свойств бентонитовых глин / В.М. Витюгин, **Т.Н. Сомова** // Обогащение руд. – 1980. – №4 (150) – С.41-43.

4. **Витюгин, В.М.** О механизме взаимодействия бентонитовых глин с добавками полиэлектролита К-4 / В.М. Витюгин, Э.А. Губер, **Т.Н. Сомова**, Т.А. Хабас // Журнал прикладной химии.- 1980, т.13, №9. – С. 1941-1946.

5. **Балес, А.А.** Методика определения вязкости водных суспензий связующих добавок для окомкования / А.А. Балес, **Т.Н. Ильина** // Заводская лаборатория. – 1986. – №11. – С.58.

6. **Ильина, Т.Н.** Снижение пылеуноса из вращающейся цементной печи / Т.Н. Ильина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – №10. – С. 36-40.

7. **Лі́іна, Т.Н.** Structural and mechanical properties of pelletized fine materials / T.N. Лі́іна // Chemikal and Petroleum Engineering. – 2009, v45, №3-4. - S.115-118.

8. **Ильина, Т.Н.** Гранулирование в технологиях утилизации промышленных отходов / Т.Н. Ильина, Е.И. Гибелев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – №8. – С. 34-36.

9. **Ильина, Т.Н.** Способы агломерации поверхностного слоя полидисперсных материалов / Т.Н. Ильина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – №2. – С. 29-33.

10. **Ильина, Т.Н.** Механизм постадийного гранулообразования полидисперсных материалов / Т.Н. Ильина, В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 4. – С. 3-7.

11. **Ильина, Т.Н.** Процессы фильтрации газообразной и жидкой фаз при уплотнении порошкообразных материалов / Т.Н. Ильина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 5. – С. 11-14.

12. **Ильина, Т.Н.** Конструктивно-технологическое совершенствование агрегатов для гранулирования порошкообразных материалов /

Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин // Вестник БГТУ. – 2010. – №2. – С. 100-102.

13. **Ильина, Т.Н.** Реологические исследования растворов полиэлектролитов / Т.Н. Ильина // Вестник БГТУ. – 2010. – №3. – С. 110-114.

14. **Ильина, Т.Н.** О взаимодействии водорастворимых полимеров с компонентами гранулируемых шихт / Т.Н. Ильина // Вестник БГТУ. – 2010. – №2. – С. 110-113.

15. **Глаголев, С.Н.** Технологические модули для комплексной переработки техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, **Т.Н. Ильина**, В.И. Уральский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 43-45.

16. **Севостьянов, В.С.** Исследование условий процесса микрогранулирования в дисперсных системах / В.С. Севостьянов, **Т.Н. Ильина**, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин // Вестник БГТУ. – 2011. – №1. – С.81-86.

Авторские свидетельства и патенты

17. А.с. 901313. Связующая добавка для окомкования руд и концентратов / **Т.Н. Сомова**, А.А. Салыкин, А.В. Балес и др.; опубл. 30.01.82, Бюл. №4.

18. А.с. 954464. Связующая добавка для окомкования руд и концентратов / **Т.Н. Сомова**, А.А. Салыкин, Л.В. Безменова и др.; опубл. 30.08.82, Бюл. №32.

19. А.с. 1063850. Связующая добавка для окомкования руд и концентратов / **Т.Н. Сомова**, А.А. Салыкин, А.В. Балес и др.; опубл. 30.12.83, Бюл. №48.

20. А.с. 1224657. Способ контроля качества термообработанных железорудных окатышей / А.А. Балес, О.П. Зюбан, С.А. Пчельник, **Т.Н. Сомова**, Ж.Б. Цвик; опубл. 15.04.86, Бюл. №14.

21. А.с. 1330197. Окатыши для выплавки чугуна или стали / Д.Н. Солодовников, А.И. Везенцев, А.А. Смоликов, **Т.Н. Сомова**; опубл. 30.04.88, Бюл. №16.

22. А.с. 1404898. Способ определения щелочноземельного бентонита в глинистых смесях / **Т.Н. Ильина**, А.А. Балес, В.М. Кадошников и др.; опубл. 23.06.88, Бюл. №23.

23. А.с. 1392132. Связующая добавка для окомкования руд и концентратов / **Т.Н. Ильина**, А.А. Балес, М.Л. Вишневецкий и др.; опубл. 30.04.88, Бюл. №16.

24. А.с. 1636822. Способ определения пригодности щелочных бентонитов для производства окатышей / Б.Г. Виничук, А.А. Балес, А.П. Поддубный, **Т.Н. Ильина** и др.; опубл. 23.03.91, Бюл. №11.

25. А.с. 1601159. Способ подготовки шихты к окомкованию / **Т.Н. Ильина**, М.Л. Вишневецкий, А.А. Балес и др.; опубл. 23.10.90, Бюл. №39.

26. А.с.1592778. Способ определения обменной емкости щелочноземельных бентонитов / **Т.Н. Ильина**; опубл.15.09.90, Бюл. №34.

27. А.с. 1632994. Способ получения окатышей / **Т.Н. Ильина**, А.А. Балес, М.Л. Вишневецкий и др.; опубл.07.03.91, Бюл. №9 .

28. А.с. 1594161. Способ получения карбонатной суспензии для нейтрализации почвенной кислотности / **Т.Н. Ильина**, М.Л. Вишневецкий, А.Ш. Шакиров и др.; опубл. 23.09.90, Бюл. №35.

29. А.с. 1710777. Способ закрепления пылящей поверхности / **Т.Н. Ильина**, В.А. Минко, Л.В. Наумкина и др.; опубл. 07.02.92, Бюл. №5.

30. Пат. 1781194 РФ. Мелиорант для раскисления почв / Шок И.А., **Ильина Т.Н.**, Мясников Н.Ф. и др.; заявл. 23.04.90; опубл. 15.12.92, Бюл. №46.

31. Пат. 1813771 РФ. Мелиорант для раскисления почв / Шок И.А., **Ильина Т.Н.**, Шакиров А.Ш. и др.; заявл. 31.07.91; опубл. 07.05.93, Бюл. №17.

32. Пат. 2151205 РФ. Способ защиты поверхности обожженных окатышей от истирания и разрушения при перегрузках и транспортировании / **Ильина Т.Н.**, Минко В.А., Михайлова С.Д.; опубл. 20.06.00, Бюл. №17.

33. Пат. 2412753 РФ. Вибрационно-центробежный гранулятор / **Ильина Т.Н.**, Севостьянов М.В., Уральский В.И., Шкарпеткин Е.А.; заявл. 25.09.09 ; опубл.27.02.2011, Бюл. №6.

Публикации в других изданиях

34. *Балес, А.А.* Опыт использования глинистых связующих добавок для окомкования / А.А. Балес, Б.Г. Виничук, **Т.Н. Ильина.**- Белгород: НТО черной металлургии, 1986. – 33с.

35. *Сомова, Т.Н.* Влияние природы наполнителей на реологические свойства бентонитовых суспензий / Т.Н. Сомова, В.М. Витюгин // Новое в реологии полимеров: материалы XI Всесоюзного симпозиума по реологии / ИНХС АН СССР.– М.: ИНХС. –1981.– Вып 2. – С.61-63.

36. *Сомова, Т.Н.* Мергель – флюсосвязующая добавка в окомковании // Т.Н. Сомова, А.А. Балес, В.А. Серебренников // Молодые ученые-научно – техническому прогрессу: материалы III науч. техн. конф., - Донецк, 1982. – С. 11-14. – Деп. в УКРНИИНТИ, №3644 – Д 82.

37.*Балес, А.А.* Разработка многокомпонентных связующих добавок в окомковании / А.А. Балес, **Т.Н. Сомова**, А.В. Балес, // Подготовка ших-

ты для обжига и спекания: сб. науч. тр. – Свердловск: Уралмеханобр, 1983. – С.39-42.

38. **Сомова, Т.Н.** Реологические исследования концентрированных дисперсных систем / Т.Н. Сомова, А.А. Балес, В.И. Мосьпан // Совершенствование химии и технологии строительных материалов: сб. науч. тр. – М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1984. – С. 69-72.

39. **Балес, А.А.** Вовлечение в производство железорудных окатышей отходов добычи и переработки полезных ископаемых/А.А. Балес, **Т.Н. Сомова**, М.Л. Вишневецкий, В.А. Ткачев // Комплексное использование минерального сырья.– Алма –Ата, 1985, №8(86) – С.18-22.

40. **Сомова, Т.Н.** Оценка модифицируемости щелочноземельных бентонитов для окомкования / Т.Н. Сомова, А.А. Балес, В.А. Серебренников // Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке: тез.докл. Всесоюзной науч.техн. конф. / ДМЕТИ. – Днепропетровск, 1985. – С. 249-250.

41. **Ильина, Т.Н.** Водорастворимые полимеры в окомковании / Т.Н. Ильина // Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для доменного процесса и бескоксовой металлургии: тез.докл. Всесоюзной науч.техн. конф. / ДМЕТИ. – Днепропетровск, 1990. – С.58-59.

42. **Ильина, Т.Н.** Способы снижения поверхностного пыления дисперсных материалов при их открытом складировании и перевозке / Т.Н. Ильина // Машины и комплексы для новых экологически чистых производств строительных материалов: сб.науч. тр. – Белгород: Изд. БТИСМ, 1994. – С.126-130.

43. **Ильина, Т.Н.** Методы снижения поверхностного пыления на хвостохранилищах ГОКов / Т.Н. Ильина, В.А. Минко, С.Д. Михайлова // Промышленная экология: сб. науч. тр. – Ростов н/Д: Изд. РГСУ, 1998, вып. 2, – С.28-32.

44. **Ильина, Т.Н.** Влияние физико- химических свойств адгезива и дисперсного материала на прочность образующегося покрытия / Т.Н. Ильина, С.Д. Михайлова // Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережения в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века: сб. докл. Междунар. науч. практ. конф. / БелГТАСМ. – Белгород, 2000, Ч.6. – С.41-45.

45. **Романович, А.А.** Технологический комплекс для утилизации техногенных волокнистых материалов / А.А. Романович, **Т.Н. Ильина**, Н.В. Солопов и др. // Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: матер. Междунар. науч. практ. конф., Белгород / Вестник БГТУ. – 2005. – №11. – С.203-205.

46. **Ильина, Т.Н.** Техника и технология гранулирования отходов перлитового производства / Т.Н. Ильина, Е.А. Шкарпеткин // Сотрудничество для решения проблемы отходов: матер. VI Междунар. конф., Украина, НТУ, ХПУ.– Харьков: Изд-во ХПУ, 2009. – С.102-103.

47. **Гибелев, Е.А.** Вскрышные породы горнодобывающих предприятий КМА в технологии гранулирования органоминеральных удобрений / Е.И. Гибелев, **Т.Н. Ильина** // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях: матер. Десятого Международного симпозиума / Международная академия минеральных ресурсов, ФГУП ВИОГЕМ. – Белгород: Изд-во ВИОГЕМ, 2009. – С. 337-342.

48. **Ильина, Т.Н.** Технологический комплекс для производства перлитосодержащих заполнителей /Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин, М.Н. Спирин // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. научн.-практ. конф., Белгород, 5-8 окт. 2010 г. / Белгор. гос. технол. ун-т.— Белгород: Изд-во БГТУ, 2010.— Ч.3. – С.107-110.

49. **Ильина, Т.Н.** Технологический комплекс для производства перлитосодержащих композиционных смесей / Т.Н. Ильина, В.С. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин, А.А. Макридин, А.П. Писарчук // там же С. 111-115.

50. **Ильина, Т.Н.** Ресурсосберегающее оборудование для гранулирования техногенных материалов / Т.Н. Ильина, В.С. Севостьянов, А.В. Уральский, Е.А. Шкарпеткин // Ресурсо-и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: матер. Междунар. научн.-техн. конф., Беларусь, Минск / Белорусский государственный технологический университет – Минск: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч.2. – С.171-174.

ИЛЬИНА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ АГЛОМЕРАЦИИ
ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ АППАРАТУРНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Подписано в печать	7.07.2011г.	Формат 60x84 /16
Объем 2,5 Уч.-изд.л.	Заказ № 188	Тираж 100

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46.