

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УЧИТЕЛЬ Александр Давидович

УДК 669.162.24:621.928.2.(087.23)

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН ДЛЯ ПОДГОТОВКИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШИХТ

Специальность 05.04.04 - Машины и агрегаты металлургического
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск, 1992 г.



00820222 (G)

Работа выполнена в Днепропетровском
Знамени металлургическом институте

Официальные оппоненты:

академик АН УССР, доктор технических наук Ефименко Г.Г.

доктор технических наук, профессор Большаков В.И.

доктор технических наук, профессор Франчук В.П.

Ведущее предприятие: институт НИИ "Механобрчермет"
г.Кривой Рог

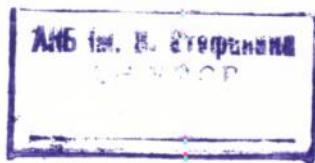
Защита диссертации состоится "1" декабря 1992 г.
в 12-30 часов на заседании специализированного совета
Д.068.02.02. по защите диссертаций на соискание ученой степени
доктора технических наук при Днепропетровском ордена Трудового
Красного Знамени металлургическом институте по адресу:
3200635, г.Днепропетровск, проспект Гагарина, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Днепропет-
ровского металлургического института.

Автореферат разослан "22" ОКТАБРЯ 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор

В.К.Цапко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсификация процессов спекания и плавки, снижение энергетических и материальных затрат при ведении этих процессов, повышение качества получаемых продуктов достигается за счет улучшения качества исходного сырья - шихтовых материалов. Одним из способов улучшения качества шихты является ее подготовка перед подачей в технологические агрегаты. Подготовка шихты к спеканию включает операции дробления, измельчения, окомкования, обезжелезивания, фракционирования, дозирования, усреднения и другие. При подготовке шихты к плавке используют операции дробления, охлаждения, фракционирования, дозирования. Основным методом подготовки является фракционирование, осуществляемое на грохотах. Грохочение шихты на современных вибрационных грохотах недостаточно эффективно. Нарращивание с целью повышения эффективности площади секущих поверхностей грохотов не является прогрессивным направлением развития этого вида оборудования, так как приводит к снижению удельной производительности, росту металлоемкости и энергоемкости аппаратов. С особой остротой стоит вопрос создания высокоэффективных питателей-грохотов для доменных печей объемом до 3000 м³, где ограниченность площадей подбункерных помещений не позволяет установить аппараты с развитой секущей поверхностью, а требования к эффективности грохочения весьма высоки. При эксплуатации в подбункерных помещениях доменных печей узлы вибрационных грохотов подвергаются воздействию высоких температур, абразивного материала и пыли, а в ряде случаев, и химически активных веществ, например, фенольной воды. Поддержание работоспособности таких аппаратов в условиях ограниченных по площади помещений, где обслуживание и ремонт затруднены, выдвигает высокие требования к их надежности. В аналогичных условиях работают шихтовые вибромашины коксосортировок коксохимических заводов, агломерационных фабрик.

В последние годы начинают формироваться и находить техническое воплощение новые идеи, на основе которых становится возможным совершенствование таких аппаратов. Эти идеи возник-

ли на фундаменте крупных научных и инженерных разработок, выполненных в институтах "Механобр" (д.ф.-м.н, профессор Блехман И.И., д.т.н. Лавров Б.П., к.т.н.: Вайсберг Л.А., Барзуков В.П., Жгулев А.С. и др.), ИГДЮАНР (д.т.н., профессор Тишков А.В.), МВМИ (д.т.н., профессор Гончаревич И.Ф.), ИГТМ АН УССР (акад. АН УССР Потураев В.Н., д.т.н. Червоненко А.Г. и др.), ДГИ (д.т.н., профессор Франчук В.П. и др.), ИЧМ (д.т.н., профессор Большаков В.И., к.т.н. Клоцман Е.Я. и др.), "Механобрчермет", "Гипромашуглеобогащение", "Гипромашобогащение", "Уралмашзавод", ПО "Рудгормаш" и другими авторами и научными коллективами.

Стало очевидным, что процесс фракционирования, реализуемый на вибрационных грохотах, включает подпроцессы подачи материала на вибрирующую плоскость, вибрационного транспортирования, внутрислоевых взаимоперемещений частиц, составляющих слой, поглощения частиц отверстиями сита, захвата их стенками отверстий, дробления и измельчения малопрочных частиц при их взаимодействии между собой и вибрирующей плоскостью. Интенсивность каждого из указанных подпроцессов определяет эффективность фракционирования и производительность аппарата, однако влияние каждого из них на указанные технологические параметры неоднозначно, при этом процесс фракционирования не аддитивен составляющим его подпроцессам. Таким образом, оптимизация процесса фракционирования на вибрационных грохотах требует решения комплексной многокомпонентной проблемы. Необходимость в повышении надежности вибрационных машин, работающих в тяжелых условиях, потребовала поиска новых технических решений при разработке таких аппаратов и их узлов.

Решению этих проблем посвящена настоящая работа, выполненная в соответствии с заданиями единого плана МНТК "Механобр" согласно постановления ГЦНТ СССР от 14.08.1986 г. № 377 и программы Минвуза СССР "Металл".

Цель работы - на основе изучения и теоретического анализа процессов, протекающих при подготовке шихты с применением вибрационных машин, анализа факторов, влияющих на работоспособность таких машин, разработать научные основы создания высокоэффективных вибрационных машин - питателей-грохотов для

подготовки металлургической шихты к спеканию и плавке.

Научная новизна работы: Разработана теория процессов взаимодействия толстого, в ряде случаев, полубесконечного слоя шихты с вибрирующей плоскостью, формирования производительности вибромашины при различных способах ее загрузки, видах траекторного поля рабочего органа, формах траекторий его отдельных точек и величинах кинематических и геометрических параметров. Разработана математическая модель процесса доставки мелких частиц на контакт с ситом, в основу которой положены представления о такой доставке, как о движении таких частиц в формируемых под воздействием вибраций поровых каналах под действием сил тяжести и сухого трения.

Разработана теория взаимодействия частиц шихты с перфорированным грузонесущим органом, включающая анализ процессов поглощения частиц отверстиями или их захвата кромками последних. Впервые эти процессы рассмотрены для частиц и отверстий произвольной формы. На основе обобщения закономерностей протекания процесса формирования слоя шихты на вибрирующем рабочем органе, внутрислоевых процессов, процесса взаимодействия частиц с ситом и их теоретического описания разработана математическая модель процесса грохочения, реализуемая на ЕС ЭВМ и в упрощенном виде на ПЭВМ.

Разработаны теоретические положения процесса разрушения частиц шихты при их виброобработке и доказана перспективность виброобработки шихты для стабилизации ее гранулометрического состава и повышения прочности при минимальном увеличении в ней некондиционных фракций.

Предложены вибрационные грохоты с неоднородными плоским и пространственным полями траекторий и дано математическое описание движения точек их рабочих органов в холостом ходу и под нагрузкой. Разработаны приемы синтеза таких машин с минимизацией динамических нагрузок, передаваемых на фундамент. На базе сформулированных задач и обоснованных научных положений предложен ряд аппаратов нового поколения для подготовки металлургических шихт.

Основной научный результат диссертационной работы заключается в разработке научных основ создания шихтовых вибрационных

машин с высокими технологическими показателями.

Практическая ценность. С использованием полученных научных результатов разработаны и выпускаются серийно на машиностроительных заводах вибрационные машины: питатели рудные АШЛ (совместно с институтом ВНИПИРУДМАШ), грохоты агломерата ГИТ-41Б (совместно с институтом "Гипромашобогашение"), грохоты аглоруды ГИТ-42 (совместно с институтом "Гипромашобогашение"), грохоты кокса ГИК-52А (совместно с институтом "Гипромашуглеобогашение"). Подготовлены к серийному производству и приняты межведомственными государственными комиссиями грохоты шихтовые ГИТ-62Ш и питатели ПП-1, выпускаются крупными партиями и широко внедряются в производство грохоты горячего агломерата И82А-ГРМ, грохоты кокса ГИТ-71К, питатели известняка ВД, питатели рудные ВПР и питатели агломерата и окатышей. Использование результатов диссертации позволило:

- обосновать и разработать методику определения технологических параметров вибрационной машины и производить выбор ее геометрических и кинематических параметров;
- обосновать метод стабилизации гранулометрического состава шихты и ее прочности в вибрационном силовом поле;
- разработать методику расчета кинематических параметров вибромашин с неоднородным полем траекторий рабочего органа с учетом нагрузки;
- обосновать и разработать метод прогнозирования износа элементов грузонесущей поверхности вибромашин;
- разработать конструктивные элементы шихтовой вибромашин, обеспечивающие ее высокую работоспособность;
- разработать ряд новых вибрационных машин для подготовки металлургической шихты к спеканию и плавке;
- предложить технические решения (способы и устройства) по совершенствованию системы подготовки шихты и ее отдельных звеньев.

Реализация результатов работы. В настоящее время на промышленных предприятиях металлургической промышленности находятся в эксплуатации более 1000 вибрационных питателей и грохотов И2-и типов, созданных с использованием приведенных в работе результатов исследований.

В институтах ВНИИ "Механобрчермет" (г.Кривой Рог), "Гипромашобогашение" (г.Санкт-Петербург) внедрены в практику конструирования методы расчетов вибромашин с неоднородным полем траекторий.

Экономический эффект от внедрения указанных разработок составил 24,8 млн.рублей.

Апробация работы. Материалы работы доложены и обсуждены на международной конференции (1990 г., Варна), на 8 всесоюзных конференциях (1977, 1979, 1980, 1984, 1985, 1990 г.г.), на 4 республиканских и отраслевых конференциях (1969, 1972, 1985 г.г.) и 3 семинарах (1986, 1990, 1991 г.г.).

В полном объеме диссертация доложена и обсуждена на научно-технических советах институтов ВНИИ "Механобрчермет" (г.Кривой Рог), "Гипромашобогашение" (г.Санкт-Петербург), расширенном научном семинаре кафедры "Машины и агрегаты металлургического производства" ДМЕТИ.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в монографии, брошюре, 99 статьях, защищено 3 патентами и 95 авторскими свидетельствами.

Объем работы. Диссертация представлена в двух томах. Первый состоит из введения и 10 разделов, изложенных на 511 страницах машинописного текста, 23 таблиц, 168 рисунков, списка литературы из 448 наименований. Второй изложен на 355 страницах и содержит акты внедрения, расчеты экономических эффектов, акты и протоколы испытаний, приемки на серийное производство, справок, подтверждающих внедрение новых машин, примеров расчета, информационного массива, иллюстрирующего и дополняющего некоторые положения работы, приведенные в первом томе.

Содержание работы. Во введении показана важность рассматриваемой проблемы, приведен перечень решаемых задач и вопросов, выносимых на защиту.

В первой главе "Анализ состояния вопроса. Постановка задачи исследований" рассмотрены основные направления совершенствования вибрационных машин, как звеньев транспортно-технологической линии "добычный участок-плавильный агрегат". Показано, что в этой линии в качестве звеньев используется 16 видов (по назначению и условиям эксплуатации) вибрационных машин. Методом

экспертной оценки произведен выбор основных направлений в области создания вибрационных машин и их исследований. Произведен анализ конструктивных и технологических особенностей вибрационных машин на основе предложенных четырех условных коэффициентов технического уровня, что позволило оценивать уровни совершенства конкретных аппаратов, эксплуатируемых в несопоставимых условиях: коэффициентов совершенства компоновки, объемной эффективности, объемной производительности, уровня технических решений. Анализ на этой основе технического уровня 138 типов и типоразмеров вибрационных грохотов, выпускаемых в нашей стране и зарубежом, позволил выработать ряд рекомендаций по рационализации типоразмерных рядов вибрационных машин.

Проведен анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований в области процессов, протекающих при виброперемещении и грохочении сыпучих материалов. По мнению автора, новые результаты в исследуемой области техники могут быть получены на основе разработки математической модели с последующей ее экспериментальной проверкой и уточнением. Наиболее перспективным для разработки такой модели является использование уравнений математической физики с определением коэффициентов этих уравнений, например, на основе феноменологических моделей. Фундамент таких исследований заложен трудами большой группы отечественных и зарубежных ученых: И.И. Блехмана, В.Н.Потураева, В.А.Олевского, В.А.Баумана, Н.Н.Быховского, Л.Б.Левинсона, В.А.Перова, В.П.Франчука, П.С.Ермолаева, М.Н.Летошнева, В.Штофа, П.Водзинского, И.Ф.Гончаревича, Б.И.Крюкова, В.Бадера, Г.Н.Корнева, В.Я.Хайнмана, В.В.Гортинского, М.С.Исламова, Е.А.Непомнящего, О.Н.Тихонова, А.Майнеля, Г.Шуберта и других.

Проведенный анализ технологических процессов и схем подготовки шихты на металлургических предприятиях позволил установить, что трудами отечественных ученых и специалистов Е.Ф. Вегмана, Ю.С.Карабасова, Г.Г.Ефименко, В.И.Большакова, И.К. Борискина, С.П.Ефимова, Н.И.Миценко, Н.М.Бабушкина и других обоснованы и, в ряде случаев, реализованы направления модернизации таких схем и технологий; дальнейшее совершенствование

упомянутых технологий и схем сдерживается несовершенством аппаратов для шихтоподготовки.

На основе выполненного анализа в рамках рассматриваемой проблемы сформулирован перечень задач, решение которых осуществлено в рамках настоящей работы. Такими задачами являются: исследования процессов формирования слоя шихты на рабочем органе вибромашины, внутрислоевых процессов, процессов на контакте слоя с просеивающей поверхностью; создание математической модели процесса грохочения; исследования стабилизации гранулометрического состава и механической прочности шихты в вибрационном поле; создание и испытания, внедрение высокоэффективных вибрационных шихтовых машин; разработка мероприятий по повышению стойкости вибромашин в технологических линиях подготовки шихты.

Во второй главе "Выпуск шихты из выпускного отверстия питающего устройства. Формирование слоя на вибрирующей рабочей поверхности" рассмотрены закономерности формирования слоя шихты на грузонесущем органе вибромашины при различных способах подачи материала на него, разработана методика расчета параметров слоя - высоты и скорости транспортирования.

Способ подачи шихты из бункера на грузонесущую поверхность вибромашины существенно влияет на ее технологические показатели, так как определяет распределение амплитуд колебаний по длине рабочего органа, высоту и скорость транспортирования слоя и, следовательно, производительность аппарата. Показано, что при имеющейся многообразии способов загрузки, формирование слоя происходит либо в соответствии с закономерностями, характерными для непрерывных потоков, либо с более сложными закономерностями, учитывающими затухание упругих волн в слое, неоднородность траекторного поля рабочего органа. Для такого наиболее общего случая разработан метод определения параметров слоя, заключающийся в том, что в уравнение движения слоя вместо внутренних сил вводится результат их совместного действия - распределение амплитуд колебаний по высоте слоя. Рассмотрена модель многослойного потока шихты. Для участка слоя шихты, находящегося на высоте h от вибрирующей плоскости записаны уравнения на возможных этапах совместного движения, проскаль-

звания, полета. Получено уравнение для определения фазовых углов переходов этапов скольжения в этап полета. Получены также выражения для величин перемещения элементарных слоев, составляющих слой высотой H , на каждом из возможных этапов движения. Средняя скорость движения слоя высотой H определяется из выражения: $V_{сл}(H) = [S_+(H) + S_-(H) + S_n(H)] : T$, где S_+ , S_- , S_n - перемещения слоя в этапах скольжения и полета; T - период переключений в установившемся режиме. Эта скорость существенно изменяется при изменении высоты слоя, причем при некоторых значениях H виброперемещение прекращается. Из этого следует, что производительность вибромашин, определяемая как $Q = K \cdot H \cdot V_{сл}(H)$ при некоторых значениях H имеет максимум. При загрузке грузонесущей поверхности полубесконечным по высоте слоем именно этот максимум определяет не только производительность вибромашин, но и параметры ее сопряжения с питающим устройством: заглубление и высоту активно истекающего слоя. Разработана методика определения дозы выпуска шихты из питающего устройства без зависаний, а также расхода шихты из негоризонтального отверстия. Проведены экспериментальные исследования, позволившие подтвердить и углубить основные теоретические положения.

В третьей главе "Внутрислойные процессы в шихтовых материалах при воздействии вибраций" рассмотрены свойства шихтовых материалов, влияющие на их грохотимость: распределение частиц по размерам, их форма, размеры поровых каналов. Установлено, что шихтовые материалы являются бинарной смесью с границей припасовки для агломерата и окатышей 7...8 мм, для кокса 40 мм. Получены теоретические распределения, описывающие гранулометрический состав шихт. Предложена методика построения распределения размеров частиц по тракту шихтоподачи при заданном распределении в любой точке тракта и известных параметрах перегрузок. Разработана статистическая модель шихты, в которой входными параметрами являются размеры и форма частиц, а выходными - объем и поверхность частиц, их количество в единице объема, размеры поры, поверхность и порозность слоя и др. Получены выражения для всех упомянутых параметров слоя шихты. Путем сравнения пяти различных моделей формирования порознос-

ти слоя шихты при воздействии на него вибраций с экспериментальными данными установлено, что для расчета порозности пригодно выражение, в котором шихта рассматривается как сплошная среда.

$$m_{cp} = 1 - \frac{1 - m_{cm}}{1 + K_y \frac{A_0}{H_{cm}} \cdot \frac{2}{\ell n} \frac{1}{\zeta} (1 - \zeta^2) \left(1 - \frac{1}{\zeta \Gamma}\right)},$$

где m_{cm} , H_{cm} - порозность и высота покоящегося слоя; A_0 - амплитуда колебаний грузонесущей поверхности; $\zeta = e^{-A_0 H}$, $K_y = 1,05 \dots 1,2$ - коэффициент коррекции.

При представлении шихты в виде совокупности дискретных частиц близкие к экспериментальным значениям порозности получены с использованием вычислительного эксперимента, в основу которого положена одномерная молекулярно-динамическая модель (МД-метод). Проведены экспериментальные исследования внутрислоевых процессов в вибровозбужденном слое шихты и установлено, что перемещение мелких фракций в слое происходит при ускорениях вибрирующей плоскости до 30 м/с^2 преимущественно за счет их направленного движения - сегрегации, при больших ускорениях - за счет диффузии. Интенсивность сегрегации H_c и диффузии H_d зависит не только от величины ускорений, но и от формы траектории вибрирующей плоскости и ее направления. Разработана феноменологическая модель процесса доставки мелких фракций на контакт с вибрирующей плоскостью, в основу которой положены представления о такой доставке, как о движении частиц в вертикальных трубах под воздействием сил тяжести и сухого трения. Скорость направленного движения i -ой фракции

$$V_{ci} = K_{\varphi} \left(\frac{g d_n K_w}{4 \text{tg } \varphi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{d_i}{d_n K_w} \right)^{\frac{5}{2}};$$

где K_{φ} - коэффициент формы частицы шихты; d_n - эквивалентный диаметр поры; φ - угол внутреннего трения; d_i - средний размер фракции; $K_w = 1 - e^{-(0,75 \dots 1) A \omega^2 / g}$ - коэффициент раскрытия пор.

Для шихтовых материалов с большим содержанием мелких фракций, например, возврата агломерата, движение мелких фракций

на контакт с ситом описывается процессом осаждения несферической частицы в стесненных условиях в ограниченной псевдожидкой среде. Скорость доставки при этом может быть определена из выражения

$$V_{ci} = 0,242 \frac{\gamma_M - \gamma_{cm}}{\mu \cdot tg \varphi} d_i^2 K_\varphi \frac{m_{cp}^{\lambda+2}}{(1 - m_{cp})^2} \left(1 - \frac{d_i}{d_n}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_n}\right)^2\right];$$

где γ_M , γ_{cm} - плотность частицы и среды, соответственно, кг/м³; μ - коэффициент вязкости, П; λ - коэффициент, комплексно учитывающий размер, плотность и форму частиц ($\lambda = 4,65 \dots 7$).

В четвертой главе "Исследование процесса прохождения частиц через сеющую поверхность" предложен комплексный параметр, определяющий поглощающую способность сита, то есть подрешетную производительность грохота - поток частиц через сито и получено выражение для его расчета, кг/м².с:

$$q_i = \frac{3}{4} K_q K_{ж.с} P_i \gamma_{cm} \sqrt{\frac{g}{f}} d_{омб} \left(1 - \frac{d_i}{d_{омб}}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{C_i}{d_i^2 (1 + 3K_v^2)};$$

где K_q - коэффициент пропорциональности; $K_{ж.с}$ - коэффициент живого сечения сита; f - коэффициент трения шихты о сито; $d_{омб}$ - гидравлический диаметр отверстия; d_i , C_i - средний диаметр частиц i -ой фракции и ее концентрация в приконтактном ситовом слое, соответственно; P_i - вероятность прохождения частицы в отверстие при встрече с ним.

Предложена методика определения P_i для частиц и отверстий произвольной формы, базирующаяся на вычислительном эксперименте. Смысл вычислительного эксперимента заключается в том, что проводится серия из n опытов, в каждом из которых i -я частица, сгенерированная по заданным значениям ее размера d_i и дисперсии $\sigma_i = K_v d_i$, случайно располагается на площади, содержащей отверстие. В случае, если массив точек Z_{oj} , образующий контур частицы, находится внутри массива точек ε_n , образующего контур отверстия Γ , то частица прошла через отверстие. Индикатором положения массива Z_{oj} относительно ε_n является значение интеграла, являющегося частным случаем интеграла Коши.

$$\frac{1}{2\pi i} \oint \frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon - z_0} d\varepsilon = \begin{cases} f(z_0) & - \text{внутри } \Gamma \\ 0 & - \text{вне} \end{cases}$$

Поскольку контур Γ представлен массивом точек ε_k на комплексной плоскости, то этот интеграл вычисляется приближенно и определяется до значений 1 или 0:

$$\chi_i = \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{d\varepsilon}{\varepsilon - z_{0j}} = \frac{1}{2\pi i} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k}{\frac{\varepsilon_{k+1} + \varepsilon_k}{2} - z_{0j}} ;$$

$j = 1, 2, \dots, m .$

Если в массиве z_{0j} найдется хоть одна точка, для которой $\chi_i = 0$, то счет прекращается: частица задела кромку отверстия и не прошла в него.

Расчеты с использованием записанного выражения для q дают хорошие результаты для небольшой высоты слоя на сите ($H < 2,5d_{cp}$) при низкой интенсивности вибраций, так как в нем не учитываются влияние взаимодействий частиц в районе отверстия и вибрация сита. Для "толстого" слоя выражение для удельного потока имеет вид:

$$q_i = K_{ж.с} K_1 K_2 K_m K_\beta K_\alpha P_i C_i \gamma_m \sqrt{g \cdot f d_{омб}^{0.5} \sqrt{1 - \frac{d_i}{d_{омб}} \left(1 - 2 \frac{1-f}{\sqrt{1+f^2}}\right)}} ;$$

где K_1, K_2 - экспериментальные коэффициенты, учитывающие порционность подачи частиц через отверстия и влияние расстояния между отверстиями на их расходные характеристики; K_m, K_β, K_α - коэффициенты, учитывающие форму, направление и ускорение колебаний сита. Для всех этих коэффициентов экспериментально получены уравнения связи с влияющими на них параметрами.

В выражениях для удельного потока q_i на коэффициент живого сечения существенно влияет забиваемость отверстий сита частицами δ : $K_{ж.с} = K'_{ж.с} (1 - \delta)$. Получено и решено дифференциальное уравнение, описывающее процессы забиваемости и самоочистки отверстий сит:

$$\frac{d\delta}{dt} = a - \delta b, \quad \delta = \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}), \quad \text{при } t \rightarrow \infty$$

$$\delta_{\sigma} = \delta_{\text{уст}} = \frac{a}{b}, \text{ где } a = K_1 K_2 d_{\text{отв}}^2 \frac{\gamma_{\text{см}}}{\gamma_{\text{м}}} \sum_{i=i_6}^{i=i_4} \frac{C_{i3}}{d_{i3}^2};$$

$$b = a + K_2 K_6 \frac{d_{i3cp}}{H} \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{см}}} \left(1 + K_4 \frac{n_k}{n_{\text{отв}}}\right) \frac{(A_6 + K_5 A_2) \omega^2}{(\cos \alpha + K_3 \frac{A_6 \omega^2}{g}) g};$$

$K_1 \dots K_6$ - экспериментально установленные коэффициенты, зависящие от типа сита, вида и свойств шихты; d_{i3} , C_{i3} - размеры и концентрация забивающих фракций.

Произведен анализ кинетики забиваемости отверстий сит и приемов, способствующих их самоочистке.

В пятой главе "Математическая модель процесса грохочения" приведена математическая модель процесса грохочения, разработанная на основе теоретического описания подпроцессов, протекающих при перемещении слоя шихты по вибрирующему сити. Приведены также результаты исследований, проведенных при реализации математической модели на ЕС ЭВМ и, в упрощенном виде, на ПЭВМ. Математическая модель процесса формирования слоя на грузонесущей поверхности позволила установить связи между высотой сформировавшегося слоя H , его маршевой скоростью $V_{\text{м}}$, а, следовательно, производительностью вибромашины и ее кинематическими и геометрическими параметрами, а также построить эпюру слоя по длине рабочего органа. Для внутрислоевых процессов изменения концентрации подрешетных фракций с слоя материала по его высоте описывается системами дифференциальных уравнений, записывающихся для i -ых фракций:

$$\frac{\partial C_i(y, \tau)}{\partial \tau} = -V_i(y, \tau) \frac{\partial C_i(y, \tau)}{\partial y} - C_i(y, \tau) \frac{\partial V_i(y, \tau)}{\partial y};$$

где y - координата по высоте слоя, для которой определяется концентрация i -ой фракции C_i ; V_i - скорость направленного движения i -ой фракции. Число уравнений в системе совпадает с числом i -ых фракций, число систем - с количеством ярусов сит. Обозначив концентрацию i -й фракции в j -ом объеме в момент времени τ через C_{ij}^{τ} , а скорость сегрегации этой фракции

в том же объеме V_{ij}^τ из этого уравнения, записанного в конечных разностях, следует выражение, позволяющее определить концентрацию i -й фракции в j -ом элементарном объеме в момент времени $\tau + \Delta\tau$, через известные концентрации и скорости в $(j-1)$ -ом, j -ом и $(j+1)$ -ом объемах:

$$C_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = C_{ij}^\tau + \frac{1}{2} (V_{ij-1}^\tau C_{ij}^\tau + V_{ij}^\tau C_{ij-1}^\tau - V_{ij}^\tau C_{ij+1}^\tau - V_{ij+1}^\tau C_{ij}^\tau) \frac{\Delta\tau}{\Delta y_j^\tau}$$

Аналогично, с учетом начальных и граничных условий, записаны выражения для i -й фракции в приконтактных к ситам каждого яруса объемах. С учетом того, что длина, пройденная слоем по ситам за время τ равна $L_\tau = \int_0^\tau V(\tau) d\tau$, записано уравнение массопереноса i -ой фракции от сечения $L(\tau_1)$ до сечения $L(\tau_2)$:

$$Q_i(\tau_1) - Q_i(\tau_2) = q_i(\tau_1, \tau_2),$$

позволяющее определять долю i -ой фракции, прошедшей через сито на участке от $L(\tau_1)$ до $L(\tau_2)$, к массе этой фракции в исходном продукте, то есть эффективность грохочения по i -ой фракции. На основе описанной математической модели создана программа "Грохот" для расчета технологических параметров шихтовых грохотов на ЕС ЭВМ. Программа "Грохот" позволяет по заданным характеристикам грохотимого материала и производительности для заданных параметров колебаний сит и их конструкций рассчитать содержание всех фракций в надрешетном и подрешетном продуктах в любой точке по длине сита, а также определить длину сита, необходимую для достижения заданной эффективности. Программа позволяет также рекомендовать наиболее подходящий для данных условий грохот из числа серийно выпускаемых. Для определения адекватности описанной модели проведены параллельно вычислительный и физический эксперименты для грохотов с однородным (ОПГ) и неоднородным (НПГ) полем траекторий. Анализ полученных результатов показал, что характер изменения контролируемых параметров в процессе вычислительного и физического экспериментов совпадает; численные значения, полученные в процессе вычислительного эксперимента, в среднем на 4 % для концентраций, на 13 % для эффективности

выше, чем в физическом эксперименте, то есть эта математическая модель дает оптимистические результаты.

Предложен и разработан вариант упрощенной модели, реализуемой на ЭВМ. Такая модель получена путем наложения на ранее описанную дополнительных допущений, основным из которых является дискретное изменение свойств надрешетного материала при его переходе от одного участка по длине сита к другому, а также выделение по высоте слоя подслоя постоянной высоты, контактного с ситом, являющегося "распределителем" находящихся в нем частиц (фракций) между вышележащим слоем и ситом. Проведенные на упрощенной модели исследования показали, что она дает пессимистические результаты, полученные при ее использовании значения эффективности и производительности не более, чем на 12 % и 2,5 %, соответственно, ниже, чем в физическом эксперименте.

С использованием математической модели процесса грохочения получены взаимосвязи между технологическими показателями грохотов с ОИП' и НИП', свойствами грохотимого материала и кинематическими параметрами грохотов.

В шестой главе "Формирование гранулометрического состава и механических характеристик агломерата и кокса с использованием специальных режимов" определены режимы грохотов, при которых происходят разрушения кусков агломерата и кокса за счет истирания и дробления в вибрационном силовом поле. Исходя из предположения, что истирание кусков шихты пропорционально работе сил сухого трения на контактах между ними получено и в процессе экспериментов уточнено выражение для индекса истирания:

$$I_u = K_{4u} \left(1 - e^{-\frac{K_{2u} A^2 \omega^3 d e^H (\cos \beta - K_{3u} \sin \beta) \tau}{K_{4u} + K_{5u} d}} \right).$$

В процессе экспериментальных исследований с последующей обработкой массива данных на ЭВМ ЕС-1033 получены численные значения коэффициентов K_{iu} для агломерата и кокса. Аналогично, исходя из предположения, что дробление кусков шихты пропорционально относительной скорости соударений в случае, если эта скорость превышает критическую, а работа сил, возникающих при соударении, пропорциональна величине части эне-

гии соударения, расходуемой на дробление, получено выражение для индекса дробления кусков шихты:

$$H_{\partial} = \frac{m_{\tau} \partial}{m_{\text{учх}}} = K_{i\partial} \left(1 - e^{-K_{2\partial} \left(\frac{d}{d_{\text{кр}}} \right)^{K_{3\partial}} \frac{K_{\text{рлсн}} (\sqrt{v_{\text{соуд}}^2 - v_{\text{кр}}^2}) \omega \tau}{4\pi}} \right).$$

Таким образом, получены обобщенные показатели, характеризующие наращивание выхода некондиционных фракций шихты в зависимости от ее свойств и интенсивности взаимодействия с вибрирующим рабочим органом.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что одновременно с наращиванием выхода некондиционных фракций с ростом $H_{\alpha} + H_{\partial}$ происходит увеличение показателя прочности шихты, причем при $H_{\Sigma} < 10$ для кокса и $H_{\Sigma} < 26$ для агломерата повышение прочности происходит без увеличения суммарного выхода некондиционных фракций по тракту шихтоподачи, что удачно отличает метод виброобработки от других методов стабилизации грансостава и прочности шихты. Установлено также, что рационально воздействовать на слой шихты вначале касательными к вибрирующей плоскости колебаниями, а затем нормальными: первые приводят к упорядочению поверхности кусков, "залечиванию" мелких поверхностных трещин, вторые - к выбраковке дефектных кусков путем их дробления и выделения в подрешетный продукт грохота. Отсюда следует вывод, что грохоты с III в большей степени, чем с 0III способствуют стабилизации шихты.

Отдельно рассмотрен метод повышения прочности шихты путем ее виброобработки в промежуточных емкостях, которые могут быть совмещены с течками приемных бункеров. Здесь исходили из того, что повышение прочности шихты можно ожидать при $H_{\alpha} \gg H_{\partial}$, а увеличение H_{α} достигается не только за счет касательных колебаний и повышения удельной энергии вибрационного силового поля $A^2 \omega^3$, но и путем увеличения высоты слоя H и времени виброобработки τ . В такой емкости с вибрирующим днищем слой может иметь достаточно большую высоту и время виброобработки, равное минимальному промежутку между загрузкой весовой воронки. В процессе виброобработки в промежуточной емкости происходит снятие с кусков шихты поверхностного слоя (в котором сосредоточены трещины и дефекты, являю-

щиеся концентраторами напряжений) на глубину $h = \frac{1}{600} U_a d K_{\varphi}$

Получены выражения, описывающие взаимодействие между вибрирующим днищем емкости (вибропоршнем) и слоем шихты. Получены также выражения для определения кинематических параметров вибропоршня и мощности вибровозбудителя. Установлено, что повышение эффективности виброобработки слоя в промежуточной емкости (повышение прочности шихты) достигается при дорезонансной настройке колебательной системы вибропоршня при высоте слоя, выбираемой из соотношения $h = \lambda / 4 (1 + 2n)$; где λ - длина продольной волны в слое; n - целое число. Предельное значение $h = 3\lambda$.

В седьмой главе "Грохоты с неоднородным полем траекторий" сообщаются результаты теоретических и экспериментальных исследований нецентромассных питателей-грохотов. Согласно ранее приведенным данным для трудногрохотимых шихт с небольшим содержанием некондиционных фракций применение нецентромассных вибромашин обеспечивает рост эффективности грохочения и стабилизации гранулометрического состава и прочности шихты.

Разработана нецентромассная динамическая схема вибрационного шихтового питателя-грохота на основе двухмассного астатического маятника и дано математическое описание движения масс в холостом ходу и под нагрузкой. Записана система дифференциальных уравнений, описывающая движение любой точки каждой из масс с учетом нагрузки. Система уравнений в матричной форме имеет вид: $M\ddot{q} + Cq - Q = PS$, где M - шестимерная квадратная матрица инерционных коэффициентов; C - такая же матрица коэффициентов жесткости; Q - матрица-столбец диссипативных членов; P - матрица размерности 6×2 , элементы которой являются амплитудными значениями гармонических возбуждающих сил; q - матрица-столбец, элементы которой являются обобщенными координатами; S - матрица-столбец, элементы которой являются гармониками возбуждающей силы. Решение системы произведено методом механического импеданса. Результирующим движением любой точки рабочего органа является гармоническое; траекторией такой точки, лежащей на расстоянии ℓ от центра масс короба, является эллипс, описываемый уравнением:

$$\left(\frac{x_e}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{y_e}{A_e}\right)^2 - 2 \frac{x_e}{A_x} \cdot \frac{y_e}{A_e} \cos(\varphi_x - \varphi_e) = \sin^2(\varphi_x - \varphi_e),$$

длины полуосей которого

$$\tilde{a} = \frac{\sqrt{2} A_x A_e |\sin(\varphi_x - \varphi_e)|}{\sqrt{A_x^2 + A_e^2} \sqrt{(A_x^2 + A_e^2) - 4 A_x^2 A_e^2 \sin^2(\varphi_x - \varphi_e)}};$$

$$\tilde{b} = \frac{\sqrt{2} A_x A_e |\sin(\varphi_x - \varphi_e)|}{\sqrt{A_x^2 + A_e^2} \sqrt{(A_x^2 + A_e^2) - 4 A_x^2 A_e^2 \sin^2(\varphi_x - \varphi_e)}};$$

причем малая полуось \tilde{b} повернута относительно оси OX на угол γ^* :

$$\operatorname{tg} 2\gamma^* = - \frac{2 A_x A_e \cos(\varphi_x - \varphi_e)}{A_x^2 - A_e^2}.$$

Частными случаями траекторий является окружность (центр масс) и прямая (центр удара).

Построена АЧХ системы в холостом ходу и под нагрузкой, анализ которой показал, что при отношении массы рабочего органа к массе опорного рычага-коромысла, равном 5...15, первые три резонанса имеют невысокую добротность, что обеспечивает быстрое их прохождение при пуске-выбеге; добротность 4-го и 5-го резонансов под нагрузкой возрастает в 2,5...3,5 раза, а коэффициент усиления достигает 2,9, что подтверждает возможность создания по рассматриваемой схеме резонансной машины; самая высокая собственная частота на порядок превышает используемые на практике вынужденные частоты и поэтому интереса не представляют. Проведены исследования влияния нагрузки на траекторное поле рабочего органа и динамическую уравновешенность питателя-грохота. Увеличение нагрузки уменьшает вертикальную составляющую амплитуды, приводя к "сплющиванию" траекторных эллипсов и уменьшению угла наклона большей их оси к вибрирующей плоскости. С использованием результатов теоретических исследований решена задача синтеза вибромашины с НПТ, что позволяет создать аппарат с высокой грузонесущей способ-

ностью и минимальными динамическими нагрузками, передаваемыми на фундамент. Минимизация передачи динамических усилий достигается при присоединении коромысла к коробу в точке, совершающей линейные колебания, причем коромысло устанавливается под углом к центральной оси инерции короба, являющимся дополнительным к углу вибрации до $\pi/2$, а точка присоединения на коромысле совпадает с его центром качания. На основе критериального подхода произведена комплексная оценка влияния геометрических и кинематических параметров рабочего органа вибромашин с НИП на их технологические показатели. Установлено, что максимальные значения эффективности и производительности достигаются для грохотов с НИП при критерии:

$$\Gamma_1 = \frac{1}{g(u_H - u_K)} \int_{u_K}^{u_H} \ddot{y} du =$$

$$= \frac{m_1 r \omega^2}{g} \sqrt{\left[\frac{1}{M} - \frac{l_c}{2J} (u_H + u_K) \right]^2 - \left[\frac{h_c}{2J} (u_H + u_K) \right]^2}$$

= 3,1...3,2; а для грохотов с пространственным неоднородным полем траекторий (ИНИП):

$$\Gamma_{1y} = \frac{m_1 r \omega^2}{g} \left[\frac{1}{M} + \frac{l_c}{J_z} \frac{u_K + u_H}{2} \right] = 2,0...2,5;$$

$$\Gamma_{2y} = \frac{\int_{u_K}^{u_H} \ddot{y} u du}{(u_H - u_K) \int_{u_K}^{u_H} \ddot{y} du} =$$

$$= \frac{\frac{u_K + u_H}{2M} + \frac{u_K l_c}{3J_z} (u_K^2 + u_K u_H + u_H^2)}{\frac{u_K - u_H}{M} + \frac{l_c}{2J_z} (u_K^2 - u_H^2)} = 0,1...0,15;$$

где $m_1 r \omega^2$ - возбуждающая сила; M - масса короба с вибровозбудителем; l_c, h_c - координаты оси вибровозбудителя в системе координат с центром в центре колеблющихся масс; J_z - моменты инерции; u_K, u_H - длина отрезков, на которые

центр колеблющихся масс делит длину короба.

По физическому смыслу Γ_1 - средняя величина вертикальных ускорений точек сита, отнесенная к ускорению свободного падения; Γ_2 - координата центра тяжести эпилоры вертикальных ускорений точек сита, отнесенная к его длине. Получены также условия обеспечения высокой эффективности грохота при пониженной производительности и наоборот. Контрольные эксперименты подтвердили достоверность и общность полученных результатов. Экспериментально установлено рациональное значение углов наклона дебалансных валов вдоль сита и сита поперек короба для грохотов с ПНП. Проведен также сравнительный анализ технологических показателей грохотов с различной формой колебаний сита при рассеивании агломерата. Анализ полученных результатов показывает, что грохоты с ПНП при грохочении агломерата с содержанием мелких фракций до 30 % обеспечивают более высокие технологические показатели, чем грохоты с плоским траекторным полем.

В восьмой главе "Промышленные исследования технологических показателей шихтовых вибрационных питателей и грохотов" приведены результаты исследований и испытаний шихтовых вибромашин, созданных на основе анализа приведенных в главах 2...7 математических моделей, результатов экспериментальных исследований и информационного массива, приведенного в главе I. Были подвергнуты исследованиям и испытаниям в промышленных условиях 28 типов вибрационных питателей и грохотов. Сведения о тех из них, которые достаточно широко внедрены в производство, приведены в табл. I. В процессе исследований и испытаний хронометрированием и пробоотбором с последующей обработкой проб определялись производительность аппаратов и ее стабильность, эффективность и ее стабильность, показатели стабилизации гранулометрического состава и прочности шихты. Установлено, что при правильном выборе геометрических и кинематических параметров, грохоты с ПНП обеспечивают увеличение эффективности грохочения кокса на 8...10 % абс., агломерата от 5 % абс. на грохотах 6-го габарита до 25 % абс. на грохотах с ПНП 4-го габарита при той же производительности. Грохоты с ПНП по сравнению с грохотами ОП обеспечивают также

Таблица I

Тип машины, назначение. Основные технические и эксплуатационные пока- затели	Место внедрения	Объем внед- рения, шт.	Состояние освоения	Подтвержден- ный годовой экономический эффект, тыс. руб.
1	2	3	4	5
Питатель АШД для выпус- ка руд и шихт из емкост- тей. Производительность, т/ч - 300	Рудники черной и цветной ме- таллургии, ГОКи, металлургичес- кие заводы	более 3000	С 1971 г. серийное произ- водство на Киселевском, Барвенковском, Черчикс- ком, Цхинвальском машза- водах	5,0...7,0
Питатель ПТ-I (ВП-3) для выпуска руды из бунке- ров. Производительность, т/ч - 1000	КМК "Криворож- сталь", ДЦ-2	14	Передан на производство Поваровскому машзаводу г. Малаховка	46,0
Грохоты ГИТ-62Ш (А, К) для грохочения агломе- рата (А) и кокса (К) на участках шихтоподачи печей объемом 5000 м. Производительность, т/ч- А - 500, К - 180	КМК "Криворож- сталь", ДЦ-2	3	Приняты межведомственной государственной комиссией для серийного производст- ва. Переданы ПО "Рудмаш" г. Воронеж	249,8
Грохоты ВГ-10 для сорти- ровки увлажненного из- вестняка по классу -16мм. Производительность, т/ч- 100...150	КМК "Криво- рождаль", ЦОИ	2	Выпускаются для собствен- ных нужд УГМ КМК	100,0

Продолжение табл. I.

I	!!	2	! 3	4	!	5
Грохоты И82А-ГРМ горячего агломерата на участках шихтоподачи печей до 1700 м ³ . Производительность, т/ч - 220.		КМК "Криворож-сталь", ДЦ-1	60	Выпускаются для собственных нужд УГМ КМК		46,5
Грохоты ГИТ-41Б (И82Б-ГР) горячего агломерата для участков шихтоподачи доменных печей объемом до 3200 м ³ . Производительность, т/ч - 300		ДСЗИМ (Уфа), Норильский ГМК, КМК, КГОК, УМК, ДнепрМК, Запорожск. АЗ, Чимкентский СЗ и др.	129	Принят межведомственной государственной комиссией; производится серийно по чертежам ГМО (г. Санкт-Петербург) на ПО "Рудмаш"		33,6
Грохот ГИТ-42 для грохочения аглоруды. Производительность, т/ч - 250-350		ЖГОК, ЛПИК Старый Оскол, ЭМК, Марганецкий ГОК и др.	54	Серийное производство по чертежам "Гипромашобогашение" (ГМО г. Санкт-Петербург) на ПО "Рудмаш"		8,92
Питатели ВПР для выпуска руды и шихты из бункеров. Производительность, т/ч - 300...2500		КГОК	6	Производится партиями для КГОКа, КГОКа, ИнГОКа взамен 196-ПГ МП "ИМПЮСТ"		90,0
Питатели ВД для дозирования увлажненного известняка в обжиговые печи. Производительность, т/ч - 30		КМК "Криворож-сталь", ЦОИ	14	Производится партиями в МП "МАКРО"		8,9

в среднем на 4 % абс. более высокую стабильность производительности, позволяет снизить на 1,0 % абс. класс +80 мм и на 0,4 % абс. класс -25 мм в скиповом коксе, одновременно повысив его прочность не менее, чем 1,3 ед. При грохочении агломерата на грохоте с НИП снижение содержания класса +80 мм составляет, как и у грохотов с ОИП, около 0,4 % абс., но содержание класса -5 мм в скиповом ниже на 0,9 % абс., а прочность выше на 0,1...1,0 ед., чем при грохочении на аппаратах с ОИП. Грохоты с НИП обеспечивают более высокую стабильность эффективности, чем грохоты с ОИП за счет снижения забиваемости отверстий сит в их разгрузочной части. В главе приведены также результаты исследований и испытаний новых вибромашин для подготовки известняка и аглоруды.

В девятой главе "Исследование эксплуатационной надежности шихтовых вибромашин" произведен анализ надежности вибромашин, работающих в условиях участков шихтоподготовки доменных цехов. Установлено, что узлами, определяющими время простоев таких машин, является короб с грузонесущей поверхностью и вибровозбудитель. Выход из строя металлоконструкций короба происходит из-за износа его элементов. На основе теоретического анализа процесса ударно-абразивного износа поверхностей, контактных со слоем шихты, разработана инженерная методика расчета износа элементов короба и сита. Износ грузонесущей поверхности может определяться по формулам: $J_{m\pm} = J_m + J_y$;

$$J_m = \frac{1800}{\pi} K \cdot K_m \tau A \omega \gamma_{cp} f g H \cos \alpha \cdot \cos \beta (\sin \delta_n - \sin \delta_{ск});$$

$$J_y = \frac{1}{4\pi} K_y \omega \tau K \gamma_{cp} H (V_{соуд}^2 - V_{кр}^2),$$

в которых J - износ в мм поверхности за 1000 часов работы машины; K_m, K_y - экспериментальные коэффициенты, зависящие от пары взаимодействующих материалов, например, для пары агломерат-сталь 35ГС $K_m = (2,7...2,9) 10^{-II} \text{ м}^3/\text{Дж}$; $K_y = (5,5...7,5) 10^{-II} \text{ м}^3/\text{Дж}$; $\delta_n, \delta_{ск}$ - фазовые углы начала полета и скольжения, соответственно; K - коэффициент, учитывающий режим работы грохота, при $\sin \delta_n = 0,30$ $K = 1$;

$0,30 \leq \sin \delta_n \leq 0,165$ $K = 0,5$. Экспериментальными исследованиями в промышленных условиях установлено, что реальный износ находится в пределах теоретически прогнозируемых его значений.

Предложена также методика расчета износа поверхности бортовин короба и стенок отверстий сит.

Предложены и внедрены методы дефектоскопии состояния бортовин звуковой локацией, а также метод определения действующих в элементах короба механических напряжений, на этапе проектирования - поэлементный расчет с последовательным наложением усиливающих элементов, что позволило в значительной степени снизить металлоемкость короба.

Проведены экспериментальные исследования динамики вибромашин, их энергетических и санитарно-гигиенических характеристик. Отдельно проведен анализ подшипниковых опор вибровозбудителей, эксплуатируемых в условиях весьма высокой запыленности окружающей среды. Выявлены факторы, симптомы и виды отказов их элементов. Показано, что основной причиной выхода из строя подшипников шихтовых вибромашин является абразивный износ их элементов и заклинивание под действием высоких температур. Предложены и внедрены рациональные конструкции подшипниковых опор вибровозбудителей и их уплотнений для жидкой и консистентной смазки. Предложены и внедрены новые вибровозбудители, в которых повышение долговечности достигается за счет снятия части нагрузки с подшипниковых опор и непосредственной передачи ее на бортовины короба. Разработаны рекомендации по способам охлаждения подшипниковых опор, работающих в условиях их нагрева со стороны окружающей среды. Произведены испытания новых вибровозбудителей в промышленных условиях. Установлено, что расчет долговечности подшипниковых опор должен производиться не только из условия динамической грузоподъемности, но и с учетом абразивного износа. С использованием методики фирмы FAS разработан метод расчета долговечности подшипниковых опор вибромашин, учитывающий их назначение и условия эксплуатации. Испытаны несколько типов просеивающих поверхностей для грохочения кокса и агломерата. Проведены измерения механических напряжений и износа элементов сит и рассмотрено влияние

на долговечность сит способа их крепления к коробу. Установлены также значения сроков службы сит шихтовых грохотов при различных условиях эксплуатации: вида шихты, ее температуры и удельной нагрузки. На основе анализа износа элементов короба даны конкретные рекомендации и технические решения по повышению их стойкости. Одним из эффективных способов повышения ресурса электродвигателей вибромашин является капсулирование их статорных обмоток. Разработан и внедрен метод капсулирования и составы компаундов, позволяющие улучшить тепловой режим двигателей и повысить их надежность.

В работе рассмотрены также некоторые направления совершенствования систем подготовки шихты, модернизации шихтовых вибромашин.

Основные выводы

1. Совокупность теоретических и экспериментальных исследований процессов и вибрационных аппаратов для подготовки шихты к доменной плавке позволила разработать научные основы повышения их технологических показателей, создать и внедрить в металлургической промышленности новые вибрационные машины, обладающие высокой надежностью, пониженной энерго- и материалоемкостью.

2. Установлено, что рост удельной производительности шихтовых вибромашин достигается при взаимодействии их рабочих органов с толстым слоем шихты, перемещаемым по грузонесущей поверхности - ситу или днищу короба. Аналитическими методами на основе феноменологической модели описан процесс взаимодействия толстого, в ряде случаев, полубесконечного слоя шихты с вибрирующей плоскостью, что позволило построить математическую модель процесса, реализуемую на ЭВМ, целевой функцией которой является производительность вибромашин, а входными параметрами - способ загрузки вибромашин, параметры ее сопряжения с выпускным отверстием, вид траекторного поля рабочего органа, форма траекторий его отдельных точек, кинематические и геометрические параметры рабочего органа.

3. Рассмотрены закономерности непрерывного стабильного выпуска шихты из выпускных отверстий на грузонесущую поверх-

ность, дебитные возможности выпускных устройств при использовании в качестве выпускного средства вибромашины. В лабораторных и промышленных условиях с использованием теории размерностей проведена экспериментальная проверка полученных теоретическими методами результатов, доказана их качественная сходимость, установлено, что относительная ошибка численных результатов, полученных при вычислительном эксперименте, от полученных экспериментально, составляет до 14 % при определении производительности и до 24 % при определении заглубления.

4. Улучшение качества металлургической шихты, подготовка которой производится на вибрационных грохотах, связано с эффективностью этих аппаратов. При грохочении толстого слоя шихты такая эффективность зависит от интенсивности процессов доставки подрешетных фракций шихты через слой на контакт с ситом, поглощением их отверстиями сита и способностью отверстий к самоочистке от забивающих их частиц. Предложена феноменологическая модель, в которой доставка подрешетных фракций на контакт с ситом рассматривается как направленное движение мелких частиц под действием сил тяжести и трения в каналах, образованных крупными частицами, получены выражения для определения коэффициентов системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентрации частиц разных размеров во времени их пребывания на рабочем органе вибромашины и по толщине слоя. На основе нового подхода к определению вероятности прохождения частиц произвольной формы в отверстия произвольной формы с использованием интеграла Коши получены выражения для потока частиц шихты через сито; проведен также анализ кинетики забиваемости отверстий сита частицами шихты и получены выражения, описывающие этот процесс.

5. На основе полученных в процессе теоретических исследований выражений разработана двумерная математическая модель процесса грохочения, реализованная на ЕС ЭВМ. На основе введения в модель дополнительных допущений получена упрощенная модель, реализуемая на ЦЭВМ. Математическая модель позволяет производить вычислительный эксперимент, решающий две задачи: определение технологических показателей вибрационной машины

при заданных ее геометрических и кинематических параметрах (проверочный расчет); выбор параметров машины при заданных технических требованиях к ее показателям (проектный расчет). Кроме того, модель позволяет решать ряд частных задач, возникающих при оптимизации параметров вибромашин: выбор апертуры сит при заданных допустимых значениях замельчения и закрупления продуктов рассева, выбор переменных по длине сита апертур сита, выбор траекторного поля по длине и ширине сита и другие.

6. С учетом того, что шихтовые материалы являются искусственными спеками, которым свойственен самораспад в процессе охлаждения и под воздействием механических нагрузок, разработаны методы стабилизации гранулометрического состава и механической прочности шихты в вибрационном поле; получены выражения, описывающие процесс стабилизации, предложены аппараты для реализации этих методов, установлены также рациональные параметры вибрационных машин, обеспечивающие стабилизацию крупности частиц шихты, их механической прочности. Установлено, что использование стабилизации шихт в вибрационном поле позволяет обеспечить повышение прочности шихты на 1...2 % без увеличения суммарного выхода некондиционных фракций на тракте шихтоподачи.

7. Установлено, что интенсификация процессов грохочения шихтовых материалов и стабилизации шихты обеспечивается за счет использования неоднородного во времени воздействия на шихту вибрационного поля. В шихтовых вибрационных грохотах такое воздействие обеспечивается за счет синтеза неоднородного по длине и, в ряде случаев, по ширине рабочего органа поля траекторий. Рассмотрены динамика вибромашин с плоским и пространственным неоднородным полями с учетом нагрузки, предложен ряд модификаций таких машин, проведены их широкие экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях.

8. По результатам промышленных испытаний шихтовых вибромашин и анализа их технологических показателей, шесть из них внедрены в производство в единичных образцах и мелкими партиями, четыре - крупными партиями и четыре решением государ-

ственных межведомственных комиссий переданы на серийное производство, освоены и выпускаются машиностроительными заводами. Установлено, что грохоты с неоднородным полем траекторий обеспечивают не менее, чем на 5 % абс. при грохождении агломерата и 3,5 % абс. при грохождении кокса более высокую эффективность, чем аналогичные грохоты с однородным полем траекторий в сопоставимых условиях; использование грохотов с НПГ позволяет снизить на 0,8...1,2 % абс. содержание класса +80 % и на 0,4...0,5 % абс. содержание класса -25 мм в скиповом коксе. Установлено, что металлоемкость грохотов с НПГ не менее, чем на 19 %, а энергоемкость не менее, чем на 30 % ниже, чем у аналогичных грохотов с ОПГ.

10. Исходя из того, что существенное повышение качества подготовки металлургической шихты может быть достигнуто только при комплексном подходе к проблеме, разработаны направления совершенствования отдельных звеньев схем подготовки шихты к спеканию и плавке, разработан ряд принципиально новых аппаратов для дробления, измельчения, обезвоживания, грохождения, окомкования, стабилизации и классификации шихт в процессе их подготовки.

II. Результаты работы внедрены:

- путем организации серийного производства вибрационных питателей и грохотов на машиностроительных предприятиях бывшего Минтяжмаша: Воронежского ЦО "Рудмаш" (совместно с институтом "Гипромашобогашение"), Барвенковского, Цхинвальского, Киселевского машзаводов (совместно с институтом "ВНИПИРудмаш");

- путем организации выпуска промышленных партий шихтовых вибромашин на отраслевых заводах и в условиях ремонтных цехов металлургических предприятий;

- путем внедрения шихтовых вибромашин на КМК "Криворож-сталь", ЮГОКе и более, чем на 20 других промышленных предприятиях;

- путем внедрения математических моделей и методик расчетов шихтовых вибромашин в расчетную практику институтов ВНИИ "Механобрчермет" и "Гипромашобогашение".

Положения диссертации опубликованы в 197 работах, основными из которых являются:

1. Учитель А.Д. и др. Новый шахтный люк с дистанционным управлением / А.Д.Учитель, А.В.Говоров, Н.В.Федоренко // Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1965. - № 9.
2. Учитель А.Д. и др. Энергетические характеристики вибрационных конвейеров с инерционным приводом малой мощности, работающих под завалом / А.Д.Учитель, Г.В.Линчевский, В.И.Северенчук // Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1965. - № 9.
3. Учитель А.Д. Энергетические характеристики виброконвейеров в переходных режимах / Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1965. - № 9.
4. Учитель А.Д. Вибрационные машины для выпуска и доставки руды в СССР и за рубежом / М.: НИИИнформтяжмаш, 1965. - С.94.
5. Учитель А.Д., Кононенко А.П., Шматкова В.И. Капсулирование статоров горных электрических машин эпоксидными компаундами / М.: Электротехника, 1966. - № 2.
6. Учитель А.Д., Кононенко А.П. Совершенствование мотор-вибраторных приводов виброконвейеров / Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1966. - № 2.
7. Учитель А.Д. и др. Конструкция и расчет вибрационных люков для выпуска руды // А.Д.Учитель, Л.С.Гендельман, П.П.Макаренко / Тр. ин-та Гипроникель. - Л.: 1967. - № 31. - С.52-67.
8. Учитель А.Д. Конструкция и расчет секционированного виброконвейера ВКВС // Тр. ин-та Гипроникель. - Л.: 1967. - № 31. - С.44-51.
9. Учитель А.Д., Каварма И.И. О рациональных типах виброконвейеров для доставки руды в условиях шахт Кривбасса / Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1967. - № 31.
10. Учитель А.Д. и др. Совершенствование моторвибраторных приводов виброконвейеров / А.Д.Учитель, В.Н.Северенчук, В.А.Друян, З.Г.Белоножко // Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1967. - № 2.
11. Учитель А.Д. и др. Новый шахтный вибрационный люк / А.Д.Учитель, А.В.Говоров, Г.В.Линчевский, В.А.Друян // Горный журнал. - М.: 1969. - № 3.

12. Учитель А.Д. и др. Промышленные испытания вибрационного выпуска на Кировском руднике комбината "Апатит" / А.Д. Учитель, Ю.А.Коротков, Ю.А.Баренцов // Тр. ин-та Гипроникель. Л.: 1971. - № 50.

13. Учитель А.Д. и др. Инерционный вибратор с бесступенчатым регулированием возмущающей силы / А.Д.Учитель, А.П.Конonenko, Я.Е.Альтшулер, В.П.Усачев и др. // Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1972. - № 2-72-27. - С.28-31.

14. Учитель А.Д. и др. Вибрационные конвейеры с регулируемой упругой системой / А.Д.Учитель, Я.Е.Альтшулер, Э.Г.Колендо и др. // Угольное и горнорудное машиностроение. - М.: 1972. - № 2-72-27. - С.31-34.

15. Учитель А.Д. и др. Инерционный вибратор с бесступенчатым регулированием возмущающей силы / А.Д.Учитель, Я.Е.Альтшулер, Э.Г.Колендо, А.П.Конonenko, А.Н.Дружинин // Горные машины и автоматика. - М.: 1972. - № 6. - С.24-26.

16. Учитель А.Д. и др. Тепловой режим закрытого необдуваемого электродвигателя / А.Д.Учитель, А.П.Конonenko, Я.Е.Альтшулер и др. // Электрические машины. - Вып.12. - М.: Информэлектро, 1972. - С.19.

17. Тихонов Н.В., Учитель А.Д., Колендо Э.Г. и др. Взаимодействие рабочего органа вибрационного конвейера с материалом в условиях завала // Горный журнал. - 1972. - № 6. - С.24.

18. Корнеев Г.Н. и др. Модели сыпучих сред применительно к задачам вибровыпуска руды из блоков / Г.Н.Корнеев, А.Д.Учитель, А.А.Глуценко, Г.С.Торочкин // Оптимизация параметров и технологических процессов систем подземной разработки недр.- Апатиты, 1974. - С.150-155.

19. Учитель А.Д. и др. Вибрационный выпуск руды при камерных системах разработки в Криворожском бассейне / А.Д.Учитель, В.А.Лубенец, В.Л.Грамаков, Г.М.Буланов и др. // Горный журнал. - 1975. - № 9. - С.47-50.

20. Учитель А.Д. и др. Поточная техника и технология при подземной разработке мощных месторождений крепких руд / А.Д.Учитель, В.В.Гущин, Ю.И.Дудин, Ю.В.Демидов // Горный журнал.- 1975. - № 2.

21. Учитель А.Д., Гущин В.В. Промышленные испытания виб-

рационного выпуска руды на рудниках комбината "Апатит" // Угольное и горнорудное машиностроение. - 1975. - № 2.

22. Учитель А.Д. и др. Исследование колебаний плотности угольной шихты в объеме печной камеры / А.Д.Учитель, И.З.Шатоха, А.Я.Лазаренко и др. // Кокс и химия. - 1975. - № II. С.5-6.

23. Учитель А.Д. и др. Способы увеличения разовой загрузки шихты в печную камеру / А.Д.Учитель, И.З.Шатоха, С.В.Щеголев, Б.М.Линецкий и др. // Кокс и химия, 1975. - № 7. - С.6-7.

24. Учитель А.Д., Бренер Л.Ю., Зелов Е.А. Вибропитатель с изменяющейся геометрией рабочего органа // Угольное и горнорудное машиностроение. - 1976. - № 15.

25. Учитель А.Д., Гуцин В.В., Дудин Ю.И. Применение мощных вибропитателей, работающих в условиях завала для поточной технологии выдачи руды из блоков // Горный журнал. - 1976. - № 6.

26. Боярский А.Е., Денисов Ф.М., Сузиков Л.С., Учитель А.Д. Комплексные исследования самобалансных грохотов и питателей в системе шихтоподачи доменной печи / Горное оборудование : Реферат. сб. "Машины и оборудование для горных работ". - М.: НИИИнформтяжмаш. - 1977.

27. Учитель А.Д. и др. Маятниковый моторвибратор вибропитателей / А.Д.Учитель, А.П.Кононенко, В.Н.Северенчук // Горные машины и автоматика. - М.: 1977. - № I. - С.16-17.

28. Колендо Э.Г., Учитель А.Д. Методика расчета параметров вибрационного выпуска руды // Шахтный конвейерный транспорт. - М.: Недра. - 1977. - С.194-200.

29. Учитель А.Д. и др. Методика исследования плотности загрузки угольной шихты в модели коксовой камеры / А.Д.Учитель, И.З.Шатоха, А.Я.Лазаренко и др. // Metallургия и коксохимия. - Вып.51. - 1976. - С.40-41.

30. Учитель А.Д. и др. Влияние формы бункеров углезагрузки вагона на скорость истечения угля / А.Д.Учитель, И.З.Шатоха, А.Я.Лазаренко, Г.Ф.Алексеев и др. // Кокс и химия, 1977. - № 2. - С.5-7.

31. Учитель А.Д. и др. Влияние технологических параметров

на самосинхронный возбудитель / Л.И.Барзуков, Л.А.Вайсберг, Л.К.Балабатько, А.Д.Учитель // Обогащение руд. - 1978. - № 2.

32. Учитель А.Д., Балабатько Л.К., Боярский А.Е. Испытание новых грохотов на рассеивание шихты в условиях доменной печи № 9 завода "Криворожсталь" / Угольное и горнорудное машиностроение. - № 2. - 1978.

33. Учитель А.Д. и др. Вибропитатель для загрузки раскислителей и легирующих в ковш / А.Д.Учитель, В.Н.Гуров, Я.Е.Альтшулер, Л.Ю.Бренер // Черная металлургия. № 1(813). - М.: 1978. - С.31.

34. Учитель А.Д. и др. Исследование процесса и некоторых закономерностей забиваемости сит / А.Д.Учитель, Ю.К.Кувда, А.Г.Дербас, К.Л.Ивченко // Новые эффективные методы обогащения полезных ископаемых : Сб. АН СССР, ин-т ИПКОН. - М.: 1978.

35. Учитель А.Д., Brenер Л.Ю., Колендо Э.Г. Исследование вибрационного выпуска горной массы // Горный журнал. - 1978. № 3. - С.27-30.

36. Учитель А.Д., Кувда Ю.К., Дербас А.Г., Brenер Л.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования процессов классификации руд по крупности на высокопроизводительных грохотах. - В кн.: "Интенсификация подготовительных магнитных и гравитационных процессов обогащения". - Днепропетровск, Москва, 1980.

37. Учитель А.Д., Бегагоен И.А., Brenер Л.Ю. Исследование работы сил трения при вибротранспортировании сыпучих абразивных материалов. - Сб.научн.тр. "Проблемы трения и изнашивания". - Киев: Техника. - 1980. - Вып.18.

38. Учитель А.Д. и др. Повышение производительности грохотов для циклов измельчения / А.Д.Учитель, Ю.К.Кувда, А.Г.Дербас, К.Д.Ивченко, Е.А.Зелов // Новые эффективные методы обогащения полезных ископаемых: Сб. АН СССР, ин-т ИПКОН. - М.: 1978. - С.183-189.

39. Учитель А.Д. и др. Об улучшении газодинамических характеристик шихтовых материалов в процессе загрузки доменных печей / А.Д.Учитель, Е.Г.Донсков, Ф.М.Журавлев, и др. // Сталь. - М.: Металлургия. - № 7. - 1980. - С.522-559.

40. Учитель А.Д., Гуцин В.В. Вибрационный выпуск горной массы. - М.: Недра. - 1981. - С.232.

41. Учитель А.Д., Засельский В.И. Выбор рациональных колебаний короба грохота для рассева агломерата // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - № 1. - 1982.

42. Учитель А.Д. и др. Новый высокоэффективный грохот - А.Д.Учитель, Е.А.Зелов, Л.Ю.Бренер, И.Е.Альтшулер // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 1982. - № 2. - С.57-58.

43. Бегагоен И.А., Учитель А.Д., Зелов Е.А. О внутрислойных процессах при грохождении агломерированных концентратов // *Обогащение полезных ископаемых*. - Киев: Техника. - 1982. - Вып.31. - С.83-88.

44. Учитель А.Д. и др. Уточнение газодинамических параметров шихтовых материалов // А.Д.Учитель, Б.В.Боклан, Е.Г.Донсков, В.И.Засельский и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. - Т.1. - 1982. - С.13-17.

45. Бегагоен И.А. и др. О засорении рабочей поверхности грохотов при рассеве агломерированных концентратов / И.А.Бегагоен, А.Д.Учитель, Е.А.Зелов, Е.Г.Батуров. - В кн.: *Обогащение полезных ископаемых*. - Киев: Техника. - 1982. - Вып.31. С.80-83.

46. Учитель А.Д. и др. Усовершенствование грохотов горячего агломерата в условиях доменных цехов / А.Д.Учитель, Г.Ф.Вольнский, В.И.Засельский, И.Н.Рябичев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - № 4. - 1983. - С.42-43.

47. Учитель А.Д., Засельский В.И., Brenер Л.Ю. Критериальный подход к оценке работы грохота с пространственными колебаниями рабочего органа. - В кн.: *Тезисы докладов Всесоюз. конф. по вибрационной технике*. - Телави, ин-т Механики машин АН ГССР. - 1984. - 204 с.

48. Учитель А.Д., Вольнский Г.Ф. Вибрационный грохот для горячих спеков. - В кн.: *Тезисы докладов Всесоюз. научн.-техн. конф. по вибротехнике*. - Телави, 1984. - 99 с.

49. Учитель А.Д. и др. Коэффициент газопроницаемости при ламинарном течении газа как обобщенная характеристика грану-

лометрического состава шихты / А.Д.Учитель, Б.В.Боклан, Е.Г.Донсков, В.И.Засельский // Известия вузов. Черная металлургия. - № II. - 1984. - С.26-28.

50. Учитель А.Д. и др. Испытания грохота с неоднородным полем траекторий рабочего органа / А.Д.Учитель, Е.А.Зелов, В.И.Засельский, В.П.Лялюк, В.И.Никитенко и др. // Металлург. М.: Металлургия. - № 7. - 1987. - С.18.

51. Учитель А.Д. и др. Работа доменной печи, оборудованной модернизированными грохотами для рассева металлургической шихты / А.Д.Учитель, В.П.Лялюк, В.И.Засельский, И.И.Дышлевич, А.Я.Зусмановский и др. // Металлург. - М.: Металлургия. - № 6. - 1988. - С.34-35.

52. Учитель А.Д. и др. Испытания вибрационного грохота с неоднородным полем траекторий в условиях коксопиритовки / А.Д.Учитель, Н.В.Пустьинский, Е.Г.Батуров, И.Г.Крышень и др. Кокс и химия. - М.: Металлургия. - № 6. - 1989. - С.41-42.

53. Учитель А.Д. К анализу процесса сегрегации сыпучих материалов на вибрационных грохотах // Исследование процессов, машин и агрегатов разделения материалов по крупности: Межведомств. сб.научн.трудов. - Л.: Механобр. - 1988. - С.71-80.

54. Учитель А.Д., Эстрайх В.Л. Определение вероятности попадания частиц произвольной формы в отверстия сит грохотов Исследования процессов, машин и агрегатов разделения материалов по крупности: Межведомств,сб,научн,трудов. - Л.: Механобр. - 1989. - С.64-70.

55. Совершенствование технологии подачи шихты в доменную печь / А.Д.Учитель, Б.В.Боклан, А.Я.Зусмановский, В.П.Лялюк// Тезисы докладов национальной научн.-техн.конф. с международным участием "Новые и усовершенствованные технологии для окускования сырья и производства чугуна и ферросплавов". - Федерация научно-технических дружеств, Варна, Болгария. - 12-14.06.1990г. - С.93.

56. Учитель А.Д., Лялюк В.П. Стабилизация гранулометрического состава и механической прочности агломерата и кокса, загруженных в доменную печь. - Национальная научн.-техн.конф. с международным участием на тему: "Новые и усовершенствованные

технологии для окускования сырья и производства чугуна и ферросплавов". МДУ им.Ф.Ж.Кюри. - Варна, Болгария, 12-14 июня 1990 г. - С.16.

57. Учитель А.Д., Засельский В.И. Новый грохот для рас-сева металлургической шихты / Экспресс-информация "Отечест-венный опыт. Конструирование и эксплуатация оборудования". Серия I. - Металлургическое оборудование. - Вып. II. - М.: 1984. - С.380.

58. Бегагоен И.А., Учитель А.Д., Бренер Л.Ю. Абразивное изнашивание рабочего органа вибрационных транспортных ма-шин. - В кн.: Трение и износ. - Т. VI. - Минск: Наука и тех-ника. - 1985.

Патенты: Вибрационный грохот. Патент СССР № P5329-82. Патент ФРГ № 3723754. Патент США № 4402826.

Авторские свидетельства.

Вибрационные питатели, грохоты, их элементы, способы грохочения: 21367I, 234209, 235584, 23705I, 369074, 376582, 388972, 398468, 500354, 563336, 565859, 567645, 576582, 66364I, 72786I, 774596, 816888, 875I05, 917864, 995894, I009532, I007723, I05864I, II9740, II34244, II6736I, II86284, I2075I5, I232299, I238795, I328000, I33I587, I349778, I36623I, I366233, I376322, I377I58, I384347, I397687, I438854, I440559, I446743, I456249, I46I524, I473867, I479I47, I49I587, I5I2685, I5I2686, I5I52II, I528572, I52830, I53565I, I5603I, I58679I, I639774, I65I990, I65I993;

Оборудование, способы совершенствования систем подготовки и подачи шихты: 24I965, 7I39I9, 922I53, 9260I6, I0I8986, I070I72, III4463, I2063II, I306973, I36833I, I369063, I386296, I386667, I424I89, I440739, I496074, I5I3677, I534830, I552438, I629094.



Подписано к печати 10.09.1992 г. Формат 60x84/16, физ. п. п. 2,0
Уч.-изд. л. 1,28. Усл. п. п. 1,86. Тираж 100 экз. Заказ .
Бесплатно. Днепропетровский металлургический институт, 320005,
г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 4. 03 ДМетИ, 320005, Лоцманское
шоссе, 3-б.

468442

AB 25.937