

На правах рукописи



Огурцов Александр Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ВИБРОГРОХОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: советник РААСН, доктор технических наук, профессор
Акулова Марина Владимировна

Официальные оппоненты: **Бобков Сергей Петрович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Жуков Владимир Павлович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Защита состоится 17 июня 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д.20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета www.ivgpi.com

Автореферат разослан 16 мая 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, к.т.н.,
доцент

 Н.В. Заянчуковская

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Для промышленного, транспортного, гидротехнического и других видов строительства требуется огромное количество нерудных строительных материалов. В России более 3000 предприятий занимаются их добычей и переработкой. Из карьеров минерально-сырьевых месторождений сыпучие материалы поступают на дробильно-сортировочные заводы, товарной продукцией которых являются гравий, щебень из гравия и песок. Грохочение и дробление являются основными технологическими операциями на этих предприятиях.

Исследование процессов фракционирования и транспортирования материала по грохоту, расчет времени пребывания частиц на сите, расчет кинетики отсева в условиях производства требуют больших материальных и трудовых затрат. Однако именно эти параметры определяют конечный гранулометрический состав товарного продукта. Поэтому представляется актуальным исследование процессов грохочения сыпучих материалов на основе современных математических моделей фракционирования, учитывающих реальные факторы производства сыпучих строительных материалов.

Степень разработанности темы. Разработкой теории грохочения занимались отечественные и зарубежные исследователи: И.М. Абрамович, В.А. Олевский, И.И. Блехман, Л.А. Вайсберг, В.А. Бауман, В.А. Перов, П.С. Ермолаев, И.В. Пономарев, О.Н. Тихонов, Е.А. Непомнящий, В.В. Гортинский, В.Я. Хайнман, Н.Г. Картавый, А.В. Кондратьев, В.П. Надутый, О. Молерус, А. Майнелль, Х. Шуберт, Ж. Феррера, У. Прети, Р. Уорнер, Ф. Прокат, Э. Рамлер, и многие другие. Их работы направлены на совершенствование техники и технологии грохочения. Разобренный подход теоретических и экспериментальных исследований в области грохочения не позволяет создать общепринятую теорию процесса. Выходом из этой ситуации является использование программных комплексов имитационного моделирования, включающих современные теоретические разработки, что позволит перейти на качественно новый уровень исследований процесса грохочения.

Цель работы – разработка новых подходов к исследованию процесса грохочения с использованием имитационного моделирования процесса транспортирования частиц по ситам для выбора технологических параметров работы виброгрохотов, обеспечивающих повышение степени извлечения проходных частиц из исходного сырья и/или производительности классифицирующего оборудования.

Задачи исследования

1. Разработать имитационную модель процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, учитывающую амплитудо-частотные параметры колебаний сита, угол его наклона к горизонту, физико-механические свойства сыпучего материала (форму частиц, коэффициенты динамического и статического трения между ситом и частицами, коэф-

фициенты восстановления скорости при ударе частиц друг о друга, о просеивающую поверхность, о борта грохота и другие).

2.Используя средства имитационного моделирования, исследовать влияние параметров вибровоздействия грохота на сыпучий материал, на скорость транспортирования и время пребывания частиц внутри аппарата.

3.Разработать синтезированный метод моделирования процесса виброгрохочения сыпучих материалов, используя теорию цепей Маркова и имитационную модель транспортирования сыпучего материала по грохоту, обеспечивающий прогнозирование фракционного состава конечного продукта отсева.

4.Исследовать влияние распределения времени пребывания частиц на сите на кинетику фракционирования и основные показатели работы грохота: производительность и эффективность классификации.

5.Выполнить экспериментальные исследования по определению коэффициентов для имитационной модели транспортирования. Сравнить значения скорости движения частиц по вибрирующему сити, полученными компьютерными и экспериментальными исследованиями.

6.Разработать рекомендации по технологическим параметрам грохочения в промышленных условиях, обеспечивающих заданное качество продуктов отсева.

Научная новизна:

1. Разработана имитационная модель процесса движения ансамбля частиц по вибрирующему сити грохота, основанная на теории цепей Маркова в сочетании с результатами компьютерных экспериментов, позволившая определить скорость транспортирования частиц по сити и время их пребывания в аппарате и рассчитать кинетику грохочения, обеспечивающая более точное прогнозирование фракционного состава конечного продукта отсева, чем существующие методики.

2.Проведена адаптация программной системы Autodesk 3ds Max, обладающая широким спектром возможностей визуализации, к имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующему сити грохота, обеспечивающая учет ряда параметров, нелинейно влияющих на показатели работы грохота.

3.Предложен метод расчета скорости транспортирования частиц по сити грохота при различных режимах его работы в более широких диапазонах изменения параметров колебаний, чем у промышленных аппаратов, основанный на определении распределения времени пребывания частиц на сите грохота, учитывающий амплитуды и частоты колебаний сита, угол его наклона к горизонту, физико-механические свойства материала, такие как: размер и форма частиц, коэффициенты статического и динамического трения, коэффициенты восстановления скорости при ударе и другие.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании выполненных исследований по разработанной имитационной модели процесса транспортирования ансамбля частиц по вибрирующей поверхности сита грохота, по результатам расчета кинетики грохочения проведено прогнозиро-

вание выхода товарных фракций продуктов отсева. Проведенные исследования процесса фракционирования использовались для расчета параметров процессов грохочения для аппаратов, работающих на завершающих стадиях производства фракций щебня дробильно-сортировочного завода в ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область), где получен реальный технический и экономический эффект. Имитационная модель и визуализация процесса транспортирования сыпучего материала по вибрирующему сити грохота включены в состав учебных курсов для бакалавров «Специальное оборудование для производства строительных материалов», магистров «Моделирование технологических процессов в оборудовании предприятий стройиндустрии» и аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования».

Методология и методы исследования. Модель процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах основана на математическом аппарате, описывающем поведение дисперсных сред со случайными свойствами, базовые принципы которой использовались в работах В.Е. Мизонова, С.П. Бобкова, В.П. Жукова, З. Бернотата, А. Бертье и ряда других отечественных и зарубежных исследователей. Процесс виртуального транспортирования сыпучей среды по сити виброгрохота описывается методами компьютерного моделирования с использованием программной системы Autodesk 3ds Max (лицензия Autodesk Building Design Suite Ultimate 2016, серийный номер 558-41879224, номер пользователя 864438DSADV_2016_OF).

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационную модель транспортирования сыпучего материала по грохоту, в которой определяется распределение времени пребывания частиц на вибрирующем сите и средняя скорость транспортирования сыпучего материала по грохоту.
2. Адаптация программной системы Autodesk 3ds Max к имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующему сити грохота.
3. Результаты компьютерных экспериментов с имитационной моделью процесса транспортирования частиц по грохоту, позволивших определить влияние вибрационных режимов колебаний сита на время пребывания частиц на грохоте и среднюю скорость транспортирования сыпучей среды по просеивающей поверхности.
4. Результаты экспериментальной проверки имитационной модели на лабораторном стенде.
5. Реализацию результатов работы на предприятии ООО «Хромцовский карьер».

Степень достоверности полученных результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием при моделировании апробированных балансовых соотношений и удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных значений средней скорости движения сыпучей среды по грохоту.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих отечественных и международных конференциях: XVI Международной научной конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологий (Бенардосовские чтения)», Иваново, 2011; Международной НК «Информационная среда вуза», Иваново, 2010-2012; VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2012»; Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Поиск 2016», XIX Международном научно-практическом форуме «SMARTEX-2016».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе, 5 работ в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 123 страницы, состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, списка использованных источников (167 наименований).

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, описываются цель и задачи исследования.

В первой главе на основе литературных источников проанализировано современное состояние проблемы моделирования движения ансамбля частиц при фракционировании сыпучих материалов на виброгрохотах.

Модели процесса грохочения можно условно разделить на эмпирические, основанные на механике сплошной среды и стохастические. Наибольших успехов в описании закономерностей процесса грохочения добились сторонники вероятностного подхода, использующие математический аппарат теории Марковских процессов и, в частности, ячеечную модель. Приложения данной модели к расчету процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах, изложены в работах С.В. Федосова, В.Е. Мизонова, В.А. Огурцова, их учеников и последователей.

В последнее время исследователями, изучающими процессы в дисперсных средах, уделяется большое внимание методу дискретных элементов. На его основе созданы пакеты программ EDEM (DEM Solution Ltd), AnyLogic, PFC3D, ELFEN, MIMES и другие, обычно принадлежащие зарубежным разработчикам. Использование в предлагаемой работе имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота позволило определить время пребывания частиц в аппарате, что повысило прогностические возможности ячеечной модели.

Во второй главе рассматривается математическая модель движения ансамбля частиц при фракционировании сыпучих материалов на виброгрохотах. Объектом исследования является многокомпонентная механическая система, представляющая собой совокупность конечного числа N частиц. Каж-

дая частица представляет собой тело, движение которого ограничено силовыми взаимодействиями с другими телами.

Движение одной из ансамбля частиц описывается движением ее центра масс в неподвижной декартовой системе координат, связанной с основанием грохота

$$m_i \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = \bar{F}_i, \quad (1)$$

где m_i – масса частицы; \bar{r} – радиус-вектор, определяющий положение частицы в неподвижной системе координат; \bar{F}_i – сумма силы тяжести и сил, действующих при контакте i -й и j -й частиц, которая определится как

$$\bar{F}_i = \sum_{j=1}^N \bar{F}_{ij} + m_i \bar{g}, \quad (2)$$

где \bar{F}_{ij} – поверхностная сила, состоящая из сил отталкивания и сил трения, определяемых из вязкоупругой модели контактной механики. Движение частицы вокруг центра масс описываем теоремой об изменении кинетического момента

$$\frac{d\bar{K}_c}{dt} = \bar{M}_i, \quad (3)$$

где \bar{M}_i – момент сил \bar{F}_{ij} относительно центра масс частицы. Кинетический момент частицы относительно центра масс определится как

$$\bar{K}_c = I_c \bar{\omega}, \quad (4)$$

где I_c – момент инерции частицы, $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости частицы. Численное решение системы дифференциальных уравнений (1), (3) для N частиц методом дискретных элементов позволит определить положение каждой частицы относительно неподвижной системы координат. Однако моделирование всех аспектов процесса грохочения, когда учитывается как процесс миграции частиц различной крупности по слою сыпучего материала, так и процесс проникновения через отверстия сита проходных частиц, крупность которых так же разная, потребует введения в программу расчетов большого числа частиц порядка 10^5 . Это приведет к большим затратам машинного времени.

Являясь сторонниками вероятностного подхода к описанию закономерностей движения частиц со случайными свойствами в вибрирующем аппарате, который сам является источником случайности, вносимой в процесс фракционирования, положим в основу расчета процессов миграции частиц по виброоживленному слою и проникновения проходных частиц через отверстия сита одномерную ячеечную модель теории цепей Маркова для расчета кинетики грохочения.

В слое материала под действием вибрации друг относительно друга перемещаются крупные и мелкие частицы. Исследуем миграцию проходных частиц узкого класса крупности по слою сыпучего материала. Слой сыпучего материала разбит на m подслоев - ячеек конечного размера толщиной Δx . (рисунок 1).

Вероятности S_i того, что в данный момент времени мелкая частица рассматриваемой фракции окажется в i -ой ячейке, различны. Их полный набор образует вектор состояния

$$S = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_m]^T, \quad (5)$$

сумма всех элементов которого равна единице. Индекс T означает транспонирование вектора. Будем считать процесс миграции частиц дискретным во времени и пространстве. Через малый промежуток времени Δt возможен переход выделенных частиц из i -ой ячейки в соседние. Тогда время процесса рассчитываем как $t_k = (k-1)\Delta t$, где целое число $k=1, 2, \dots$ - номер перехода.

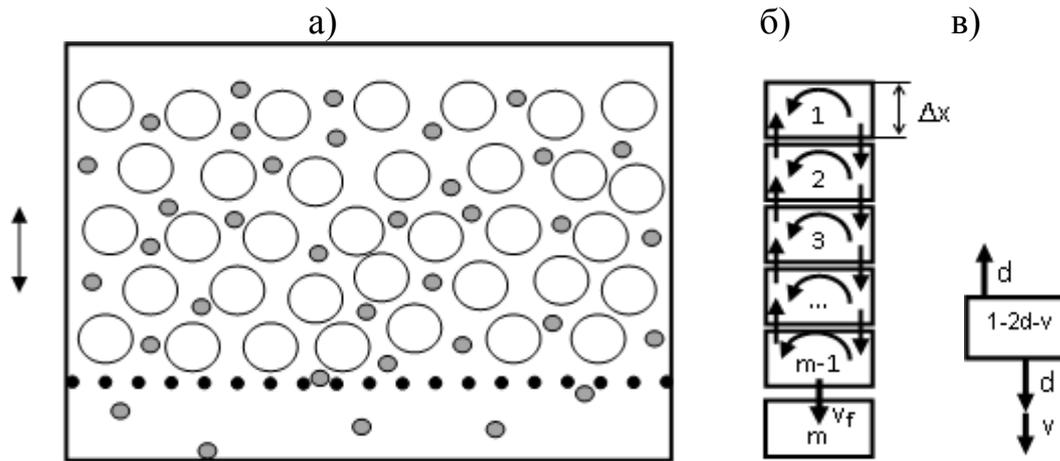


Рисунок 1. Расчетная схема процесса (а), его ячейечная модель (б), переходные вероятности (в)

Эволюция состояния цепи может быть описана следующим матричным рекуррентным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (6)$$

где P – матрица переходных вероятностей, которая имеет вид

$$P = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v+d & 1-v-2d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v+d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-d-v_f & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В этой матрице в столбце, соответствующем номеру ячейки i , находятся вероятности проходов частиц узкого класса крупности перейти в течение Δt вверх d (диффузионная составляющая), вниз $v+d$ (сегрегационная и диффузионная составляющая) и остаться в ячейке $1-2d-v$. Сумма всех вероятностей в каждом столбце равна единице. Считаем, что проходовые частицы узкого класса крупности склонны к сегрегации вниз. Место под ситом занимает ячейка-коллектор мелкой фракции. Попавшие в нее проходовые частицы остаются в ней. Вероятность v_f выхода в эту ячейку из нижней ячейки, принадлежащей слою материала, отличается от других вероятностей перехода

вниз. Эта вероятность зависит от соотношения размеров проходовой частицы и отверстия сита и амплитудо-частотных характеристик колебаний грохота.

Безразмерные величины d, v, v_f связаны с параметрами дисперсионного уравнения соотношениями: $v=V \Delta t/\Delta x$, $d=D \Delta t/\Delta x^2$, $v_f=V_f \Delta t/\Delta x$ где V – размерная скорость сегрегации, D – размерный коэффициент макродиффузии, V_f – размерная скорость проникновения рассматриваемой фракции через отверстия сита. Стохастические коэффициенты модели V, D и V_f зависят от физико-механических свойств сыпучего материала (размера и формы частиц, содержания частиц отдельных фракций в исходном сырье, влажности и многих других). Эти коэффициенты определяются на основании тестовых опытов на лабораторной установке по периодическому фракционированию реальных сыпучих материалов в режимах, соответствующих промышленному грохочению.

Выход частиц в коллектор на каждом переходе может быть рассчитан по формуле

$$q(k) = S_m^{k+1} - S_m^k = S_{m-1}^k v_f \quad (8)$$

Если известно начальное распределение вероятностей, тождественное начальному распределению относительной концентрации проходвых частиц в материале, то уравнение (6) при известной матрице (7) полностью описывает кинетику фракционирования, рассчитываемую как

$$\varepsilon(k) = \sum_{k=1}^k q(k) \quad (9)$$

Многие исследователи, изучающие грохочение, считают, что движение сыпучей среды по вибрирующей плоскости сита можно моделировать как движение одиночной частицы. При этом частицы сыпучей среды представляются либо сферами, либо материальными точками. Кинематические характеристики движения одиночных частиц по вибрирующей поверхности существенно нелинейны и неустойчивы. Возникают погрешности между реальными параметрами движения и расчетными данными.

Нами предлагается имитационная модель транспортирования ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, основанная на программной системе Autodesk 3ds Max.

В программе методами компьютерного моделирования по разработанной нами программе в виртуальном пространстве был создан грохот с просеивающей поверхностью длиной 240 мм и шириной 120 мм. Размеры квадратной ячейки сита 5 на 5 мм, размер проволоки 1 мм. По разработанному алгоритму и программе были созданы частицы разных размеров и форм. Им были приданы физические свойства, идентичные свойствам реальных частиц щебня (масса, плотность, упругость и другие). В интерфейсе MassFX Tools в окне компьютера Simulation Tools воспроизводился виртуальный процесс движения частиц по вибрирующему сити. Сыпучий материал двигался по вибрирующей поверхности, мелкие частицы проникали через отверстия сита и ссыпались в подситовой поддон, крупные ссыпались в поддон, находящийся за разгрузочной частью просеивающей поверхности (рисунок 2).

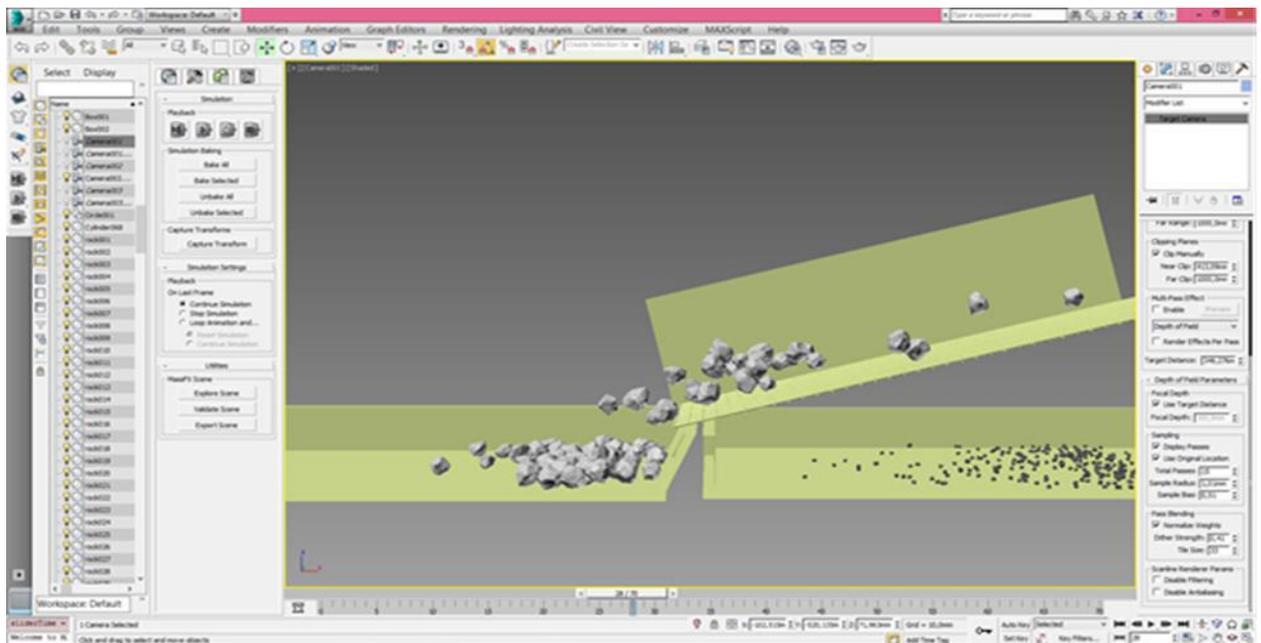


Рисунок 2. Движение сыпучего материала по вибрирующей поверхности сита

Используя возможности программы, отслеживалось движение каждой частицы, с фиксацией параметров абсолютного и относительного движения. На рисунке 3 показаны кривые зависимостей координаты x положения некоторых частиц относительно неподвижной системы координат от времени. По оси абсцисс отложены номера кадров съемки (25 кадров соответствуют 1 секунде), по оси ординат отложены значения координаты x в миллиметрах.

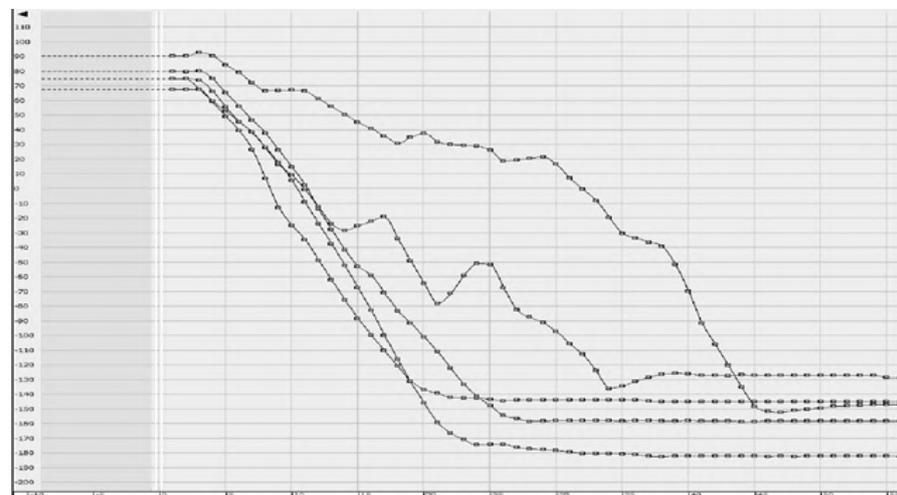


Рисунок 3. Графики движение 5 частиц, выделенных из общего ансамбля частиц сыпучей среды, относительно неподвижной оси x

На рисунке 4 построена кумулятивная кривая, которая описывает заполнение по времени непроходowymi частицами поддона, расположенного за разгрузочной частью сита, и гистограмма распределения времени пребывания частиц на сите.

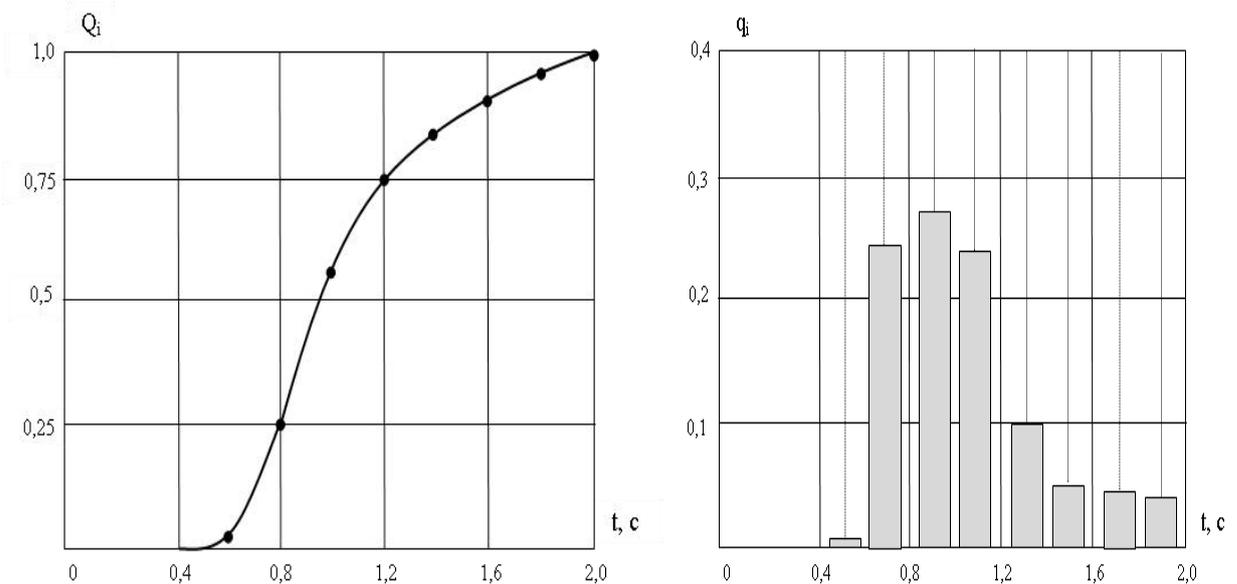


Рисунок 4. Кумулятивная кривая и гистограмма распределения времени пребывания частиц на сите.

Среднее время пребывания частиц на грохоте определится как

$$\langle t \rangle = \sum q_i t_i, \quad (10)$$

где q_i – нормированный выход непроходивших частиц с поверхности сита в момент времени t_i за интервал времени $\Delta t = 0,2$ секунды.

Результаты обработки данных компьютерного эксперимента позволили получить среднюю скорость транспортирования ансамбля частиц по просеивающей поверхности виброгрохота.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов зависимости скорости движения частиц по сити от амплитуды его колебаний при разных углах наклона просеивающей поверхности к горизонту. На рисунке 5а частота колебаний сита составляет 12,5 Гц, на рисунке 5б - 16,6 Гц.

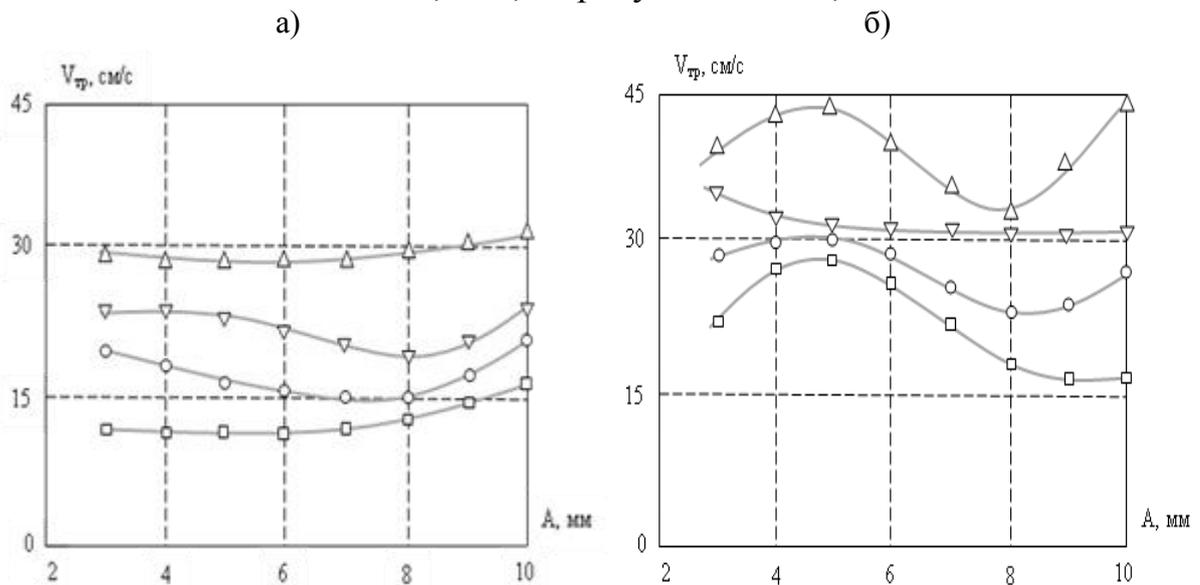


Рисунок 5. Зависимость скорости движение частиц по сити от амплитуды его колебаний при разных углах наклона: Δ - 26°; ∇ - 22°; \circ - 18°; \square - 14°

На рисунке 6 представлены результаты расчёта скорости движения частиц по вибрирующему ситы от частоты его колебаний при разных вариантах моделирования этого процесса. Движение сыпучей среды моделируется движением одиночной материальной точки, одиночным шаром и ансамблем частиц.

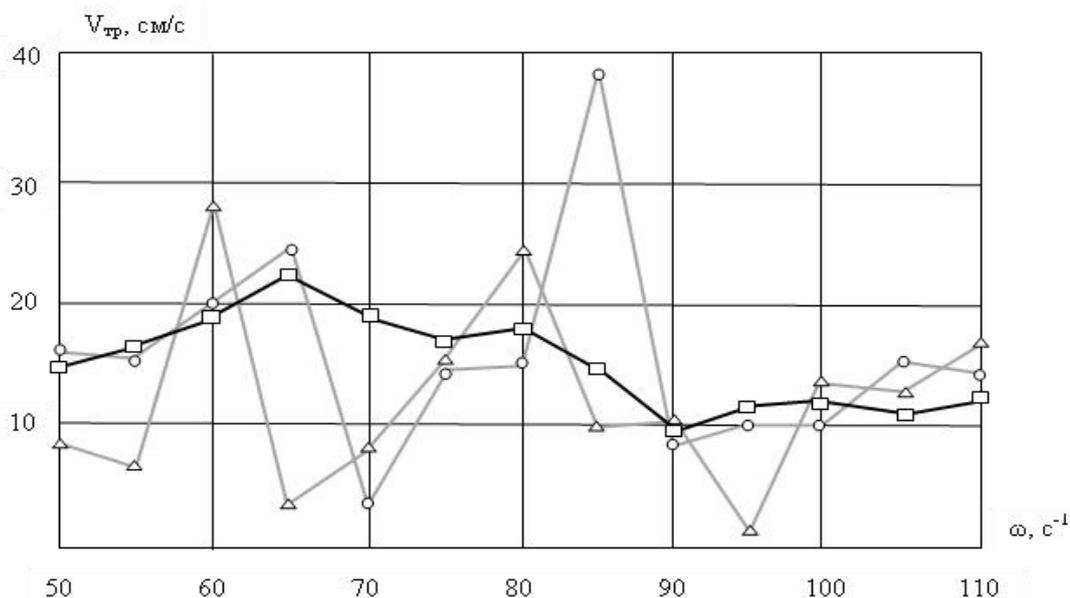


Рисунок 6. Зависимость скорости движения частиц по ситы от частоты его колебаний при разных вариантах моделирования процесса транспортирования: \circ - одиночная материальная точка, Δ - одиночный шар, \square - ансамбль частиц

Результаты расчетов показали, что влияние амплитуды и, особенно, частоты колебаний сита на скорость транспортирования носит сложный характер. Расхождение результатов расчетов скорости транспортирования для некоторых режимов колебаний грохота при разных вариантах моделирования движения частиц по ситы может достигать до 63%. При моделировании процесса движением одиночной частицы или шаром скорость транспортирования более чувствительна к изменению режима вибрации сита, чем при моделировании движения ансамбля частиц с помощью программы Autodesk 3ds Max.

Программа позволила учесть широкий набор параметров, определяющих протекание процесса: коэффициенты статического и динамического трения, коэффициенты восстановления удара и, что наиболее важно, определить численные значения времени пребывания частиц в аппарате при различных режимах грохочения.

При расчете кинетики непрерывного процесса на реальном грохоте, время пребывания частиц в аппарате, то есть время грохочения сыпучего материала на сите рассчитывается как

$$t_{гр} = \frac{L}{V_{тр}} , \quad (11)$$

где $V_{тр}$ – средняя скорость транспортирования материала по просеивающей поверхности грохота; L – длина сита грохота. Если время лабораторного периодического грохочения неограниченно, то время пребывания частиц в аппарате при заданной длине сита принимает конкретные значения и прерывает

кривую кинетики грохочения. На рисунке 7 показана расчетная кривая кинетики фракционирования, ограниченная двумя значениями времени грохочения, что соответствует двум скоростям транспортирования сыпучего материала по ситам грохота.

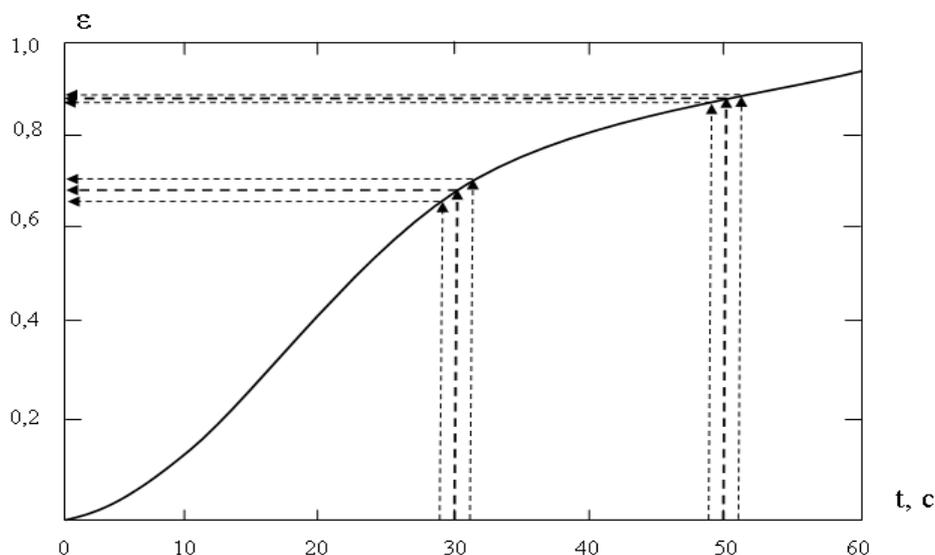


Рисунок 7. Кинетика грохочения при $d=0,005$; $v=0,02$; $v_f=0,2$

Эффективность при «коротком» времени грохочения составила 67,5%, при «длинном» - 87,5%. Причем, при ошибке в определении времени грохочения в 1 секунду эффективность грохочения может измениться на 4% как в лучшую, так и в худшую стороны, что приведет к значительной засоренности некондиционными частицами продуктов отсева. Во втором варианте эффективность грохочения изменится лишь на 1,1%.

Правильно выбранное значение скорости транспортирования материала по ситам, позволяет при заданном качестве отсева точно рассчитать производительность грохота как

$$Q = Bhv_{\text{тр}} \quad (12)$$

где Q – производительность грохота, $\text{м}^3/\text{с}$; B - ширина сита грохота, м; h - высота слоя сыпучего материала, подаваемого на сито грохота, м.

Третья глава посвящена расчетно-экспериментальному исследованию процесса транспортирования сыпучего материала по вибрирующей просеивающей поверхности. Использовалась лабораторная установка, представленная на рисунке 8. Установка представляла собой короб с металлическим ситом с размером ячейки 5x5 мм. Меняя положение короба, меняли угол наклона сита к горизонту. Короб с ситом, соединенный с эксцентриковым валом, совершал колебания с частотой, равной частоте вращения двигателя, вращающего вал, и амплитудой, равной эксцентриситету вала. Проводились предварительные многократные опыты по определению коэффициентов статического и динамического трения частиц щебня о поверхность металлического сита. Средние значения составили: $f_{\text{ст}}=0,46$; $f_{\text{дин}}=0,35$. Определялся коэффициент восстановления удара частиц щебня о металлическую поверхность сита. Среднее значение составило: $k=0,21$.



Рисунок 8. Лабораторная установка

Для опыта подбирались частицы щебня, размер которых был больше размера отверстия сита. Определялась их плотность и масса. Киносъемка процесса движения частиц по ситум позволила определить скорость транспортирования.

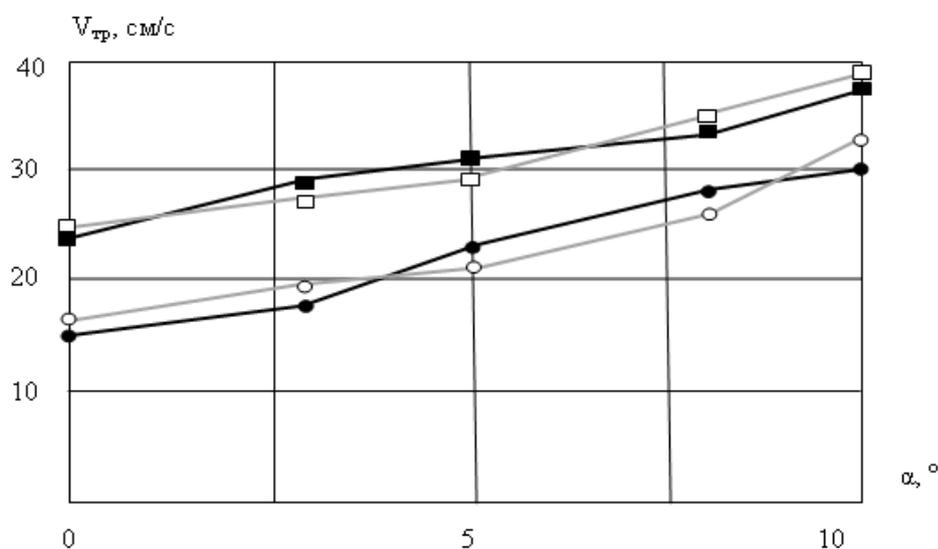


Рисунок 9. Скорости движения частиц по ситум при разных углах его наклона:

- , □ - расчетные и опытные значения при $\omega=78,7$ с $^{-1}$, $A=10$ мм;
- , ○ - расчетные и опытные значения при $\omega=104,7$ с $^{-1}$, $A=5$ мм

На рисунке 9 приведены опытные и расчетные значения скорости движения частиц по ситум при различных углах его наклона к горизонту. Удовлетворительное совпадение результатов (расчетные и опытные значения отличаются не более чем на 5%) доказывает достоверность результатов расчета

при использовании имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота.

Четвертая глава посвящена реализации результатов работы в промышленных условиях. На предприятии ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область, Фурмановский район) возникла необходимость увеличить выпуск товарной фракции щебня 5 -20 мм. Анализ работы предприятия показал, что увеличение нагрузки на грохоты, работающие на завершающей стадии в цехе сортировки, нецелесообразно, так как это приведет к снижению эффективности отсева, то есть ухудшению качества отпускаемой с завода наиболее востребованной продукции. Совместно с главным инженером ДСЗ и представителями производственно-технического отдела было принято решение об установке дополнительного грохота на линии по производству щебня. Нами было предложено установить грохот ГИС-52. Верхнее сито металлическое, с квадратной ячейкой размером 20 мм, нижнее сито резиновое, размер ячейки 5 мм.

Были проведены лабораторные исследования по периодической классификации сыпучей смеси, которая должна была поступать на дополнительный грохот. Экспериментальные режимы периодической классификации соответствовали условиям технологического регламента работы промышленного грохота ГИС-52. Результаты экспериментов, в ходе которых проводилась идентификация расчетных и экспериментальных кинетик периодического грохочения сыпучего материала, позволили определить стохастические параметры модели для расчета кинетики фракционирования как отдельных узких классов проходных частиц, так и всего проходного класса в целом. С помощью имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту было определено время пребывания частиц на сите грохота, скорость движения частиц по просеивающей поверхности. Определелись технологические параметры режима работы дополнительного грохота, обеспечивающие заданное качество продуктов классификации. Ожидаемый экономический эффект от установки дополнительного грохота с учетом издержек и затрат составит 850000 рублей в год.

Заключение

Итоги исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. На основе анализа современных работ, посвященных исследованию движения ансамбля частиц по просеивающей поверхности виброгрохота, выявлено, что скорость транспортирования сыпучего материала по ситам определяется либо эмпирическими зависимостями, либо по результатам расчетов, полученных при моделировании движения среды как движения одиночной материальной точки. При таком подходе невозможно учесть силовое взаимодействие частиц. Достоверные кинематические характеристики движения частиц сыпучего материала были получены на основе решения методом дискретных элементов системы дифференциальных уравнений, описывающих движение каждой входящей в ансамбль частицы. Разработана имитаци-

онная модель для исследования процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, которая использует программную систему Autodesk 3ds Max, обладающую широким спектром возможностей визуализации и позволяющую создать виртуальный процесс движения сыпучего материала по вибрирующему ситам грохота.

2. Разработан метод расчета кинетики фракционирования сыпучих материалов, основанный на имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту и теории цепей Маркова, повышающий точность прогнозирования фракционного состава конечного продукта отсева на 25%, в сравнении с методом моделирования движения сыпучего материала по виброгрохоту движением одиночной частицы.

3. Результаты компьютерных экспериментов по расчету скорости транспортирования сыпучего материала по ситам при разных режимах колебаний инерционного грохота показали возможность повысить эффективность фракционирования на 5-8% при ведении режима грохочения в диапазоне изменения частот колебаний сита от 85 до 110 с⁻¹, амплитуд от 3 до 5 см, угла наклона сита к горизонту от 10° до 16°.

4. Разработанные методы расчета процесса грохочения нашли свое применение при выборе технологических параметров грохотов, работающих на завершающей стадии производства щебня фракции 5-20 мм в ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область). Было предложено в цехе сортировки установить дополнительный грохот ГИС-52, для которого был определен режим работы и основные технологические характеристики: производительность 75 т/час и эффективность грохочения 83,5%. Результаты компьютерных экспериментов определили скорость транспортирования сыпучего материала по ситам, которая составила 12,6 см/с при следующих технологических параметрах грохочения: угол наклона сита – 12°, амплитуда колебаний – 3,2 см, частота колебаний – 16,2 Гц. Ожидаемый экономический эффект от данного предложения составит 850 тысяч рублей в год.

5. Совершенствование имитационных моделей движения дисперсных сред позволит воспроизводить сложные физические явления и полностью перейти на компьютерные методы исследования процесса фракционирования.

**Основные положения диссертации опубликованы:
в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК,**

1. Акулова, М.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит / М.В. Акулова, А.П. Алешина, Ал.В. Огурцов, Ан.В. Огурцов // Вестник МГСУ. – №2. – 2013. – С. 80-87.
2. Огурцов, В.А. Моделирование движения частиц при виброгрохочении на основе теории цепей Маркова / В.А. Огурцов, Е.Р. Горохова, А.В. Огурцов, П.А. Медведева // Строительство и реконструкция. – 2011. - №5(37). – С.85 – 88.
3. Огурцов, В.А. Механика миграции частиц при грохочении в виброоживленном слое / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, Е.Р. Горохова, А. А. Галиева // Вестник ИГЭУ. - Иваново. – 2011.- №5 С. 38-41.
4. Огурцов, В.А. Кинетика фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов с применением ситовых тканых полотен / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, А.В. Огурцов, Е.Р. Брик // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 1. С. 201 – 204

(издание, индексируемое Scopus) .

5. Акулова, М.В. К расчету скорости движения ансамбля частиц по поверхности вибрационного грохота / М.В. Акулова, В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.П. Алешина // Вестник ИГЭУ. - Иваново. – 2016, №2. С. 48-52.

в прочих изданиях

6. Акулова, М.В. Моделирование кинетики пофракционного грохочения подрешётного продукта / М.В. Акулова, А.П. Алешина, А.А. Галиева, А.В. Огурцов, В.А. Огурцов // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза». Иваново: ИГАСУ, 2012. С. 794 – 799.

7. Акулова, М.В. Ячеечная модель фракционирования сыпучих материалов на грохотах с многоярусной компоновкой сит продукта / М.В. Акулова, А.П. Алешина, А.А. Галиева, А.В. Огурцов, В.А. Огурцов // Ученые записки инженерно-строительного факультета. Иваново: ИГАСУ, 2012. вып. 6. С. 7 – 9.

8. Алешина, А.П. Моделирование движения частиц над вибрирующей поверхностью сита грохота / А.П. Алешина, А.В. Огурцов, П.А. Медведева, В.А. Огурцов // Материалы VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2012». Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 249.

9. Огурцов, В.А. Оценка динамических параметров работы виброгрохотов / В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.А. Галиева, Е.Р. Горохова // Ученые записки инженерно-строительного факультета ИГАСУ. – Иваново. - 2008.- Вып.4. - С.231 – 234.

10. Степанов, С.Г. Моделирование процесса транспортирования сыпучей среды по вибрационному грохоту /С.Г. Степанов, В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, Е.Р. Горохова// Материалы XVII Междунар. НТК «Информационная среда вуза», Иваново, 2010, С. 456-460.

11. Огурцов, В.А. Моделирование процесса сепарации частиц в виброожиженном слое / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, А.А. Галиева, Е.Р. Горохова// Тезисы XVI Междунар. НТК «Состояние и перспективы развития энерготехнологий (Бенардосовские чтения)» Иваново, 2011, С. 317 - 319.

12. Огурцов, В.А. Динамическая модель движения сыпучих материалов по просеивающей поверхности грохота / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, А.А. Галиева, Е.Р. Горохова // Ученые записки инженерно-строительного факультета / Иван. гос. архит.-строит. ун-т.- Иваново, 2011. – Выпуск 5, С. 165-168.

13. Огурцов, В.А. Одномерная стохастическая ячеечная модель процесса периодического грохочения сыпучих материалов / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, А.А. Галиева, Е.Р. Горохова // Ученые записки инженерно-строительного факультета / Иван. гос. архит.-строит. ун-т.- Иваново, 2011. – Выпуск 5, С. 169-172.

14. Огурцов, А.В. Имитационное моделирование транспортирования ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота / А.В. Огурцов // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Поиск-2016». Иваново: ИВГПУ, 2016. С. 354 – 355.