

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Огурцов Александр Валерьевич

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

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

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

Иваново - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АНСАМБЛЯ ЧАСТИЦ ПО ВИБРИРУЮЩЕЙ ПРОСЕИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРОХОТАХ ...	10
1.1. Моделирование процесса миграции частиц в виброожиженном слое при грохочении.....	10
1.2. Общая характеристика кинетики процесса фракционирования сыпучих материалов.	12
1.3. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих материалов на вибрационных грохотах.....	14
1.4. Моделирование процесса транспортирования сыпучих материалов по вибрирующей просеивающей поверхности грохота.....	19
1.5. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований	31
2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ	33
2.1. Дифференциальные уравнения движения ансамбля частиц по просеивающей поверхности виброгрохота.....	34
2.2. Одномерная ячеечная модель теории цепей Маркова для расчета кинетики грохочения	38
2.3. Имитационная модель транспортирования ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, основанная на программной системе Autodesk 3ds Max.	45
2.4. Исследование результатов численных экспериментов с имитационной моделью процесса транспортирования частиц по сити виртуального грохота.....	58
2.5. Выводы по главе 2	65

3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ПО ВИБРИРУЮЩЕМУ СИТУ	67
3.1. Цели экспериментальных исследований. Описание лабораторного стенда для исследования процесса транспортирования частиц по ситум. Методика проведения эксперимента и его результаты.....	67
3.2. Совершенствование технологических режимов процессов промышленного виброгрохочения	74
3.3. Выводы по главе 3	78
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВИБРОГРОХОЧЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ	79
4.1. Исследование фракционных составов сыпучих смесей, поступающих в цех сортировки и промывки дробильно-сортировочного завода ООО «Хромцовский карьер».....	79
4.2. Выбор режима дополнительного грохота на линии по производству щебня.....	80
4.3. Расчет экономической эффективности от работы дополнительного грохота	83
4.4. Выводы по главе 4	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	97
ПРИЛОЖЕНИЯ	116

ВВЕДЕНИЕ

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. Майнель, Х. Шуберт, Ж. Феррера, У. Прети, Р. Уорнер, Ф. Прокат, Э. Рамлер, и многие другие. Их работы направлены на совершенствование техники и технологии грохочения. Разобщенный 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 амплитудно-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, коэффициенты 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 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 прогнозирование 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 ситам 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 ситам 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.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует области исследований специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство) пункту 1: «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов», пункту 3: «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций».

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).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АНСАМБЛЯ ЧАСТИЦ ПО ВИБРИРУЮЩЕЙ ПРОСЕИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРОХОТАХ

1.1. Моделирование процесса миграции частиц в виброоживленном слое при грохочении

Грохочение (фракционирование) – механический процесс разделения сыпучей среды на крупную и мелкую фракции на вибрирующем сите [1]. Воздействуя на слой сыпучего материала, просеивающая поверхность приводит его в состояние «виброоживления». Частицы разных размеров, формы, плотности, упругости начинают двигаться друг относительно друга. Условно процесс грохочения можно разделить на три взаимосвязанных между собой процесса. Первый процесс – это стохастический процесс движения мелких частиц в среде крупных «в среднем» вниз к просеивающей поверхности сита грохота. Он обусловлен двумя механизмами: сегрегационным и диффузионным. При сегрегации происходит расслоение частиц по размерам. Крупные перемещаются вверх слоя сыпучего материала, а мелкие вниз. Диффузионное перемещение частиц равновероятно во всех направлениях. Оно аналогично поведению молекул в жидкости или газе.

Второй процесс – это вероятностный процесс проникновения мелких частиц через отверстия сита. На этот процесс влияет множество факторов, таких как соотношение размеров проходных частиц к размеру отверстия сита, амплитуда и частота колебаний просеивающей поверхности, угол ее наклона к горизонту, угол направления вектора скорости движения частицы к плоскости сита в момент соприкосновения и многие другие.

Третий процесс – это процесс движения слоя сыпучего материала по вибрирующему сити. Рассмотрению этого процесса посвящена данная работа. Модели процесса грохочения можно условно разделить на эмпирические, детерминистические, основанные на механике сплошной среды и стохастические.

Эмпирические методы описывают работу конкретного оборудования. Эти методы не могут решить проблемы перехода к грохочению сыпучих материалов, физико-механические свойства которых меняются. Кроме того, приходится решать сложные уравнения механики многофазных сред, что приводит к погрешности расчетов основных показателей процесса [1-3].

При детерминистическом описании грохочения авторы часто рассматривают условия прохождения отдельной частицы через отверстия сита. При этом вводятся следующие допущения : к отверстию подходит одна частица сферической формы, вектор скорости частицы направлен перпендикулярно просеивающей поверхности. При таком подходе скорость перемещения материала по ситам должна быть минимальной. Толщина слоя при заданной производительности грохота существенно возрастет. Это приведет к тому, что мелкие частицы будут долго пробираться через слой крупных к поверхности сита. Эффективность отсева снизится.

Несмотря на погрешности расчетов, к которым приводят детерминистических моделей, их ценность заключается в том, что они наглядно показывают влияние определенных факторов на процесс грохочения.

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 [1,11-17,32-35 и др.].

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 [163-167]. Однако исследование процессов грохочения с использованием метода дискретных элементов встречается крайне редко. Можно выделить работы исследователей Научно-производственной корпорации «Механобр-техника»,

Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Института проблем машиноведения РАН, Национального минерально-сырьевого университета «Горный» [42-44].

1.2. Общая характеристика кинетики процесса фракционирования сыпучих материалов

Кинетика грохочения – это зависимость от времени степени извлечения частиц проходовых фракций из исходного сыпучего материала, поступающего на сито грохота. Так как длина сита имеет конечные размеры, не все проходовые частицы успевают проникнуть через отверстия просеивающей поверхности. При этом происходит засорение мелкими некондиционными частицами надрешетного (верхнего) продукта, который на предприятиях, производящих щебень, является товарным продуктом.

Таким образом сыпучий материал, перемещаясь по просеивающей поверхности, находится на сите грохота определенное время. Вводится понятие степени извлечения ε , которая определяется как отношение числа частиц расчетной крупности, прошедших через сито к числу частиц той же крупности, содержащихся в исходной смеси. Расчетная крупность – это крупность частиц, равных по размеру отверстию сита [1,2,6,32]. Извлечение может определяться для узких классов проходовых частиц, так и для всех проходовых частиц в целом. При установившемся режиме работы грохота выполняется равенство

$$Q = Q_{\text{п}} + Q_{\text{н}} , \quad (1.1)$$

где Q - производительность грохота по исходному сырью; $Q_{\text{п}}, Q_{\text{н}}$ - объемная производительность грохота по подситовому и надситовому продуктам. Уравнение баланса всех проходовых частиц имеет вид

$$Q\alpha = Q_{\text{п}}\beta + Q_{\text{н}}\vartheta , \quad (1.2)$$

где α, β, ϑ - содержание проходовых частиц в исходном сырье, подрешетном и надрешетном продуктах. Учитывая уравнение баланса, выход подрешетного продукта γ в % запишется

$$\gamma = \frac{100Q_{\Pi}}{Q} = \frac{100(\alpha - \beta)}{(\beta - \vartheta)}. \quad (1.3)$$

Тогда извлечение проходových частиц в подрешетный продукт определится как

$$\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{\alpha} = \frac{100\beta(\alpha - \vartheta)}{\alpha(\beta - \vartheta)}. \quad (1.4)$$

Эффективность фракционирования E , являющийся основным показателем работа грохота, равна разности между извлечением в подрешетный продукт проходových частиц ε и извлечением в тот же подрешетный продукт более крупных частиц ε_+

$$E = \varepsilon - \varepsilon_+ \quad . \quad (1.5)$$

Величина ε_+ определится

$$\varepsilon_+ = \frac{\gamma(100 - \beta)}{100 - \alpha} \quad . \quad (1.6)$$

Тогда эффективность грохочения определится как

$$E = \frac{100\gamma(\beta - \alpha)}{\alpha(100 - \alpha)} \quad . \quad (1.7)$$

Эффективность грохочения учитывает попадание в подрешетный продукт крупного материала, поэтому точнее характеризует процесс фракционирования.

Когда засорение крупным материалом подситового продукта не происходит, то эффективность грохочения равна извлечению

$$E = \varepsilon = \frac{100\gamma}{\alpha} = \frac{10^4}{\alpha(100 - \vartheta)} (\alpha - \vartheta) \quad . \quad (1.8)$$

Высокая эффективность грохочения может не соответствовать высокому качеству фракционирования. Качество процесса характеризуется остаточным содержанием проходových частиц в надрешетном продукте, то есть величиной ϑ , которую называют замельченностью [1], определяемую как

$$\vartheta = \frac{100(\alpha - \gamma)}{100 - \gamma} \quad . \quad (1.9)$$

Эффективность и замельченность фракционирования очень чувствительны к производительности грохота. Эти характеристики процесса определяются как физико-механическими свойствами сыпучего материала, так и параметрами вибрации просеивающей поверхности грохота.

1.3. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих материалов на вибрационных грохотах

Модели, описывающие процесс грохочения, можно условно разделить на эмпирические, основанные на механике сплошной среды и стохастические. В зависимости от подхода к моделированию авторы предлагали вид уравнений кинетики фракционирования.

В середине прошлого века И.М. Абрамович впервые предложил называть зависимость извлечения частиц мелких фракций от времени отсева кинетикой грохочения [2].

$$E = t^m / (t^m + a) \quad , \quad (1.10)$$

где m и a – параметры, определяемые из эксперимента.

В.А. Перовым предложена следующая формула кинетики грохочения [1]

$$E = 1 - \exp(-kt^n) \quad , \quad (1.11)$$

где k и n также определяются экспериментально.

Е.А. Непомнящий, являющийся сторонником вероятностного описания процесса, предложил использовать следующее уравнение кинетики грохочения

$$E = 1 - F(h/\sqrt{2bt}) \quad , \quad (1.12)$$

где $F(h/\sqrt{2bt})$ – интеграл вероятности ошибок (функция Лапласа); h – толщина слоя материала; t – время грохочения; b – коэффициент макродиффузии, характеризующий условия грохочения, определяемый из опыта [7].

Е.А. Непомнящий предложил вероятностную теорию фракционирования, где учитывается влияние случайных факторов на процесс [7-10]. Изменение положения частиц в слое сыпучего материала, подверженного вибровоздействию

со стороны сита грохота, считалось случайным марковским процессом и интерпретировалось их прямолинейным блужданием. Плотность распределения вероятности положения частиц понималась как относительная концентрация частиц узкого класса крупности в некоторой точке слоя сыпучего материала и описывалась дифференциальным уравнением вынужденной квазидиффузии или уравнением Колмогорова – Фоккера – Планка, которое можно упростить до линейного случая одномерного дисперсионного уравнения

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad . \quad (1.13)$$

Стохастический коэффициент V является мерой скорости упорядоченного движения частиц (сегрегации), D является мерой неупорядоченности движения (коэффициент макродиффузии) [1,28,32]. Эти коэффициенты зависят размера частиц, гранулометрического состава материала, физико-механических свойств сыпучей среды, параметров колебаний сита грохота [1,55,58].

В ранних работах Е.А. Непомнящего считалось, что процесс грохочения принимает чисто диффузионный характер. Данное допущение было так же принято в работах зарубежных исследователей В. Ульриха, Ж. Феррары, У. Прети [153,154]. Немецкие исследователи А. Майнел и Х. Шуберт, использующие дисперсионное уравнение, учитывают диффузионную и сегрегационную составляющие процесса движения частиц по слою сыпучего материала, подверженного вибровоздействию сита грохота [144,145]. Исследования проводились при тонкой классификации кварцевого песка на ударно-вибрационных грохотах. В качестве граничного условия для решения уравнения (1.13) использовалось представление о свободном проникновении мелких частиц через отверстия сита. Исследовались зависимости стохастических коэффициентов от параметров колебаний сита грохота. Авторы этих моделей грохочения приходили к уравнению кинетики фракционирования, которое имело общепринятый вид.

О.Н. Тихонов на основании уравнений массопереноса получил уравнение кинетики грохочения

$$\varepsilon = 1 - \exp[-v_c h^{-1} t], \quad (1.14)$$

где v_c – скорость просеивания частиц через отверстия сита. Для составления уравнения фракционирования на сите принимались следующие допущения: не учитывались силы, действующие на частицу в зоне над ситом; считалось, что над ситом материал идеально перемешан и фракционная характеристика не зависит от координаты в слое. Учитывая, что уравнение кинетики основано на уравнениях массопереноса, при расчете использовались опытные данные по перемешиванию сыпучих материалов [29-31].

Эффективность грохочения ε изменяется с течением времени t по экспоненте. При бесконечно большом времени грохочения эффективность стремится к 100%. Данные зависимости в подобном виде можно применять к процессу периодического грохочения, например, к ситовому анализу на лабораторных вибростендах. Для расчета кинетики промышленного фракционирования авторы моделей грохочения использовали допущение о том, что скорость транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности грохота постоянна по всей длине сита.

Е.А. Непомнящий предложил применять для процесс непрерывного грохочения критерий

$$N = \frac{h}{\sqrt{2bt}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2bL}{v}}} = \frac{Q}{B\sqrt{2bLv}}, \quad (1.15)$$

где L, B – длина и ширина сита; v – скорость движения материала по ситам; Q – объемная производительность грохота. Тогда для высоких значений эффективности $\varepsilon > 65\%$ формула кинетики грохочения упрощается до

$$\varepsilon = 1 - 1,13N. \quad (1.16)$$

Для промышленного грохочения О.Н. Тихонов предложил заменить переменное время на постоянное время транспортирования [29]

$$t = \frac{L}{v_{\text{тр}}} = \frac{M}{Q}, \quad (1.17)$$

где L – длина грохота; $v_{\text{тр}}$ – скорость транспортировки; M – масса материала на грохоте; Q – производительность грохота.

Л.А. Вайсбергом и Д.Г. Рубисовым [42-44] на основании массовобалансной модели процесса грохочения предложено дифференциальное уравнение кинетики

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = \frac{u\gamma}{v} \left(1 - \frac{D}{d_o}\right)^\Psi p_{D,y}(0)(1 - \varepsilon_D), \quad (1.18)$$

где ε_D – извлечение в подрешетный продукт частиц узкого класса D ; y – вертикальная координата; u – нормальная к сити составляющая скорости частиц при их попадании в отверстие; γ – полный выход материала в подрешетный продукт; v – скорость транспортирования; d_o – размер отверстия сита; коэффициент $\Psi = 1$ для щелевидных отверстий сита и $\Psi = 2$ для квадратных отверстий сита; $p_{D,y}(0)$ – функция, определяющая скорость сегрегационных и диффузионных процессов, происходящих в виброожиженном слое.

Метод расчета основных характеристик грохочения, рассчитывающий эффективность процесса и производительность грохота, разработанный во ВНИИСтройдормаше, используется в промышленности строительных материалов [59]. Эффективность грохочения E рассчитывают по эмпирической формуле

$$E = e K_1 K_2 K_3, \quad (1.19)$$

где e – эталонная эффективности для средних условий грохочения; K_1 , K_2 , K_3 – значения коэффициентов, которые учитывают содержание нижнего класса в исходном материале, содержание в нижнем классе зерен размером меньше половины размера отверстий сита, угол наклона просеивающей поверхности к

горизонту [59]. Производительность грохота рассчитывается по эмпирической формуле

$$Q = m q F K_1 K_2 K_3 , \quad (1.20)$$

где m – коэффициент, который учитывает неравномерность питания и фракционный состав материала, форма частиц, и тип грохота; q – значение удельной производительности сита площадью 1 м^2 ; K_1 , K_2 , K_3 – значения коэффициентов, учитывающих процентное содержание нижнего класса в исходном материале, процентное содержание в нижнем классе зерен размером меньше половины размера отверстий сита, угол наклона грохота [59]. Среди специалистов, занимающихся грохочением, считается, что достоверность расчета по методу удельной производительности низкая [2].

Множество случайных факторов, влияющих на процесс грохочения, определили для многих авторов применение вероятностных подходов для описания кинетики процесса грохочения и, в частности, теорию Марковских процессов. Больших успехов в теоретическом описании поведения дисперсных сред добились авторы, использующие ячеечные модели, основанные на теории цепей Маркова. Многие отечественные и зарубежные ученые (В.Е. Мизонов, С.В. Федосова, В.Ф. Першин, С.П. Бобков, В.П. Жуков, З. Бернотат, А. Бертье и другие исследователи) [47-56, 73-80, 146-148], последовательно и систематически применяющие теорию цепей Маркова для описания процессов переработки сыпучих материалов, теплотехнических, химических и других процессов, добились значительных успехов моделировании этих процессов. Данные исследования послужили основой для разработки в предлагаемой диссертации синтезированного метода моделирования кинетики фракционирования сыпучих материалов, основанного на теории цепей Маркова и имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту.

1.4. Моделирование процесса транспортирования сыпучих материалов по вибрирующей просеивающей поверхности грохота

Создание модели движения сыпучего материала по вибрирующей поверхности грохота изложено в трудах отечественных и зарубежных ученых И.И. Блехмана, Г.Ю. Джанелидзе, Р.Ф. Нагаева, А.А. Кобринского, А.Е. Кобринского, В.А. Баумана, В.А. Олевского, И.Ю. Гончаревича, Н.Р. Малкина, Г. Линдера, Р. Юнга, В. Клокгауза и многих других. Эти исследователи внесли большой вклад в развитие теории вибрационного транспортирования.

Многие из авторов считают, что движение сыпучей среды по вибрирующему сити можно моделировать как движение одиночной частицы [1,2,15,17,32,42-44]. При этом решается сложная динамическая задача, имеющая большое практическое значение, так как по характеру движения одиночной частицы судят о движении слоя сыпучего материала по вибрирующей поверхности. Наибольший интерес для исследователей, занимающихся изучением движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности грохота, представляют средняя скорость транспортирования сыпучего материала по сити и время пребывания частиц в аппарате. На представлении кинематических характеристик движения ансамбля частиц кинематическими характеристиками движения одиночной частицы накладываются ограничения: толщина слоя не должна быть больше 10 диаметров средних частиц, ускорение движения точки сита не должно превышать $10g$, где g – ускорение свободного падения; круговая частота колебаний сита не должна превышать 300 с^{-1} . При этом авторы признают, что погрешность между теоретическими и экспериментальными результатами может составить 30 % [137,138]. Такая погрешность расчетов не может удовлетворить технологов предприятий, выпускающих сыпучие материалы, так как скорость транспортирования и время грохочения определяют основные характеристики процесса грохочения: эффективность фракционирования и производительность грохота. Кроме того, параметры реальных промышленных режимов грохочения могут превышать данные ограничения.

Нелинейные задачи движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности решаются точными и приближенными методами. К точным методам относятся: метод поэтапного интегрирования, обратный метод, метод точечных преобразований. К приближенным: метод гармонического баланса, метод точечной аппроксимации, метод численного интегрирования дифференциальных уравнений движения.

Из теории вибрационного перемещения наибольший интерес представляют задачи о движении материальной точки по вибрирующей поверхности сита грохота. Точки сита совершают колебательное движение в плоскости наибольшего ската. При этом частица может оторваться от сита, скользить по нему или покоится относительно просеивающей поверхности. Уравнения полета, скольжения или относительного покоя легко записать и решить. Трудно отыскать момент перехода от одного состояния к другому.

Основная трудность решения таких задач обусловлена тем, что дифференциальные уравнения движения на отдельных этапах записываются в разной аналитической форме. На каждом этапе уравнения легко интегрируются. Главную сложность представляет отыскание моментов перехода от одного этапа к другому. В работе [137] рассматривается пример, когда плоскость сита совершает прямолинейные колебания (рисунке 1.1).

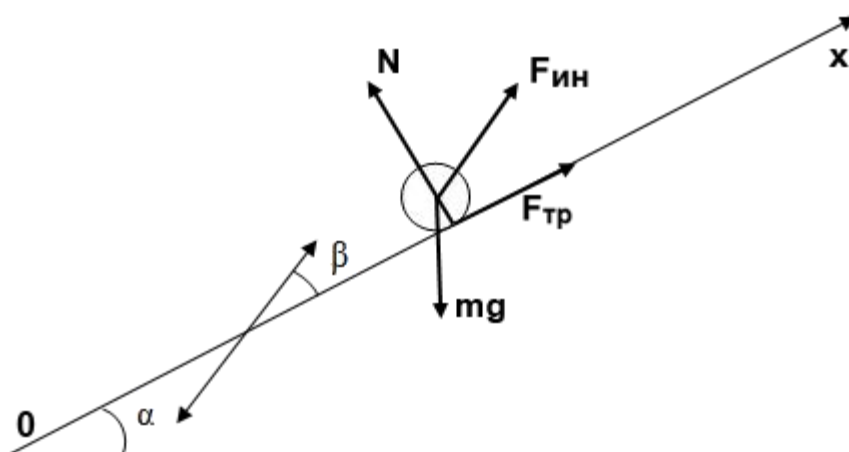


Рисунок 1.1. Расчетная схема движения частицы на просеивающей поверхности грохота, совершающего прямолинейные колебания

К частице приложены сила тяжести P , сила сухого кулонова трения $F_{\text{тр}}$, реакция опоры N , переносная сила инерции $F_{\text{ин}}$. Дифференциальное уравнение относительного движения материальной точки относительно оси x , которая определяет относительное движение точки по колеблющейся наклонной плоскости имеет вид

$$mx = mA\omega^2 \cos\beta \sin\dot{\omega}t - mgsin\alpha + F_{\text{тр}} , \quad (1.21)$$

где $F_{\text{тр}} = fN$ - сила сухого трения, f – динамический коэффициент трения, N - реакция опоры. Для определения движения частицы, вводят закон изменения скорости при ударе частицы о плоскость. Чаще всего рассматривается абсолютно неупругий удар. Только в некоторых работах вводят коэффициент восстановления скорости при ударе, учитывая упругость соударяющихся тел. Вводят коэффициент восстановления k , который согласно гипотезе Ньютона о мгновенном ударе, определяется как

$$k = \frac{V_0}{V_1} , \quad (1.22)$$

где V_0 и V_1 – проекции скорости частицы на вертикальную ось до и после удара.

Некоторые исследователей полагают, что при ударе продольная составляющая скорости частицы по оси x постоянная или равна нулю [88]. Иногда принимаются более сложные гипотезы о процессах, происходящих при ударе. В работе [34] предлагают считать скорость точки вдоль оси x как

$$\dot{x}_1 = (1 - \lambda)\dot{x}_0 \quad (1.21)$$

при ограничении величины продольной скорости точки до удара

$$|\dot{x}_0| \leq \left| \frac{f(\dot{y}_1 - \dot{y}_0)}{\lambda} \right| , \quad (1.22)$$

где λ – коэффициент мгновенного трения, иногда принимаемый равным коэффициенту динамического трения.

При выполнении противоположного условия

$$|\dot{x}_0| > \left| \frac{f(\dot{y}_1 - \dot{y}_0)}{\lambda} \right| , \quad (1.23)$$

Продольная составляющая скорости после удара определится как

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_0 - f'(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) \operatorname{sgn} \dot{x}_0 , \quad (1.24)$$

где f' – коэффициент ударного трения, также часто принимаемый равным коэффициенту динамического трения..

Отсутствие экспериментальных данных и сложность процессов, происходящих при ударе различных тел, объясняют разнообразие гипотез об изменении скорости частиц при ударе [34, 88].

Уравнения, описывающие движение частицы по вибрирующей плоскости, сводятся к следующим.

При относительном покое частицы на вибрирующей плоскости выполняются соотношения

$$y \equiv 0, \dot{x} = 0 , \quad (1.25)$$

$$-f_1 N(t) < F^{(0)}(t) < f_1 N(t) . \quad (1.26)$$

Сила трения $F^{(0)}$, не превосходит по абсолютной величине предельную силу статического трения

$$F_{max} = f_1 N \quad (1.27)$$

где f_1 – статический коэффициент трения. Тогда сила трения определится как

$$F^{(0)}(t) = mg \sin \alpha - mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t \quad (1.28)$$

При скольжении частицы вибрирующей плоскости выполняются соотношения

$$y \equiv 0, \dot{x} \neq 0 , \quad (1.29)$$

$$\ddot{x} = -g \frac{\sin(\alpha \pm \rho)}{\cos \rho} + A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho} \sin \omega t , \quad (1.30)$$

где угол трения скольжения определится как

$$\rho = \operatorname{arctg} f . \quad (1.31)$$

Если материальная точка находится в фазе полета, то меняются ее координаты относительного движения. Дифференциальные уравнения относительного движения материальной точки в системе координат, связанной с поверхностью грохота, запишутся как

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= A\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - g \sin \alpha, \\ \ddot{y} &= A\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - g \cos \alpha\end{aligned}\quad (1.32)$$

В уравнениях движения материальной точки не учтена сила сопротивления воздуха. Для частицы, которую представляют шаром диаметром d , когда она движется с постоянной скоростью, сила сопротивления воздуха определяется как

$$W = C_w(Re) \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.33)$$

Число Рейнольдца определится выражением

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{A\omega d}{\nu}, \quad (1.34)$$

Кинематический коэффициент вязкости ν равен

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.35)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, ρ – плотность воздуха. Коэффициент сопротивления C_w зависит от числа Рейнольдца и определяется из [137,138]. В работе приведены формулы для расчета средней скорости. К сожалению, формулы для вычисления средней скорости различны для различных режимов вибрации. Отсутствуют результаты натурных испытаний транспортирования сыпучих материалов по просеивающей поверхности виброгрохотов при различных параметрах колебаний сита.

В работах [1,32] была построена динамическая модель движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности сита. Целью работы являлось создание математической модели для получения данной скорости расчетным путем. В качестве объекта рассматривалась материальная точка. Ее кинематические

характеристики должны были прогнозировать характеристики движение ансамбля частиц по вибрирующей поверхности сита грохота.

Расчетная схема для моделирования процесса показана на рисунке 1.2.

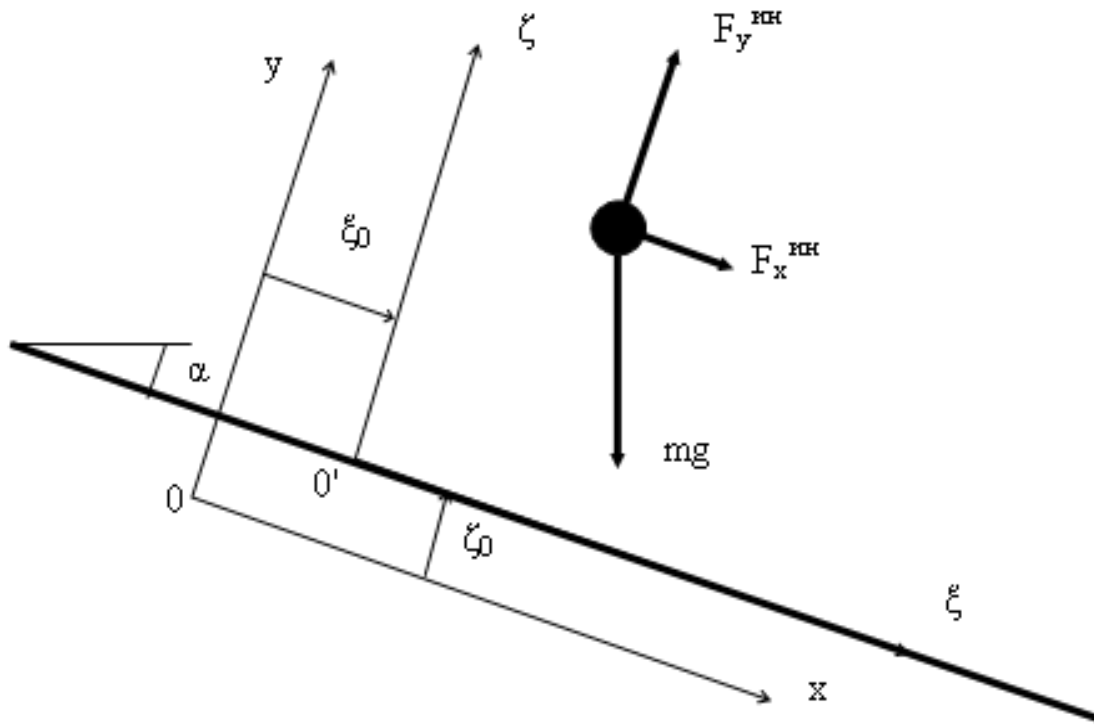


Рисунок 1.2. Расчетная схема движения частицы над вибрирующим ситом

Были введены две системы координат с параллельными осями. Неподвижная система координат xoy связана с фундаментом грохота. Подвижная система координат $\xi o'zeta$ связана с поверхностью вибрирующего сита, которое наклонено под углом α к горизонту. Сито совершает сложные колебания, независимые по направлениям x и y по законам

$$x = A_x \sin(\omega_x t + \varphi_x), \quad (1.32)$$

$$y = A_y \sin(\omega_y t + \varphi_y), \quad (1.33)$$

где A , ω и φ – амплитуда, частота и начальная фаза каждого колебания соответственно. Координаты связаны формулами

$$x = \xi + A_x \sin(\omega_x t + \varphi_x), \quad (1.34)$$

$$y = \zeta + A_y \sin(\omega_y t + \varphi_y). \quad (1.35)$$

Дифференциальные уравнения движения частицы в подвижной системе координат имеют вид

$$\dot{v}_\zeta = -g \cos \alpha + A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y), \quad (1.36)$$

$$\dot{\zeta} = v_\zeta, \quad (1.37)$$

$$\dot{v}_\xi = g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t + \varphi_x), \quad (1.38)$$

$$\dot{\xi} = v_\xi. \quad (1.39)$$

где v_ξ и v_ζ – проекции скорости относительного движения частицы на подвижные оси координат. Переносные силы инерции определяются как

$$\Phi_x = m \omega_x^2 A_x \sin(\omega_x t + \varphi_x), \quad (1.40)$$

$$\Phi_y = m \omega_y^2 A_y \sin(\omega_y t + \varphi_y). \quad (1.41)$$

Силу сопротивления воздуха движению частицы не учитывали.

Частица находится в состоянии полета при условии, что

$$A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y) > g \cos \alpha. \quad (1.42)$$

При достижении сита $\zeta=0$. Частица ударяется о его поверхность. Изменение ее скорости при ударе было описано соотношениями неупругого удара [1,32,137,138]

$$v_{\zeta}^{+} = -R v_{\zeta}^{-}, \quad (1.43)$$

$$v_{\xi}^{+} = v_{\xi}^{-} - f(R+1) v_{\zeta}^{-}, \quad (1.44)$$

где R – коэффициент восстановления скорости при ударе, f – коэффициент трения частицы о поверхность сита, индексы « $-$ » и « $+$ » соответствуют состояниям непосредственно до и после удара [1,32]. Вводя в модель процесса движения частиц по просеивающей поверхности грохота коэффициент восстановления скорости при неупругом ударе, в дальнейшем авторы считают, что частица ударяется не о поверхность сита, а о слой таких же частиц. Отскок частицы от слоя, по мнению авторов, практически отсутствует. Полагая, что $R=0$, Ю делается допущение о том, что

$$v_{\zeta}^{+} = v_{\xi}^{+} = 0. \quad (1.45)$$

Если $A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y) > g \cos \alpha$, то частица находится в полете и движется над поверхностью сита. Уравнения (1.36) – (1.39) описывают это движение.

Если $A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y) < g \cos \alpha$, то частица находится на поверхности сита.

При выполнении условия, что

$$|(g \cos \alpha - A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y))| f > |g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \sin(\omega_x t + \varphi_x)|, \quad (1.46)$$

то частица находится в покое относительно сита и скорость частицы по оси ξ равна нулю.

Если $|(g \cos \alpha - A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y))| f < |g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \sin(\omega_x t + \varphi_x)|$, то

$$\dot{v}_{\xi} = g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t + \varphi_x) - f(g \cos \alpha + A_y \omega_y^2 \cos(\omega_y t + \varphi_y)), \quad (1.47)$$

$$\dot{\xi} = v_{\xi}. \quad (1.48)$$

При этом частица движется по поверхности сита. На нее действует сила тяжести, переменная сила трения и переменная сила инерции переносного движения.

При рассмотрении кинематических характеристик движения частицы по сити реального грохота, когда траектории колебательного движения точек просеивающей поверхности окружности, уравнения движения упрощаются. Расчетная схема процесса движения частицы над просеивающей поверхностью грохота при ее круговых колебаниях показана на рисунке 1.3

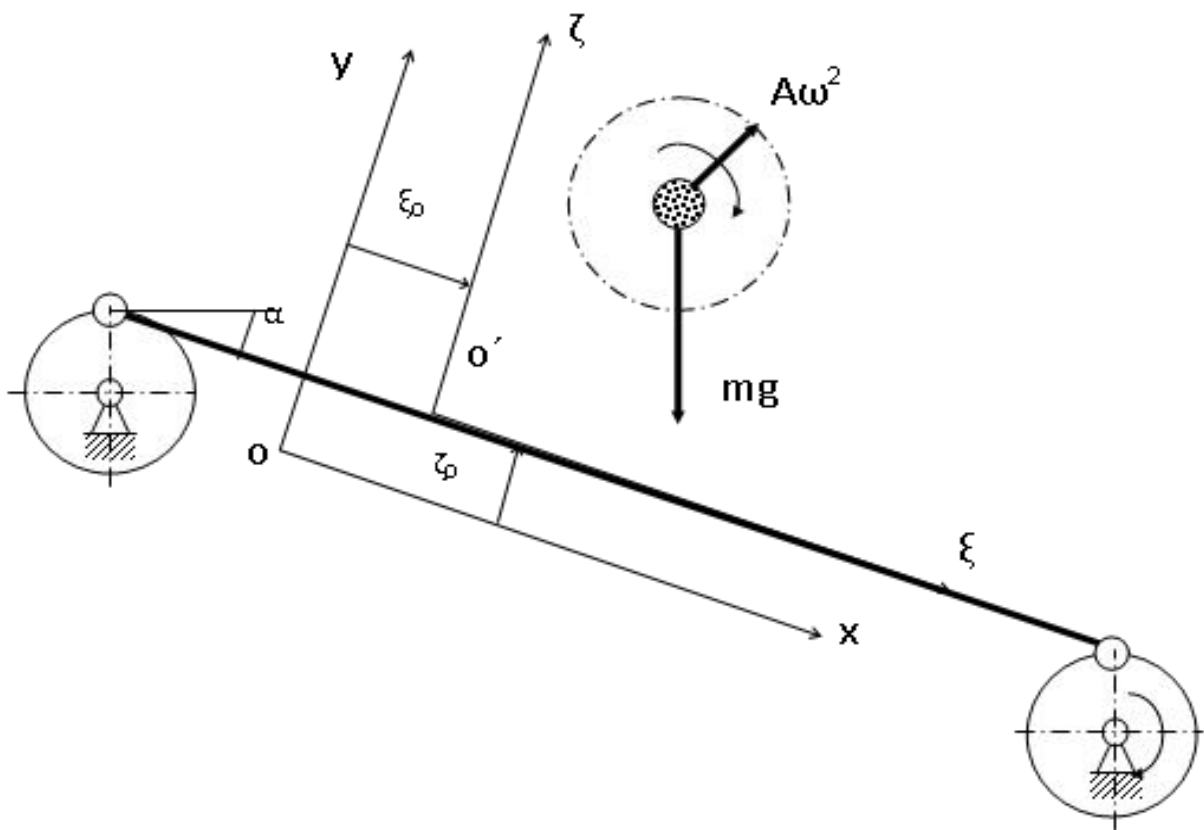


Рисунок 1.3. Расчетная схема процесса при круговых колебаниях сита грохота

Для круговых колебаний сита уравнения движения частицы по поверхности сита грохота принимают вид

$$\dot{v}_{\zeta} = -g \cos \alpha + A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.49)$$

$$\dot{\zeta} = v_{\zeta}, \quad (1.50)$$

$$\dot{v}_{\xi} = g \sin \alpha + A \omega^2 \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.51)$$

$$\dot{\xi} = v_{\xi} \quad (1.52)$$

На поверхности сита выполняются условия неупругого удара

$$v_{\zeta}^{+} = -R v_{\zeta}^{-}, \quad (1.53)$$

$$v_{\xi}^{+} = v_{\xi}^{-} - f(R+1) v_{\zeta}^{-} \quad (1.54)$$

Частица отрывается от поверхности сита при условии

$$A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) > g \cos \alpha, \quad (1.55)$$

где A и ω – амплитуда и частота круговых колебаний сита грохота.

В работах [1,32] представлены результаты численных экспериментов с моделями движения частицы над поверхностью сита грохота.

На рисунке 1.4 показаны траектории движения частицы при горизонтальном расположении сита. Частица движется в сторону вращения просеивающей поверхности. Циклическая частота колебаний грохота составляла 80с^{-1} . Вверху показаны траектории относительного движения, имеющие сложный характер. Траектории абсолютного движения, расположенные в нижней части рисунка 1.3, более регулярны.

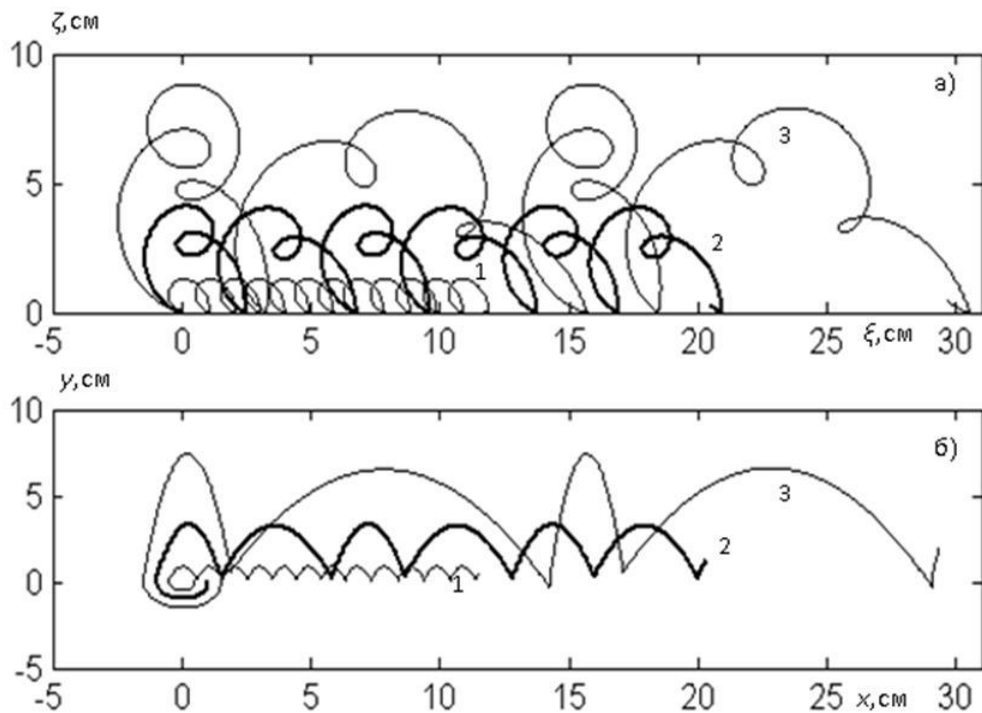


Рисунок 1.4. Расчетные траектории движения частицы в подвижной (а) и неподвижной (б) системах координат ($\omega=80\text{с}^{-1}$; 1 – $A=0,5\text{см}$; 2 – $1,0\text{ см}$; 3 – $1,5\text{см}$).

Среднюю скорость движения частицы, которую авторы [1] считают скоростью транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности сита грохота, получают, поделив частицей смещение частицы на время, за которое оно произошло.

На рисунке 1.5 показано влияние циклической частоты колебаний просеивающей поверхности грохота на скорость движения частиц по горизонтальному сити при различных амплитудах его колебаний. При высоких значения амплитуды и частоты колебаний сита зависимость скорости транспортирования носить сложный характер. Высокая чувствительность скорости движения частиц по сити грохота к параметрам колебаний грохота требует строгого соблюдения этих параметров при промышленной эксплуатации реальных просеивающих машин.

На рисунке 1.6 показано влияние угла наклона просеивающей поверхности на величину скорости транспортирования частиц при прямом вращении привода и реверсивном с круговой частотой 50 с^{-1} . При прямом вращении сыпучий материал на горизонтальном сите движется в сторону вращения. Увеличение угла наклона сита грохота увеличивает скорость транспортирования сыпучего материала. При реверсивном вращении привода сыпучий материал движется вверх. При наклоне около 20° движение материала прекращается, и он останавливается.

Авторы [1] использовали результаты расчетов, полученные по предложенной модели, для расчета скорости движения ансамбля частиц по сити промышленного грохота. Эта скорость позволила рассчитать время грохочения и определить эффективность процесса отсева. Величина скорости транспортирования позволила рассчитать производительность грохота. К сожалению, было проведено ограниченное число опытов на лабораторном грохоте, которые подтвердили бы правомерность использования данной модели.

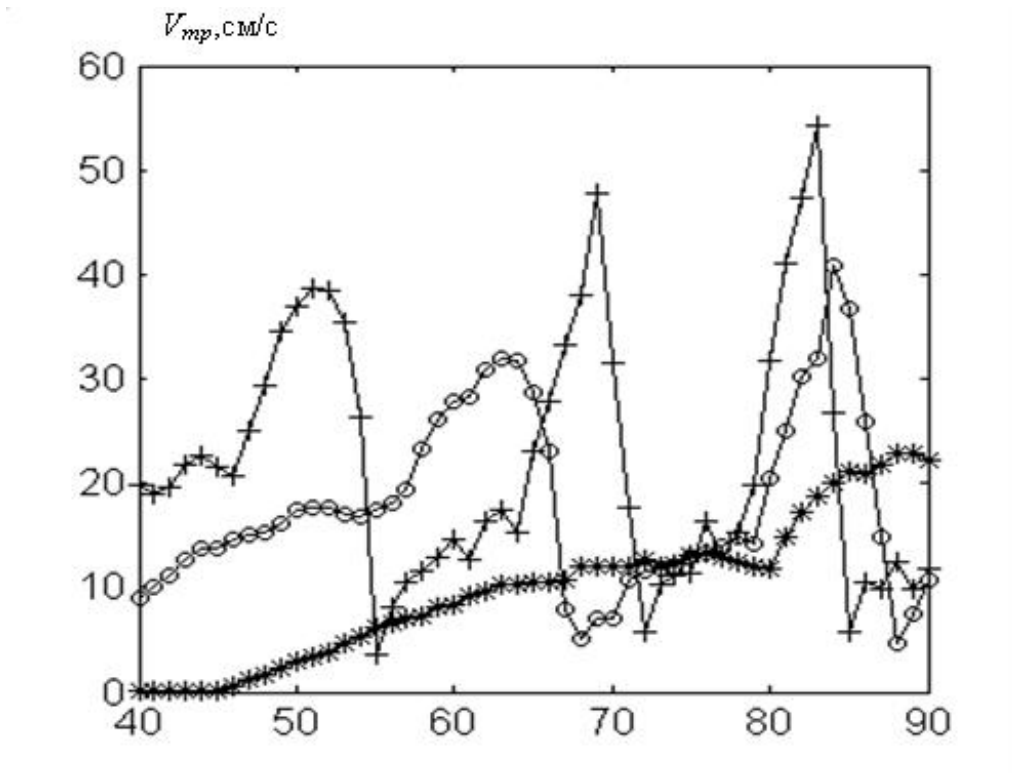


Рисунок 1.5. Влияние частоты и амплитуды колебаний сита на скорость транспортирования(+ - $A=1,5$ см; o - $1,0$ см; * - $0,5$ см)

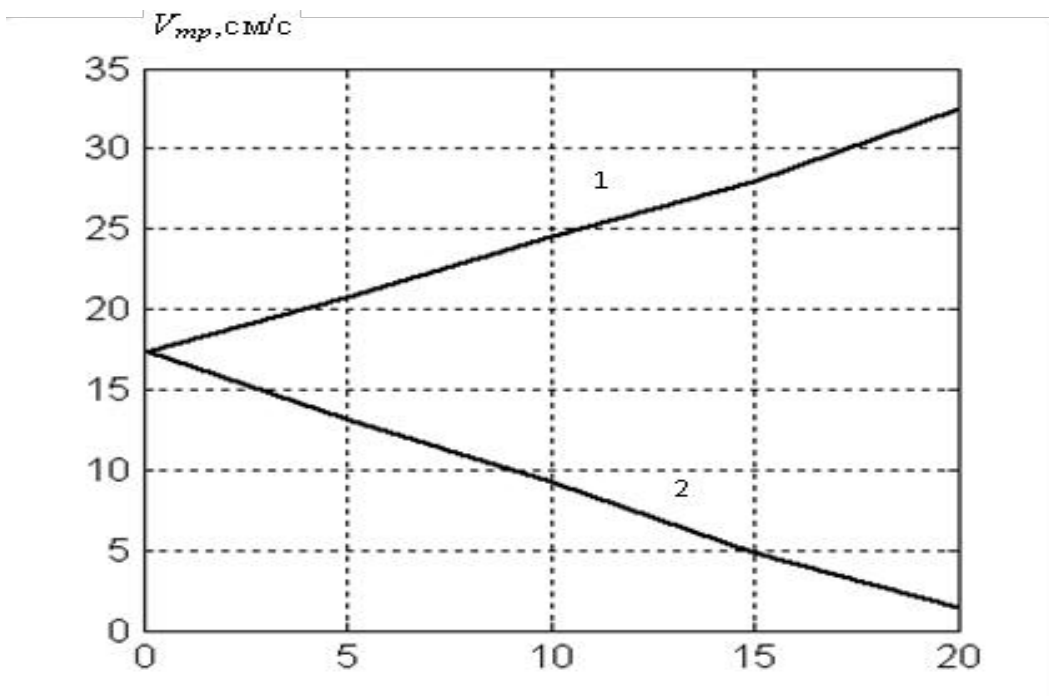


Рисунок 1.6. Влияние угла наклона сита на скорость транспортирования при $A=1$ см; $\omega=50$ с⁻¹ (1 - прямое вращение вибропривода, 2 – реверсивное вращение вибропривода)

1.5. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований

По настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Сравнение теоретических моделей процесса грохочения показало, что в настоящее время не существует завершенной теории грохочения, которая учитывала бы многие аспекты процесса: случайные свойства сыпучей среды, случайность, которую вносит в процесс сам аппарат. Не выявлено влияние технологических параметров вибровоздействия сита грохота на основные процессы: миграция частиц по слою, транспортирование сыпучего материала по поверхности сита, процесс проникновения мелких частиц через отверстия сита.

2. 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.

3. Предложенная расчетная модель, описывающая движение одиночной частицы, для расчета кинематических параметров движения сыпучей среды по просеивающей поверхности грохота, определяют среднюю скорость транспортирования материала по ситам, но при некоторых режимах колебаний грохота расхождение между расчетными и опытными величинами скорости движения частиц по ситам так велико, что может существенно исказить значения основных параметров процесса: производительность грохота и эффективность фракционирования.

4. Наиболее подходящим математическим инструментом для моделирования кинетики грохочения являются вероятностные модели и, в частности, теория цепей Маркова.

5. Модель движения одиночной частицы, описывающая процесс транспортирования сыпучей среды по просеивающей поверхности грохота может

быть положена в основу создания имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, учитывающую различные режимы вибровоздействия сита на слой сыпучего материала.

В связи с этим в работе были поставлены следующие 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, коэффициенты 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 точное 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 ситам, полученными компьютерными и экспериментальными исследованиями.

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

ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ

Имитационная модель процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах позволила построить модели так, как они проходили бы в действительности. Объектом исследования является многокомпонентная механическая система, представляющая собой совокупность конечного числа частиц. Каждая частица представляет собой тело, движение которого ограничено силовыми взаимодействиями с другими телами. Система тел подвергается внешнему силовому воздействию. Имитационная модель должна определить положение каждой частицы в пространстве в различные моменты времени. Если это проходная частица, то модель должна дать ответ, будет ли частица находится в подситовом пространстве за отведенное ей время пребывания на сите грохота. Скорость транспортирования сыпучего материала по сити конечной длины определяет время пребывания частиц на поверхности сита грохота. Если рассматривается движение непроходной частицы, то модель должна определить ее положение. Находится ли частица на поверхности сита или успела покинуть грохот?

Задача движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности является одной из классических в механике грохочения. Для моделирования механического поведения частиц, представляющих собой сыпучий материал, в последнее время отечественными и зарубежными исследователями, изучающими процессы в дисперсных средах, используют метод дискретных элементов. На его основе созданы пакеты программ EDEM (DEM Solution Ltd), AnyLogic, PFC3D, ELFEN, MIMES и другие, обычно принадлежащие зарубежным разработчикам. Он основан на применении законов Ньютона и контактной механики. Его отличают большая универсальность и неограниченные возможности диагностики исследования механических процессов.

2.1. Дифференциальные уравнения движения ансамбля частиц по просеивающей поверхности виброгрохота

Исследование динамики движения и взаимодействия частиц успешно решается приближенными или численными методами. Один из вариантов этих методов – метод дискретных элементов. Он рассматривает движущуюся сыпучую среду как совокупность взаимодействующих частиц. Каждую частицу можно рассматривать как абсолютно твердое или упругое тело. Движения системы тел описывается системой дифференциальных уравнений. При решении этих уравнений решается задача Коши, где на коротком интервале времени интегрируются дифференциальные уравнения при начальных условиях, заданных на начало временного интервала. При этом учитываются разные законы взаимодействия. Для каждой частицы вычисляется результирующая сила на выбранном отрезке времени. В итоге получаются начальные данные для определения координат точек при следующем шаге интегрирования. Вычисления продолжаются в течение всего времени протекания процесса. В нашем случае это время пребывания ансамбля частиц на просеивающей поверхности вибрационного грохота. Очевидно, при вычислении закономерности движения каждой частицы при использовании метода дискретных элементов возникают погрешности. Однако если временной интервал интегрирования уменьшить, то точность решения дифференциальных уравнений возрастет.

Важным моментом при использовании данного метода является возможность визуализации процесса движения частиц по ситам грохота на дисплее компьютера. В последнее время примеры анимационного изображения процессов переработки дисперсных сред демонстрируются на международных конференциях и симпозиумах. При исследовании процесса движения ансамбля частиц по просеивающей поверхности, используя возможности компьютерных средств, можно замедлить процесс и наблюдать за столкновением частиц между собой и с поверхностью сита виброгрохота. Программа позволяет остановить движение и приблизить картину взаимодействия конкретной частицы с ее

окружением. Имитационное моделирование заменяет физический эксперимент и ускоряет обработку его результатов.

В данном исследовании сыпучая среда представляет собой совокупность N обособленных частиц. Каждая частица представляет собой тело, движение которого ограничено силовыми взаимодействиями с другими телами. По законам Ньютоновской механики движение одной из ансамбля частиц описывается движением ее центра масс в неподвижной инерциальной декартовой системе координат, связанной с основанием грохота (рисунок 2.1)

$$m_i \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = \bar{F}_i, \quad (2.1)$$

где m_i – масса i -й 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 (рисунок 2.2), которая определится как

$$\bar{F}_i = m \bar{g} + \sum_{j=1}^N \bar{F}_{ij}. \quad (2.2)$$

\bar{F}_{ij} – поверхностная сила, состоящая из сил отталкивания и сил трения, определяемых из вязкоупругой модели контактной механики [90,124,143].

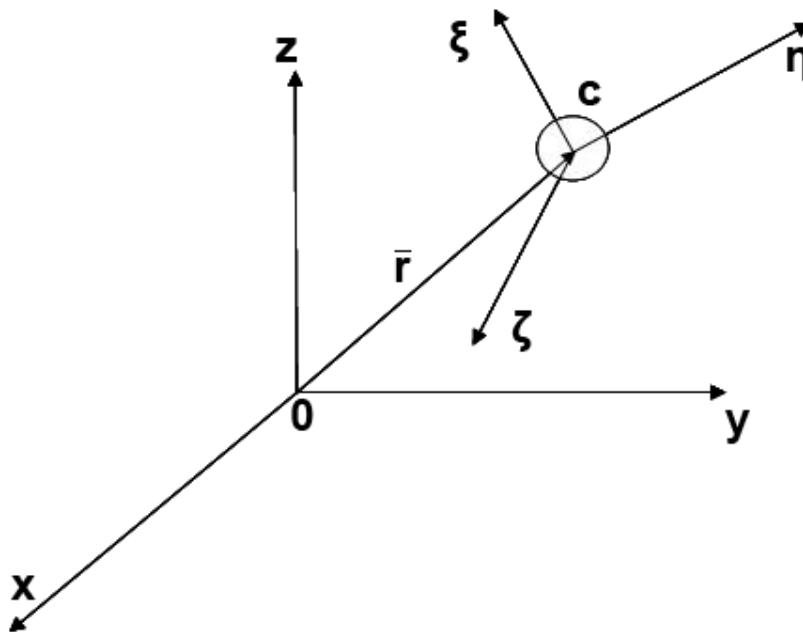


Рисунок 2.1. Расчетная схема движения одной из ансамбля частиц

Начало подвижной системы координат, жестко связанной с телом, выберем в центре масс частицы, а оси ξ, η, ζ направим вдоль главных осей инерции (рисунок 2.1). Движение частицы вокруг центра масс описываем теоремой об изменении кинетического момента частицы

$$\frac{d\bar{K}_c}{dt} = \bar{M}_i, \quad (2.3)$$

где \bar{M}_i момент сил \bar{F}_{ij} относительно центра масс i -й частицы.

Кинетический момент частицы относительно центра масс определится как

$$\bar{K}_c = I_c \bar{\omega}, \quad (2.4)$$

где I_c – момент инерции частицы, $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости частицы.

Сила отталкивания $F_{N,ij}$ возникает между частицами при $\delta_{ij} > 0$ (рисунок 2.2 а). Она направлена по нормали n к центру i -й частицы (рисунок 2.2.б).

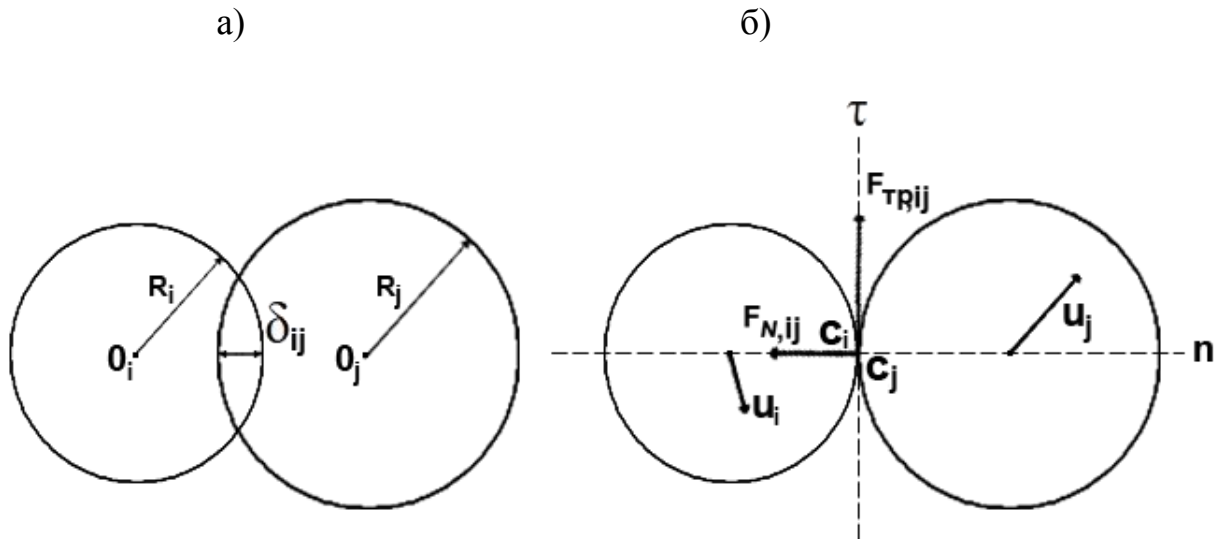


Рисунок 2.2. Схема контакта частиц: а) – схема перекрытия; б) – схема действия сил в точке контакта

Согласно [124] сила отталкивания определится как

$$F_{N,ij} = F_{N,ij}^y + F_{N,ij}^B, \quad (2.5)$$

где $F_{N,ij}^y$ – упругая составляющая силы отталкивания, $F_{N,ij}^B$ – вязкая составляющая силы отталкивания.

Упругая составляющая силы отталкивания, согласно [124] определится как

$$F_{N,ij}^y = \frac{4}{3} \frac{E_i E_j}{(1-\nu_i^2)E_i + (1-\nu_j^2)E_j} \sqrt{\frac{R_i R_j}{R_i + R_j}} \delta_{ij}^{\frac{3}{2}}, \quad (2.6)$$

где ν_i, ν_j – коэффициенты Пуассона i -й и j -й частиц; E_i, E_j – модули упругости частиц.

Вязкая составляющая силы отталкивания определится как

$$F_{N,ij}^B = \gamma_N M_{ij} u_{N,ij}. \quad (2.7)$$

Здесь M_{ij} – приведенная масса частиц, определяемая как

$$M_{ij} = \sqrt{\frac{m_i m_j}{m_i + m_j}}, \quad (2.8)$$

$u_{N,ij}$ – проекция скорости точки C_i относительно скорости C_j на ось n , γ_N – коэффициент демпфирования, влияющий на коэффициент восстановления скорости при ударе [143].

Сила трения $F_{тр, ij}$ направлена против движения i -й частицы относительно j -й. Ее величину можно определить как

$$F_{тр,ij} = \text{sign}(u_{\tau ij}) F_{N,ij} t g \varphi_{\tau}, \quad (2.9)$$

где $u_{\tau ij}$ – проекция скорости точки C_i относительно скорости C_j на ось τ , φ_{τ} – угол контактного трения между частицами.

Решение системы дифференциальных уравнений (2.1), (2.3) для N частиц позволит определить положение каждой частицы относительно неподвижной системы координат в произвольный момент времени.

Моделирование всех аспектов процесса грохочения, когда учитывается как процесс миграции частиц различной крупности по слою сыпучего материала, так и процесс проникновения через отверстия сита проходových частиц, крупность которых так же разная, потребует введения в программу расчетов большого числа частиц порядка 10^5 . Это приведет к большим затратам машинного времени.

Качественная оценка влияния технологических режимов грохочения на

скорость транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности вибрационного грохота и время пребывания частиц на сите, которое является временем фракционирования может быть проведено при меньшем количестве виртуальных частиц, участвующих в имитационном движении.

2.2. Одномерная ячеечная модель теории цепей Маркова для расчета кинетики грохочения

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 проходových частиц через отверстия сита одномерную ячеечную модель теории цепей Маркова для расчета кинетики грохочения. Это позволит описать два процесса из трех, определяющих протекание всего процесса грохочения в целом: процесс движения частиц по слою сыпучего материала, подвергнутого вибровоздействию со стороны сита вибрационного грохота и процесс проникновения проходových частиц разной крупности через отверстия сита. Описание процесса транспортирования сыпучего материала по грохоту проводилось с помощью имитационной модели движения частиц по ситy с использованием компьютерной программы Autodesk 3ds Max.

В слое материала под действием вибрации друг относительно друга перемещаются крупные и мелкие частицы. Исследуем миграцию проходových частиц узкого класса крупности по слою сыпучего материала. Слой сыпучего материала разбит на m подслоев - ячеек конечного размера толщиной Δx . Расчетная схема процесса показана на рисунке 2.3.

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

$$S=[S_1 \ S_2 \ \dots \ S_m]^T, \quad (2.10)$$

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.

Сыпучий материал состоит из частиц мелких (проходowych) и крупных (непроходowych) фракции. При передачи силовых импульсов от сита на слою сыпучего материала частицы мелких фракций мигрирует вниз к просеивающей поверхности. Этот процесс сопровождается диффузионным перемешиванием частиц всех фракции. Достигнув сита, частицы мелких фракций, с некоторой долей вероятности, проникают через отверстия просеивающей поверхности.

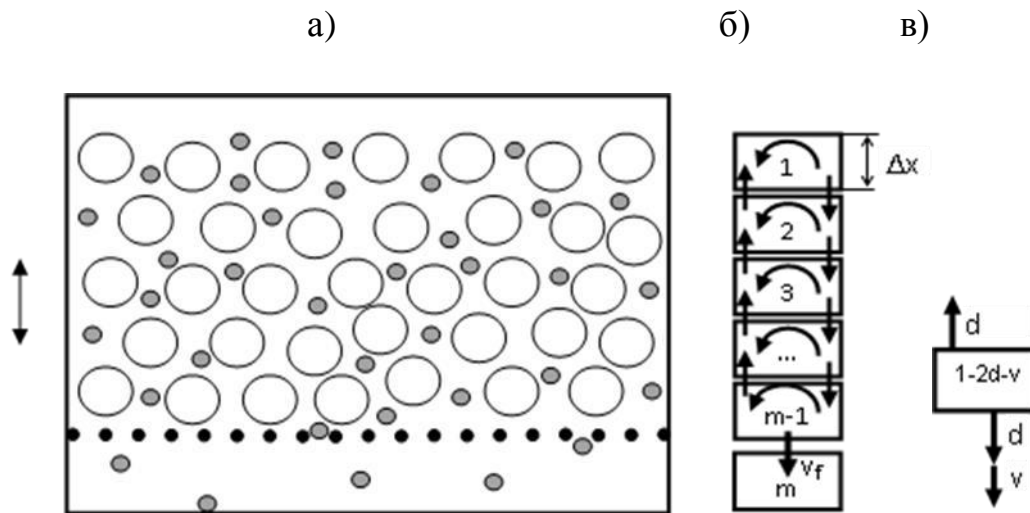


Рисунок 2.3. Расчетная схема процесса (а), его ячеечная модель (б) и доли переходных вероятностей (в)

Эволюция состояния цепи может быть описана следующим рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1}=P \cdot S^k, \quad (2.11)$$

где \mathbf{P} – матрица переходных вероятностей, имеющая вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v+d & 1-v-2d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v+d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-d-v_f & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

В этой матрице в столбце, соответствующем номеру ячейки i , находятся вероятности проходовых 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

$$q(k) = S_m^{k+1} - S_m^k = S_{m-1}^k v_f. \quad (2.13)$$

Если известно начальное распределение вероятностей, тождественное начальному распределению относительной концентрации проходových частиц в материале, то уравнение (2.11) при известной матрице (2.12) полностью описывает кинетику фракционирования, рассчитываемую как

$$\varepsilon(k) = \sum_{k=1}^k q(k). \quad (2.14)$$

Пример расчетной эволюции распределения частиц мелкой фракции в ячейках слоя показан на рисунке 2.4 [135].

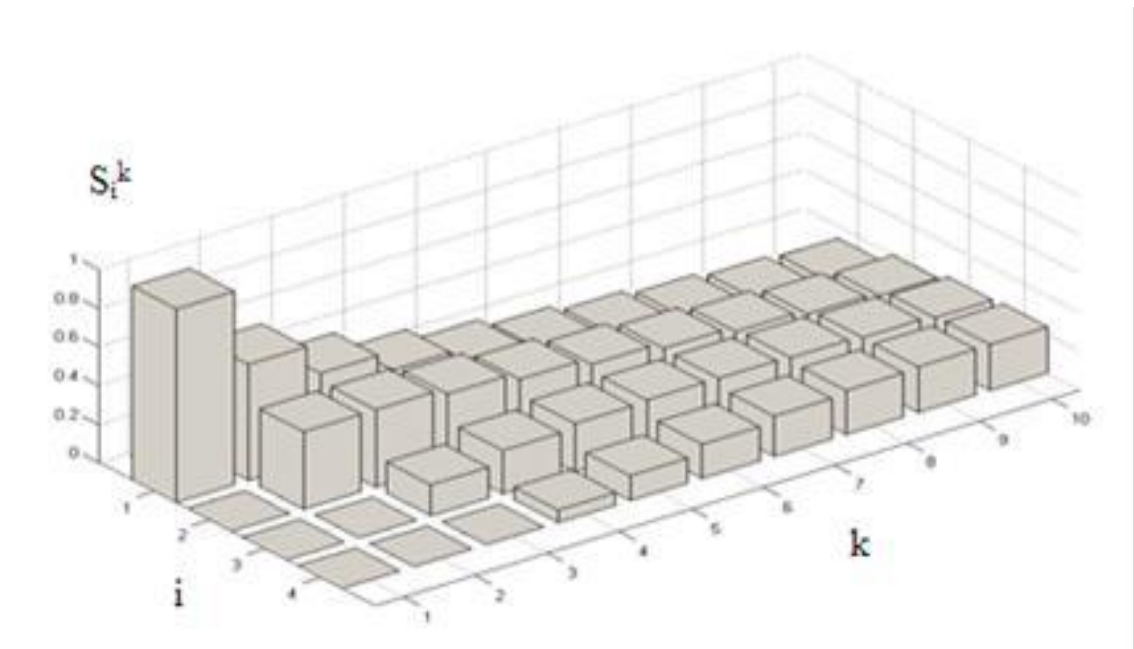


Рисунок 2.4. Пример эволюции распределения частиц мелкой фракции в ячейках слоя ($d=0,2$; $v=0,2$; $vf=0,2$)

На рисунках 2.5 – 2.7 показаны примеры результатов расчета кинетики извлечения проходовой фракции по предлагаемой ячеечной модели. На рисунке 2.5 кривые различаются вероятностями прохождения частиц сквозь сито, на рисунке 2.6 – величинами скорости сегрегации, на рисунке 2.7 – величинами дисперсионных коэффициентов.

Результаты расчетов показывают, что величина вероятности проникновения частиц через отверстия сита значительно влияет на кинетику процесса, влияние скорости сегрегации меньше, чем влияние вероятности прохождения через сито, а величина коэффициента макродиффузии слабо влияет на кривую кинетики рассева [135].

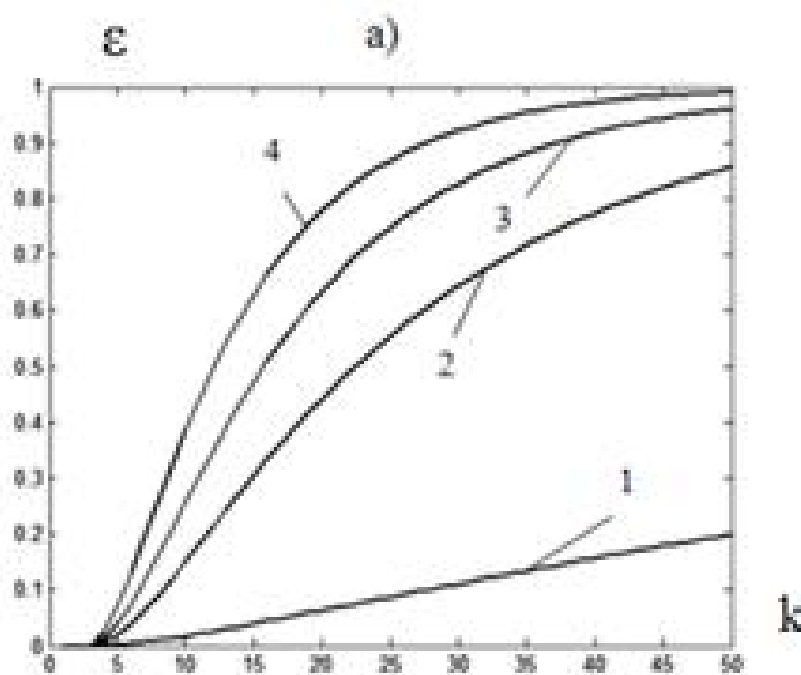


Рисунок 2.5. Влияние вероятности проникновения частиц через отверстия сита на кинетику грохочения ($d=0,2$; $v=0,2$; 1, 2, 3, 4 - $v_f = 0,01$; 0,1; 0,2; 0,4)

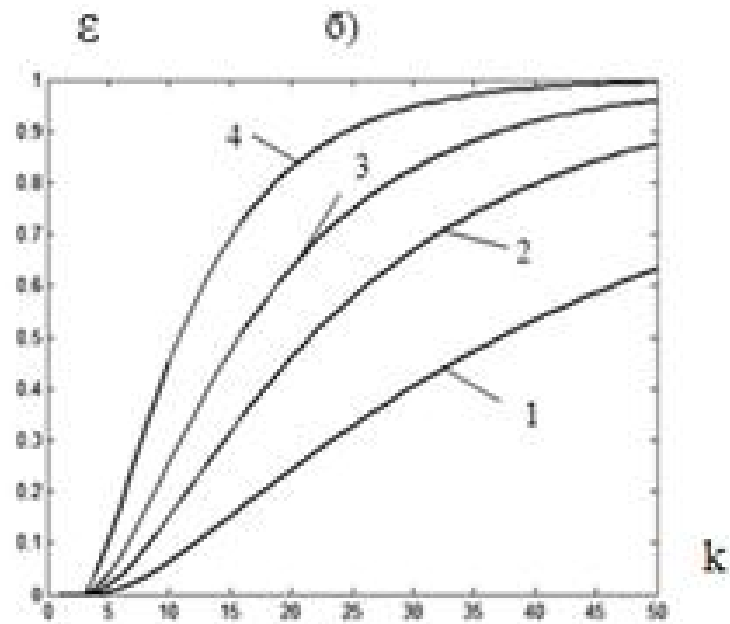


Рисунок 2.6. Влияние скорости сегрегации частиц на кинетику грохочения
($d=0,2$; $v_f=0,2$; 1, 2, 3, 4 - $v=0; 0,1; 0,2; 0,4$)

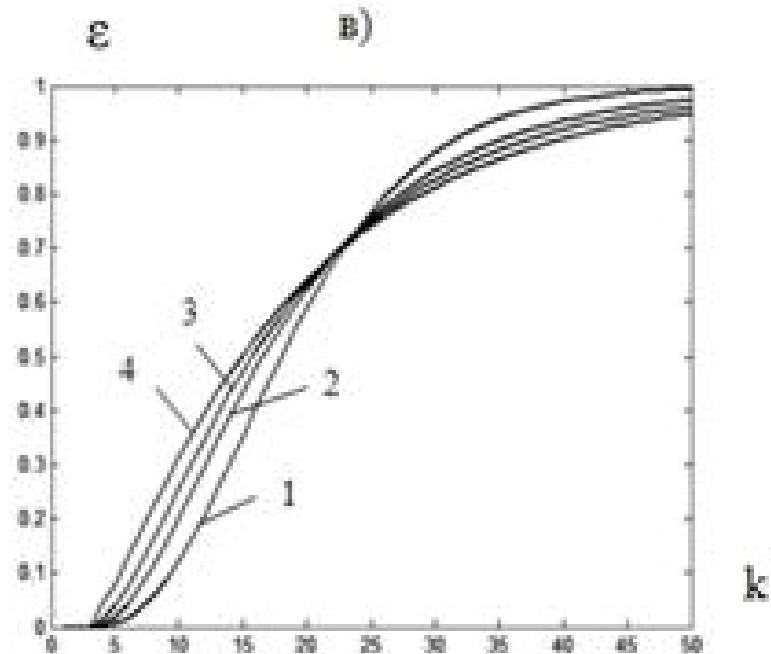


Рисунок 2.7. Влияние диффузии частиц на кинетику грохочения
($v=0,2$; $v_f=0,2$; 1, 2, 3, 4 - $d=0; 0,1; 0,2; 0,4$)

В основу модели расчета кинетики грохочения сыпучих материалов положены работы С.В. Федосова, В.Е.Мизонова, В.А. Огурцова, их учеников и последователей [1, 11-17,118-123 и др.]. Для успешного использования этих моделей необходимо знать время пребывания частиц на сите грохота при непрерывном фракционировании. Это время позволит ограничить непрерывную кривую кинетики грохочения, так как время движения порции сыпучего материала по ситам и есть конкретное время грохочения, равное времени пребывания частиц на сите.

Расчет этого времени производился на основе имитационного моделирования движения частиц по грохоту.

2.3. Имитационная модель транспортирования ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, основанная на программной системе Autodesk 3ds Max

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.

Достоверные кинематические характеристики движения частиц сыпучего материала могут быть получены на основе решения методом дискретных элементов системы дифференциальных уравнений, описывающих движение каждой входящей в ансамбль частицы. Для исследования процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота разработана имитационная модель, использующая программную систему Autodesk 3ds Max, которая позволяет создать виртуальный процесс движения сыпучего материала по вибрирующему сити грохота.

Разработка метода расчета кинетики фракционирования сыпучих материалов, основанная на имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту и теории цепей Маркова, повышает точность прогнозирования фракционного состава конечного продукта грохочения.

В программе Autodesk 3ds Max создаем виртуальный просеивающий аппарат. На панели команд выбираем из набора стандартных объектов цилиндр, как наиболее подходящий прототип стальной нити сита (рисунок 2.8). Такой аппарат обладает всеми признаками реального грохота, отличающийся от реальной машины габаритами. Его сито может совершать такие же колебания, как и реальный грохот. А сито виртуального грохота может по геометрическим параметрам полностью соответствовать реальному сити.

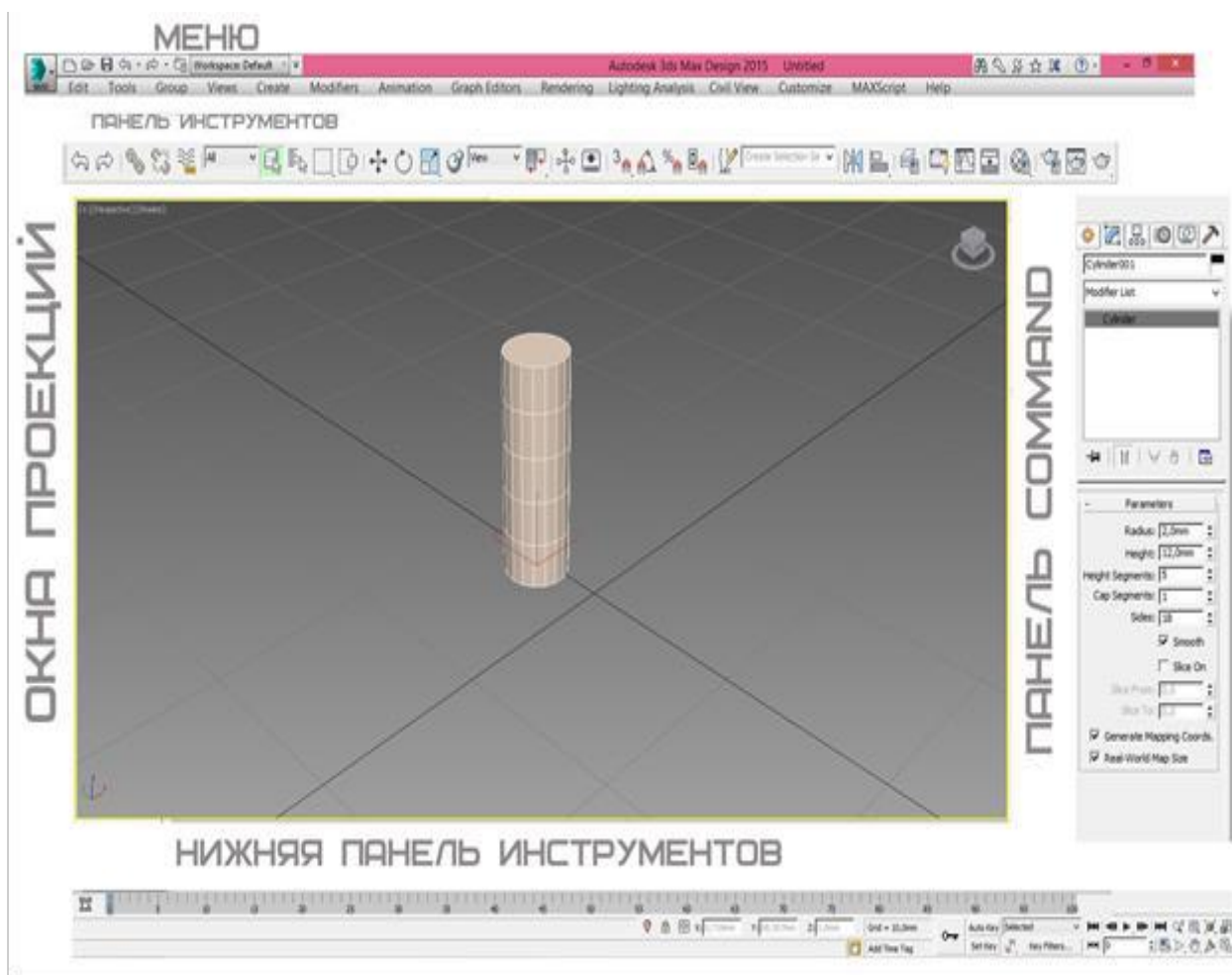


Рисунок 2.8. Стандартный объект в окне проекции интерфейса программы Autodesk 3ds Max.

В окне проекций изменяем форму цилиндра, радиус и длину. Настраиваем радиус размером 0,5 мм, что соответствует радиусу проволоки реального сита. Перемещаем с помощью панели инструментов данный цилиндр в пространстве, тиражируя его, создав нужное количество копий, и преобразуя в просеивающую плоскость (рисунок 2.9).

Создаем виртуальную просеивающую поверхность длиной 240 мм и шириной 120 мм. Размер квадратной ячейки сита – 5 мм.

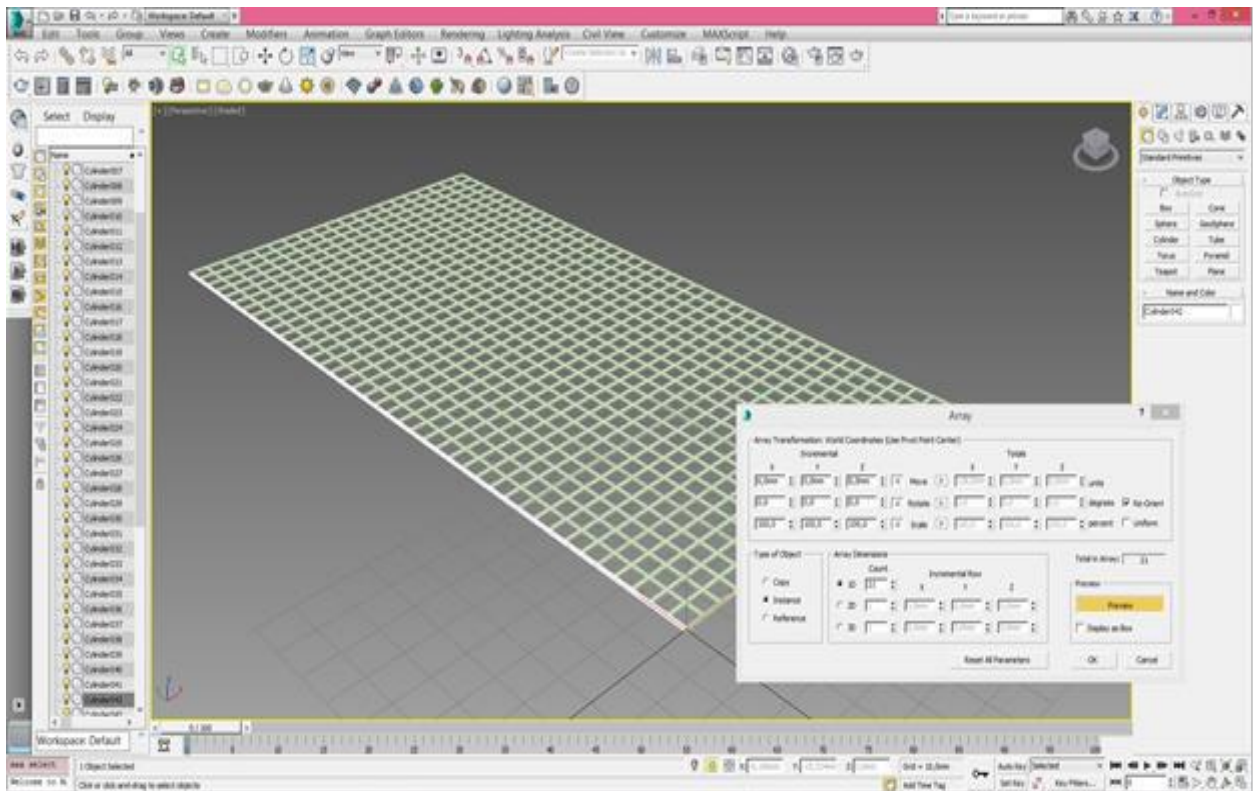


Рисунок 2.9. Виртуальная просеивающая поверхность

Для того, чтобы программа воспринимала заготовленные цилиндры, их надо перевести с помощью редактора в виртуальное пространство. Из стандартного параллелепипеда, придав ему нужные размеры: высоту, длину и толщину, создаем борта просеивающего аппарата (рисунок 2.10). Процесс фракционирования на виртуальном грохоте будет отличаться от реального лишь временем пребывания частиц на сите. Средняя скорость транспортирования сыпучего материала по виртуальному сити будет такой же как у частиц,двигающихся по реальному сити. Значение средней скорости можно перенести на реальный аппарат и пересчитать время пребывания частиц на сите реального грохота, что позволит рассчитать эффективность рассева промышленного грохота.

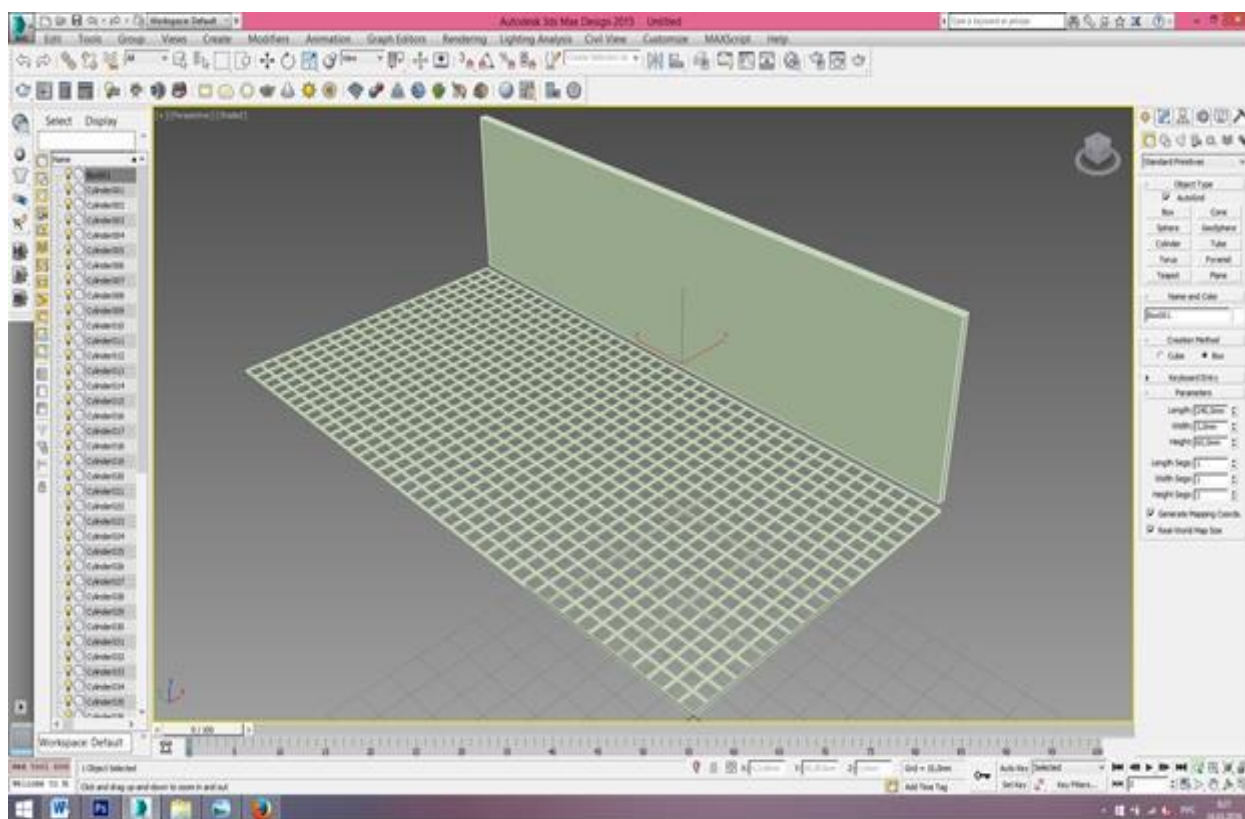


Рисунок 2.10. Создание виртуальной просеивающей установки

В меню программы раздела Animation с помощью команды Path Constraint задаем траекторию кругового движения точек просеивающего сита с амплитудой круговых колебаний, которая может меняться в диапазоне от 1 до 15 мм. Задаем частоту вращения точек просеивающей поверхности в диапазоне от 25 до 150 с⁻¹. Одна секунда процесса соответствует 25 кадрам визуализации процесса в окне проекции. Частота вращения 78,5 с⁻¹ соответствует 2 кадрам. Таким образом, полный оборот по заданной траектории точка виртуальной просеивающей поверхности проходит за два кадра.

На рисунке 2.11 при помощи панелей инструментов задаем угол наклона поверхности сита к линии горизонта, который менялся от 0 до 35 градусов.

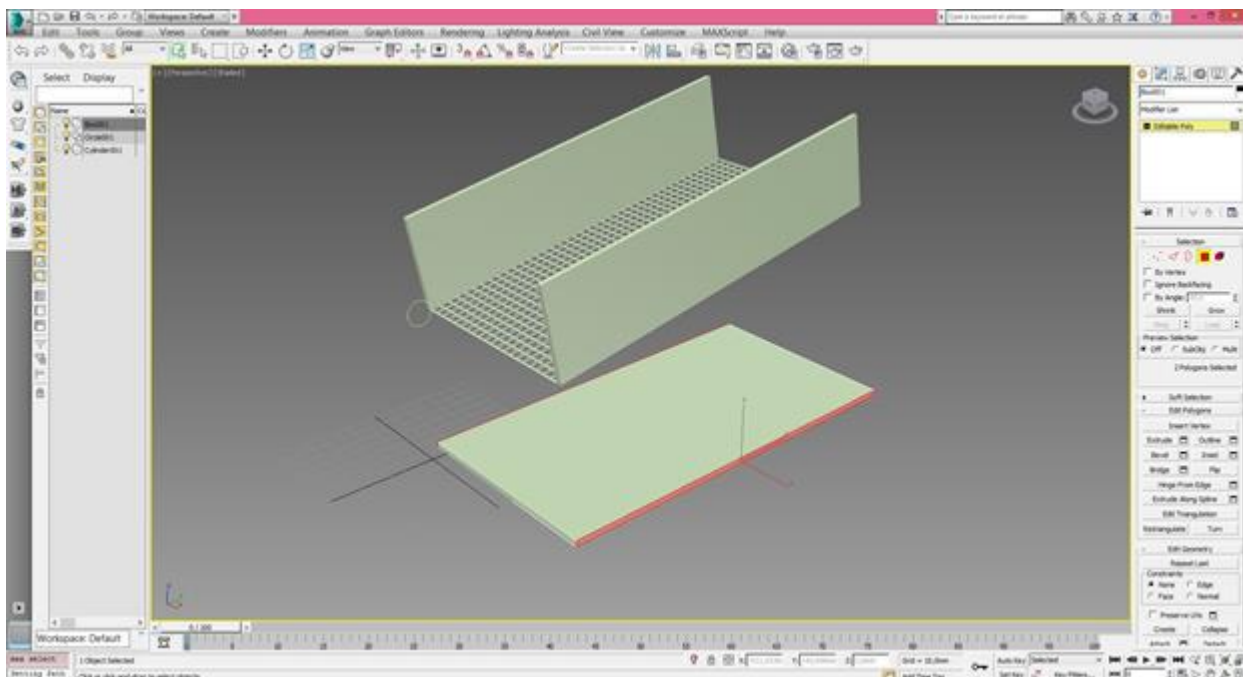


Рисунок 2.11. Вариант наклона просеивающей поверхности

Пользуясь стандартными фигурами, взятыми на панели команд, создаем поддоны, принимающие подситовые и надситовые частицы.

Таким образом, создана просеивающая поверхность, имеющая определенный угол наклона к горизонту, частоту и амплитуду круговых колебаний.

Создание частиц сыпучего материала, которые перемещались по сити грохота, проводилось в следующей последовательности:

1. Из сфер диаметром 10 и 4 мм создавались крупные и мелкие частицы. Каждая сфера изначально состояла из множества плоских полигонов, соединенных друг с другом вершинами.
2. Редактировалась форма сфер. Им придавалась реальная форма частиц щебня. Это осуществлялось изменением формы полигонов и положением вершин, которое осуществлялось с помощью модификатора Editable Poly (рисунок 4а).
3. С помощью агрегата Array в меню инструментов создавались копии частиц. Было создано 100 крупных и 300 мелких частиц (рисунок 2.12).

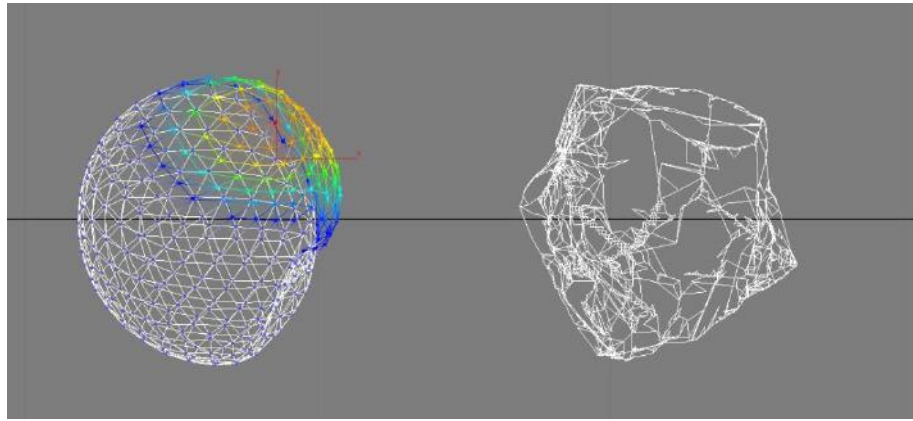


Рисунок 2.12. Трансформирование сферы в форму реальной частицы

Созданные частицы были размещены с помощью инструмента перемещений на загрузочной части просеивающей поверхности (рисунок 2.13).

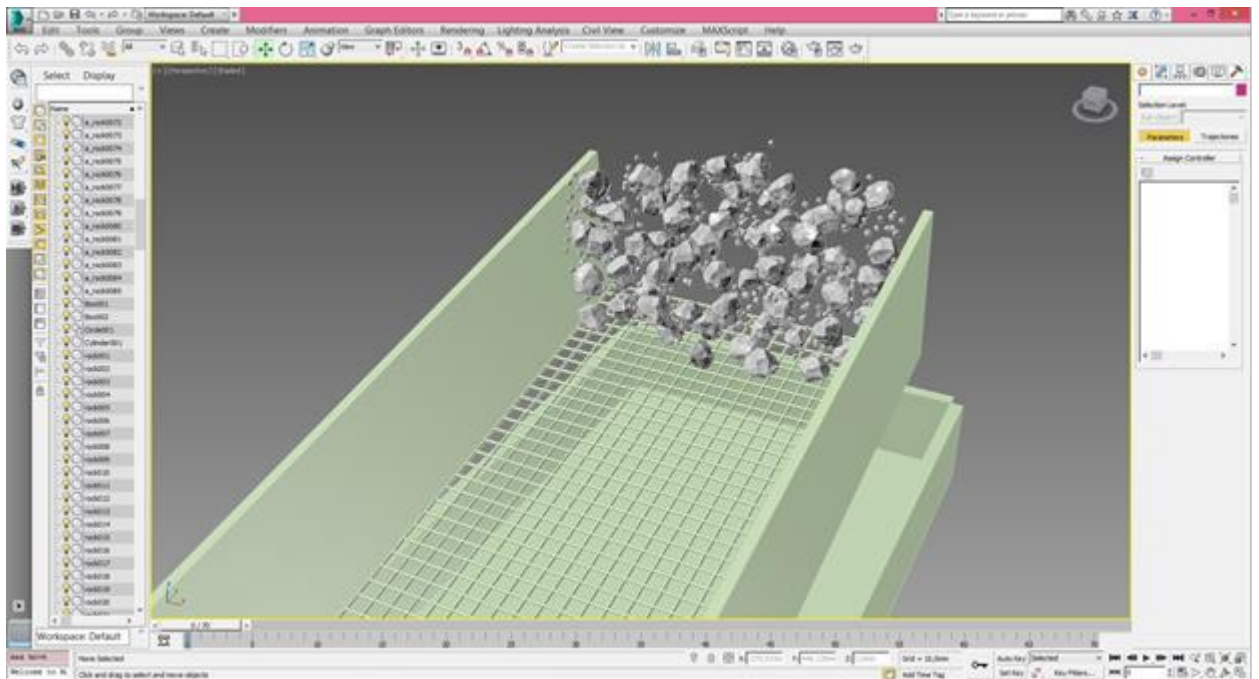


Рисунок 2.13. Размещение частиц над загрузочной частью сита

Объектам процесса были приданы физические свойства. С помощью инструментов MassFX Tool (симулятор закона физики) придавалось ситу, бортам и поддону заданная жесткость, соответствующая жесткости стали. На рисунке 8 показана панель инструментов MassFX Tool, с помощью которой можно придавать жесткость просеивающей поверхности, соответствующей следующим материалам: сталь, резина, полиуретан и другие (рисунок 2.14).

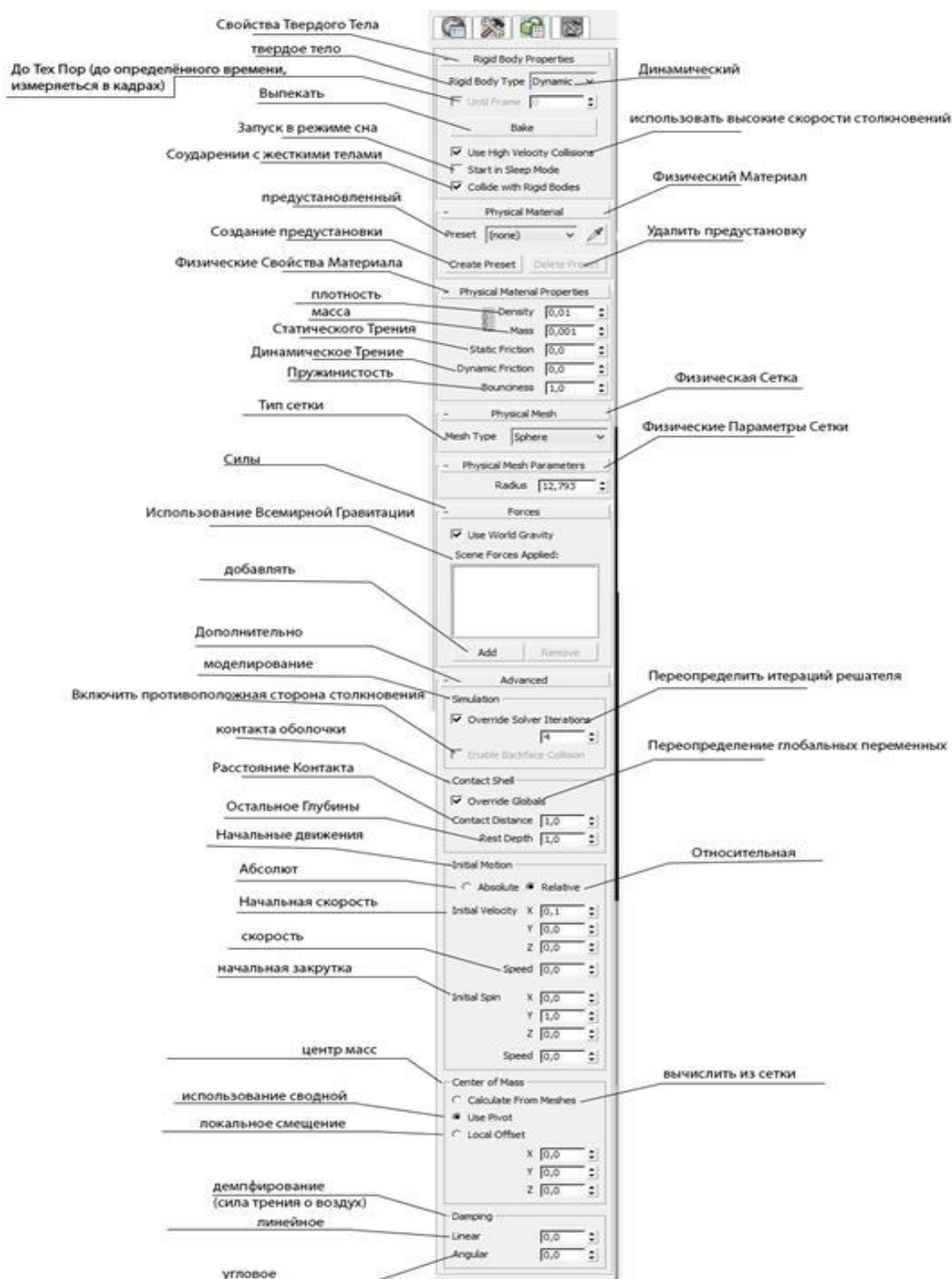


Рисунок 2.14. Модификатор MassFX Tool для настройки свойств частиц

С помощью этого же модификатора можно придавать различные физические свойства частицам: плотность от 500 до 10 000 кг/ куб.м., масса частицы от 0,001 грамма до 46,7 грамма в зависимости от объема выбранного начального тела, коэффициент статического трения от 0 до 1, коэффициент динамического трения от 0 до 1, коэффициент скорости восстановления при ударе от 0 до 1. Кроме того модификатор предусматривает введение пород щебня: карбонатных, известняковых, гранитных и других.

Модификатор MassFX Tool задавал действие сил гравитации, трения и ударных импульсов. В интерфейсе MassFX Tool в окне Simulation Tools включался виртуальный процесс движения частиц (рисунок 2.15)

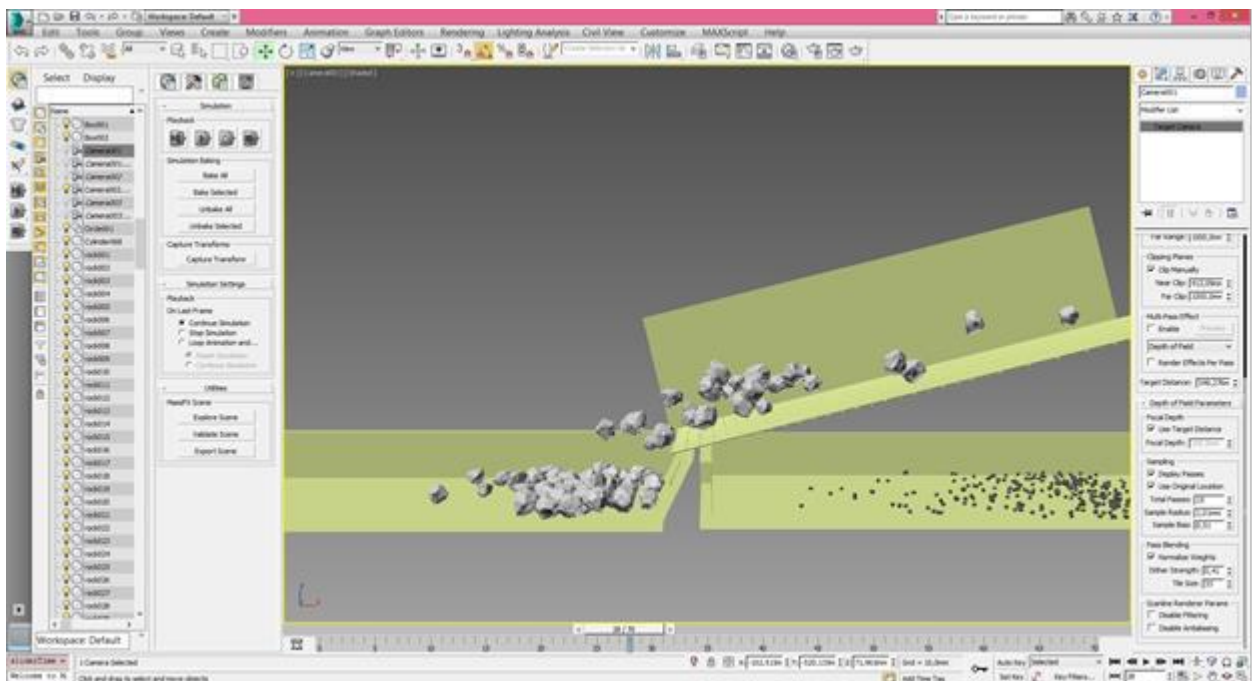


Рисунок 2.15. Виртуальный процесс движения ансамбля частиц по сити грохота

В окне проекций воспроизводился процесс движения частиц по вибрирующему сити. Сыпучий материал перемешался по просеивающей поверхности, мелкие частицы проникали через отверстия сита и ссыпались в подситовой поддон, крупные попадали в поддон, находящийся за разгрузочной частью просеивающей поверхности.

Используя возможности программы, отслеживалось движение каждой

частицы, с фиксацией параметров абсолютного и относительного движения. Каждая частица имела 6 степеней свободы. Они соответствовали трем значениям координат, связанных с основанием грохота, и значением трех углов поворота частицы вокруг осей подвижной системы координат. Оси подвижной системы координат жестко связаны с частицей, начало системы координат совпадает с ее центром масс.

Открывалась вкладка Open Mini Curve Editor для отображения изменения шести параметров движения частицы во времени (рисунок 2.16).

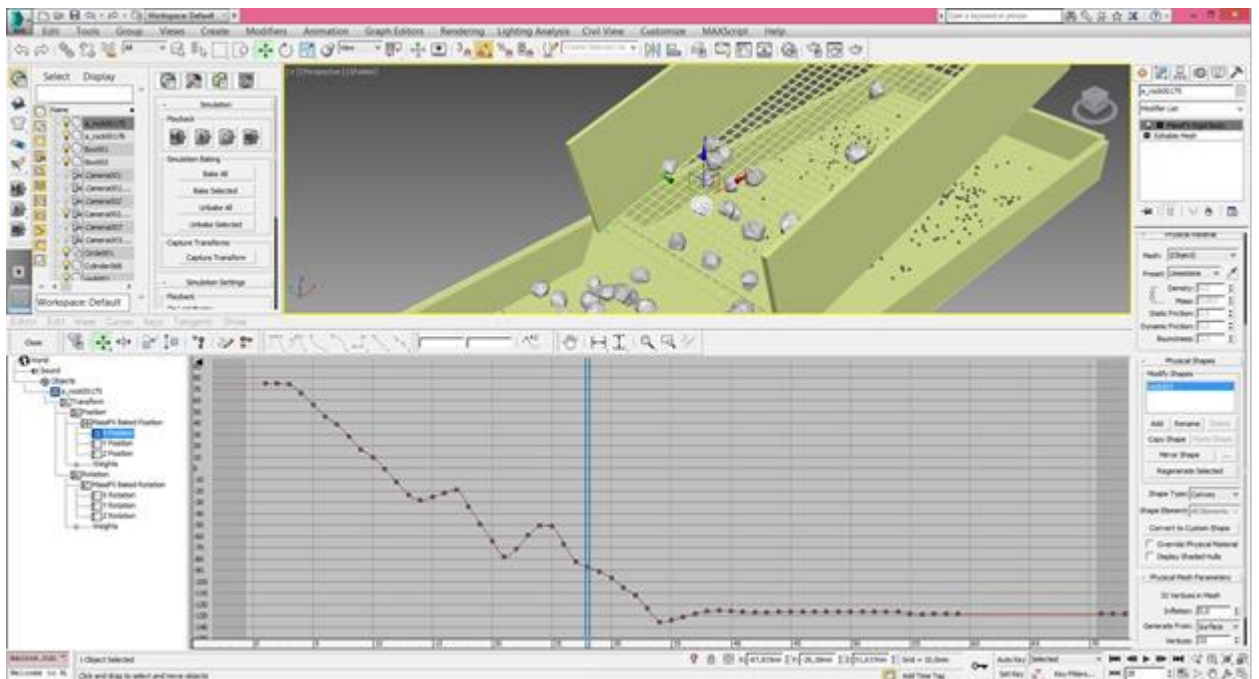


Рисунок 2.16. Зависимость координаты x от времени одной из частиц

В нижней панели инструментов (рисунки 2.16 – 2.18) показаны кривые зависимости координат x , y и z положения частицы 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. В результате обработки данных были получены численные значения координат положения точки за время пребывания частиц на просеивающей поверхности виртуального вибрационного грохота.

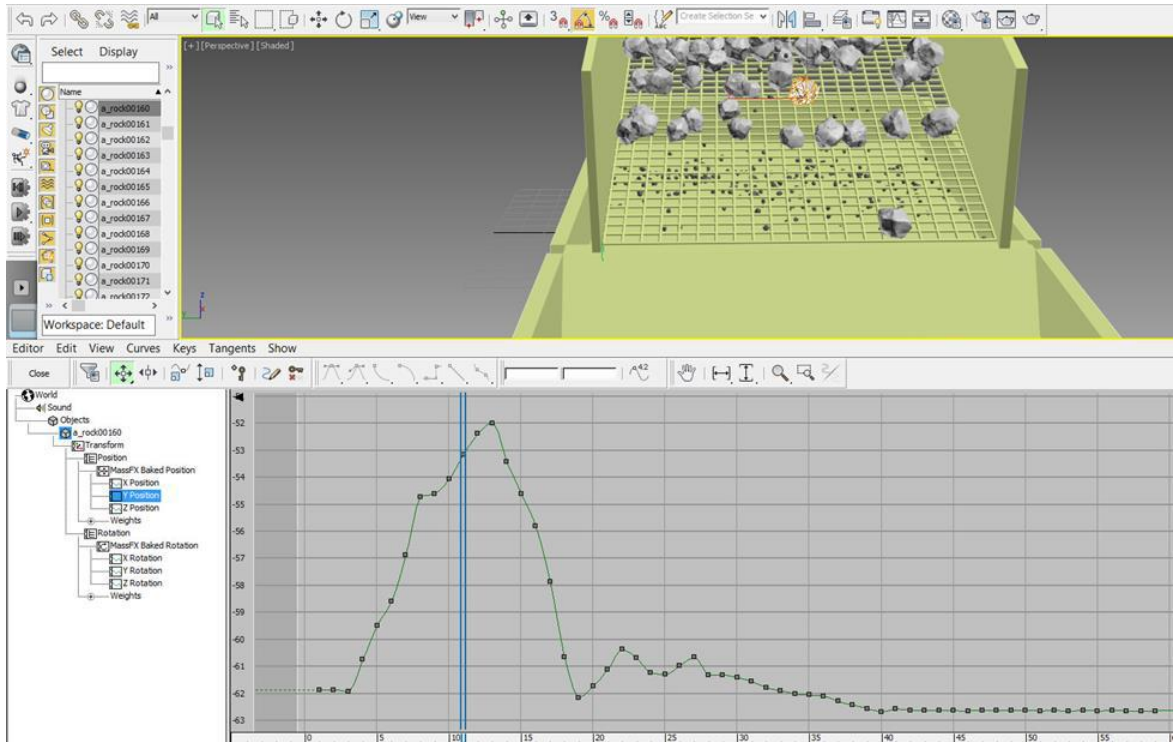


Рисунок 2.17. Зависимость координаты y от времени одной из частиц

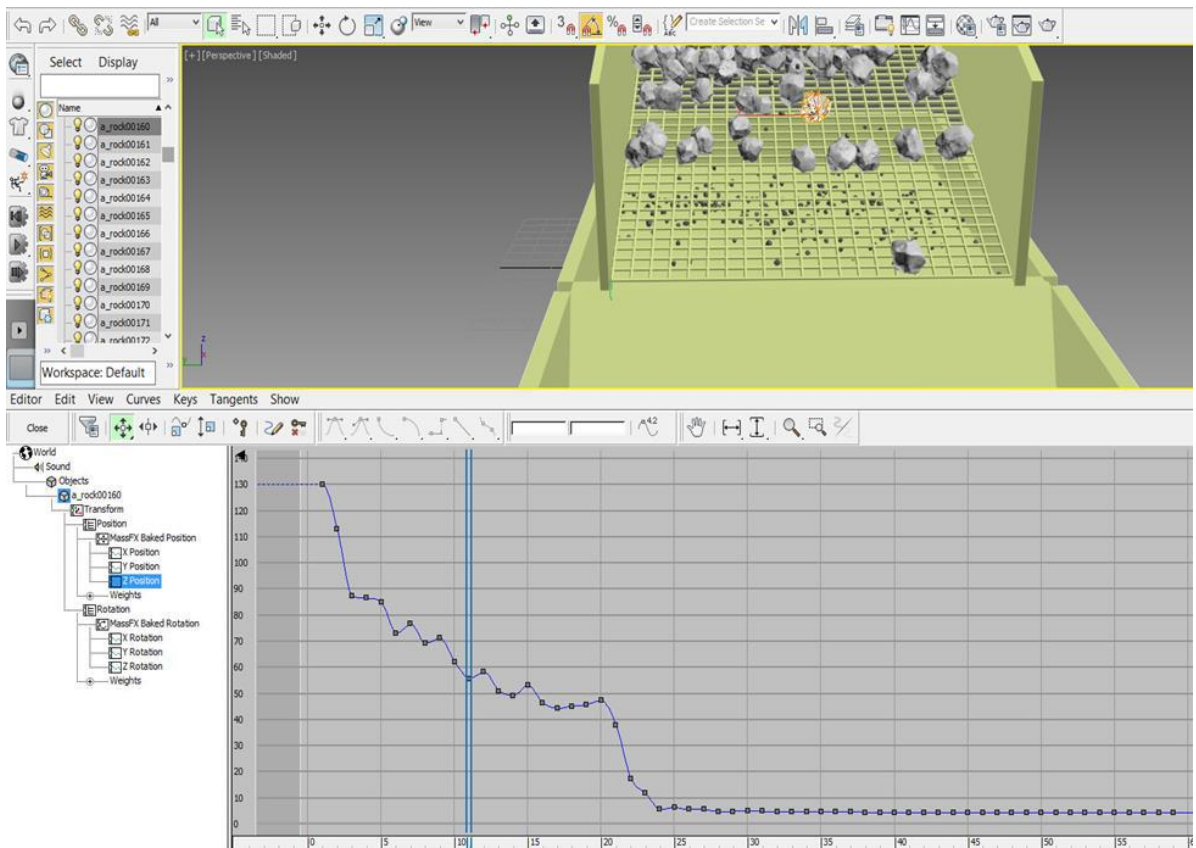


Рисунок 2.18. Зависимость координаты z от времени одной из частиц

В нижней панели инструментов (рисунки 2.19 – 2.21) показаны кривые зависимости углов поворота выделенной частицы относительно осей x_1 , y_1 и z_1 подвижной системы координат от времени.

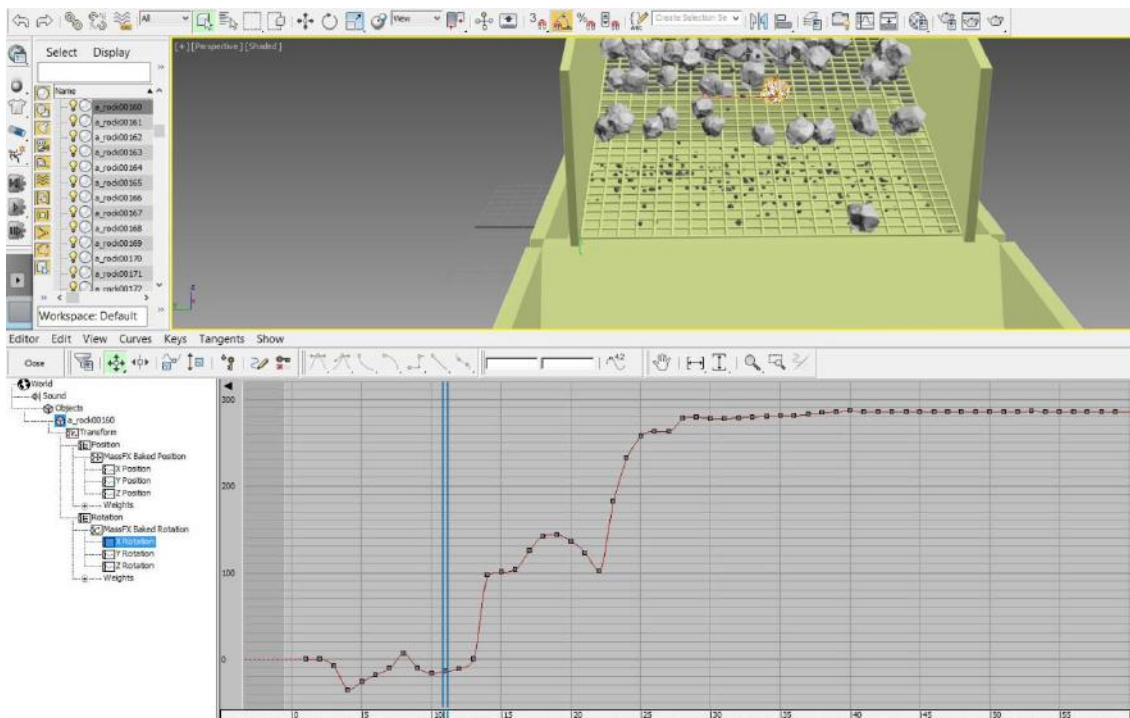


Рисунок 2.19. Зависимость угла поворота частицы относительно оси x_1 от времени

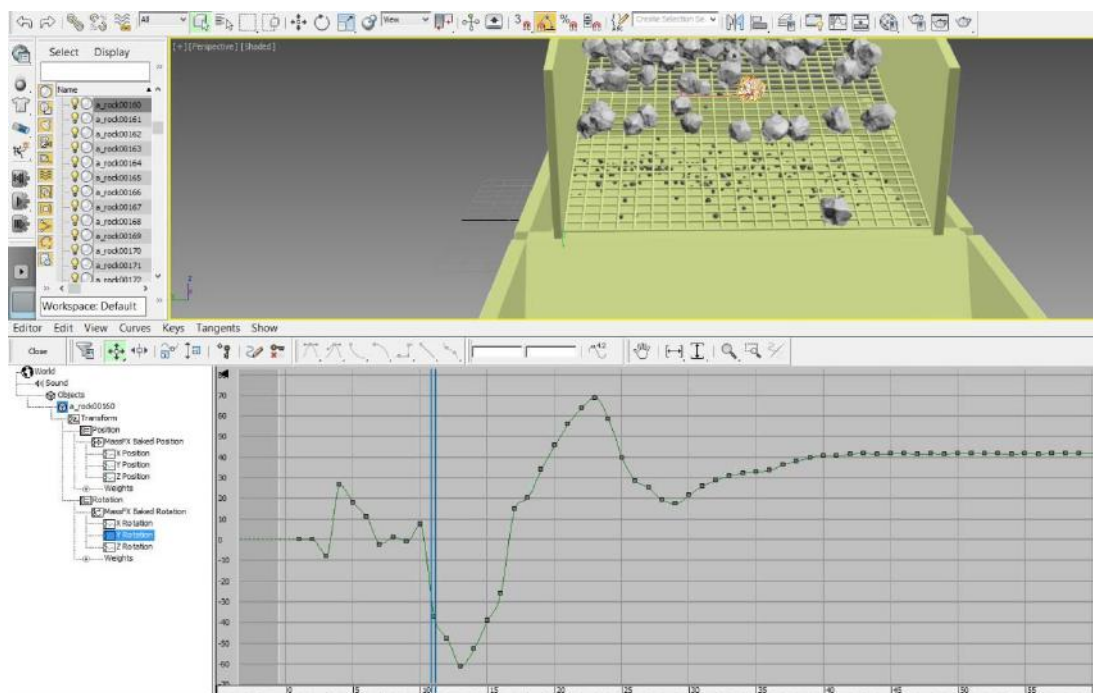


Рисунок 2.20. Зависимость угла поворота частицы относительно оси y_1 от времени

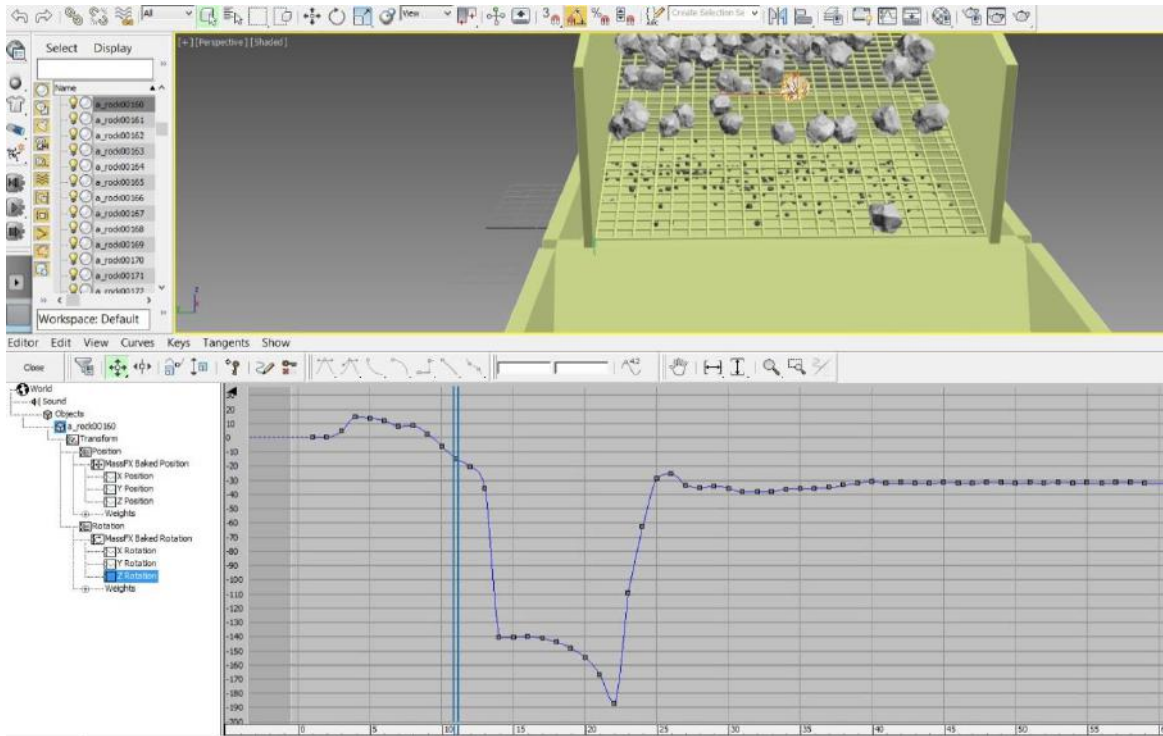


Рисунок 2.21. Зависимость угла поворота частицы относительно оси z_1 от времени

На рисунке 2.22 показаны графики зависимостей x от t пяти частиц, случайным образом выбранных из ансамбля частиц, котором приняли участие в движении по ситу 100 крупных и 300 мелких частиц.

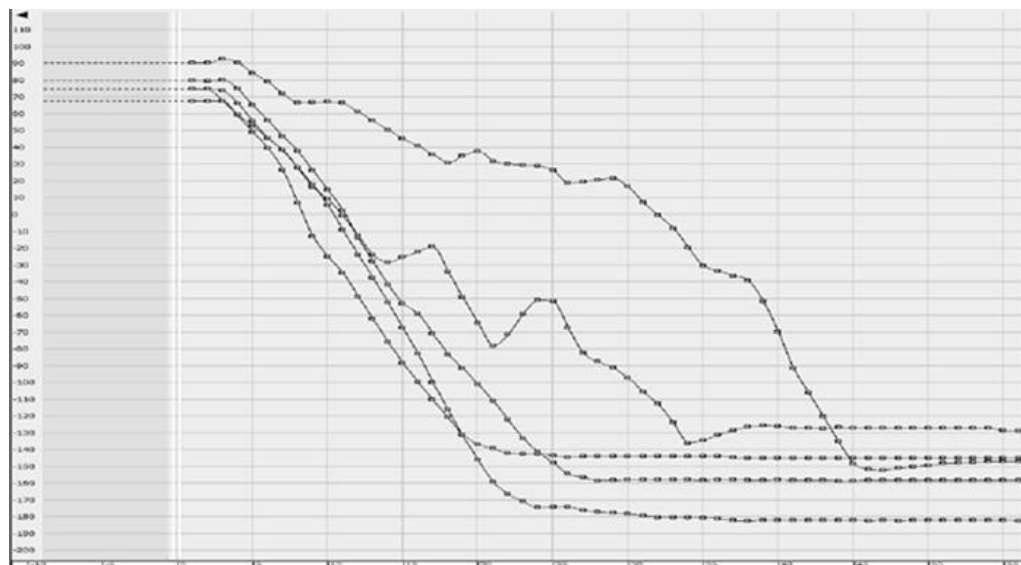


Рисунок 2.22. Зависимости x от t пяти частиц, случайным образом выбранных из множества частиц

Для определения скорости транспортирования сыпучего материала по ситам вибрационного грохота определялось распределение времени пребывания частиц на просеивающей поверхности. В каждом опыте фиксировалось количество частиц, которые покидали сито и попадали в поддон, находящийся за разгрузочной частью просеивающей поверхности. Определялось количество частиц, сошедших с сита, за короткий интервал времени Δt .

На рисунке 2.23 показана реализация такого эксперимента. В виртуальном пространстве в разгрузочной части сита выставлялись две вертикальные плоскости с зазором, равным по величине среднему размеру непроходовой частицы. Плоскости показаны в правом верхнем квадранте поля экрана монитора компьютера. Подсчитывалось количество частиц, попавших в этот зазор за интервал времени Δt .

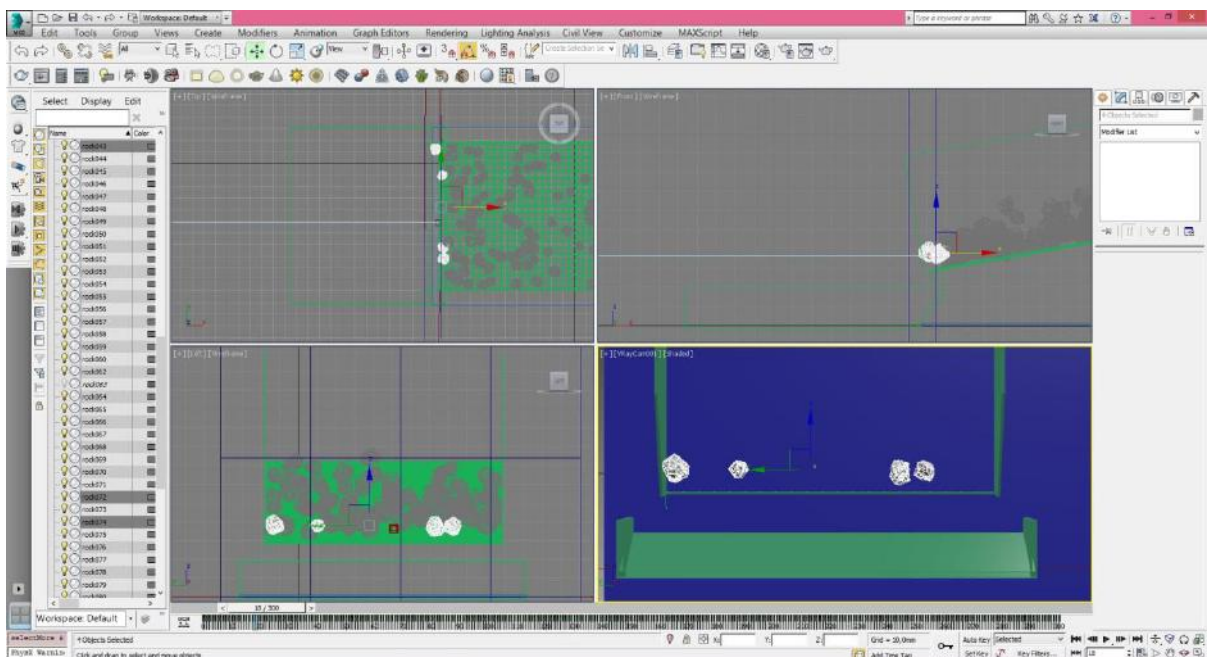


Рисунок 2.23. Реализация способа подсчета частиц, покидающих сито, за короткий интервал времени

На рисунке 2.24 построена кумулятивная кривая, которая описывает заполнение по времени непроходовыми частицами поддона, расположенного за разгрузочной частью сита.

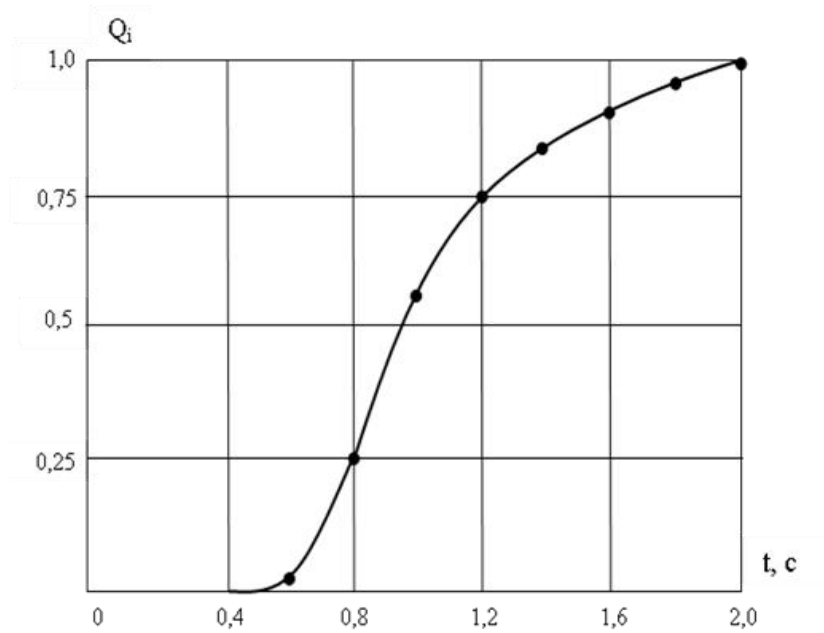


Рисунок 2.24. Кумулятивная кривая распределения времени пребывания частиц на сите

По оси ординат отложено отношение суммы частиц, покинувших сито к определенному моменту времени, к общему числу частиц, находящихся на сите грохота. В расчет принимались только крупные частицы.

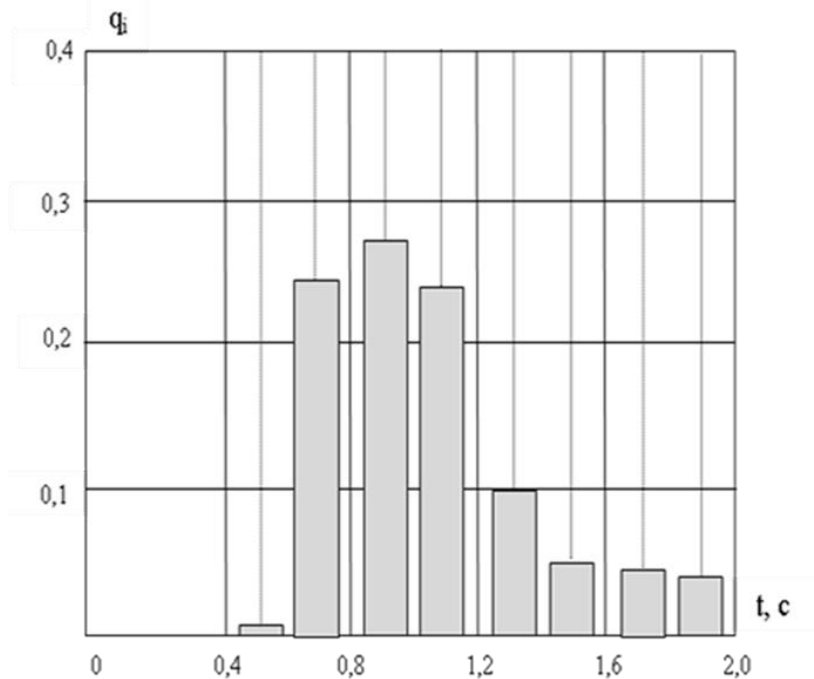


Рисунок 2.25. Гистограмма распределения времени пребывания частиц на сите

По кумулятивной кривой строилась гистограмма распределения времени пребывания частиц на сите грохота (рисунок 2.25).

Среднее время пребывания частиц на грохоте определялось как

$$\langle t \rangle = \sum q_i t_i, \quad (2.15)$$

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

Средняя скорость транспортирования частиц по ситам определялась как

$$v_{\text{тр}} = \frac{l}{\langle t \rangle}, \quad (2.16)$$

где l – длина виртуального сита.

Результаты обработки данных компьютерных экспериментов позволили получить среднюю скорость транспортирования ансамбля частиц по просеивающей поверхности виртуального виброгрохота.

2.4. Исследование результатов численных экспериментов с имитационной моделью процесса транспортирования частиц по ситы виртуального грохота

Были проведены численные эксперименты по определению влияния параметров колебаний сита и угла его наклона на среднюю скорость транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности грохота.

На рисунке 2.17 представлены результаты расчетов зависимости скорости движения частиц по ситы от амплитуды его колебаний при разных углах наклона просеивающей поверхности к горизонту. На рисунке 2.26 а частота колебаний сита составляет 12,5 Гц, на рисунке 2.17 б - 16,6 Гц.

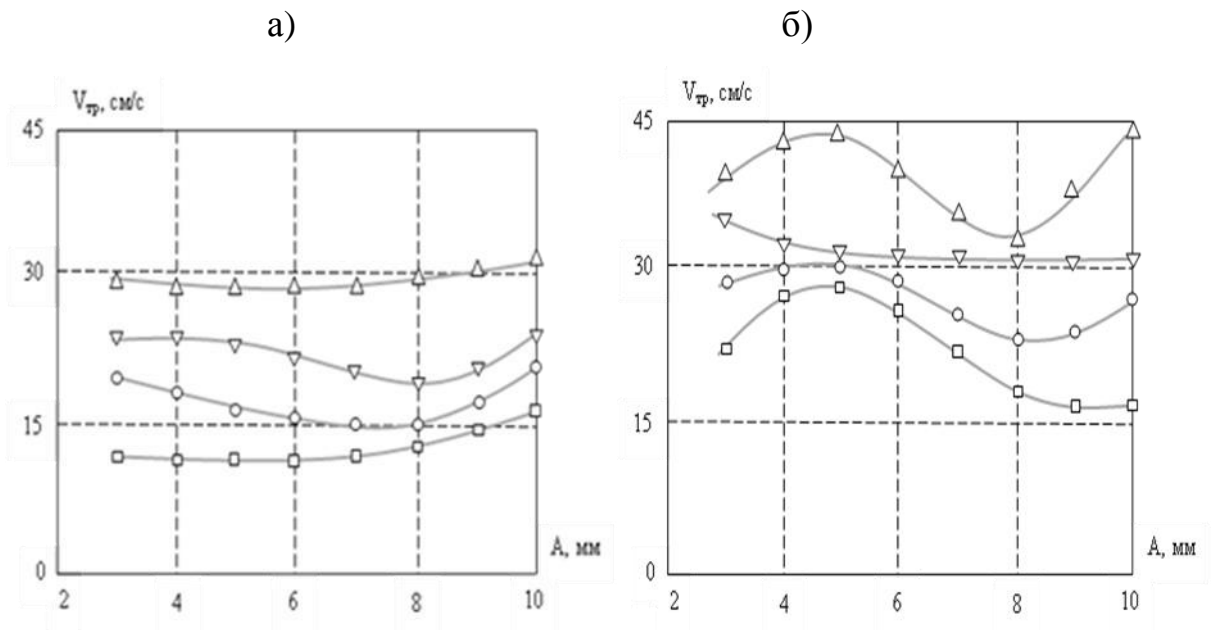


Рисунок 2.26 . Зависимость скорости движение частиц по ситы от амплитуды его колебаний при разных углах наклона: Δ - 26° ; ∇ - 22° ; \circ - 18° ; \square - 14°

На рисунке 2.27 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 точкой, одиночным шаром и ансамблем частиц.

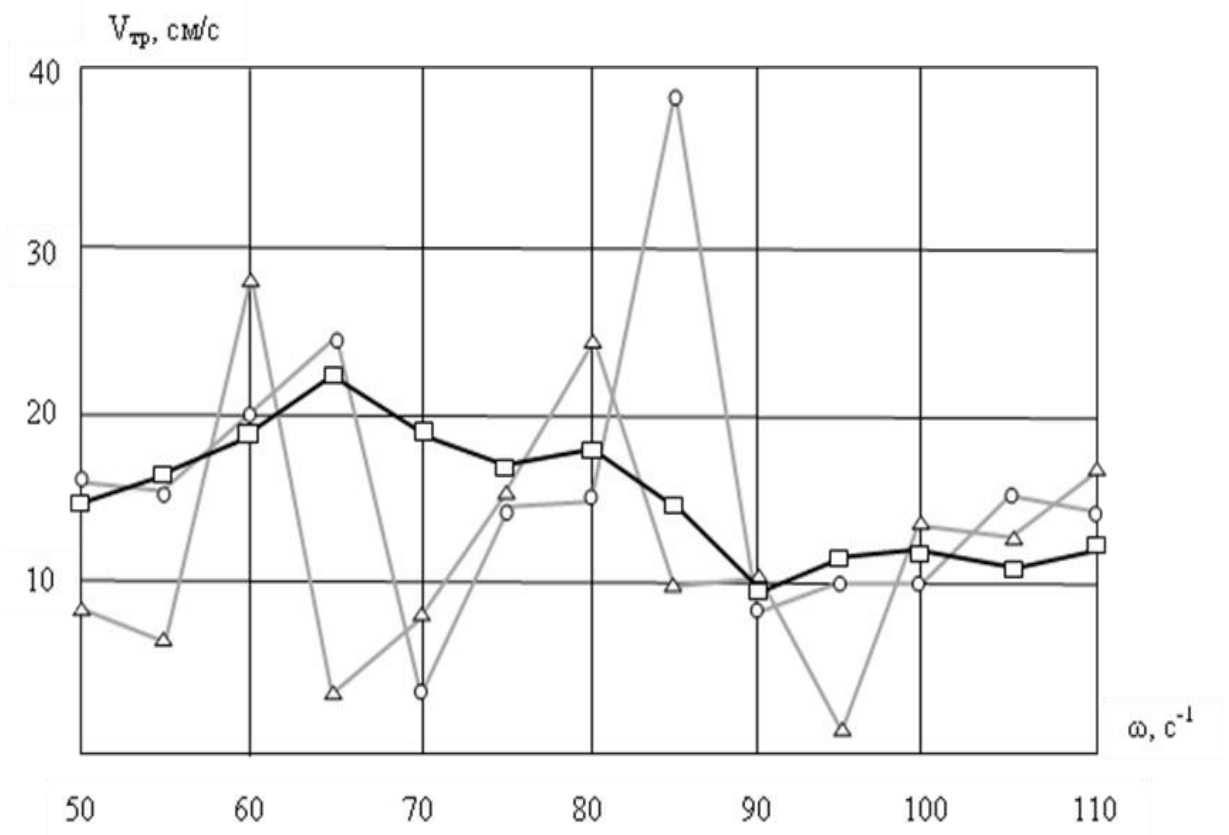


Рисунок 2.27. Зависимость скорости движения частиц по ситам от частоты его колебаний при разных вариантах моделирования процесса транспортирования:

○ - одиночная материальная точка, Δ - одиночный шар, □ - ансамбль частиц

Данные о движении одиночной частицы соответствуют данным, приведенным в работах [1,12, 14, 17].

На рисунке 2.28 показано влияние угла наклона сита на скорость движения частиц по грохоту. Компьютерный эксперимент проводился при следующем режиме грохочения: амплитуда колебаний виртуального сита составляла 5 мм, частота – 16,7 Гц.

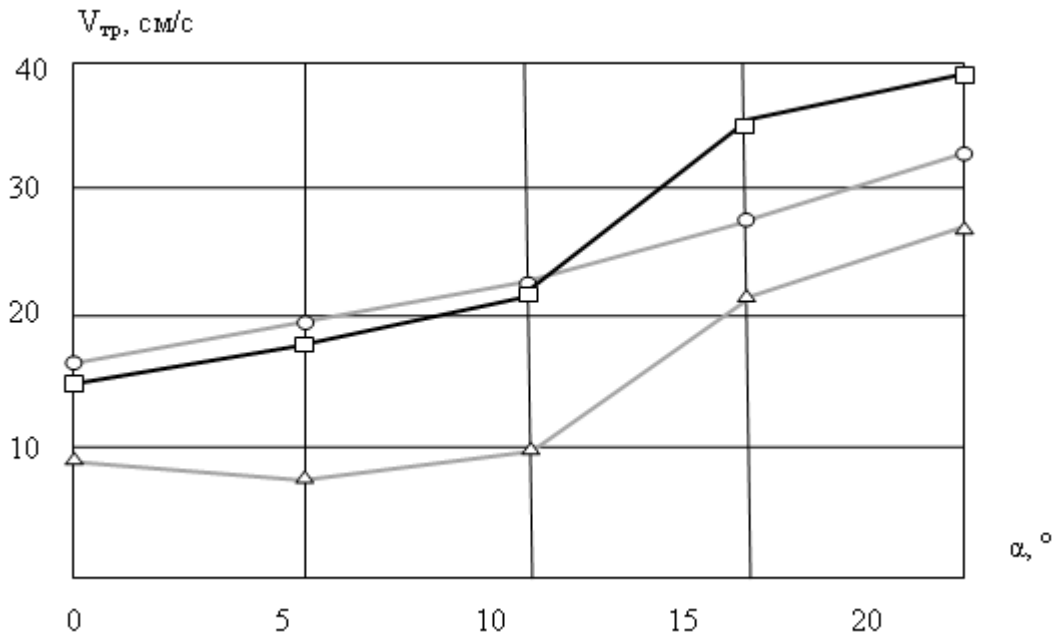


Рисунок 2.28. Влияние угла наклона сита на скорость движения частиц по грохоту при разных вариантах моделирования процесса: о - одиночная материальная точка, Δ - одиночный шар, □ - ансамбль частиц

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 ситам 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.

Если время лабораторного периодического грохочения неограниченно, то время пребывания частиц в аппарате при заданной длине виртуального сита принимает конкретные значения и прерывает кривую кинетики грохочения. На рисунке 2.29 показана расчетная кривая кинетики фракционирования, ограниченная двумя значениями времени грохочения, что соответствует двум скоростям транспортирования сыпучего материала по ситам грохота.

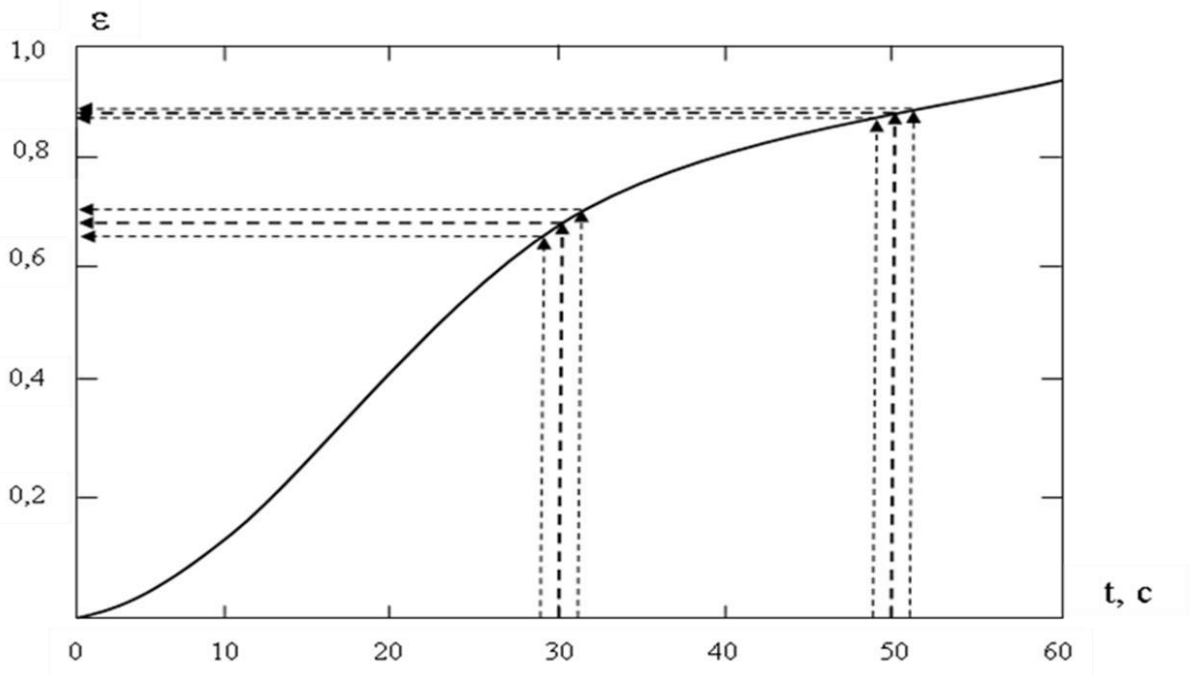


Рисунок 2.29. Кривая кинетики фракционирования, ограниченная двумя значениями времени грохочения

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 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 рассчитанное значение скорости транспортирования материала по ситам, позволяет перенести данные на расчет промышленного грохота и определить его производительность при заданном качестве отсева.

Тогда производительность промышленного грохота можно рассчитать как

$$Q = Bh v_{тр}, \quad (2.17)$$

где Q – производительность промышленного грохота, $\text{м}^3/\text{с}$; B – ширина сита грохота, м; h – высота слоя сыпучего материала, подаваемого на грохот, м; $v_{тр}$ – скорость транспортирования частиц по грохоту, полученная по результатам компьютерного эксперимента.

Результаты численных экспериментов показали, что скорость движения

частиц по сити грохота зависит от количества частиц, участвующих в эксперименте. Начиная с 300 частиц зависимость выравнивается. Дальнейшее увеличение числа частиц участвующих в эксперименте не целесообразно, так как это приводит к необоснованному увеличению времени расчетов. На рисунке 2.30 показано, что для достоверных расчетов скорости транспортирования частиц по сити грохота можно ограничиться участием в экспериментах 400 частиц.

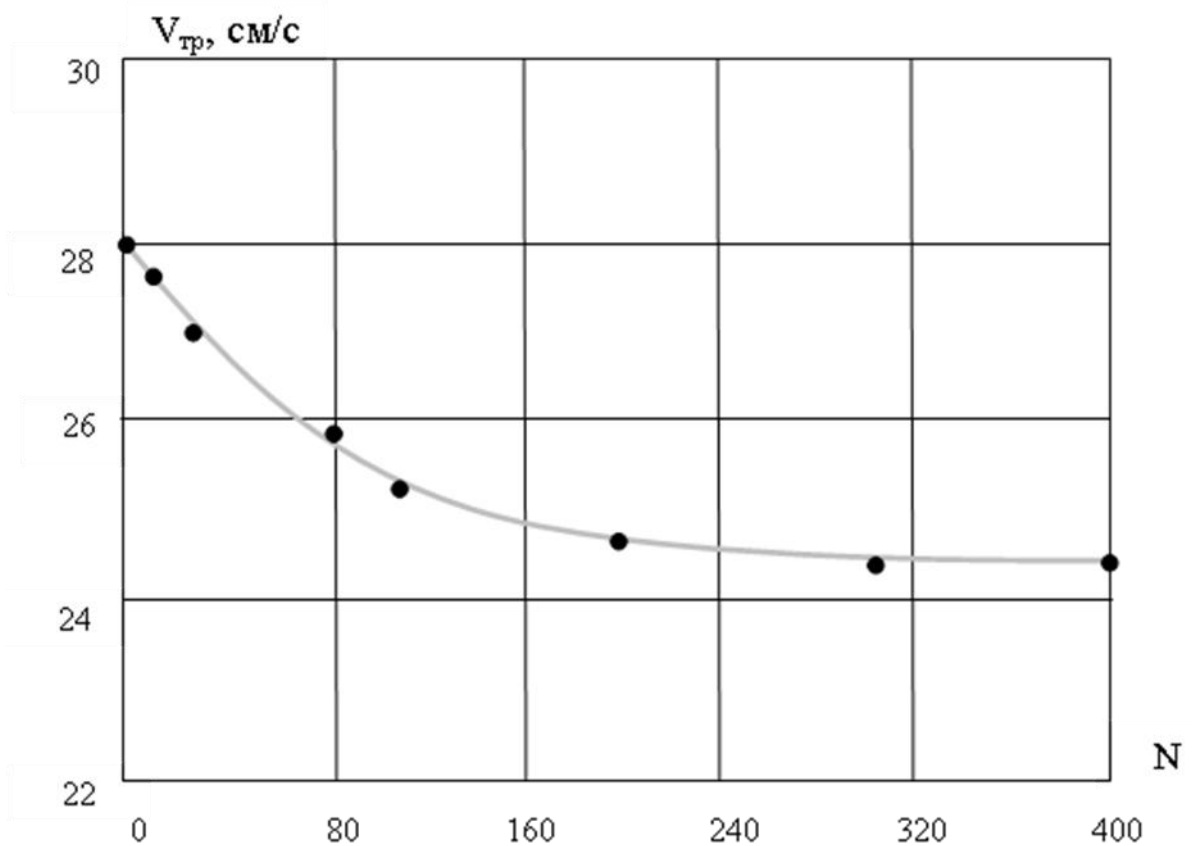


Рисунок 2.30. Влияние числа частиц, участвующих в численных экспериментах, на среднюю скорость движения сыпучего материала по грохоту

Эксперимент проводился при следующих параметрах: угол наклона сита 18° , частота колебания 12,5 Гц, амплитуда колебания 5 мм.

2.5. Выводы по главе 2

По результатам моделирования процесса фракционирования сыпучих материалов на вибрационных грохотах можно сделать следующие выводы:

1. Имитационная модель процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах позволила построить модели так, как они проходили бы при реальном грохочении сыпучих материалов.

2. Для моделирования механического поведения частиц, представляющих собой сыпучий материал, используем метод дискретных элементов на основе пакета программ Autodesk 3ds Max . Он основан на применении законов Ньютона и контактной механики. Его отличают большая универсальность и неограниченные возможности диагностики исследования механических процессов.

3. Моделирование всех аспектов процесса грохочения, когда учитывается как процесс миграции частиц различной крупности по слою сыпучего материала, так и процесс проникновения через отверстия сита проходových частиц, крупность которых так же разная, потребует введения в программу расчетов большого числа частиц порядка 10^5 . Это приведет к большим затратам машинного времени.

4. Положим в основу расчета процессов миграции частиц по виброоживленному слою и проникновения проходových частиц через отверстия сита одномерную ячеечную модель теории цепей Маркова для расчета кинетики грохочения. Это позволит описать два процесса из трех, определяющих протекание всего процесса грохочения в целом: процесс движения частиц по слою сыпучего материала, подвергнутого вибровоздействию со стороны сита вибрационного грохота и процесс проникновения проходových частиц разной крупности через отверстия сита. Описание процесса транспортирования сыпучего материала по грохоту будем проводить с помощью имитационной модели движения частиц по ситy с использованием компьютерной программы Autodesk 3ds Max.

5. Кинематические характеристики движения одиночных частиц по вибрирующей поверхности существенно нелинейны и неустойчивы. Возникают

погрешности между реальными параметрами движения и расчетными данными.

6. Разработка метода расчета кинетики фракционирования сыпучих материалов, основанная на имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту и теории цепей Маркова, повышает точность прогнозирования фракционного состава конечного продукта грохочения.

7. Результаты обработки данных компьютерных экспериментов позволили получить среднюю скорость транспортирования ансамбля частиц по просеивающей поверхности виртуального виброгрохота при различных режимах его колебаний.

8. Результаты расчетов показали, что влияние амплитуды и, особенно, частоты колебаний сита на скорость транспортирования носит сложный характер.

9. Расхождение результатов расчетов скорости транспортирования для некоторых режимов колебаний грохота при разных вариантах моделирования движения частиц по ситам 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.

10. Для достоверных расчетов скорости транспортирования частиц по ситам грохота можно ограничиться участием в компьютерных экспериментах 400 частиц.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ПО ВИБРИРУЮЩЕМУ СИТУ

3.1. Цели экспериментальных исследований. Описание лабораторного стенда для исследования процесса транспортирования частиц по ситум.

Методика проведения эксперимента и его результаты

Целями экспериментальных исследований являлось:

- 1) создание компьютерного метода определения скорости транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности вибрационного грохота;
- 2) доказательство адекватности предлагаемой имитационной модели движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности сита реальному процессу грохочения;
- 3) сравнение значений скорости транспортирования сыпучего материала по ситум грохота, полученных в результате обработки компьютерных данных искусственно созданного имитационного процесса движения частиц по вибрирующему ситум, и экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке;
- 4) определение расчетным путем рациональных режимов вибрации сита, угла его наклона, обеспечивающих повышение эффективности грохочения реальных промышленных аппаратов.

Для этого была создана лабораторная установка, представленная на рисунке 3.1. Установка представляла собой короб размером 30 на 30 см с металлическим ситум с размером ячейка 5 на 5 мм. Короб с ситум, соединенный с эксцентриковым валом, совершал колебания с частотой, равной частоте вращения двигателя, вращающего вал, и амплитудой, равной эксцентриситету вала. Частота колебаний короба менялась частотой вращения двигателя, амплитуда – регулировочными винтами. Наклоняя короб и фиксируя его статическое

положений пружинными растяжками, изменяли угол наклона сита к горизонту.

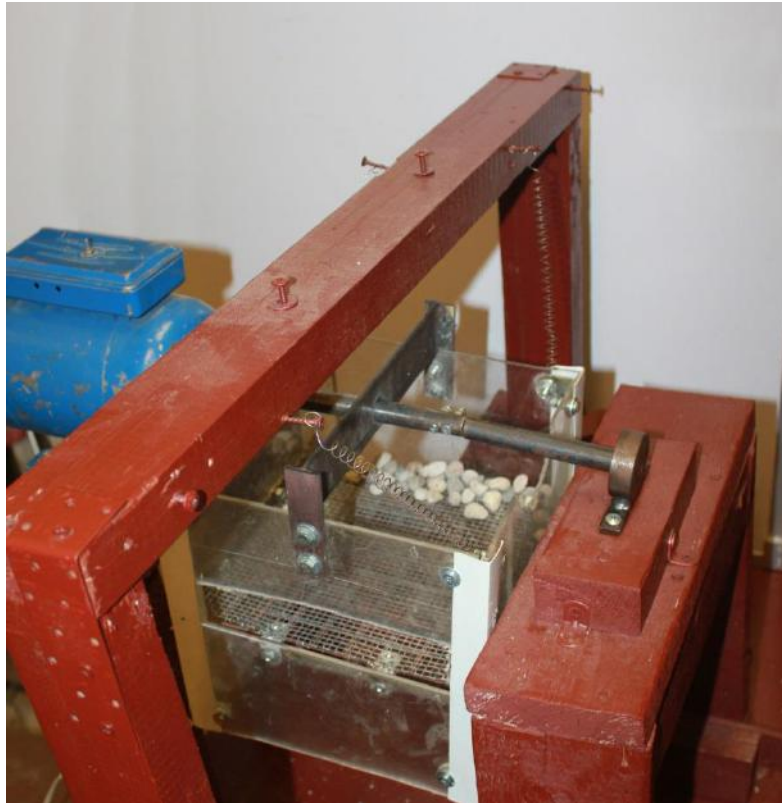


Рисунок 3.1. Лабораторная установка

Частота колебаний сита измерялись прибором ВИБРОТЕСТ - МГ4. Амплитуда равнялась смещению эксцентрикового вала.

Проводилась киносъёмка движения частиц по сити. Так как длина и ширина лабораторного сита небольшие, то число частиц, принимающих участие в одном эксперименте движения по сити то же небольшое (30 - 35 штук). Для получения средней скорости движения частиц по сити опыт повторялся 4 раза при одинаковых режимах вибрации и одном угле наклона сита. Для определения средней скорости транспортирования рассчитывалось среднее время пребывания частиц на сите. Определялась плотность и масса частиц, участвующих в опыте. На рисунке 3.2. представлены весы электронные «Momet», на которых производилось взвешивание каждой частицы. Точность взвешивания 0,01 грамма. Определялась общая масса частиц, которые использовались в одном опыте. Определялся общий объем частиц, вычислялась их плотность.



Рисунок 3.2. Весы электронные «Momet»

Частицы размещались на сите у одного из бортов короба. Включался вибростенд, одновременно начиналась съёмка процесса движения. Частицы двигались по сити, перемещаясь к другому борту короба. Достигнув этого борта, они покидали сито и ссыпались в кювету через прорезь.

Методика определения средней скорости движения реальных частиц по сити была такой же, как и для компьютерного эксперимента. Строилась кумулятивная кривая четырех опытов сбора частиц в кювету. По этой кривой РВП строилась гистограмма РВП. Так как время эксперимента было меньше одной секунды, то временной интервал составлял от 0,05 до 0,1 секунды. Это было выполнено благодаря обработке съёмки реального процесса на компьютере.

При одинаковых режимах вибрации, но с разными углами наклона сита от 0 до 10°, проводилась две серии опытов (всего 5 опытов в каждой серии и по 4 повторения в каждом опыте). Первая серия опытов проводилась при частоте колебаний сита $\omega = 78,7$ 1/с и амплитуде колебаний $A=10$ мм. Вторая серия опытов - при $\omega =104,7$ 1/с; $A=5$ мм.

Те же опыты при тех же режимах колебаний сита для тех же углов его наклона проводились виртуальные опыты, с использованием виртуальной модели процесса транспортирования частиц по вибрирующему сити грохота.

На рисунках 3.3 - 3.7 приведены результаты киносъёмки процесс движения частиц по вибрирующему сити и результаты расчетов, проведенных с помощью программы Autodesk 3ds Max для одного из опытов.

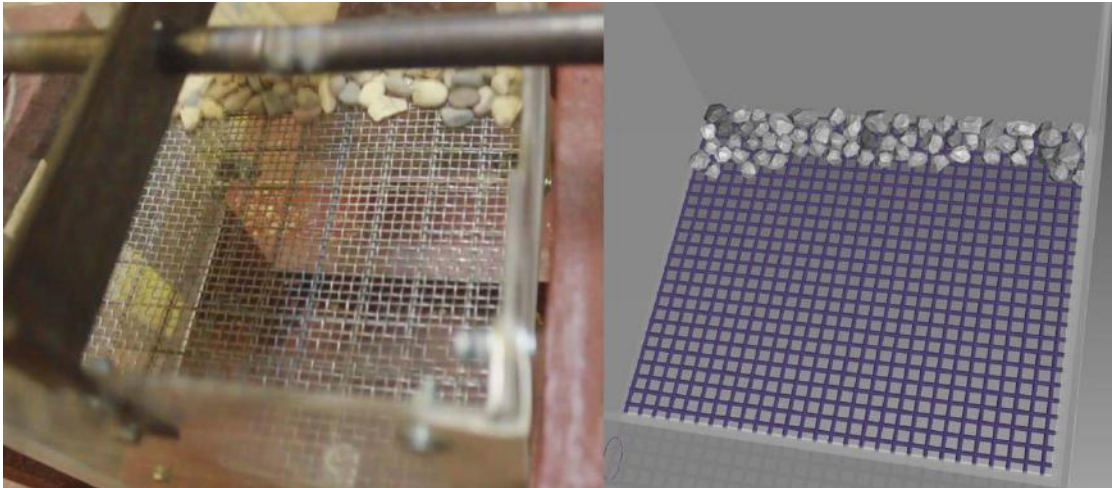


Рисунок 3.3. Движение частиц по сити при $t_0=0$

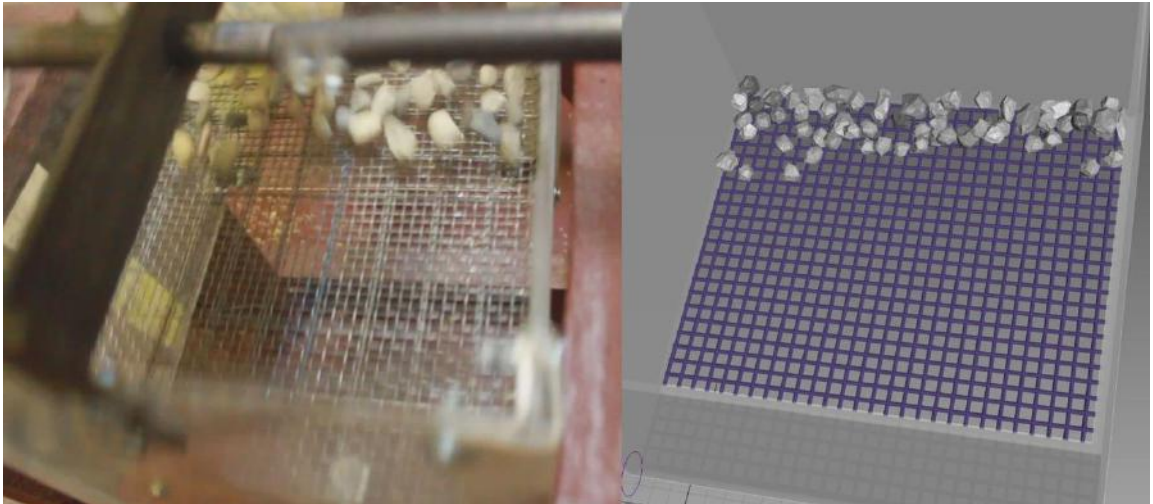


Рисунок 3.4. Движение частиц по сити при $t_1=0,18$ с

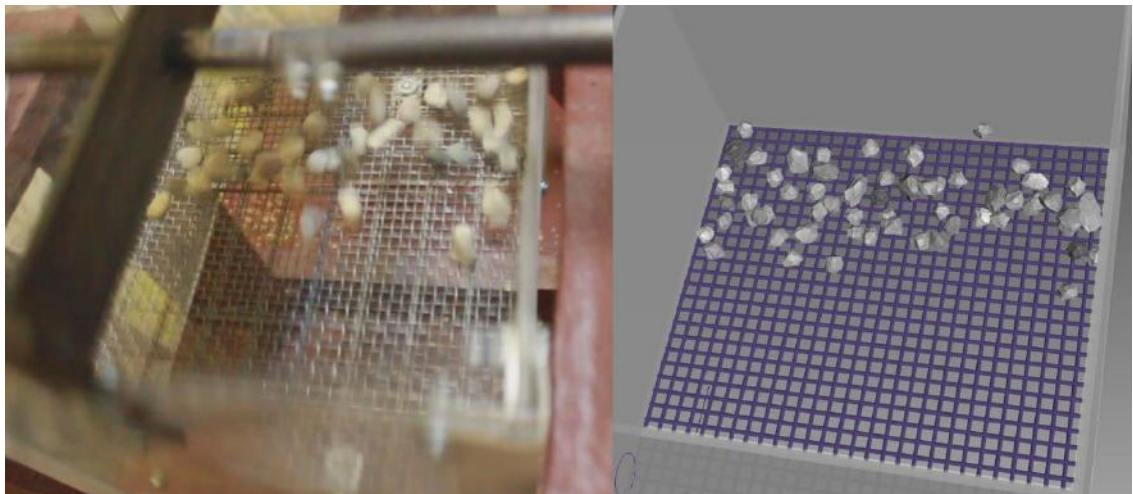


Рисунок 3.5. Движение частиц по сити при $t_2=0,36$ с

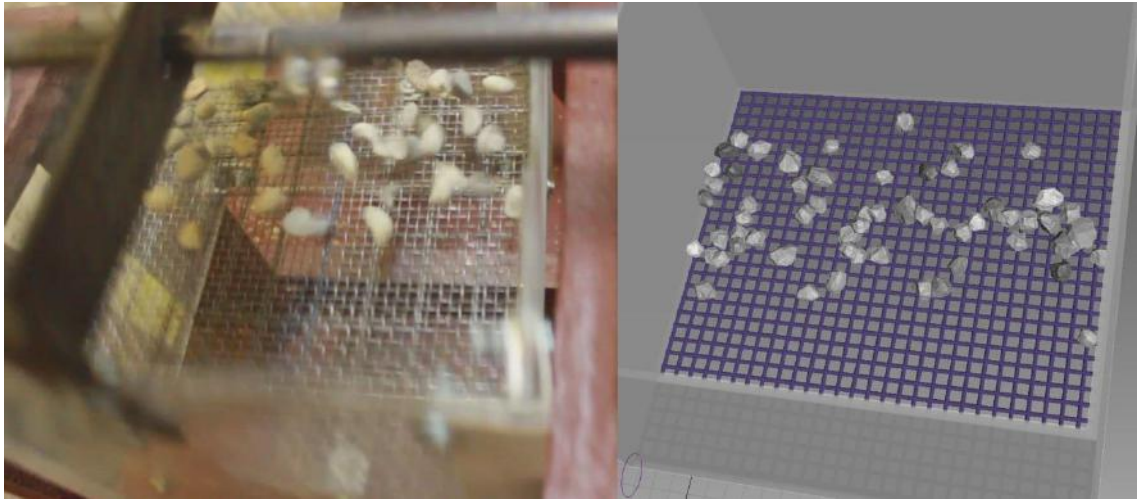


Рисунок 3.6. Движение частиц по сити при $t_3=0,54$ с

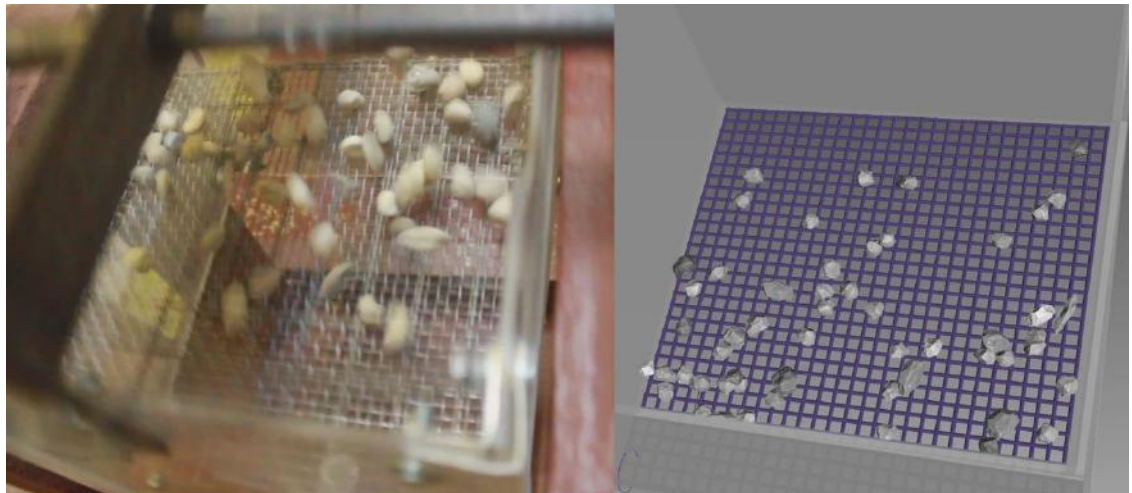


Рисунок 3.7. Движение частиц по сити при $t_4=0,72$ с

Опыты проводились при следующих параметрах: угол наклона сита 0 , амплитуда колебаний сита 10 мм, частота колебаний сита $\omega = 78,7$ с⁻¹.

На рисунке 3.4 приведены опытные и расчетные значения скорости движения частиц по сити 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.

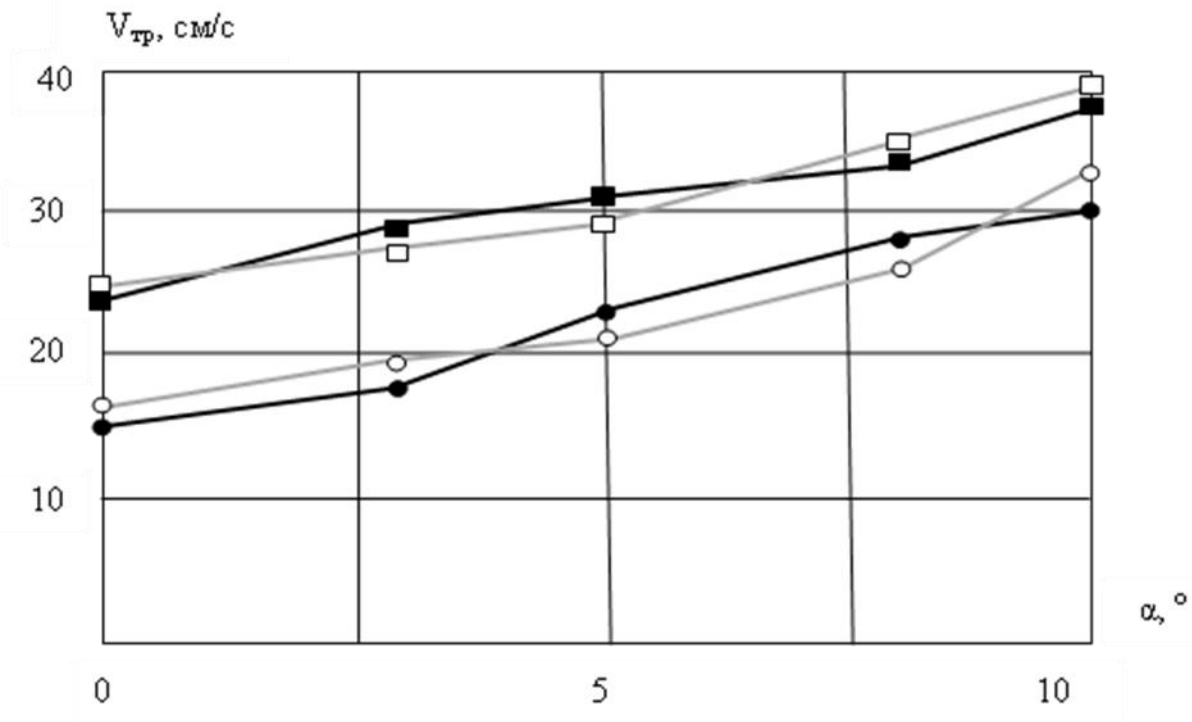


Рисунок 3.4. Скорости движения частиц по ситам при разных углах его наклона:

- , □ - 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

Для проведения расчетов скорости движения частиц по ситам, с использованием программы Autodesk 3ds Max, были определены следующие параметры имитационной модели: коэффициенты статического и динамического трения частиц о просеивающую поверхность сита, коэффициент восстановления скорости при ударе частицы о плоскость сита.

Коэффициент статического трения определялся следующим образом. На неподвижную поверхность сита помещалась частица щебня размером больше размера отверстия сита. Сито наклонялось до тех пор, пока частица не начинала движение. Определялся угол наклона сита, при котором наблюдалось это неустойчивое положение равновесия. Известно [1, 12,14], что коэффициент статического трения определяется как

$$f_{ст} = tg\varphi, \quad (3.1)$$

где φ – угол наклона сита. Статический коэффициент составил $f_{ст} = 0,46$.

Динамический коэффициент трения частиц о поверхность сита определялся следующим образом. Проводилась съемка процесса скольжения частицы щебня по наклонному ситю. Определялся путь S , который проделала частица за время t . Опыт повторялся 5 раз. Динамический коэффициент трения определялся как

$$f_{дин} = \sin\varphi - \frac{2S}{gt^2}. \quad (3.2)$$

Среднее значение динамического коэффициента составило $f_{дин} = 0,35$. На рисунке 3.5 показан эксперимент определения коэффициентов трения.



Рисунок 3.5. Эксперимент определения коэффициентов трения

Коэффициент восстановления скорости при ударе определялся следующим образом. С высоты h_0 на сито бросали частицу щебня. Высота отскока составляла h_1 . Проводилась съемка процесса. Опыт повторялся 50 раз. Коэффициент восстановления скорости при ударе определялся как

$$k = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}. \quad (3.3)$$

Среднее значение коэффициента составило $k = 0,21$. На рисунке 3.6 показан эксперимент определения коэффициента восстановления скорости при ударе.

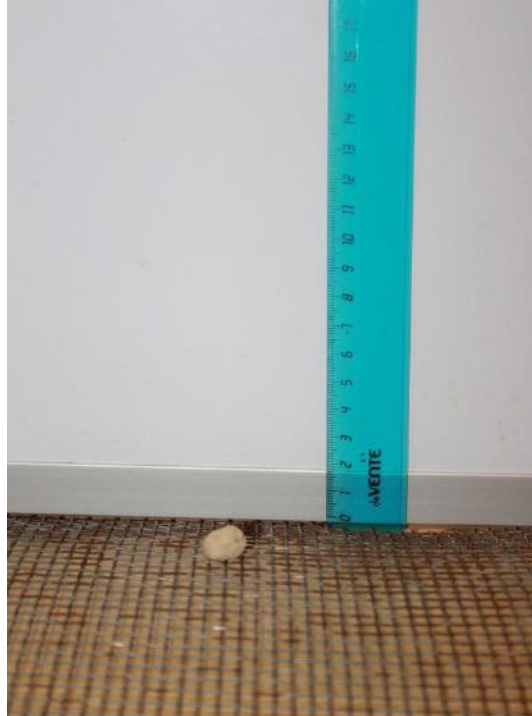


Рисунок 3.6. Эксперимент определения коэффициента восстановления скорости при ударе

3.2. Совершенствование технологических режимов процессов промышленного виброгрохочения

Совершенствование технологических режимов процесса грохочения – задача весьма актуальная. В условиях производства выбор параметров колебаний грохота, угла его наклона, как правило, не ведется. Устанавливаются параметры, которые рекомендованы заводом – изготовителем грохотов. Это осредненные значения, которые подбирались из опыта эксплуатации вибрационных грохотов, работающих с различными сыпучими средами.

Однако известно [1,12], что грохочение конкретного сыпучего материала

имеет свои особенности. Определение рациональных параметров для грохочения конкретного сыпучего материала, рассеиваемого на конкретном агрегате, которые обеспечивают высокое значение эффективности процесса фракционирования, должно проводиться с учетом современных методов и моделей.

Предлагается следующий алгоритм определения рациональных режимов грохочения в промышленных условиях (рисунок 3.5).

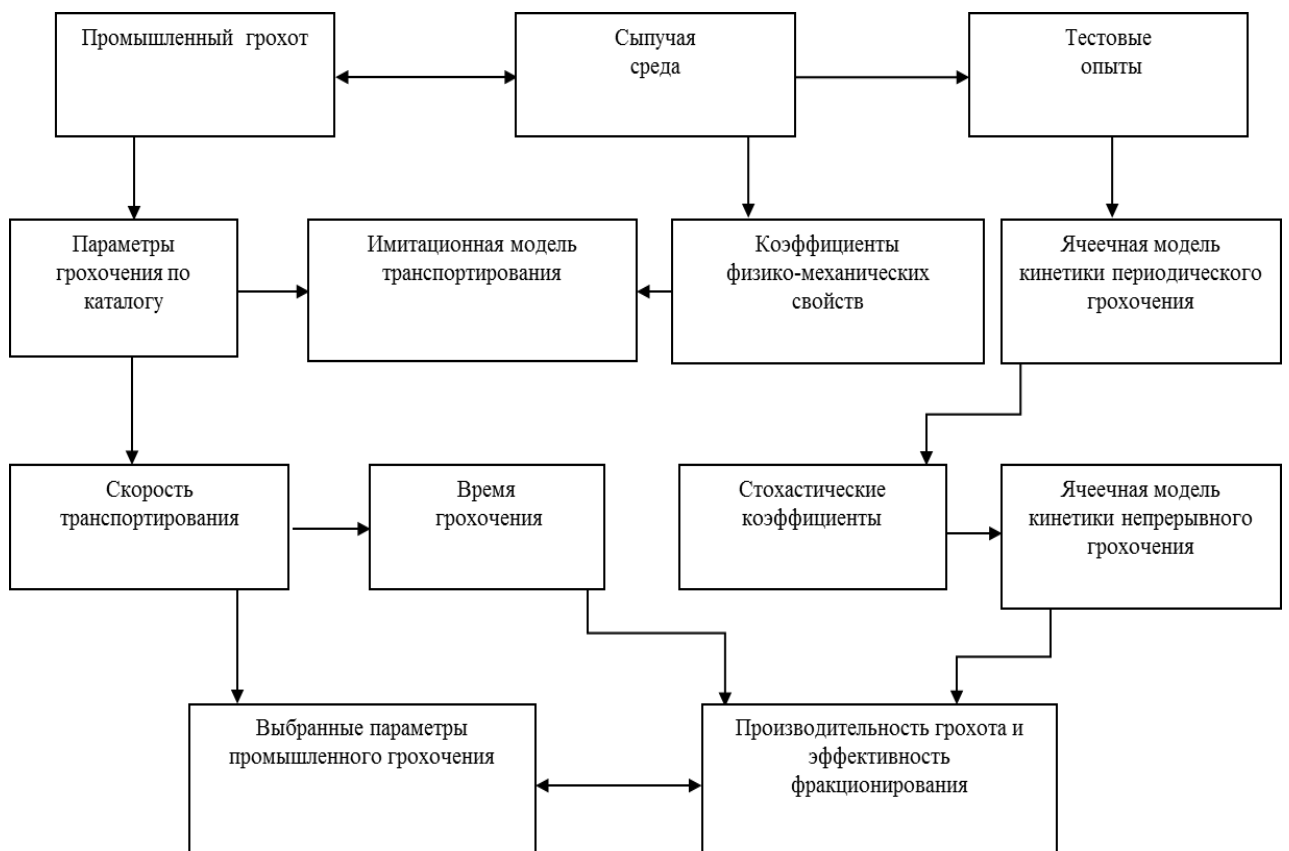


Рисунок 3.5. Алгоритм подбора параметров грохочения, обеспечивающих повышение эффективности фракционирования

Алгоритм включает в себя блоки, относящиеся к грохоту и блоки, относящиеся к фракционируемому материалу. В алгоритм введены: имитационная модель процесса транспортирования сыпучего материала по

вибрирующему сити грохота; ячеечная модель расчета кинетики грохочения периодического и непрерывного процесса. Работоспособность имитационной модели поддерживается лабораторными исследованиями по определению физико-механических характеристик сыпучего материала: коэффициентами статического и динамического трения, коэффициентами восстановления скорости частиц при ударе о сито грохота. С помощью ячеечной модели периодического грохочения и тестовых опытов, проводимых с реальной сыпучей смесью в условиях, соответствующих промышленному грохочению, определяются стохастические параметры для работы ячеечной модели непрерывного грохочения.

Рассмотрим алгоритм определения параметров грохочения для инерционного грохота, работающего в технологической линии дробильно-сортировочного завода, производящего товарный сыпучий материал, например, щебень.

Задается производительностью грохота, у которого известны габариты сита (длина и ширина), материал, из которого сито изготовлено. Известны форма и размер ячеек отверстий сита.

Сыпучий материал, с заданной характеристикой крупности, подвергается грохочению на лабораторной установке. Параметры колебаний сита меняются в диапазоне промышленного грохота. Лабораторное сито такое же, как у промышленного аппарата. Для каждой фракции проходовых частиц строим кинетику грохочения, по которой с помощью ячеечной модели определяем стохастические коэффициенты.

С помощью имитационной модели определяем скорость транспортирования материала по сити и время пребывания частиц в аппарате.

С помощью ячеечной модели строим кинетику грохочения каждой проходовой фракции и общую кинетику грохочения всего проходового класса в целом. Ограничивая эти кинетики временем грохочения, равным времени пребывания частиц на сите, определяем степень извлечения каждой проходовой фракции на промышленном грохоте и общую эффективность процесса.

Перебирая параметры грохочения (угол наклона сита, частоту и амплитуду

его колебаний), определяем такие параметры, которые обеспечат повышение эффективности процесса.

Возможно применение этого алгоритма в том случае, когда возникнет необходимость поменять сито, например с металлического на полиуретановое.

Воспользовавшись результатами исследований, изложенных в работах [12, 35, 125], в которых проведены результаты расчета кинетики периодического и непрерывного грохочения сыпучих строительных материалов, с помощью предложенной имитационной модели движения частиц по ситы грохота, определены диапазоны изменения параметров, обеспечивающих высокую эффективность фракционирования. Рассмотрены грохоты ГИС (грохот инерционный средний) с просеивающей поверхностью 4,5 на 1,75 метра. Сито металлическое с размером ячейки 5 на 5 мм.

Результаты компьютерных экспериментов по расчету скорости транспортирования сыпучего материала по ситы 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°.

Настоящим алгоритм можно воспользоваться при выборе грохота другого типа, например самобалансного или резонансного. Для этого придется изменить режим вибровоздействия сита на слой сыпучего материала. Изменения коснутся как имитационной модели движения сыпучей среды по ситы, так и тестовых опытов периодического фракционирования сыпучего материала, но общие принципы выбора рациональных параметров грохочения останутся прежними.

3.3. Выводы по главе 3

1. Разработана установка, позволившая реализовать процесс транспортирования частиц по вибрирующему сити.

2. Удовлетворительное совпадение результатов расчётных и опытных данных доказывает достоверность расчета при использовании имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота.

3. В условиях производства выбор параметров колебаний грохота, угла его наклона, как правило, не ведется. Устанавливаются параметры, которые рекомендованы заводом – изготовителем грохотов. Это осредненные значения, которые подбирались из опыта эксплуатации вибрационных грохотов, работающих с различными сыпучими средами.

4. Разработан алгоритм определения рациональных режимов грохочения в промышленных условиях.

5. Результаты компьютерных экспериментов по расчету скорости транспортирования сыпучего материала по сити при разных режимах колебаний инерционного грохота (ГИС) 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°.

ГЛАВА 4. . СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВИБРОГРОХОЧЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

4.1. Исследование фракционных составов сыпучих смесей, поступающих в цех сортировки и промывки дробильно-сортировочного завода

ООО «Хромцовский карьер»

Разработанные методы расчета процесса грохочения нашли свое применение при выборе технологических параметров грохотов, работающих на завершающей стадии производства щебня фракции 5-20 мм дробильно-сортировочного завода в ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область).

Завод специализируется на добыче и переработке гравийно-песчаных смесей с 1975 года. Предприятие выпускает: щебень гравийный фракции 5-20, 20-40 мм; гравий фракции 5-20мм; песок мелкий первого класса с модулем крупности 1,5-2,0 мм; песок крупный второго класса с модулем крупности 2,5-3,0 мм.

Общий объем продукции завода составляет более 1.5 млн. м³ в год.

Предприятие производит поставку продукции в Московскую, Владимирскую, Ярославскую, Ивановскую, Нижегородскую, Вологодскую области. Для этого используется железнодорожный и автомобильный транспорт. ООО «Хромцовский карьер» самый крупный производитель нерудной продукции в Ивановской области. На предприятии ведется круглогодичная промывка щебня и гравия.

Песчано-гравийная масса из карьеров подается автосамосвалами в приемный бункер корпуса первичного дробления дробильно-сортировочного завода. На рисунке 4.1 изображена схема цепи аппаратов дробильно-сортировочного завода ООО «Хромцовский карьер».

Из бункера питателем сыпучая смесь подается на колосниковый грохот со щелью 150 мм. На грохоте сыпучий материал разделяется на два потока: гравийно-песчаный (- 150 мм) и щебеночный (+ 150 мм). Верхний класс с колосникового грохота подается в щековую дробилку СМД-111, после которой поступает на вторичное дробление в конусную дробилку КСД-1750Гр.

СХЕМА ЦЕПИ АППАРАТОВ ДСЗ ХРОМЦОВСКОГО КАРЬЕРА

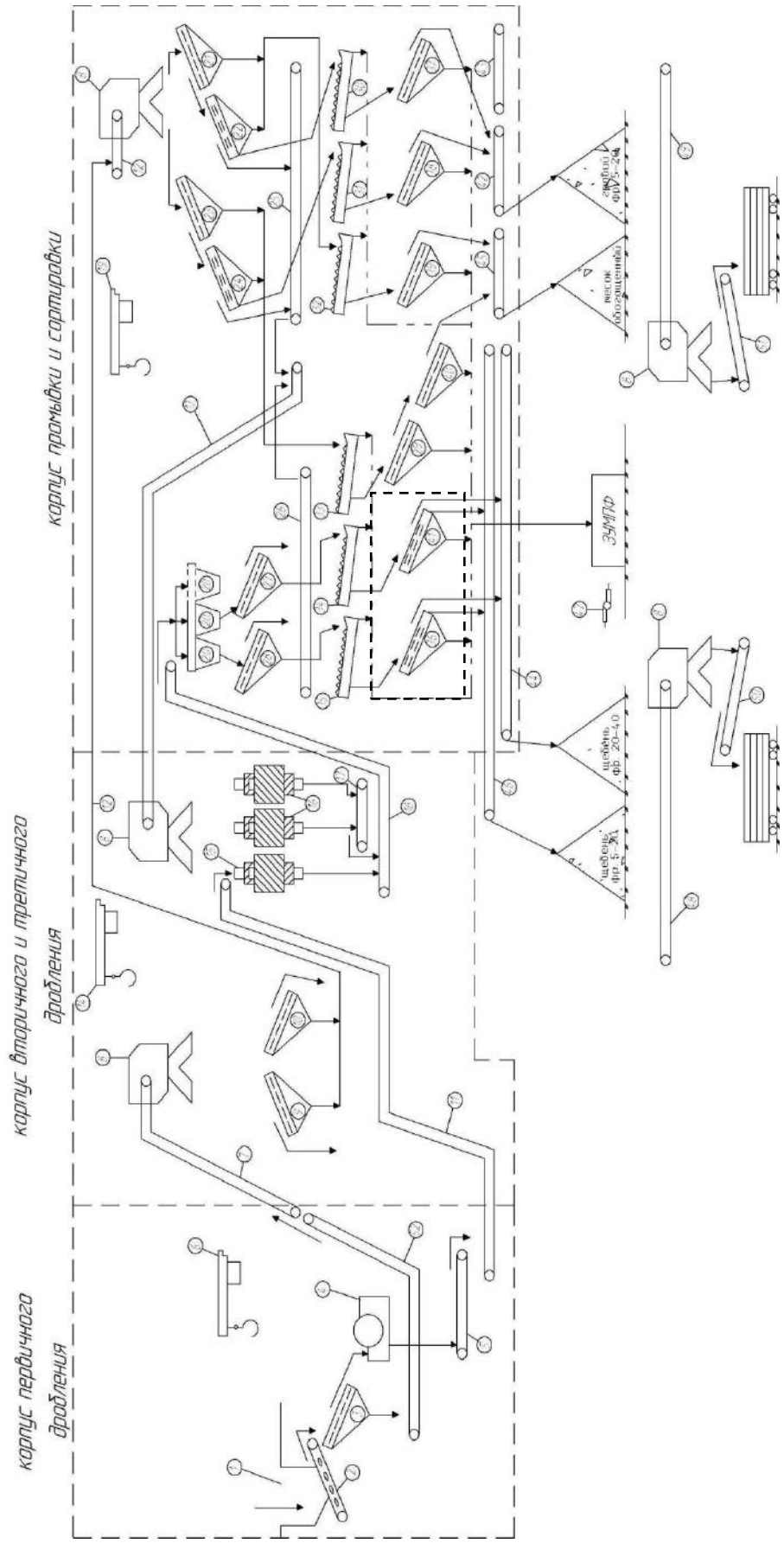


Рисунок 4.1. Схема технологической линии дробильно-сортировочного завода

Нижний класс с колосникового грохота поступает на два грохота СМД-121 «А», где разделяется на два класса: верхний (40-150мм), который подается в дробилку КСД-1750Гр, нижний класс (0-40мм) подается в цех промывки и сортировки. Там сыпучий материал делится на две линии грохотов. Каждая линия состоит из двух расположенных последовательно грохотов СМД-121. На грохотах происходит отделение песка от гравийно-песчаной смеси.

Песок поступает самотеком в спиральные классификаторы КСН-20, где частично обезвоживается на грохотах СМД-148 и СМД-121 «А» со шпальтовыми ситами с щелью 1,2 – 1,5 мм. Обезвоженный песок с помощью ленточного конвейера подается на склад песка. Нижний продукт грохотов СМД-121 «А» подается на корытные мойки К-14, с которых подается на два ряда грохотов СМД-121. Происходит промывка гравия и подача его на склад готовой продукции.

Продукт дробления КСД-1750Гр поступает в промежуточные бункера, откуда подается на грохоты СМД-121. Верхний продукт грохочения направляется в две конусные дробилки КМД-1750Т, которые работают в замкнутом цикле с дробилками КСД-1750 Гр. Нижний продукт грохотов поступает в корытные мойки К-14, с которых направляется для товарного фракционирования на грохоты СМД-121, где происходит разделение сыпучей смеси на три класса: щебень фракции 20-40, щебень фракции 5-20 и отсеvy.

Готовая продукция поступает на склад, с которого отгружается потребителям железнодорожным и автотранспортом.

На предприятии возникла необходимость увеличить выпуск товарной фракции щебня 5 -20 мм. Анализ работы предприятия показал, что повышений объемов перерабатываемой сыпучей смеси приведет к увеличению нагрузки на грохоты СМД-121(на рисунке 4.1 они выделены пунктиром), работающие на завершающей стадии в цехе сортировки. 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 фракции 5-20 мм.

Совместно с сотрудниками отдела качества были взяты пробы сыпучего материала, поступающего на грохоты СМД-121. Был проведен анализ фракционного состава проб на ситовом анализаторе (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2. Ситовой анализатор

Характеристика крупности пробы материала до грохота СМД-121 сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Фракционный состав пробы сыпучего материала, взятой до грохота СМД-121

Полные остатки на ситах, мм	40	20	10	5	2,5	<2,5
Фактически, %	7,9	36,8	62,82	94,37	99,01	100
Фактически, кг	0,790	2,890	2,602	3,155	0,554	0,099

Нами было предложено установить грохот ГИС-52. Грохот инерционный производится на ООО «Канмаш ДСО» город Канмаш Чувашской республики. Грохот предназначен для классификации по фракциям щебня, песчано-гравийной смеси и других сыпучих материалов на стационарных дробильно-сортировочных заводах. Верхнее сито металлическое с квадратной ячейкой размером 20 мм, нижнее сито резиновое размер ячейки 5 мм.

Технические характеристики грохота представлены в таблице 4.2.

Наблюдения за работой грохотов показали следующее. Сыпучий материал на верхнем сите грохота рассеивается весьма интенсивно. Частицы фракций размером меньше 20 мм практически сразу просеиваются через отверстия верхнего сита. Это хорошо видно на рисунке 4.3. Основной процесс происходит на нижнем сите, где отсеиваются частицы некондиционных фракций, которые засоряют товарные фракции щебня. Процесс фракционирования на нижнем сите грохота более сложен с технологической точки зрения. На нижнем сите находится большее количество «трудногрохотимых» частиц. Условия их прохождения через отверстия сита размером 5 на 5 мм затруднены наличием большего количества частиц, размер которых приближается к размеру отверстия сита. Поэтому процесс фракционирования сыпучего материала на нижнем сите является предметом исследования.

Таблица 4.2. Технические характеристики грохота ГИС-52

Наименование параметра и единицы измерения	ГИС-52
Размер просеивающей поверхности, мм	1750
- ширина	5000
- длина	8,75
- площадь, м ²	
Число ярусов	2
Вес максимальный объемно-насыпной массы, просеивающего материала, т/м ³	1,8
Максимальная производительность, м ³ /час	210
Амплитуда колебаний короба, мм	3,5
Частота колебаний, об/мин	970
Угол наклона просеивающей поверхности, град	18



Рисунок 4.3. Процесс фракционирования сыпучей смеси на верхнем сите грохота СМД-121

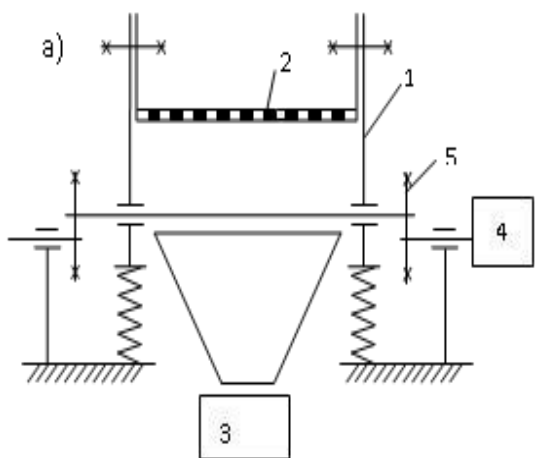
Опыт эксплуатации сит из разных материалов показал, что металлические сита работают не более одного месяца. В рассматриваемом варианте верхнее сито работает в щадящем режиме, поэтому такое сито может быть установлено на верхнем ярусе дополнительного грохота ГИС-52. Немаловажным фактором в выборе металлического сита является его низкая цена в сравнении с ситами из других материалов. Срок службы резиновых сит в четыре раз больше металлических. Резиновое сито благодаря эластичным свойствам изнашивается меньше металлического. Кроме того, резиновые сита обладают эффектом самоочистки.

4.2. Выбор режима работы дополнительного грохота на линии по производству щебня

Для выбора параметров работы дополнительного грохота ГИС-52, обеспечивающего требования к фракционному составу товарного щебня, проводились исследования по разработанной имитационной модели с сыпучей средой, которая должна поступать на нижнее сито грохота ГИС-52. Отбирались пробы сыпучего материала для проведения тестового лабораторного грохочения. Так как взять пробу материала, поступающего на нижнее сито в условиях производства затруднительно, то сыпучая смесь готовилась в ручную. Из материала, который поступал на работающий грохот СМД-121, на сите 20 на 20 мм убиралась крупные частицы. Оставшийся материал подвергался ситовому анализу. Результаты анализа представлены в таблице 4.3. Частицы всего материала были поделены на пять фракций: две непроходные – 5,0-10,0 мм, 10,0 - 20,0 мм; три проходные – 0-1,0 мм, 1,0- 2,5 мм, 2,5-5,0 мм. После ситового анализа частицы всех исследуемых фракций тщательно перемешивались. Полученная смесь подвергалась периодическому грохочению на лабораторной установке (рисунок 4.4). Грохочение проводилось в следующих режимах вибрации: амплитуда колебаний менялась от 2 до 10 мм, частота от 10 до 20 Гц.

Таблица 4.3. Результаты ситового анализа сыпучего материала, поступающего на нижнее сито грохота ГИТ-52

Полные остатки на ситах, мм	10,0	5,0	2,5	1,0	2,5	<1,0
Фактически, %	6,9	14,7	23,0	33,6	72,7	100



б)



Рисунок 4.4.. Лабораторная установка для периодического грохочения сыпучих материалов: а) – схема установки (1 – корпус, 2 – сменное сито, 3 – кювета для сбора подситового продукта, 4 – привод эксцентрикового вала, 5 – регулировочные винты для изменения амплитуды колебаний сита); б) – вид установки

Общее время процесса периодического грохочения составляло 60 секунд. Опыты повторялись четыре раза. Подситовой продукт собирался в кюветы, которые менялись под ситом через 5 секунд. Материал в каждой кювете взвешивался и просеивался на ситах 2,5 и 1,0 мм.

В таблице 4.4 приведены осредненные результаты грохочения проходовых фракций в различные моменты времени.

Таблица 4.4. Степень извлечения мелких фракций в различные моменты времени

Размер фракции, мм	Время фракционирования, с			
	5	10	15	20
0-1,0	0,79	0,86	0,89	0,99
1,0-2,5	0,68	0,74	0,82	0,92
2,5-5,0	0,51	0,63	0,71	0,83

По результатам эксперимента строились кинетики грохочения. Проводилась идентификация расчетных и опытных кинетик грохочения, позволившая определить стохастические коэффициенты модели для каждой фракции. В таблице 4.5 приведены значения стохастических коэффициентов для серии опытов, которые проводились при следующем режиме вибрации: амплитуда колебаний 4 мм, частота - 90 с^{-1} .

Таблица 4.5. Безразмерные коэффициенты ячеечной модели процесса периодического грохочения

Класс крупности, мм	Безразмерная скорость сегрегации	Безразмерный коэффициент макроdiffузии	Безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия сита
0-1,0	0,213	0,018	0,34
1,0-2,5	0,102	0,012	0,26
2,5-5,0	0,081	0,009	0,19

С помощью имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту было определено время пребывания частиц на сите грохота, скорость движения частиц по просеивающей поверхности при изменении режима вибрации и угла наклона сита грохота. Диапазон изменения этих параметров значительно

сузился благодаря проведенным предварительным исследованиям. Перебор вариантов режимов грохочения позволил определить рациональные параметры ведения режима грохочения для дополнительного грохота ГИС-52. 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. Следует отметить, что параметры, полученные в результате исследований, отличаются от параметров, рекомендованных заводом изготовителем.

4.3. Расчет экономической эффективности от работы дополнительного грохота

При проведении маркетинговых исследований сотрудниками отдела сбыта было установлено наличие заинтересованных потребителей в качественной продукции нерудных сыпучих материалов. Руководством предприятия была поставлена задача увеличить выпуск продукции. Особенным спросом у потребителей пользуется щебень фракции 5-20 мм.

При установке дополнительного грохота в цехе сортировки ДСЗ создается возможность увеличить выпуск товарной продукции нерудных материалов. При этом общий объем перерабатываемой сыпучей смеси заводом возрастет.

Общий объем производства на 2015 год составил:

- щебень фракции 5-20 мм – 270720 тонн;
- щебень фракции 20-40 мм – 63840 тонн;
- гравий фракции 5-20 мм – 294440 тонн;
- песок 1 класса крупный – 760720 тонн;
- песок 1 класса средний - 128000 тонн.

Таким образом выпуск нерудных материалов на предприятии составил 1517720 тонн в год.

Для увеличения выпуска наиболее востребованного товарного продукта – щебня фракции 5-20 мм необходимо увеличить объем перерабатываемой заводом сыпучей массы. Увеличение перерабатываемых объемов на 2,5 % возможно. Но даже такое увеличение производительности грохотов СМД-121, которые работают на пределе своих возможностей, приведет к снижению качества выпускаемой продукции.

Расчет товарной продукции на 2015 год и товарной продукции, выпуск которой запланирован на 2016 год, в ценах на 1 января 2015 года сведен в таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Расчет товарной продукции на 2015 и 2016 годы

Наименование	Цена за тонну	Масса, т 2015 г.	Сумма, руб 2015 г.	Масса, т 2016 г.	Сумма, руб 2016 г.
Щебень 5-20	855,12	270720	231498086	277488	237285539
Щебень 20-40	947,66	63840	60498614	65436	62011080
Гравий 5-20	761,00	294440	224068840	301801	229670561
Песок крупный	134,82	760720	102560270	779738	105124277
Песок средний	162,76	128000	20833280	131200	21354112
Нерудные материалы		1517720	639459090	1555663	655445569

По данным бюджетно-аналитического отдела косвенные расходы предприятия составили за 2015 год 299738558 рублей. Предполагаем, что косвенные расходы предприятия в 2016 году не изменятся. Так как отпускные

цены на продукцию в 2016 будут расти, то инфляцию при расчете косвенных и прямых расходов не учитываем.

Прямые расходы предприятия в 2015 году составили 313037400 рубля. В 2016 году прямые расходы на предприятии возрастут. Увеличение расходов будет связано с увеличением объемов продукции, выпускаемой предприятием.

Прямые расходы должны учесть расходы на приобретение грохота ГИТ-52, доставку его на ДСЗ ООО «Хромцовский карьер», монтаж, пуско-наладочные работы, установку дополнительных транспортеров.

Цена ООО «Канмаш ДСО» грохота ГИС-52 450000 рублей (на 1 января 2015 года). Издержки на доставку оборудования, по опыту работы бюджетно-аналитического отдела, в среднем составляют 4% от стоимости оборудования, то есть 18000 рублей. Монтаж нового оборудования и пусконаладочные работы, в среднем, составляют 18% от стоимости оборудования. Таким образом прямые затраты увеличатся на 81000 рублей.

Таким образом, прямые расходы в 2016 году составят 328173881 рублей.

Прибыль предприятия в 2015 году определялась как стоимость товарной продукции минус полная себестоимость, то есть прямые и косвенные затраты.

То есть $639459090 \text{ руб.} - (299738558 \text{ руб.} + 313037400 \text{ руб.}) = 26683132 \text{ руб.}$

Прибыль предприятия в 2016 году составит

$655445569 \text{ руб.} - (299738558 \text{ руб.} + 328173881 \text{ руб.}) = 27533130 \text{ руб.}$

В 2016 году планируется увеличение прибыли

$27533130 \text{ руб.} - 26683132 \text{ руб.} = 849998 \text{ руб.}$

Ожидаемый экономический эффект от увеличения выпуска продукции в 2016 году составит 850 тысяч рублей.

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработанные методы расчета процесса грохочения нашли свое применение при выборе технологических параметров грохотов, работающих на завершающей стадии производства щебня фракции 5-20 мм дробильно-сортировочного завода в ООО «Хромцовский карьер».

2. Анализ работы предприятия показал, что повышений объемов перерабатываемой сыпучей смеси приведет к увеличению нагрузки на грохоты СМД-121, работающие на завершающей стадии в цехе сортировки. Это приведет к снижению эффективности отсева, то есть ухудшению качества отпускаемой с завода продукции.

3. Было принято решение об установке дополнительного грохота ГИС-52 на линии по производству щебня фракции 5-20 мм, так как работающие грохоты СМД-121 не обеспечат должной степени извлечения некондиционных мелких частиц при увеличении перерабатываемых объемов.

4. Результаты компьютерных экспериментов, проведенных по имитационной модели движения частиц по просеивающей поверхности вибрационного грохота, 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.

5. При установке дополнительного грохота в цехе сортировки ДСЗ создается возможность увеличить выпуск товарной продукции нерудных материалов. При этом общий объем перерабатываемой сыпучей смеси заводом возрастет.

6. Цена грохота ГИС-52 составляет 450000 рублей (в ценах на 1 января 2015 года). Издержки на доставку оборудования составят 4% от стоимости оборудования, то есть 18000 рублей. Монтаж нового оборудования и пусконаладочные работы составят 18% от стоимости оборудования, то есть 81000 рублей.

7. Ожидаемый экономический эффект от увеличения выпуска продукции в 2016 году составит 850 тысяч рублей.

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 имитационная модель для исследования процесса движения ансамбля частиц по вибрирующей просеивающей поверхности грохота, использующая 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.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

E – эффективность грохочения;

D – размерный коэффициент макродиффузии, м/с;

d – безразмерный коэффициент макродиффузии;

V – размерный коэффициент сегрегации, м/с;

v – безразмерный коэффициент сегрегации ;

V_f – размерная скорость просеивания проходových частиц через отверстия сита грохота , м/с;

v_f - вероятность проникновения проходových частиц через отверстия сита грохота;

Δt – продолжительность времени одного перехода, с;

k – номер временного перехода;

t_k – текущий момент времени, с;

m – количество ячеек в слое;

i – номер ячейки;

Δx – высота ячейки;

S_k - вектор-столбец распределения содержания частиц мелкой фракции по ячейкам слоя;

P - матрица переходных вероятностей ячеечной модели;

$q(k)$ – выход мелкой фракции в подрешетное пространство на каждом временном переходе;

C_0 - относительное содержание мелкой фракции в сырье;

$\varepsilon(k)$ – степень извлечения мелких частиц из исходного сырья;

h - высота слоя;

$\langle t \rangle$ - среднее время пребывания частиц на сите грохота;

B – ширина сита грохота ;

L – длина сита грохота;

Q – производительность грохота, м³/с;

$t_{гр}$ - время грохочения сыпучего материала;

$v_{\text{тр}}$ – скорость транспортирования сыпучего материала по вибрирующему сити грохота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизонов, В.Е. Процессы сепарации частиц в виброожигенном слое: моделирование, оптимизация, расчет / В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов, С.В. Федосов, А.В. Огурцов // ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет» . - Иваново, 2010. – 192 с.
2. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения / Под ред. Л.А. Вайсберга. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2005. – 252 с.
3. 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.
4. Сергеев В.П. Строительные машины и оборудование: Учеб. для вузов по спец. «Строит. машины и оборудование». – М.: Высш. шк., 1987. – 376 с.
5. Процессы в производстве строительных материалов и изделий / Учебник. В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 512 с.
6. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. - М.: Химия. - 1977. 368 с.
7. Непомнящий, Е.А. Стохастическая теория гравитационного обогащения в слое конечной толщины/ Е.А. Непомнящий // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1966. - №7. – С. 172 – 176.
8. Непомнящий, Е.А. Некоторые результаты изучения кинетики сепарирования и смешивания дисперсных материалов./ Е.А. Непомнящий // Инж.-физ. журнал. - 1967, т. 12. - № 5. – С. 583-591.

9. Непомнящий, Е.А. Кинетика некоторых процессов переработки дисперсных материалов / Е.А. Непомнящий // ТОХТ. – 1973, т. 7. – № 5. – С. 754 – 763.
10. Григорьева, Е.Д. Методика расчета показателей процесса грохочения / Е.Д. Григорьева, Е.А. Непомнящий // Труды ВНИИ абразивов и шлифования. – 1971. - №3. – С. 38 – 41.
11. Федосов, С.В. Моделирование процесса классификации полидисперсных материалов на виброгрохотах / С.В.Федосов, В.Е.Мизонов, В.А.Огурцов // Строит. материалы.– 2007.– №11.– С.26 - 28.
12. Огурцов, В.А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация / В.А. Огурцов // . // Дис. ... докт. техн. наук. Иваново.: ИГАСУ. – 2010. – 303 с.
13. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова / В.А. Огурцов, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Строит. материалы. – 2008. - № 5. – С. 33 – 35.
14. Огурцов, В.А. Расчетное исследование движения частиц по поверхности виброгрохота / В.А. Огурцов, В.Е. Мизонов, С.В. Федосов // Строит. материалы. – 2008. - №6. - С. 74 - 75.
15. Огурцов, В.А. Моделирование движения частиц над поверхностью сита виброгрохота / В.А. Огурцов // Строит. материалы. – 2008. – №8. – С. 72 - 73.
16. Огурцов, В.А. Оптимизация геометрических характеристик виброгрохота / В.А. Огурцов, С.В.Федосов, В.Е. Мизонов // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №10. – С.33 – 34.
17. Огурцов, В.А. Моделирование движения частицы по продольно колеблющейся поверхности грохота / В.А. Огурцов, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – №2. – С.23 - 24.
18. Кульбицкий, А.В. Влияние параметров колебаний плоских гирационных сортировок на процесс фракционирования щепы / А.В. Кульбицкий

// Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 178(12). Спб.: 2007. С. 99-105.

19. Васильев, С.Б. Исследование работы плоских гирационных сортировок щепы / С.Б. Васильев, А.В. Кульбицкий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 189. Спб.: 2009. С. 132-140.

20. Васильев, С.Б. Логистическое уравнение как модель фракционирования древесной щепы методом рассева / С.Б. Васильев, Г.Н. Колесников, А.В. Кульбицкий // Материалы третьей международной научно-практ. интернет-конф. «Леса России XXI века», Спб ГЛТА, 2010. С. 236-239.

21. Лапшин, Е.С. Математическое моделирование процесса грохочения с использованием цепи Маркова / Е.С. Лапшин // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГА Україна. – Дніпропетровськ. – 1999. - № 5 (46). – С. 30 – 34.

22. Надутый, В.П. Кинетика грохочения с переменным вибровозбуждением по длине просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Сб. научн. трудов: Химия, химическая технология и экология. – Харьков.: - 2008. - № 38. – 2008. – С. 11 – 18.

23. Надутый, В.П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Киев.: Наукова думка. - 2005. – 180 с.

24. Надутый, В.П. Интенсификация процесса вибрационного грохочения с учетом сегрегации, просеивания и транспортирования / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Сб. докл. Междуна. научн.-техн. конф: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – Екатеринбург. – 2002. – С. 76 - 80.

25. Надутый, В.П. Кинематика сыпучей среды при вибрационном грохочении / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Всеукр. Научн.-техн. журн.: Вибрация в технике и технологиях. – Винница. – 2003. - № 5 (31). – С. 51 – 54.

26. Лапшин, Е.С. Определение вероятности вибрационного просеивания случайно ориентированной в пространстве частицы / Е.С. Лапшин // Збагачення

корисних копалин: Наук.- техн. зб. НГА Україна. – Дніпропетровськ. – 2000. - № 10 (51). – С. 47 – 52.

27. Лапшин, Е.С. Вероятностный критерий согласования процессов сегрегации и прсеивания / Е.С. Лапшин // Всеукр. Научн.-техн. журнал: Вибрация в технике и технологиях. – Винница. – 2002. - № 1 (22). – С. 36 – 38.

28. Хохлова, Ю.В. Математическая модель смесителя непрерывного действия с неоднородным потоком сыпучего материала / Ю.В.Хохлова, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007, т. 50, вып. 9. – С.118 – 120.

29. Тихонов, О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогащительной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1973. – 240 с.

30. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделение минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. - 208 с.

31. Астафьева, Е.А. Статистическая теория грохочения полидисперсных смесей / Е.А. Астафьева, О.Н. Тихонов, В.А. Перов // Обогащение руд. ИПИ. – 1980. – С. 165 – 177.

32. Огурцов, В.А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация/ В.А. Огурцов// Дис. ...докт. техн. наук. Иваново.: ИГАСУ. – 2010. – 303 с.

33. 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.

34. Огурцов, В.А. Механика миграции частиц при грохочении в виброожигенном слое / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, Е.Р. Горохова, А. А. Галиева // Вестник ИГЭУ. - Иваново. – 2011.- №5 С. 38-41.

35. Брик, Е.Р. Исследование кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на грохотах с многоярусной компоновкой сит / Е.Р. Брик // Дис. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИГАСУ. – 2011. – 127 с.

36. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с. с иллюстрациями.
37. ГОСТ 32703 - 2014 “Щебень и гравий из горных пород для строительных работ”
38. ГОСТ 8736 - 2014 “Песок для строительных работ”
39. Арсентьев, В.А. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок / В.А. Арсентьев, Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, А.Д. Шуляков // Спб.: Изд-во ВСЕГЕИ. - 2004. 112 с.
40. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов / Учебник. В.С. Богданов, С.Б. Булгаков, Г.Д. Федоров // – Белгород, «Везелица». - 2007. - 446 с.
41. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е.Мизонов, С.Г. Ушаков, Е.В. Барочкин; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Изд. 2-е, перераб. и доп. - Иваново: ПресСто, 2014. – 260 с.
42. Вайсберг, Л.А., Рубисов, Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процесса и технологический расчет грохотов. - Спб.: Институт «Механобр». - 1994. - 47 с.
43. Вайсберг, Л.А. Теоретические основы грохочения. Учеб. пособие .– Спб.: – СПбГГИ (технический университет). – 2003. – 61 с.
44. Вайсберг, Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. - М.: Недра, 1986. - 144 с.
45. Мизонов, В.Е. Новый подход к моделированию и оптимизации процессов в сыпучих материалах / В.Е. Мизонов, В.П. Жуков, Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова // Каталог 3-го Ивановского инновационного салона «Инновации-2006». – Иваново. – 2006. – С.119-120.
46. Баранцева, Е.А. Об оптимальных параметрах перемешивающей лопасти лопастного смесителя сыпучих материалов / Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Изв. ВУЗов. Химия и

химическая технология. – 2008. – Т. 51. – Вып. 7. – С.108-110.

47. Мизонов, В.Е. Применение теории марковских цепей к моделированию механических процессов химической технологии / В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, К. Marikh, Н. Berthiaux // Труды V Международной НК „Теоретические и экспериментальные основы создания новых высокоэффективных химикотехнологических процессов и оборудования. – Иваново.: – 2001. - С. 92 - 94.

48. Жуков, В.П. Расчет процесса периодического грохочения порошков / В.П. Жуков // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. - № 1. – С. 17 - 18.

49. Жуков, В.П. Математическое описание распределенного процесса классификации порошкообразных материалов / В.П. Жуков // В сб. Процессы в зернистых средах. – Иваново. - 1989. – С. 52 – 55.

50. Мизонов, В.Е. Об одном подходе к описанию кинетики / Процессы и аппараты химической технологии (явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование). В 5 Т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д.А. Баранов, В.Н. Блиничев, В.Е. Мизонов и др.; под ред. А.М. Кутепова. – М: ЛОГОС, 2001. – 600 с.

51. Мизонов, В.Е. К расчету центробежных классификаторов порошкообразных материалов / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков // Теоретические основы химической технологии. – 1980. – т.14. – №5. – С. 784–786.

52. Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация тонкодисперсных сыпучих материалов и оборудование для ее реализации / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков // Химия и нефтяное машиностроение. – 1990. – №1. – С. 7–12.

53. Мизонов, В.Е. Обратная задача фракционирования порошков / В.Е. Мизонов, Е.В. Барочкин, С.Г. Ушаков // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1986. – т.29. – № 2. – С. 125 –127.

54. Мизонов, В.Е. Связь функциональных и критериальных характеристик процесса классификации / В.Е. Мизонов //Интенсивная механическая технология сыпучих материалов. – Иваново, 1990. – С. 80–84.

55. Мизонов, В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков / В.Е Мизонов // Теоретические основы химической технологи. – 1984. – т.18. – №6. – С . 811– 815.
56. Кондратьев, А.В. Влияние формы дисков валковой сортировки на эффективность грохочения гравия / А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, С.П. Смородов, В.А. Русинкевич // Механизация строительства. 2014. № 1 (835). С. 36-38.
57. Кондратьев, А.В. Влияние углов наклона желобообразного валкового сита на результативность грохочения / А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, А.И. Перхуров, М.И. Вересов, А.В. Виноградов // Строительные и дорожные машины. 2015. № 4. С. 52-54.
58. Кондратьев, А.В. Просеиваемость гравия по длине сортировки в зависимости от фракционного состава смеси / А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, В.А. Русинкевич, А.К. Абдуллах // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2014. № 7. С. 139-143.
59. Клушанцев, Б.В. Машины и оборудование для производства щебня, гравия и песка / Б.В. Клушанцев, П.С. Ермолаев, А.А. Дудко. – Машиностроение, 1976. – 182 с.
60. Бауман, В.А. Вибрационные машины и процессы в строительстве: учеб. пособие для студентов строительных и автомобильно- дорожных вузов / В.А. Бауман, И.И. Быховский. – М.: Высш. шк., 1977. - 255 с.
61. Вавилов, А.В. Моделирование процессов грохочения и конструкций грохотов для получения качественных заполнителей при раздельном приготовлении бетонов / А.В. Вавилов, М.Т. Елеукенов // Вестник ВКГТУ.- №2.- 2014.- С. – 31-34.
62. Вайсберг, Л.А. Массво-балансовая модель вибрационного грохочения сыпучий материалов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1988. - №5, С. 5 – 9.

63. Вайсберг, Л.А. К развитию массво-балансовой модели вибрационного грохочения / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1989. - №2, С. 3 – 5.
64. Вайсберг, Л.А. К технологическому расчету вибрационных грохотов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1991. - №5, С. 19 – 23.
65. Вавилов, А.В. Основные положения создания теории сортировки нерудных материалов на грохотах / А.В. Вавилов, Д.Е. Елемес, О.А. Коробова // Состояние и перспективы развития механики и машиностроения в Казахстане: Материалы Междунар. науч. конф. – Алматы: КазНТУ, 2007. – Т. 2. – С. 194-197.
66. Вавилов, А.В. Спиральные вибрационные грохоты / А.В. Вавилов, Н.Т. Сурашов Д.Е. Елемес, – Алматы: КазНТУ, 2010. –126 с.
67. Вавилов, А.В. Разработка перспективной конструкции спирального вибрационного грохота с дополнительным возбудителем вибрации / А.В. Вавилов, Н.Т. Сурашов Д.Е. Елемес и др. // Вестник КазНТУ им. К.И. Саипаева. - 2010. – №3. – Алматы.- С. 125-131.
68. Бобков, С.П. Использование дискретных стохастических моделей в химической кинетике / С.П. Бобков, Е.С. Бобкова, В.В. Рыбкин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 9. С. 35-39.
69. Бобков, С.П. Проверка адекватности дискретной модели процесса деформирования твердого тела // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 7. С. 107-108.
70. Бобков, С.П. Использование системного подхода при моделировании технологических процессов / С.П. Бобков, С.С. Смирнов, Н.Р. Кокина // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 3. С. 116-119.
71. Митрофанов, А.В. Моделирование теплопередачи между частицами и газом в псевдоожиженном слое / А.В. Митрофанов, А.В. Огурцов, В.Е. Мизонов, К. Tannous // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53. – Вып. 12. – С.110-112.

72. Митрофанов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в псевдооживленном слое / А.В. Митрофанов, Л.Н. Овчинников, А.В. Огурцов, В.Е. Мизонов. // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 5. – С.134-136.
73. Алоян, Р.М. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов / Р.М. Алоян, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Иван. гос. архит. – строит. ун-т; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – 256 с.
74. Федосов, С.В. Моделирование и расчет систем утилизации теплоты уходящих газов в высокотемпературных процессах строительной индустрии / С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // Иван. гос. архит. – строит. ун-т. – Иваново, 2010. – 267 с.
75. Мизонов, В.Е. Моделирование и оптимизация теплового состояния в секционных объектах с внутренними источниками теплоты / В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, Е.А. Баранцева // Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 128 с.
76. Математическая модель кинетики лопастного перемешивания сыпучих материалов / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, С.В. Федосов, Ю.В. Хохлова // Строительные материалы. – 2008.- №2.- С. 12-13.
77. Моделирование прогрева тонкого слоя материала перемещающимся источником теплоты / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, А.Б. Иванов, О.В. Тихонов // Строительные материалы. – 2007.- №3.- С. 28-29.
78. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, С.В. Хавер // Строительные материалы. – 2007.- №9.- С. 14-16.
79. Моделирование прогрева кирпичной садки произвольной внешней конфигурации / С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, А.Н. Хусаинов // Строительные материалы. – 2010.- №7.- С. 46-48.
80. Алоян, Р.М. Моделирование теплового состояния материала при протекании в нем экзотермической реакции / Р.М. Алоян, Н.В. Виноградова, М.Е. Лебедев // Строительные материалы. – 2007.- №9.- С. 74-75.

81. Алоян, Р.М. Моделирование термической обработки материала перемещающимся источником теплоты при протекании в нем экзотермической реакции / Р.М. Алоян, Н.В. Виноградова, М.Е. Лебедев // Строительные материалы. – 2007.- №10.- С.68-69.
82. Жуков, В.П. Расчет процесса периодического грохочения порошков / В.П. Жуков // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. - № 1. – С. 17 - 18.
83. Жуков, В.П. Математическое описание распределенного процесса классификации порошкообразных материалов / В.П. Жуков // В сб. Процессы в зернистых средах. – Иваново. - 1989. – С. 52 – 55.
84. Жуков, В.П. Пути повышения качества нерудных материалов / В.П. Жуков // Промышленность строительных материалов Москвы: Реф. Сб. – М.: Наука. – 1986. - № 6. – С. 17 – 20.
85. Жуков, В.П. Матричная формализация математического описания технологических систем измельчения произвольной структуры / В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, С.И. Шувалов // Химическая промышленность. – 1996. – №12. – С. 45–47.
86. Жуков, В.П. Оптимальное управление подачей исходного материала в классифицирующий каскад / В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, М.Ю. Рябов // Изв. вуз. Химия и хим. технология. –1997. – т.40. – №1. – С. 132 – 134.
87. Жуков, В.П. Расчетно-экспериментальное исследование разделения разнопрочных материалов в совмещенном распределенном процессе дробления-классификации / В.П. Жуков, А.В. Каталымов, В.Е. Мизонов // Теор. основы хим. технологии.– 1997. – т.31. – №3. – С. 333– 335.
88. Жуков, В.П. Селективная функция измельчения в измельчителях с распределенной мелющей средой / В.П. Жуков, С.Ф. Смирнов, А.Г. Красильников // Вестник ИГЭУ. –2006. – Вып.4. – С. 68–69.
89. Смирнов, С.Ф. Влияние загрузки барабана на измельчение в шаровой мельнице / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, А.Г. Красильников, В.Е. Мизонов // Труды межд. науч. конф. «Теоретические основы создания, оптимизации и

управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием». –Иваново, 2007. – Т.2. – С. 23.

90. Клишин, С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале / С.В. Клишин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 12, 2009. – С. 273 – 277.

91. Мизонов, В.Е. Об определении матрицы измельчения в математической модели размола твердого топлива / В.Е. Мизонов, Д.Е. Лебедев, А.Н. Беляков, Л. Бернье, С.Ф. Смирнов // Труды ИГЭУ. Вып. 2.; под ред. А.В. Мошкарина, В.А. Шугина, Е.С. Целищева- Иваново, 1998. – С. 77 –78.

92. Смирнов, С.Ф. Влияние материальной загрузки на измельчение в струйной мельнице кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов, D. Urbaniak, T. Wylecial // «Строительные материалы». – 2008. – №10. – С. 44 – 46.

93. Смирнов, С.Ф. Расчетно – экспериментальные исследования классификации в струйной мельнице кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов, H. Otwinowski, P. Kaniowski // «Строительные материалы». – 2009. – №.2. – С. 61 – 63.

94. Смирнов, С.Ф. Расчетно-экспериментальные исследования классификации материала в струйной мельнице кипящего слоя // С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, H. Otwinowski, P. Kaniowski // Тез. докл. XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». Т.2 – Иваново, 2009. – С. 99.

95. Смирнов, С.Ф. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разделения в двухступенчатом классификаторе струйной мельницы кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, D. Urbaniak, P. Kaniowski // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – №11. – С. 36 – 39.

96. Жуков, В.П. Математическая модель классификации материала в кипящем слое / В.П. Жуков, С.Ф. Смирнов, H. Otwinowski, D. Urbaniak // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 3. – С. 22 – 24.

97. Жуков, В.П. Расчетно-экспериментальные исследования классификации материала в кипящем слое [Текст] / В.П. Жуков, С.Ф. Смирнов, D. Urbaniak, P. Kaniowski // Материалы XIV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново. – 2007. – Т.2. – С. 182.

98. Смирнов, С.Ф. Кинетика измельчения в струйной мельнице кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, L. Pastucha, D. Urbaniak, T. WylecialTomas // Сборник трудов 22-й международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 22». – Псков. – 2009. –Т.9. – С. 80 – 81.

99. Мизонов, В.Е. Применение теории цепей Маркова к моделированию кинетики измельчения в трубных мельницах замкнутого цикла / В.Е. Мизонов, С.В. Федосов, С.Ф. Смирнов, А.Г. Красильников // «Строительные материалы». 2007. – №10. – С. 41 – 45.

100. Смирнов, С.Ф. Ячеечная модель кинетики непрерывного измельчения материалов в замкнутом цикле / С.Ф. Смирнов, А.Г. Красильников, В.Е. Мизонов, Cs. Mihalyko // Сборник трудов XX межд. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-20». – Ярославль, 2007. – Т.5. – С. 81 – 82.

101. Смирнов, С.Ф. Ячеечная модель измельчения материала в трубной мельнице замкнутого цикла / С.Ф. Смирнов, В.Е. Мизонов, А.Г. Красильников, В.П. Жуков // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – Вып. 3. – С. 98 – 100.

102. Красильников, А.Г. Модель измельчения в трубной мельнице замкнутого цикла со сложной структурой потока материала [Текст] / А.Г. Красильников, С.Ф. Смирнов, В.Е. Мизонов, В.П. Жуков, Cs. Mihalyko // Тез. докл. XIV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». – Иваново. – 2007. – С. 177.

103. Смирнов, С.Ф. Обобщенная ячеечная модель совмещенного процесса измельчения-классификации в технологических системах измельчения / С.Ф.

Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // «Строительные материалы». – 2008. – №.8. – С. 74 – 76.

104. Межеумов, Г.Г. Постановка задачи оптимизации измельчения цемента в мельнице замкнутого цикла / Г.Г. Межеумов, С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков // Тез. докл. XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». Т.2 – Иваново, 2009. – С. 97.

105. Межеумов, Г.Г. Оптимизация замкнутого цикла измельчения цемента с использованием ячеечной модели контура [Текст] / Г.Г. Межеумов, С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, В.Е. Мизонов // Тез. докл. XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». Т.2 – Иваново, 2009. – С. 98.

106. Огурцов, А.В. Моделирование поля концентраций частиц в цилиндрическом аппарате кипящего слоя на основе теории цепей Маркова / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // Тезисы Междунар. НТК “Состояние и Перспективы развития энерготехнологий (Бенардосовские чтения)”, Иваново, 2006, С.52.

107. Огурцов, А.В. Нелинейная ячеечная модель эволюции взвешенного слоя / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // XVII Межд. НТК «Математические методы в технике и технологиях» – ММТТ2006.- Воронеж.- 2006.- С.39-40.

108. Огурцов, А.В. Расчёт концентраций материала в восходящем потоке газа, с учётом изменения скорости обтекания частиц / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // Учёные записки инженерно-строительного факультета. ИГАСУ.- Иваново, 2006. – Выпуск 3. - С. 165-168

109. Огурцов, А.В. Ячеечная модель расчёта концентраций материала во взвешенном слое / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // XX Межд. НТК «Математические методы в технике и технологиях». – ММТТ2007, т.5, Ярославль.- 2007.- С.286.

110. Марьин, А.П. Опыт эксплуатации многочастотных вибрационных грохотов ULS для фракционирования материалов в производстве сухих строительных смесей / А.П. Марьин, А.А. Радзиван, В.П. Деханов // Строит. материалы. - 2006. - № 12. - С. 30 – 31.

111. Радзиван, А.А. Вибрационное оборудование для фракционирования мелкодисперсных порошков / А.А. Радзиван, В.П. Деханов, Ю.В. Омельчук // Строит. материалы. – 2005. - № 12. - С. 74 – 75.

112. Огурцов, В.А. Методы расчета и оптимизации процессов классификации сыпучих сред на виброгрохотах / В.А. Огурцов // Дис. ... канд.техн.наук. Иваново.: ИХТИ. – 1983, - 156 с.

113. А. с. 1025462 СССР, МКИ³ В 07 В 1/40. Вибрационный грохот / С.С. Кораблев, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов, А.Ю. Покровский (СССР). – № 3399940/29–03 ; заявл. 18.03.82 ; опубл. 30.06.83, Бюл. № 24. – 3 с. : ил.

114. Пат. на полезную модель 82602 Российская Федерация, МПК⁷ В 07 В 1/40. Вибрационный грохот / Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Баранцева Е.А., Огурцов А.В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет. – № 2008150025/22 ; заявл. 17.12.08 ; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13. – 2 с. : ил.

115. Пат. на полезную модель 86894 Российская Федерация, МПК⁷ В 07 В 1/40. Вибрационный грохот / Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Баранцева Е.А., Галиева А.А.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет. – № 2009116895/22 ; заявл. 04.05.09 ; опубл. 20.09.09, Бюл. № 26. – 2 с. : ил.

116. Огурцов, В.А. Кинематический анализ вибрационных грохотов со сложной траекторией колебаний сита / В.А. Огурцов, А.В. Крыков, З.А. Ахмедов // Тезисы докладов н.-т. конф. ИИСИ, Иваново. - 1987. - С. 75

117. А. с. 1220708. Вибрационный грохот / В.М. Суворов, В.И. Мочалов, В.П. Рогов, Г.Ф. Козловская (СССР). – № 3796200/29–03; заявл. 02.10.84 ; опубл. 30.03.86, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.

118. Алешина, А.П. Нелинейная ячеечная модель кинетики вибрационного

грохочения /А.П. Алешина, И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – Вып. 12. – С.81-84.

119. Алешина, А.П. Применение теории цепей Маркова к моделированию кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты / А.П. Алешина, В.А. Огурцов, В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов // Вестник ИГЭУ. – Вып. 5 – 2014. – С. 42-46.

121. Алешина, А.П. Расчетно-экспериментальное исследование сегрегационного механизма миграции ансамбля частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении / А.П. Алешина, В.А. Огурцов, М.А. Гриценко, А.В. Огурцов // Вестник ИГЭУ. – Вып. 1 – 2015. – С. 50-54.

122. Огурцов, В.А. Ячеечная модель псевдооживления в технологии производства строительных материалов / В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, А.П. Алешина // Строительство и реконструкция. - Вып. 5 (43). – 2012. – С. 68-74.

123. 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. 210 – 211.

124. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. Пер. с англ. – М. : Наука.- 1975.- 576 с.

125. Алешина, А.П. Исследование процессов виброгрохочения песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций / А.П. Алешина// Дис. ... канд.техн.наук. Иваново.: ИВГПУ. – 2016, - 127 с.

126. 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.

127. Алешина, А.П. Об одном способе описания кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на вибрационных грохотах /А.П. Алешина //

Вестник научно-промышленного общества. - Вып. 18. – Москва. - 2012. - С. 34 – 37.

128. Алешина, А.П. Описание кинетики фракционирования сыпучих материалов на двухситовом виброгрохоте / А.П. Алешина, Н.С. Жбанов, М.А. Орлова, В.А. Огурцов // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза». Иваново: ИГАСУ, 2012. С. 788 – 793.

129. 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.

130. 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.

131. Алешина, А.П. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих материалов на системе сит с поэтажной компоновкой / А.П. Алешина, В.А. Огурцов // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Иваново: ИГЭУ, 2013. т.2. С. 346-348.

132. Алешина, А.П. Повышение качества фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах с пространственной траекторией движения сит / А.П. Алешина, Е.Р. Брик // Материалы VIII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2013». Иваново: ИГЭУ, 2013. С. 275 - 276.

133. Огурцов, В.А. Моделирование движения полидисперсной смеси частиц по просеивающей поверхности виброгрохота / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, М.А. Гриценко // Сборник материалов V Всероссийской научно-

практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов». Иваново: Иван. ин-т. ГПС МЧС, ИГХТУ, 2014. С. 163-167.

134. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих материалов на двухситовом виброгрохоте / В.А. Огурцов, А.П. Алешина // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». Иваново: ИГХТУ, 2014. С. 345 – 349.

135. 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.

136. Алешина, А.П. Описание кинетики классификации сыпучих материалов на вибрационных грохотах / А.П. Алешина, В.А. Огурцов // Материалы VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2012». Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 247.

137. Блехман, И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе // Изд. Наука. М.: - 1964. - 410 с.

138. Вибрация в технике. Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет.: В.Н. Челомей // М.: Машиностроение. – 1981. (Т. 4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Э.Э. Лавендела, - 509 с.)

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

140. Огурцов, В.А. Динамическая модель движения сыпучих материалов по просеивающей поверхности грохота / В.А. Огурцов, Ал.В. Огурцов, А.А. Галиева,

Е.Р. Горохова // Учёные записки инженерно-строительного факультета / Иван. гос. архит.-строит. ун-т.- Иваново, 2011. – Выпуск 5, С. 165-168.

141. Огурцов, В.А. Моделирование процесса сепарации частиц в виброоживленном 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.

142. 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.

143. Kruggel – Emden H. et al. Review and extension of normal force models of the Discrete Element Method // Powder Technol. – 2007. - № 171.

144. Meinel, A. Über einige zusammenhänge zwischen der Eincekorndynamik und der stochastischen Sientheorie bie der Klassierung auf Stoel-schwingmaschinen [Text] / A. Meinel, H. Schebert // Aufbereitungs Technik. – 1972. – № 7. – S. 408-416.

145. Meinel, A. Zu den Grundlagen der Fensiebung [Text] / A. Meinel, H. Schebert // Aufbereitungs Technik. – 1971. – № 3. – S. 128-133.

146. Mizonov, V.E. Application of multi-dimensional Markov chains to model kinetics of grinding with internal classification / H. Berthiaux, V.P. Zhukov and S. Bernotat // Int. J. Miner. Process. - V.74, issue 1001. – 2004, - P.307-315.

147. Berthiaux, H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology, 157(2005). – P. 128-137.

148. Mizonov, V. Theoretical study of superposition of macro- and micro-scale mixing and ITS influence on mixing kinetics and mixture quality / V. Mizonov, H. Berthiaux, E. Barantseva, C. Gatumel, Y. Khokhlova // Proc. of the International Symposium on Reliable Flow of Particulate Solids IV (RELPOWFLO IV). – CD edition. – Tromso. – Norway. – 2008.

149. Vaisberg, L.A., Rubisov, D.N. Mathematische Beschreibung der Vibrationssiebung. Aufbereitungs Technik . - 1990. - № 3, S. 378 - 386.

150. Vaisberg, L.A. Screening process: modeling and application of the model to sizing of screens / L.A. Vaisberg, D.H. Rubisov // Proc. XVIII IMPC. Sidney. – 1993, P. 271 – 277.

151. Mizonov, V. Simulation of Grinding: New Approaches / V. Mizonov, V. Zhukov, S. Bernotat. – USPEU Press, Ivanovo, 1997. –118 p.

152. Kadel, R. Cost-efficient sizing of difficult-to-screen materials with ClichClean / R. Kadel // Aufbereitung Technik. 44. - 2003. - No. 7, P. 11 – 16.

153. Ulrich, W. Ein Beitrag zur Berechnung der Bewegung von Schuttgutern auf einer ruckartig bewegten Unterlage und die experimentelle Ermittlung geeigneter Stoffwerke / W. Ulrich // Aufbereitungs Technik. – 1973. Bd 14. - № 11, – S. 739-745.

154. Ferrara, G. Modelling of screening operations / G. Ferrara, U. Preti, G.D. Schena // Intern. J. of Mineral Processsing. - 1988. Vol. 22. - № 1, P. 193 – 222.

155. Herbst, J. A. Incorporating state of the art models into a mineral processing plant simulator / J. A. Herbst, G.D. Schena, L.S. Fu // Trans. of the Inst. of Mining & Metallurgy. – 1989, Vol. 98, P. 1 – 11.

156. Molerus, O. Derstellung von Windsichtertrennkurven durch ein stochastisches Modell / O. Molerus, H. Hoffmann // Chemie Ingenieur Technik.- 1969, Bd. 41. - № 5. S. 340 – 344.

157. McCarty, J.J. Computational studies of granular mixing [Tidsskrift] / J.J. McCarty, D.V. Khakar, J.M. Ottino // Powder Technology. - 2000. - Vol. 109. - S. 58 - 71.

158. Moakher, M.T. Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders [Tidsskrift] / M.T. Moakher, T. Shinbrot, F.J. Muzzio // Powder Technology. - 2000. - Vol. 109. - S. 58-71.

159. Stewart, R.L. Simulated and measured flow of granules in a bladed mixer - A detailed comparison [Tidsskrift] / R.L. Stewart, J. Bridgwatert, Y.C. Zhou, A.B. Yu // Chemical Engineering Science. - 2001. - 19 : Vol. 56. - S. 5457-5471.

160. Dury, C.M. Competition of mixing and segregation in rotating cylinders [Tidsskrift] / C.M. Dury, G.H. Ristow // *Physics of fluids*. - 1999. - 6 : Vol. 11. - S. 1387-1394.
161. Arratia, P.E. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations / P.E. Arratia, Nhat-hang Duong, F.J.Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // *Powder Technology*, Vol. 164. – 2006. - P.50 - 57.
162. Paulick, M., Morgeneyer, M., Kwade, A. Review on the influence of elastic particle properties on DEM simulation results // *Powder Technology*, V. 283, 2015, pp. 66-76
163. Jahani, M, Farzanegan, A., Noaparast, M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver // *Powder Technology*, V. 283, 2015, pp. 32-47
164. Chen, Y., Tong, X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM3D simulation // *Mining Science and Technology*, V.20, Issue 4, 2010, pp. 615-620
165. Zhao, L., Zhao,Y., Liu, C., Li, J., Dong, H. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // *Mining Science and Technology*, V. 21, Issue 5, 2011, pp. 677-680
166. Chen, Y., Tong, X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation // *Mining Science and Technology*, V.19, Issue 4, 2009, pp. 493-497
167. Webb, J. Li, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation // *Powder Technology*, V.133, Issues 1–3, 2003, pp. 190-202.

ПРИЛОЖЕНИЯ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
Общество с ограниченной ответственностью
ХРОМЦОВСКИЙ КАРЬЕР

с.Хромцово, Фурмановский р-н,
Ивановская область, Российская Федерация, 155532
тел./факс +7(49341) 2-28-98
тел./факс +7(49341) 2-27-53
E-mail: hmk@naaco.ru Internet: www.nnk.ru

р/с № 40702810001060000171
филиал «Вознесенский» АКБ «Инвестторгбанк», г.Иваново
к/с 30101810800000000772, БИК 042406772,
ИНН 3705066038, КПП 370501001,
ИНН 133705000219, ОКВЭД 14.21, ОКПО 05001079



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Хромцовский карьер»
Бобылев В.А.
12 января 2016г.

АКТ

об использовании результатов диссертационных исследований Огурцова Александра Валерьевича по выбору технологических параметров грохотов, работающих на завершающей стадии производства щебня фракции 5-20 мм в ООО «Хромцовский карьер»

Мы, нижеподписавшиеся, от ООО «Хромцовский карьер» начальник производственно-технического отдела Рыльский Ю.Г., начальник бюджетно-аналитического отдела Груздев М.Е., от ИВГПУ ассистент кафедры «Архитектура и реставрация» Огурцов А.В., составили настоящий акт о том, что 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 83,6 %. Результаты компьютерных экспериментов определили скорость транспортирования сыпучего материала по сити, которая составила 12,6 см/с при следующих технологических параметрах грохочения: угол наклона сита – 12о, амплитуда колебаний – 3,2 см, частота колебаний – 16,2 Гц. Ожидаемый экономический эффект от данного предложения составит 850 тысяч рублей в год.

От ООО «Хромцовский карьер»
начальник производственно-технического отдела

начальник бюджетно-аналитического отдела

от ИВГПУ

ассистент кафедры А и Р

Рыльский Ю.Г.

Груздев М.Е.

Огурцов А.В.

Пример программного кода для моделирования виртуальной установки для фракционирования сыпучих материалов.

```

max utility mode
max create mode
Cylinder smooth:on heightsegs:5 capsegs:1 sides:18 height:20.8975 radius:0.5
mapcoords:on realWorldMapSize:on pos:[-0.14679,0.337906,0] isSelected:on
max modify mode
$.radius = 0.5
$.heightsegs = 1
$.height = 120
max move
toolMode.coordsys #view
max tti
max rotate
clearSelection()
select $Cylinder001
actionMan.executeAction 0 "40114" -- Edit: Array
max array
clearSelection()
select $Cylinder001
actionMan.executeAction 0 "40213" -- Edit: Clone
maxOps.cloneNodes $ cloneType:#copy newNodes:&nnl
select nnl
max rotate
max tti
max undo
$.height = 240
actionMan.executeAction 0 "40114" -- Edit: Array
max array
select $Cylinder042
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Poly"
$.EditablePoly.attach $Cylinder001 $
$max move
clearSelection()
max create mode
Box lengthsegs:1 widthsegs:1 heightsegs:1 length:240 width:3 height:60 mapcoords:on realWorldMapSize:on
pos:[131.331,90.7829,0] isSelected:on
max move
max tti
select $Box002
max tool maximize
move $ [-0.327867,0,0]
select $Cylinder042

```

```

max modify mode
$.EditablePoly.attach $Box001 $
$.EditablePoly.attach $Box002 $
clearSelection()
Circle radius:0
max tool maximize
$.radius = 15.0038
max modify mode
$.radius = 8
max move
max tti
clearSelection()
select $Cylinder042
macros.run "Constraints" "Path"
macros.run "Track View" "Maximize_Trackbar"
max time play
max time start
sliderTime = 0f
macros.run "Track View" "Maximize_Trackbar"
max rotate
max tti
max undo
rotate $ (angleaxis -7.06138 [-1,0,0])
max move
select #($Cylinder042, $Circle001)
move $ [0,0.970665,0]
sliderTime = 0f
max create mode
Box lengthsegs:1 widthsegs:1 heightsegs:1 length:0 width:0 height:0 mapcoords:on realWorldMapSize:on
max tool maximize
$.width = 0
max move
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Poly"
subobjectLevel = 4
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{6}
max rotateview
max move
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{4, 6}
$.faceExtrudeHeight = 2
$.EditablePoly.buttonOp #Extrude
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{13}
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{9, 13}
$.EditablePoly.buttonOp #Extrude
move $.selectedFaces [0,25.0469,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{3}
max rotateview

```



```

max move
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{3, 5}
$.EditablePoly.buttonOp #Extrude
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{25}
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{25, 29}
$.EditablePoly.buttonOp #Extrude
move $.selectedFaces [0,24.147,0]
subobjectLevel = 0
move $ [0,25.5584,0]
actionMan.executeAction 0 "40213" -- Edit: Clone
maxOps.cloneNodes $ cloneType:#copy newNodes:&nnl
select nnl
move $ [272.791,0,0]
subobjectLevel = 1
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{17, 20, 22..23, 37..40}
move $.selectedVerts [-7.53982,0,0]
subobjectLevel = 0
select #($Circle001, $Cylinder042)
move $ [0,-2.45596,0]
max display mode
max utility mode
max create mode
GeoSphere realWorldMapSize:on pos:[1.22102,2.1017,0] isSelected:on radius:5 segs:6
max move
toolMode.coordsys #view
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Poly"
subobjectLevel = 1
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{}
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{}
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{54}
$.useSoftSel = on
$.falloff = 5.4
max tool maximize
move $.selectedVerts [0.695607,-1.16097,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{33}
move $.selectedVerts [0,-1.23103,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{262}
move $.selectedVerts [-0.637656,1.00191,0]
$.falloff = 4.914
move $.selectedVerts [-0.171415,0.335164,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{286}
move $.selectedVerts [1.83258,0.697707,0]
$.ssUseEdgeDist = off
$.falloff = 5.01228
$.pinch = 1.23
move $.selectedVerts [0.399588,-0.00282037,0]

```

```

$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{13}
move $.selectedVerts [0,0,-0.956974]
$.bubble = 1.62
move $.selectedVerts [-0.106215,-1.12873,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{8}
move $.selectedVerts [0.229278,0.278207,0]
$.useSoftSel = off
subobjectLevel = 4
$.EditablePoly.SetSelection #Face #{478}
$.useSoftSel = on
$.pinch = 0.3198
$.bubble = -0.5508
$.falloff = 4.00982
move $.selectedFaces [0,0.873136,0]
$.surfSubdivide = on
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Mesh"
modPanel.addModToSelection (optimize ()) ui:on
$.modifiers[#Optimize].autoEdge = on
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Poly"
subobjectLevel = 1
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{228}
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{409}
$.useSoftSel = on
$.falloff = 4
move $.selectedVerts [0.518172,-0.964814,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{534}
move $.selectedVerts [-0.547428,-0.634274,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{508}
move $.selectedVerts [0.37994,0.185774,0]
$.EditablePoly.SetSelection #Vertex #{469}
move $.selectedVerts [0.898546,0.46134,0]
subobjectLevel = 0
modPanel.addModToSelection (optimize ()) ui:on
deleteModifier $ 1
$.surfSubdivide = on
$.EditablePoly.resetSlicePlane ()
$.EditablePoly.setSlicePlane [0,0,-1] [2.55374,-2.1017,0.573255] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [0.70711,0,0.707103] [2.54197,-2.1017,0.585024] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [0.447214,0,0.894427] [2.5302,-2.1017,0.585024] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.274722,0,0.961524] [2.47135,-2.1017,0.549716] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.5547,0,0.83205] [2.34189,-2.1017,0.432022] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.561502,0,0.827476] [2.22419,-2.1017,0.349636] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.606673,0,0.794951] [2.1065,-2.1017,0.231942] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.612824,0,0.79022] [1.97704,-2.1017,0.126017] 4.77158

```

```

$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.609026,0,0.79315] [1.89465,-2.1017,0.0671699] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.615644,0,0.788024] [1.80049,-2.1017,-0.0152161] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.624695,0,0.780869] [1.78872,-2.1017,-0.0387549] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.627525,0,0.778596] [1.76519,-2.1017,-0.0622937] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.620403,0,0.784283] [1.76519,-2.1017,-0.0505243] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.613124,0,0.789987] [1.76519,-2.1017,-0.0387549] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.603858,0,0.797092] [1.77696,-2.1017,-0.0152161] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.6,0,0.8] [1.80049,-2.1017,0.00832275] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.583636,0,0.812015] [1.80049,-2.1017,0.0318616] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.566529,0,0.824042] [1.80049,-2.1017,0.0554004] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.55769,0,0.83005] [1.80049,-2.1017,0.0671699] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.563744,0,0.82595] [0.660535,0.384856,-0.71893] 4.77158
$.EditablePoly.slice [-0.563744,0,0.82595] [0.660535,0.384856,-0.71893]
$.EditablePoly.setSlicePlane [0,0,-1] [-1.28309,-2.1017,1.86789] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.707107,0,-0.707107] [-1.27132,-2.1017,1.85612] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.948683,0,-0.316228] [-1.27132,-2.1017,1.83258] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.919145,0,-0.39392] [-1.24779,-2.1017,1.78551] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.868243,0,-0.496139] [-1.18894,-2.1017,1.70312] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.880471,0,-0.4741] [-1.11832,-2.1017,1.56189] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.834773,0,-0.550595] [-0.918242,-2.1017,1.31473] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.814955,0,-0.579524] [-0.906472,-2.1017,1.33827] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.8,0,-0.6] [-0.894703,-2.1017,1.35004] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.784416,0,-0.620236] [-0.882934,-2.1017,1.36181] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.777245,0,-0.629198] [-0.882934,-2.1017,1.37358] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.768221,0,-0.640184] [-0.871164,-2.1017,1.37358] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.829266,0,-0.558854] [-0.918242,-2.1017,1.3265] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.842922,0,-0.538035] [-0.930011,-2.1017,1.31473] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.855915,0,-0.517116] [0.502316,0.384856,-1.08727] 4.77158
$.EditablePoly.slice [-0.855916,0,-0.517116] [0.502316,0.384856,-1.08727]
$.EditablePoly.setSlicePlane [0,0,-1] [1.14141,-2.1017,2.03266] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-1,0,0] [1.14141,-2.1017,1.99735] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.997459,0,0.071247] [1.12964,-2.1017,1.86789] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.98387,0,0.178885] [1.09433,-2.1017,1.77374] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.989203,0,0.146549] [1.09433,-2.1017,1.71489] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.993533,0,0.113547] [1.09433,-2.1017,1.62073] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.985622,0,0.168964] [1.07079,-2.1017,1.62073] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.979457,0,0.201653] [1.05902,-2.1017,1.6325] 4.77158
$.EditablePoly.setSlicePlane [-0.966705,0,0.255892] [0.39011,0.384856,-0.805571] 4.77158
$.EditablePoly.slice [-0.966705,0,0.255893] [0.39011,0.384856,-0.805571]
macros.run "Modifier Stack" "Convert_to_Mesh"
modPanel.addModToSelection (optimize ()) ui:on
$.modifiers[#Optimize].autoEdge = on

```