

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**Гриценко Михаил Алексеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ВИБРОГРОХОТАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
ТРАЕКТОРИЕЙ КОЛЕБАНИЙ СИТ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Огурцов  
Валерий Альбертович

Иваново - 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.   СОВРЕМЕННОЕ                   СОСТОЯНИЕ                   ПРОБЛЕМЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ   СЫПУЧИХ   МАТЕРИАЛОВ   НА ВИБРОГРОХОТАХ   С   РАЗЛИЧНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ КОЛЕБАНИЙ СИТ.....	11
1.1.  Современные конструкции классифицирующего оборудования с различными траекториями колебаний сит.....	12
1.2.  Моделирование составляющих процесса фракционирования сыпучих материалов   на   просеивающих   поверхностях вибрационных грохотов: движения частиц по виброожигенному слою, транспортирования сыпучего материала по вибрирующему ситу, проникновения частиц проходowych фракций через отверстия сита.....	21
1.3.  Выводы по главе 1. Постановка задач исследований.....	36
2.   НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ КОЛЕБАНИЙ СИТА...	38
2.1.  Конструкции вибрационных грохотов с пространственной траекторией колебаний сит.....	38
2.2.  Предлагаемая конструкция вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита.....	46
2.3.  Выводы по главе 2.....	49
3.   МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ   МАТЕРИАЛОВ   НА   ВИБРОГРОХОТАХ   С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ КОЛЕБАНИЙ СИТ...	50
3.1.  Математическая модель процесса грохочения, основанная на теории цепей Маркова.....	50
3.2.  Определение числа соударений частиц с просеивающей	

	поверхностью грохота.....	52
3.3.	Имитационная модель определения вероятности беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита вибрационного грохота при одном соударении...	57
3.4.	Влияние порозности сыпучего слоя на основные характеристики процесса грохочения.....	66
3.5.	Выводы по главе 3.....	70
4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ГРОХОЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	72
4.1.	Методика и цели экспериментального исследования.....	72
4.2.	Расчетно-экспериментальное исследование кинетики грохочения двухкомпонентной смеси на лабораторной установке периодического действия.....	74
4.3.	Расчетно-экспериментальное исследование кинетики грохочения многокомпонентной смеси на лабораторной установке периодического действия.....	79
4.4.	Выводы по главе 3.....	88
5.	ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	89
5.1.	Применение разработанных моделей и программно-алгоритмического обеспечения на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область).....	89
5.2.	Методика определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» (г. Иваново).....	96
5.3.	Выводы по главе 4.....	107
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	129

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Для современного дорожного строительства необходимы высококачественные сыпучие материалы: щебень, гравий, песок. Требования к фракционному составу сыпучих материалов постоянно возрастают. Так с июля 2015 года в Российской Федерации был введен в действие ГОСТ 32703-2014 "Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования" (для строительства, ремонта, капитального ремонта, реконструкции автомобильных дорог общего пользования). Новые требования распространяются на минеральную составляющую сыпучего сырья при приготовлении асфальтобетонных смесей. Основным различием между старыми и новыми требованиями к фракционному составу сыпучего сырья для асфальтобетонной смеси является наличие большего количества узких фракций щебня и гравия. Появились требования к фракциям, где размер частиц определяется до десятых долей миллиметра. Реализация этих требований возлагается на различные классификаторы, в том числе современные вибрационные грохоты. Создание принципиально нового эффективного классифицирующего оборудования позволяет получить сыпучие материалы требуемого фракционного состава. Поэтому представляется актуальным разработка достоверных математических моделей для расчета аппаратов, де интенсифицируется процесс воздействия просеивающей поверхности на слой сыпучего материала за счет создания пространственных траекторий колебаний сита, что улучшает качество отсева.

**Степень разработанности темы.** Разработкой моделей грохочения и методик определения технологических параметров процесса занимались российские и зарубежные ученые: Л.А. Вайсберг, И.И. Блехман, В.А. Бауман, Е.А. Непомнящий, В.А. Перов, П.С. Ермолаев, И.В. Пономарев, О.Н. Тихонов, В.С. Богданов, Р. Уорнер, Ф. Прокат, Э. Рамлер, О. Молерус, А. Майнель, Х. Шуберт и многие другие. Наиболее перспективным подходом к исследованию закономерностей переработки сыпучих сред, в том числе грохочения, является теория цепей Маркова, которая эффективно описывает эволюцию дисперсных

сред, где доминируют случайные свойства. Эта теория использовалась в работах В.Е. Мизонова, Р.М. Алояна, С.В. Федосова, В.П. Жукова, В.А. Огурцова, З. Бернотата, А. Бертье и других. В диссертационной работе развивается данный подход для моделирования процесса грохочения на аппаратах, в которых сито совершает пространственные траектории колебаний.

**Цель работы** – повышение эффективности фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах с пространственной траекторией колебаний сит при решении задач по обоснованию технологических параметров классифицирующего оборудования, основанного на математическом моделировании и экспериментальных исследованиях процесса грохочения.

**Задачи исследования:**

1. Разработать новую конструкцию вибрационного грохота, обеспечивающую интенсивное воздействие сита на слой сыпучего материала за счет создания пространственных траекторий движения просеивающей поверхности с независимыми параметрами колебаний в плоскости сита и в направлении перпендикулярном этой плоскости.
2. Разработать ячеечную модель процесса грохочения, основанную на теории цепей Маркова, учитывающую пространственную траекторию движения просеивающей поверхности грохота.
3. Доказать эффективность процесса отсева на ситах, совершающих колебания по пространственным траекториям, в сравнении с процессом отсева на ситах, которые совершают колебания по типовым траекториям.
4. На основе динамической модели движения ансамбля частиц на вибрирующем сите разработать методику расчета скорости проникновения проходных частиц через просеивающую поверхность, учитывающую соотношение размера частиц к размеру отверстия сита, амплитуды и частоты горизонтальных и вертикальных колебаний грохота, частоту соударений частиц с просеивающей поверхностью.
5. Исследовать с помощью средств компьютерного моделирования зависимость вероятности проникновения частиц различной крупности через отверстия сита от параметров вибровоздействия грохота на сыпучую среду.

6. Исследовать влияние вибрационных режимов предложенной конструкции грохота на основные технологические показатели процесса фракционирования: эффективность отсева и производительность классифицирующего аппарата.

7. Доказать правомерность методики компьютерного определения скорости проникновения частиц через отверстия сита с помощью экспериментальных исследований процесса грохочения сыпучих материалов на установке периодического действия.

8. Разработать рекомендации по технологическим параметрам работы грохотов в промышленных условиях, обеспечивающих заданную эффективность процесса фракционирования.

***Научная новизна:***

1. Разработана ячеечная модель процесса грохочения для аппаратов, у которых просеивающая поверхность совершает колебания по сложным заранее заданным пространственным траекториям.

2. Предложена методика определения скорости проникновения частиц через отверстия сита для проходовых частиц различной крупности, основанная на математическом описании движения ансамбля частиц над просеивающей поверхностью с помощью одномерной версии метода дискретных элементов. Учитываются параметры вертикальной составляющей пространственных колебаний сита грохота, коэффициенты восстановления скорости при ударе частиц друг о друга и о просеивающую поверхность.

3. Разработан компьютерный метод определения вероятности проникновения частиц различной крупности через отверстия сита, совершающего колебания по траекториям различных форм.

4. Выявлено влияние интенсивности колебаний сита, определяемой критерием Фруда, на локальную и среднюю порозность материала в слое, что позволяют более адекватно моделировать и рассчитывать технологические показатели процесса вибрационной сепарации: степень извлечения частиц проходовых фракций из исходного сырья и производительность машин для фракционирования сыпучих материалов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработана ячеечная модель процесса грохочения, отличающаяся от известных тем, что учитывает пространственные траектории колебаний сита грохота. Безразмерная скорость проникновения частиц через просеивающую поверхность в матрице переходных вероятностей ячеечной модели процесса грохочения определяется методами компьютерного моделирования. Разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских и проектных задач применялись на асфальтобетонном заводе ДС-168(Тейковский район, Ивановская область, ООО «Тейковская земельная компания»), где за счет замены просеивающей поверхности грохота уменьшена замельченность товарной фракции 5 – 10 мм. Используя методику определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» был рекомендован передвижной сортировочный узел УМС-400 производства ЗАО «ДОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области, обеспечивающий необходимую производительность и качество отсева, для работы на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область). Ячеечная модель процесса грохочения сыпучего материала на вибрационном аппарате с пространственной траекторией колебаний сита включена в состав учебного курса для аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования».

**Методология и методы исследования.** Математическое моделирование процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах с пространственной траекторией колебаний сита основана на математическом аппарате теории цепей Маркова, описывающем процессы переработки сыпучих строительных материалов. Параметрическая идентификация модели выполнена на основе результатов компьютерных и лабораторных экспериментов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Ячеечная модель фракционирования сыпучего материала на грохоте с ситом, совершающем колебания по пространственным траекториям, в которой



безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия просеивающей поверхности определяется компьютерными методами.

2. Математическая модель движения ансамбля частиц над вибрирующей поверхностью грохота, основанная на одномерной версии метода дискретных элементов, позволяющая описывать кинематические характеристики движение каждой частицы ансамбля с учетом соударений друг о друга и поверхностью сита грохота.

3. Результаты компьютерных экспериментов по определению влияния амплитудо-частотных характеристик колебаний грохота, размеров частиц на вероятность их проникновения через отверстия сита.

4. Результаты экспериментальной проверки ячеечной модели процесса фракционирования на лабораторном стенде.

5. Результаты внедрения результатов исследования процесса фракционирования сыпучих материалов на предприятиях по строительству и реконструкции автомобильных дорог.

***Степень достоверности полученных результатов.*** Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования и удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных значений показателей процесса грохочения, применением современных программных систем.

***Апробация результатов работы.*** Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих отечественных и международных конференциях: XIX Международном научно-практическом форуме «SMARTEX-2016», XV Международной научной конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологий (Бенардосовские чтения)», Иваново, 2011, 2017; Международной НК «Информационная среда вуза», Иваново, 2010-2012, 2015; V Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов». Иваново, 2015; VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия

2012»; Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Поиск 2016», «Поиск 2017».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе, 4 работы в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК, 1 из них в издании, индексируемом Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация общим объемом 140 страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, списка использованных источников (144 наименования).

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ КОЛЕБАНИЙ СИТ**

Фракционирование (грохочение) – процесс разделения частиц сыпучего материала по размерам на вибрирующем сите. Материал, подаваемый на вибрирующее сито, приходит в псевдооживленное состояние. Мелкие частицы двигаются по слою сыпучего материала к просеивающей поверхности и проникают через ее отверстия. При этом смесь из крупных и мелких частиц перемещается по грохоту вдоль сита. Процесс грохочения считается тем эффективнее, чем большее количество частиц, размер которых меньше размера отверстия сита, проникают в подситовое пространство.

Проблемой интенсификации процесса фракционирования, модернизацией и совершенствованием вибрационных грохотов, определением технологических параметров процесса, обеспечивающих максимальную производительность аппаратов и максимальную степень извлечения частиц мелких фракций из сыпучей среды занимались отечественные и зарубежные ученые и 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, И.Ф. Гончаревич, О.Н. Тихонов., Е.А. Непомнящий, В.В. Гортинский, В.Я. Хайнман, В.Н. Потураев, А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, Н.Г. Картавый, А.В. Кондратьев, В.С. Богданов, В.Е. Мизонов, Р.М. Алоян, С.В. Федосов, В.П. Жуков, В.А. Огурцов, А.Е. Пелевин, Р. Уорнер, Ф. Прокат, Э. Рамлер, О. Молерус, А. Майнелль, Х. Шуберт, Ж. Феррера, У. Прети и многие другие [1-32,62-64, 130-144].

В последние годы интерес российских и зарубежных конструкторов направлен на создание вибрационных грохотов со сложной пространственной траекторией колебаний сит. Несмотря на многообразие теоретических моделей процесса фракционирования и методик расчета основных технологических показателей режимов работы классифицирующего оборудования, исследование

влияния траектории колебаний на протекание процесса не проводилось. Исследованию этой проблемы посвящена данная работа.

### **1. 1. Современные конструкции классифицирующего оборудования с различными траекториями колебаний сит**

На современных предприятиях по переработке сыпучих материалов строительной, горно-обогатительной, химической, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности применяют вибрационные грохоты. Они занимают более 90 % рынка грохотов, предлагаемых различными предприятиями и фирмами обогатительного оборудования [1-4]. Вибрация сита создается за счет динамического или кинематического вибропривода. При этом сито совершает круговые, эллиптические, прямолинейные или сложные (пространственные) колебания. Поэтому принято делить вибрационные грохоты по форме траектории колебаний. Если в структуру условного обозначения включается буква И, то сито грохота совершает круговые или эллиптические колебания. Это инерционные грохоты. Буквой С обозначают грохоты с прямолинейными колебаниями сита. Сочетание букв ИС в условном обозначении соответствует грохотам с самосинхронизирующимися вибровозбудителями, сита которых совершают колебания, близкие к прямолинейным. В структуру условного обозначения резонансных грохотов включается буква Р. Сита таких грохотов совершают колебания по сложным траекториям [1-4].

На рисунке 1.1. показана кинематическая схема инерционных грохотов, сита которых совершают колебания по круговым или эллиптическим траекториям. Короб с ситом совершает колебания под действием сил инерции дебаланса. Если ось маховиков, на которых расположены неуравновешенные массы, проходит близко от центра масс короба, то точки сита совершают движение по окружностям или эллипсам, близким по форме к этим окружностям. Радиус этих окружностей или амплитуда колебаний сита регулируется массой и

эксцентриситетом дебалансов. Частота колебаний сита регулируется частотой вращения оси маховиков с неуравновешенными массами.

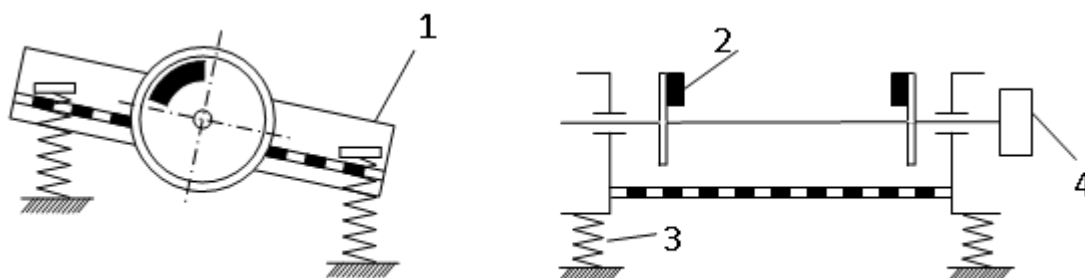


Рисунок 1.1. Кинематическая схема инерционного грохота:

1 – короб с ситом; 2 – дебаланс; 3 – пружины; 4 – шкив ременной передачи от электродвигателя

Сита гирационных грохотов, имеющих эксцентриковый вибропривод, так же совершают колебания по круговым траекториям. На рисунке 1.2. показана кинематическая схема такого грохота.

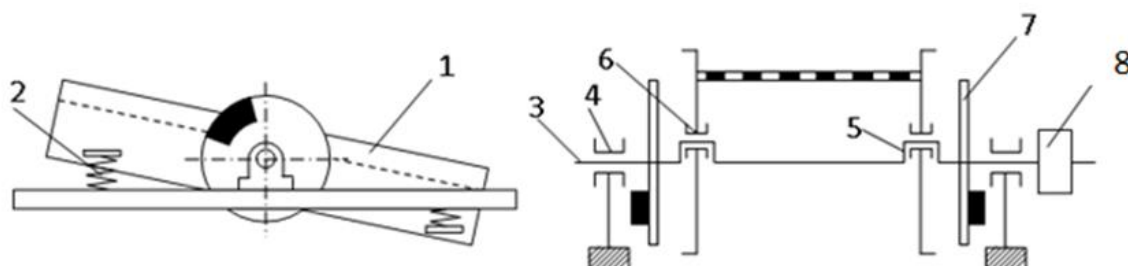


Рисунок 1.2. Кинематическая схема гирационного грохота:

1 – короб с ситом; 2 – пружины; 3 – эксцентриковый вал; 4 – неподвижные подшипники; 5 – эксцентриковые заточки; 6 – подшипники, наружная обойма которых укреплена в коробе грохота; 7 – маховики с дебалансами для уравнивания сил инерции короба грохота; 8 – шкив ременной передачи от электродвигателя

Гириационный грохот не чувствителен к изменению массы сыпучего материала, подаваемого на сито. Однако конструкция гириационного грохота сложнее, чем инерционного. Выпуск в России гириационных грохотов прекращен. Однако за рубежом продолжается выпуск и совершенствование гириационных грохотов. Примером является грохот Niagara® фирмы Haver & Boecker (Германия) [1,4, 31,32].

Сита самобалансных грохотов (рисунок 1. 3) совершают колебания по прямолинейным траекториям. Колебания просеивающей рабочей поверхности осуществляется за счет сил инерции, которые создаются вибровозбудителем, состоящим из двух одинаковых неуравновешенных масс, вращающихся на параллельных валах с одинаковой скоростью в противоположные стороны. Стремятся расположить вибровозбудители таким образом, что при вращении валов результирующая центробежных сил дебалансов проходит через центр тяжести короба. Эта сила, действуя на короб, вызывает его колебания, меняющиеся по закону синусоиды. Подбирают опорные пружины с малой жесткостью. Тогда все точки сита колеблются в вертикальных плоскостях, параллельных между собой, по прямолинейным траекториям под углом к просеивающей поверхности. При этом материал переходит в виброожуженное состояние, движется вперед по ситю. Частицы мелких проходных фракций пробиваются через отверстия сита.

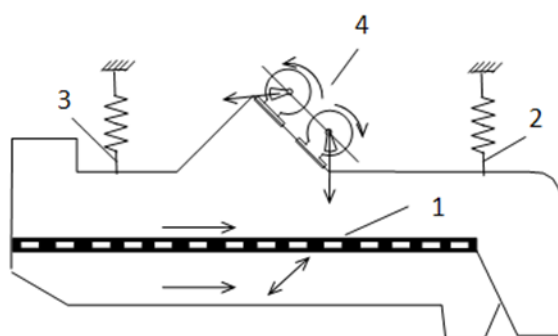


Рисунок 1.3. Схема вибродационного грохота с самобалансным вибратором:

1 – короб с ситом; 2, 3 – амортизаторы; 4 – самобалансный вибратор, обеспечивающий прямолинейные направленные колебания сита грохота

Валы вибровозбудителя могут быть связаны между собой с помощью зубчатой передачи (рисунок 1.4) или чисто динамически (рисунок 1.5).

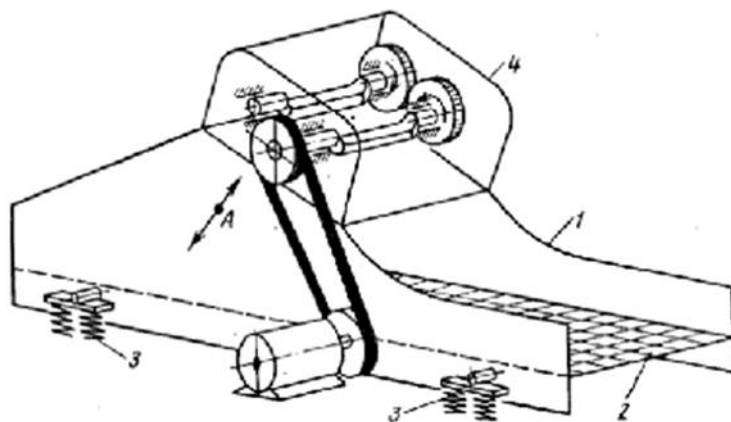


Рисунок 1.4. Схема самобалансного грохота: 1 – короб; 2 – сито; 3 – вертикальные упругие опоры; 4 – вибровозбудитель.

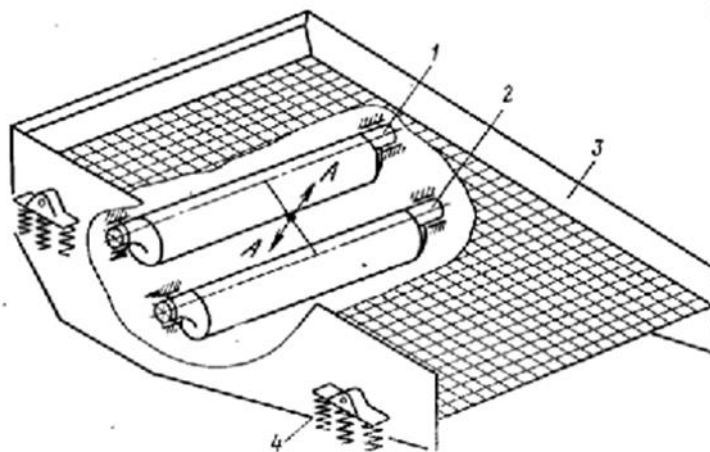


Рисунок 1.5. Схема самобалансного грохота с самосинхронизирующимися вибровозбудителями: 1 и 2 – дебалансные валы; 3 – короб с ситом; 4 – амортизаторы.

Грохот с зубчатым вибровозбудителем называется самобалансным, а грохот без зубчатых передач – самосинхронизирующимся.

В России производят самобалансные грохоты трех типов: легкие (ГСЛ), средние (ГСС) и тяжелые (ГСТ).

Самосинхронизирующийся грохот имеет два дебалансных вибровозбудителя. Они независимы и непосредственно не связанные между собой передачей. Их валы приводятся во вращение разными электродвигателями. Дебалансы вращаются в противоположном направлении с одной и той же угловой скоростью и с одной и той же фазой вращения в результате автоматической синхронизации и самофазировки. Этот механический эффект – самосинхронизация вращения кинематически несвязанных неуравновешенных роторов обнаружен и изучен в научно-производственной корпорации «Механобр - техника» И.И. Блехманом и его коллегами.

Открытие явления самосинхронизации неуравновешенных роторов определило создание новых типов виброгрохотов (рисунок 1.6), короб с ситами которых совершает прямолинейные колебания. Так как кинематические связи между дебалансными вибровозбудителями отсутствуют, то их можно располагать произвольным образом. Это обеспечивает гибкую конструктивную схему грохота. Габариты грохота ограничены работоспособностью подшипников качения. Использование двух и более вибраторов на одном рабочем органе уменьшает нагрузку на каждый подшипник вибратора, так как она делится на общее число подшипников. Предложенная сотрудниками НПК «Механобр - техника» схема позволяет разрабатывать конструкции грохотов с просеивающими поверхностями больших размеров.

Движение сыпучего материала может осуществляться при горизонтальном расположении сит. Это приведет к уменьшению высоты монтажа грохота. Самобалансные грохоты применяются на дробильно-сортировочных заводах и передвижных установках.



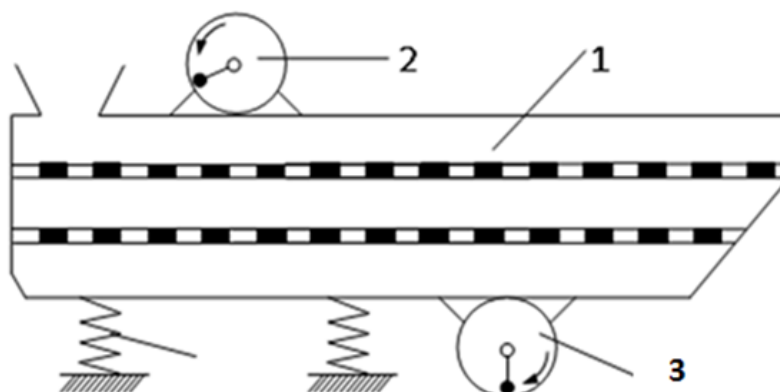


Рис. 1.6. Схема двухситового грохота с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями: 1 – короб с ситами; 2 – вибровозбудители; 3 – виброизолирующие опоры

Просеивающие поверхности резонансных грохотов (рисунок 1.7) совершают колебания по сложным траекториям. Резонансный грохот является колебательной системой из двух масс, которыми являются короб с ситом и рама. Короб и рама связаны пружинами. Кинематический привод с помощью упругого шатуна передает колебания коробу с ситом и через пружины раме. Подбирают частоту колебаний короба равной частоте собственных колебаний системы. Создается резонансный режим. Амплитуда колебаний короба и рамы возрастает. Основным недостатком резонансных грохотов является сложность конструкции, поэтому они не имеют широкого применения в России. Резонансные виброгрохоты в качестве вибровозбудителя могут использовать электромагнитные вибраторы. Преимуществами электромагнитных вибраторов являются отсутствие вращающихся и трущихся частей. К недостаткам можно отнести неравномерность значений амплитуды колебаний по длине сита грохота.

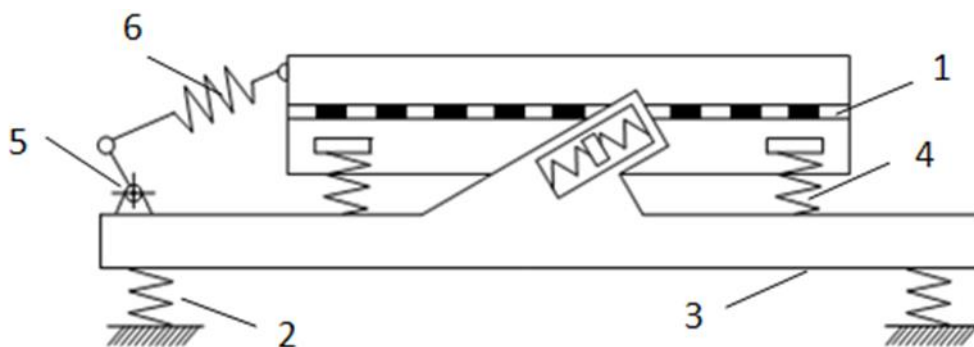


Рисунок 1.7. Схема резонансного вибрационного грохота (1 – короб с ситом; 2 – упругие амортизаторы; 3 – уравнивающая рама; 4 – упругая связь; 5 – эксцентриковый привод; 6 – упругий шатун)

Известны грохоты, у которых просеивающая поверхность совершает волнообразное движение. С помощью подвижных рычагов передается вибрация участкам сита, которые движутся с различными траекториями. Примером такого грохота является аппарат фирмы IFE (Австрия) (рисунок 1.8). В начале просеивающей поверхности его точки движутся по окружности, в середине – по прямой, в конце – по эллипсу. Сито изготовлено из полиуретана или резины. Ускорение, с которым движутся его точки, может достигать 50 g.

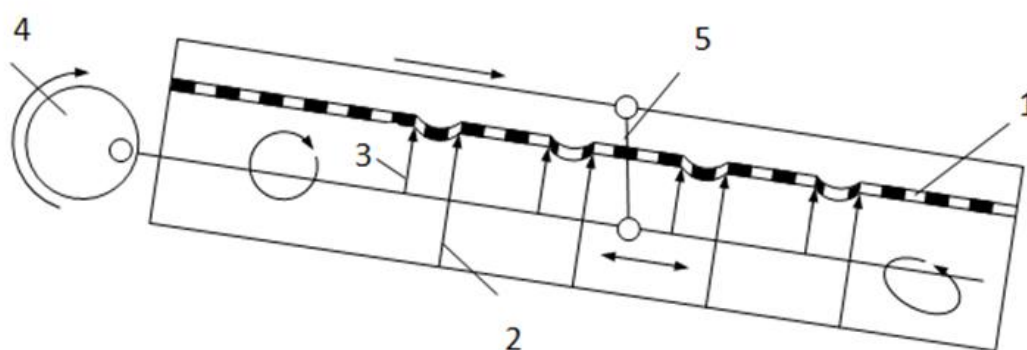


Рисунок 1.8. Схема грохота с просеивающей поверхностью типа Trisomat: 1 – просеивающая поверхность; 2 и 3 – качающиеся рычаги – коромысла; 4 – кривошипный привод; 5 – шарнирная связь

Грохота компании Astec Mobile Screens серии PEP Vari-Vibe® и Duo-Vibe® имеют различные амплитуды и частоты колебаний по длине просеивающей поверхности. Конструкторы данных грохотов полагают, что для эффективного грохочения мелкого сыпучего материала сито должно совершать колебания с небольшими амплитудами и высокими частотами, а крупнокускового материала – с низкими частотами и большими амплитудами [1,31,32,101].

Оригинальные траектории колебания имеют просеивающие поверхности грохотов, использующих систему flip-flop, производимых фирмами, такими как IFE System AB, Action Equipment Company, Eurogomma. Эти грохота применяются для материалов, склонных к забиванию ячеек сита.

Преимущества грохотов фирмы AURY Flip Flop проявляются при грохочении «трудногрохотимых» материалов [69]. Это объясняется особенностью движения просеивающей поверхности грохота. Просеивающая поверхность данных грохотов совершает волнообразные движения, сообщая частицам материала ускорение до 50g, что обуславливает их высокую эффективность при отсеивании материала с большим содержанием влаги, мелких частиц и глинистых включений, эффективности грохочения [1-4,31,32].

Фирмы TRIO Engineered Products Inc, IFE System AB, Henan Winner Vibrating Equipment Co, Weir Minerals создали и используют вибрационные грохоты типа «Банан». Угол наклона просеивающей поверхности изменяется по длине грохота. Сита имеют от двух до шести наклонных участков. Частицы сыпучего материала имеют различные скорости движения. Высокие амплитуды и частоты колебаний обеспечивают требуемую эффективность грохочения [1-4].

Виброударное воздействие на просеивающую поверхность используется в многочастотных вибрационных грохотах Ultimate Screener™ по технологии фирмы Kroosh Technologies Ltd. (Израиль). На сито передают колебания резонирующие била с различными амплитудами и частотами. Некоторые точки сита достигают ускорений более 1000 g . Получается огромное многообразие траекторий движения участков просеивающей поверхности. Каждой частице сыпучей среды передается своя резонансная частота. Происходит эффективное

расслоение сыпучего материала. По мнению представителей фирмы, эффективность отсева может достигать 99 %. Сита изготавливают металлические, нейлоновые, полиэстеровые, полиуретановые с размером отверстий сита от 2 мкм до 30 мм [1].

Многообразие конструкций грохотов, у которых просеивающие поверхности совершают колебания по сложным траекториям, которые так же разнообразны, говорит о том, что однозначного ответа на вопрос об определении оптимальной траектории колебаний сита грохота для наиболее эффективного отсева конкретного сыпучего материала не существует. Даже в простейшем случае, выбирая из типовых аппаратов оборудование для грохочения, например, гравийно-песчаных смесей, нельзя однозначно ответить, какой траектории колебаний сита следует отдать предпочтение: прямой или окружности, то есть какой грохот выбрать: самобалансный или инерционный. Эффективность грохочения и рекомендуемая производительность машин для сит с одинаковыми размерами габаритов просеивающих поверхностей и ячейки отверстий сит, указанная в рекламных материалах фирм – изготовителей, у таких аппаратов примерно одинаковая.

Дополнительную сложность в решение этой проблемы вносит вопрос о выборе амплитудо-частотных параметров колебаний грохота. Очевидно, что на качество продуктов грохочения влияет не только форма траектории колебаний сита грохота, но и значения амплитуд и частот этих колебаний. В технической литературе, посвященной проблеме грохочения, очень мало эмпирических данных, отражающих влияние амплитуд и частот колебаний грохота на качество его работы. В условиях промышленного производства щебня, гравия и песка параметры колебаний грохотов берутся из рекомендаций фирм производителей или из практического опыта и интуиции технологов. Теоретическое рассмотрение этой проблемы полностью отсутствует. Поэтому актуальность данной работы несомненна.

## **1.2. Моделирование составляющих процесса фракционирования сыпучих материалов на просеивающих поверхностях вибрационных грохотов: движения частиц по виброоживленному слою, транспортирования сыпучего материала по вибрирующему сити, проникновения частиц проходовых фракций через отверстия сита**

Математическая модель должна учитывать все многообразие взаимосвязанных процессов, происходящих при грохочении. Это движение частиц различной крупности по слою, подверженному вибровоздействию со стороны сита грохота, проникновение мелких проходовых зерен через отверстия сита, движение сыпучего материала по просеивающей поверхности грохота. Математическая модель должна выдать итоговую характеристику работы грохота, которой является гранулометрический состав продуктов отсева, зависящий от способа ведения процесса. Этот способ определяется типом аппарата и просеивающей поверхности, режимом колебаний грохота, производительностью, физико-механическими свойствами сыпучей среды.

Целью математического моделирования является определение показателей работы грохота. Однако, к сожалению, в большинстве моделей нет согласования процессов движения мелких частиц по виброоживленному слою, их проникновения через отверстия сита и вибротранспортирования сыпучей среды по просеивающей поверхности грохота [1]. Выбор эффективных технологических и конструктивных параметров грохота по этим моделям, обеспечивающих высокие показатели работы грохота, как при эксплуатации, так и при проектировании классифицирующего оборудования весьма затруднителен.

Наибольших успехов в описании процессов миграции частиц по виброоживленному слою добился Е.А. Непомнящий, сторонник вероятностного подхода к описанию процесса грохочения. Считая процесс грохочения марковским, Е.А. Непомнящий использовал дисперсионное уравнение для описания блуждания частицы в слое сыпучего материала

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} - V \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – плотность распределения вероятности положения частицы узкого класса крупности, адекватную относительной концентрации частиц данной фракции в некоторый момент времени в некоторой точке пространства,  $D$  – коэффициент макродиффузии,  $V$  – скорость сегрегации, которые считаются постоянными в течение всего процесса грохочения. В качестве начальных условий к уравнению (1.1) применялись различные варианты распределения частиц рассматриваемой фракции по слою сыпучего материала в начальный момент времени. В качестве граничного условия использовалась модели, когда сито считалось поглощающим экраном или учитывались условия затрудненного проникновения частиц проходовых фракций через отверстия сита.

В кандидатской диссертации Огурцова В.А. [110] была сделана попытка построения общей математической модели кинетики грохочения, которая позволила бы снизить необходимый объем дорогостоящих экспериментальных исследований и повысить прогностические возможности метода ее расчета, что, в свою очередь, позволило бы избежать ошибок при проектировании. Использовалась гипотеза Непомнящего Е.А. о представлении блуждания частицы в сыпучем слое одномерным марковским процессом.

Уравнение (1.1) удовлетворяло граничным и начальным условиям:

$$D \frac{\partial \rho}{\partial x} + C\rho \Big|_{x=h_1} = 0, \quad (1.2)$$

$$D \frac{\partial \rho}{\partial x} + C\rho \Big|_{x=0} = \alpha \rho, \quad (1.3)$$

$$\rho(x, 0) = \frac{1}{h_1}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент просеивания,  $h_1$  – начальная высота слоя.

Условие (1.2) учитывает отсутствие потока частиц через верхнюю границу слоя, условие (1.3) означает, что поток частиц через сито пропорционален их

концентрации. Начальное условие (1.4) соответствует равномерному распределению проходových частиц по высоте слоя.

Автор считал, что для полидисперсного материала с заданными физико-механическими свойствами (гранулометрический состав, плотность грохотимого материала, форма зерен, влажность и другие), который классифицируется на виброгрохотах с заданными конструктивными и технологическими параметрами, коэффициент макроdiffузии, скорость сегрегации, коэффициент просеивания, а также скорость транспортирования сыпучей среды по поверхности сита постоянны в течение всего времени грохочения.

Непрерывно меняющуюся высоту слоя задавалась кусочно-постоянной функцией на  $m$  интервалах длины сита.

Решая уравнение (1.1) с учетом условий (1.2) и (1.3) методом Фурье, автор получил распределение нормированной плотности вероятности положения частицы в конце  $m$ -ого участка сита

$$\bar{\rho}_m(\bar{x}_m, \bar{\tau}_m) = \sum_{k=1}^{\infty} b_{mk} \exp\left[-\left(\psi_{mk}^2 + \frac{S_m^2}{4}\right)\bar{\tau}_m - \frac{S_m}{2}\bar{x}_m\right] \left[ \frac{2\psi_{mk}}{2R_m - S_m} \cos(\psi_{mk}\bar{x}_m) + \sin(\psi_{mk}\bar{x}_m) \right], \quad (1.5)$$

где

$$\bar{\rho}_m = \frac{\rho_m(x, \tau_m)}{\rho_1(x, 0)},$$

$\tau$  – время движения материала в пределах одного участка;

$$\bar{x}_m = \frac{x}{h_m} \quad \text{– безразмерная координата;}$$

$$\bar{\tau}_m = \frac{D}{h_m^2} \tau_m \quad \text{– безразмерное время, которое является аналогом критерию Фурье;}$$

$$S_m = \frac{C}{D} h_m, \quad R_m = \frac{\alpha}{D} h_m \quad \text{– безразмерные диффузионные критерии, аналогичные диффузионному критерию Пекле;}$$

$\psi_{mk}$  – собственные числа трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg}(\psi_{mk}) = \frac{4\psi_{mk}R_m}{4\psi_{mk}^2 + S_m^2 - 2S_mR_m} \quad (1.6)$$

Пользуясь свойством ортогональности собственных функций уравнения (1.5) автор определил безразмерный коэффициент

$$b_{mk} = \frac{\int_0^1 \bar{\rho}_m(\bar{x}_m, 0) \left[ \frac{2\psi_{mk}}{2R_m - S_m} \cos(\psi_{mk}\bar{x}_m) + \sin(\psi_{mk}\bar{x}_m) \right] d\bar{x}_m}{\int_0^1 \left[ \frac{2\psi_{mk}}{2R_m - S_m} \cos(\psi_{mk}\bar{x}_m) + \sin(\psi_{mk}\bar{x}_m) \right]^2 \exp\left(-\frac{S_m}{2}\bar{x}_m\right) d\bar{x}_m} \quad (1.7)$$

Так как распределение частиц  $i$ -й фракции по высоте сыпучего слоя на границе двух смежных участков сита не меняется, то, по мнению автора, выполняется соотношение

$$\bar{\rho}_m(\bar{x}_m, 0) = \bar{\rho}_{m-1}(\bar{x}_{m-1}, \tau_{m-1}) \frac{h_m}{h_{m-1}} \quad (1.8)$$

Высоту слоя на интервале  $m$  определялась выражением

$$h_m = h_1 \left( 1 - \sum_{i=1}^{\Omega} \varepsilon_{i m-1} c_{1i} \right) \quad (1.9)$$

где  $\Omega$  – число проходов фракций;

$c_{1i}$  – содержание  $i$ -й фракции в исходном материале;

$\varepsilon_{i m-1}$  – извлечение  $i$ -й фракции на  $m-1$  участках сита.

Эффективность классификации  $i$ -й фракции по всей длине просеивающей поверхности определялась выражением

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= 1 - \int_0^1 \bar{\rho}_m(\bar{x}_m, \bar{\tau}_m) d\bar{x}_m = \\ &= 1 - \sum_{k=1}^{\infty} b_{mk} \frac{2R_m - \psi_{mk}}{(2R_m - S_m)(\psi_{mk}^2 + \frac{S_m^2}{4})} \exp\left[-\left(\psi_{mk}^2 + \frac{S_m^2}{4}\right)\bar{\tau}_m\right] \end{aligned} \quad (1.10)$$

При известных стохастических коэффициентах, пользуясь выражением (1.10), рассчитывалась кинетика грохочения всех проходов фракций.



Используя метод, позволяющий определить коэффициент макродиффузии и коэффициент просеивания, основанный на сопоставлении экспериментальных кинетик периодической классификации для случаев свободного и затрудненного проникновения частиц через отверстия сита, автор определял все стохастические коэффициенты, участвующие в описании процесса.

В дальнейших работах В.А. Огурцов, его последователи и ученики отказались от использования для описания процесса грохочения дисперсионного уравнения (1.1), так как столкнулись со следующими проблемами. Во-первых, желание получить аналитические решения этого уравнения требует принятия допущений, зачастую выхолащивающих важные физические особенности процесса. Во-вторых, само понятие концентрации частиц в точке оказывается неопределенным и не допускающим экспериментального определения в силу конечности размеров частиц. Поэтому для описания процесса и математического моделирования кинетики грохочения, использовался математический аппарат теории цепей Маркова, как наиболее удобного инструмента для описания случайной миграции частиц внутри ансамбля. Базовые положения приложения этой теории к моделированию процессов в дисперсных средах изложены в работе [1].

Дисперсионное уравнение (1.1) с использованием идеализированного допущения о свободном проникновении проходových частиц через отверстия сита применялось в работах немецких ученых А. Майнеля и Х. Шуберта [1,4, 134]. Авторы ввели коэффициент грохочения

$$k = \frac{A \omega^2}{g \cos \alpha} , \quad (1.2)$$

где  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – частота колебаний сита;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол наклона сита к горизонту. С повышением коэффициента грохочения, по мнению авторов, повышается коэффициент диффузии и скорость сегрегации. Их максимальные значения достигаются при достижении статистического резонанса. Дальнейшее повышение  $k$  снижает стохастические коэффициенты.

Используя уравнения массопереноса О.Н. Тихонов и его последователи получили распределение частиц по слою сыпучего материала, аналогичные решениям А.Н. Непомнящего [1-4, 31-33]. Авторы вводили следующие упрощения: время диффузии мало по сравнению со временем нахождения материала на сите, сегрегацией при малой толщине слоя на промышленном грохоте можно пренебречь, зоне над ситом можно использовать вариант идеального мгновенного перемешивания.

Огромный вклад в методы проектирования грохотов и теорию грохочения внесли руководитель НПК «Механобр-техника» академик Л.А. Вайсберг, его ученики и последователи. Ими предложена двумерная массово-балансная модель процесса грохочения [1-4,62-64]. Рассматривается слой сыпучего материала, который равномерно движется по просеивающей поверхности грохота. Определяется вероятность попадания частицы в некоторую точку пространства. Считается, что в отверстия сита попадают частицы, находящиеся непосредственно над отверстиями. Вероятность этого процесса определяется по известной формуле Годена – Андреева

$$p = \varphi(1 - D/d_0)^\psi, \quad (1.3)$$

где коэффициент  $\psi = 1$  для щелевидных отверстий,  $\psi = 2$  для квадратных отверстий;  $D$  – размер частицы,  $d_0$  – размер отверстия сита (для щелевидных отверстий – наименьший размер);  $\varphi$  – коэффициент живого сечения сита. Определяется извлечение в подрешетный продукт частиц узкого класса крупности и полный выход материала в подрешетный продукт. Получено дифференциальное уравнение кинетики грохочения, из следует аналитическое решение, основанное на предположении об идеальной сегрегации материала. Авторы принимают представление о сегрегации как о мгновенном «взрывообразном» процессе, который заканчивается на начальном участке ситовой поверхности.

Большое внимание процессам переработки сыпучих сред и в частности процессу грохочения уделено в работах В.С. Богданова, его последователей и

учеников [6 – 8]. По мнению авторов, грохочение является самым распространенным и весьма эффективным способом механической классификации сыпучих материалов по фракциям. Для определения основных показателей грохочения (производительности аппарата и эффективности грохочения предлагается использовать эмпирические зависимости, полученные исследователями НПО «ВНИИстройдормаш».

В кандидатской диссертации Е.В. Рудаковой [90], выполненной под руководством В.С. Богданова, рассматривается детерминистическая модель процесса фракционирования сыпучих материалов в спирально-винтовом инерционном грохоте. Предложена модель отсева частиц различной крупности на вибрирующей сетке. Сыпучий материал представляется совокупностью сферических частиц различной крупности, учитываются свойства контактного взаимодействия, основанный на интегрировании дифференциальных уравнений движения частиц. Большой интерес представляет зависимость средней частоты прохождения частиц через сито от размера отверстий сита, радиуса проволоки, амплитуды колебаний грохота.

В настоящее время наряду с детерминистическим подходом для описания процессов переработки сыпучих сред используется стохастический подход. В работах Мизонова В.Е., Алояна Р.М., Федосова С.В., Жукова В.П., Першина В.Ф., Огурцова В.А., З. Бернотата, А. Бертъе, их учеников и последователей для описания процессов переработки дисперсных сред, теплотехнических, химических и других процессов используется ячеечные и близкие к ним модели [1-4, 24-30, 67-75, 81-87 ].

В монографии Мизонова В.Е., Федосова С.В., Огурцова В.А., Огурцова А.В. [1], а также в докторской диссертации Огурцова В.А. [4] рассматривается теория процесса грохочения, с учетом многообразия факторов, определяющих его протекание. Миграция частиц проходовых фракций по виброоживленному слою сыпучего материала описывается с помощью теории цепей Маркова. На рисунке 1.9 показана расчетная схема процесса грохочения.

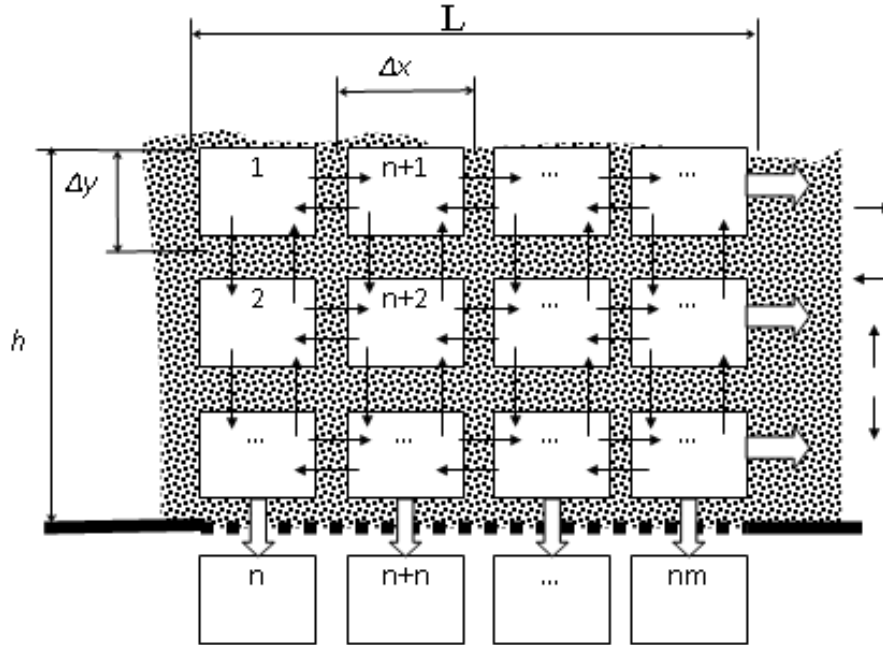


Рисунок 1.9. Расчетная схема и ячеечная модель процесса

Цепь содержит  $n$  строк и  $m$  столбцов ячеек. Слою сыпучего материала, находящегося на сите грохота, соответствует причемя  $(n-1)$  строка. Последняя  $n$ -я строка отведена подситовому пространству, куда попадает подрешетный продукт. Процесс рассматривается через последовательные малые промежутки времени  $\Delta t$  – времена перехода, в течение которых возможен переход из данного состояния (ячейки) в соседние. В  $k$ -ом состоянии распределение материала по ячейкам может быть представлено матрицей состояния

$$\mathbf{S}m^k = \begin{bmatrix} S_1^k & S_{n+1}^k & \dots & S_{n(m-1)+1}^k \\ S_2^k & S_{n+2}^k & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_n^k & S_{n+n}^k & \dots & S_{nm}^k \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

Элементы матрицы показывают относительное содержание частиц наблюдаемой фракции в ячейках. Развитие процесса во времени описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k + S_f^k, \quad (1.5)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, контролирующая переходы фракции между ячейками с течение  $\Delta t$ , а  $S_f^k$  – вектор подачи, описывающий пополнение отдельных ячеек за счет внешних источников.

Матрица  $P$  имеет размер  $(nm) \times (nm)$  и содержит вероятности (доли) перехода материала из одних ячеек в другие в соответствии с разрешенными переходами, показанными на рисунке 1.9. В частности, для цепи ячеек размером  $3 \times 3$  эта матрица имеет вид

$$P = \begin{bmatrix} p_s & p_u & 0 & p_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_d & p_s & 0 & 0 & p_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_f & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_f & 0 & 0 & p_s & p_u & 0 & p_b & 0 & 0 \\ 0 & p_f & 0 & p_d & p_s & 0 & 0 & p_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_f & 0 & 0 & p_s & p_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_f & 0 & p_d & p_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

где  $p_d$ ,  $p_u$ ,  $p_f$ ,  $p_b$ ,  $p_s$  – вероятности перейти в течение  $\Delta t$  из данной ячейки вниз, вверх, вперед, назад и остаться в ячейке, соответственно. Выделяя в этих вероятностях по каждому из двух направлений диффузионные и сегрегационные составляющие, их можно выразить как

$$p_d = v_y + d_y, \quad p_u = d_y, \quad p_f = v_x + d_x, \quad p_b = d_x. \quad (1.7)$$

Безразмерные стохастические коэффициенты определяются как

$$v_x = V_x \Delta t / \Delta x, \quad d_x = D_x \Delta t / \Delta x^2, \quad v_y = V_y \Delta t / \Delta y, \quad d_y = D_y \Delta t / \Delta y^2, \quad (1.8)$$

где  $V_x$  – размерная скорость транспортирования сыпучего материала вдоль грохота,  $V_y$  – направленная вниз скорость сегрегации фракции в слое сыпучего материал,  $D_x$  и  $D_y$  – коэффициенты макродиффузии, учитывающие стохастическую составляющую процесса.

Выход из ячеек  $(n-1)$ -й строки (рисунок 1.9)  $p_d = v_f$ , где  $v_f$  – вероятность пройти через отверстия сита для проходových частиц.

Закономерности процесса проникновения частиц мелких фракций через отверстия сита и расчет величины  $v_f$  получены в результате рассмотрения

динамики движения одиночной частицы над вибрирующей просеивающей поверхностью. При этом принимаются следующие допущения: частица считается материальной точкой, не имеющей формы и размера; удар частицы о поверхность сита считается абсолютно упругим.

На основании полученных закономерностей вычисляется вероятность проникновения частиц через отверстия сита, определяется число соударений частицы в единицу времени с просеивающей поверхностью, которая совершает колебания с различными амплитудами и частотами. При этом вероятность проникновения частицы через отверстия сита при одном соударении определяется по формуле Годена – Андреева.

Процесс транспортирования сыпучего материала по грохоту моделируется движением одиночной частицы. Данные упрощения физической картины процесса при сравнении расчетных и экспериментальных данных кинетики грохочения нивелируются подбором стохастических коэффициентов ячеечной модели.

Следует отметить, что в работах [1,4] наиболее полно и в комплексе рассмотрены составляющие процесса: движение мелких частиц по виброоживленному слою, проникновение частиц через отверстия сита, транспортирование сыпучего материала по грохоту. Это позволило рассмотреть режимы работы промышленных грохотов и дать рекомендации по выбору рациональных параметров грохочения, обеспечивающих максимальную производительность и эффективность грохочения. Впервые была решена задача о скорости движения сыпучего материала по грохоту, когда сито совершало колебания по траекториям сложной формы с независимым вибровозбуждением в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Предложенный метод моделирования и расчета процесса грохочения является универсальным для определения технологических параметров классификации на грохотах различных модификаций и типов, в том числе, их последних поколений различных технологических назначений. Метод, основанный на структурно-параметрическом синтезе основных фаз процесса

(транспортирование, просеивание и сегрегационно-диффузионная эволюция виброоживленного сыпучего слоя). Метод позволяет выявлять режимные и конструктивные направления совершенствования условий эффективной эксплуатации промышленных грохотов. Он предназначен для расчета инерционных, самобалансных, резонансных и гирационных грохотов, производящих грохочение сыпучих материалов различной насыпной плотности при классификации от крупной до особо тонкой. Метод может применяться для расчета грохотов со сложной траекторией движения сита, которое совершает циркуляционное движение, представляющее собой сумму двух компланарных колебаний с разными амплитудами и частотами.

Возможности метода определяются условиями тестовых лабораторных исследований периодического грохочения сыпучих материалов. Лабораторная установка должна воспроизводить вибрационный режим, соответствующий режиму колебаний промышленного грохота. Вибрационный режим грохотов, когда сито совершает круговые или прямолинейные колебания, легко воспроизводится в лабораторных условиях. Создание лабораторной установки по периодическому грохочению, когда сито совершает устойчивые колебания по сложной траектории, возможно. Выполнение такой установки весьма трудоемко и требует совершенной материально-технической базы. Очевидно, что такая установка способствовала бы выявлению дополнительных эффектов процесса. По мнению В.А. Огурцова, определение влияния траектории колебаний просеивающей поверхности на эффективность процесса классификации – перспективное направление исследований в области грохочения сыпучих сред.

Предлагаемая В.А. Огурцовым методика не может применяться для грохотов с активными просеивающими поверхностями. К таким относятся грохоты с непосредственным возбуждением сита, многочастотные вибрационные грохоты аналогичные по конструкции грохоту Ultimate Screener™, грохоты с резонирующими ленточно-струнными ситами и другие грохоты подобного типа. Однако общие подходы предлагаемой методики могут быть использованы исследователями, работающими в области грохочения.

Брик Е.Р. в своих работах [25,26], выполненных под руководством В.А. Огурцова предложила модель классификации сыпучих материалов на грохотах с поэтажной компоновкой сит. На рисунке 1.10 представлена расчетная схема процесса. На основе ячеечной модели грохочения разработан метод расчета кинетики процесса извлечения частиц мелких фракций при многоситовой классификации из исходного сыпучего материала. Определена эффективность работы двухситового грохота и засоренность товарного продукта.

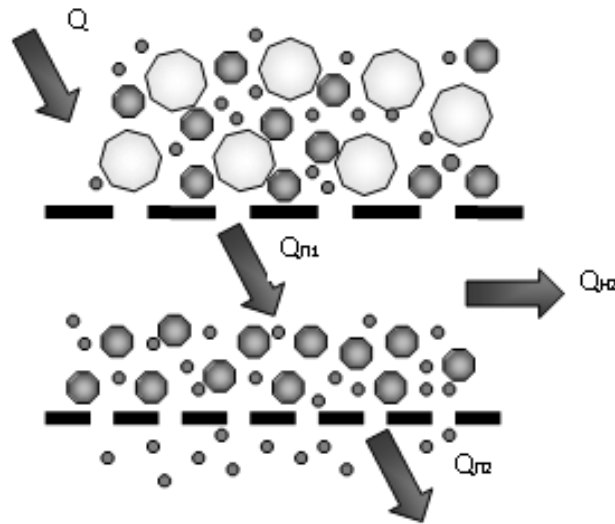


Рисунок 1.10. Расчетная схема процесса

Данная модель процесса грохочения может использоваться на стадии выбора типа двухситового грохота. Скорость проникновения частиц через отверстия сита определяется из тестовых опытов по грохочению реальных сыпучих материалов в условиях, когда размеры отверстий просеивающей поверхности, амплитуда и частота колебаний соответствовали промышленному грохочению. Стохастические коэффициенты макродиффузии и сегрегации для частиц проходовых фракций также определяются из тестовых опытов, что не позволяет теоретически обосновать выбор параметров фракционирования в



реальных условиях. Важным результатом работы является доказательство влияния кинетики грохочения проходových частиц различной крупности на верхнем сите на процесс извлечения некондиционных мелких частиц на нижнем сите грохота.

Алешиной А.П. разработана модель фракционирования песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье [27,28], которая является развитием теории грохочения, предложенной Огурцовым В.А. Данная модель также основана на теории цепей Маркова в простейшем одномерном варианте. Число ячеек цепи соответствует высоте слоя и меняется по мере извлечения частиц мелкой фракции. Сегрегация частиц к поверхности сита описывается нелинейной моделью, в которой доли сегрегационного переноса из ячейки зависят от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи и определяется как

$$v = v_0(1 - S_{i+1}^k), \quad (1.9)$$

где  $v_0$  – интенсивность сегрегации мелкой фракции в ячейку без мелкой фракции, а множитель  $(1 - S_{i+1}^k)$  учитывает замедление сегрегации по мере заполнения следующей ячейки мелкой фракцией.

Вероятность проникновения частиц проходových фракций через отверстия сита зависит от уменьшающейся высоты слоя и определится как

$$v_f^k = v_{f0} \sqrt{\frac{m - i(k)}{m}}, \quad (1.10)$$

где  $(m - i(k))$  – выраженная через число ячеек переменная высота слоя,  $v_{f0}$  – скорость истечения при начальной высоте слоя  $m$ .

Стохастические коэффициенты ячейной модели, так же как в работах Брик Е.Р. определялись опытным путем. Влияние траектории колебаний сита на эффективность процесса грохочения в данных работах не рассматривалось.

В работах Ал. В. Огурцова [29,30], посвященных исследованию движения ансамбля частиц по сити грохота, показано, что скорость движения сыпучего

материала по ситам определяется эмпирически или по результатам расчетов, полученных при моделировании движения среды как движения одиночной материальной точки. Не учитывается силовое взаимодействие частиц. Скорость транспортирования сыпучего материала по ситам получены на основе решения методом дискретных элементов системы дифференциальных уравнений движения каждой входящей в ансамбль частицы. Разработан метод расчета кинетики фракционирования сыпучих материалов, основанный на имитационной модели транспортирования сыпучего материала по грохоту и теории цепей Маркова. Автором использована программа Autodesk 3ds Max для имитационной модели процесса движения ансамбля частиц по вибрирующему ситам грохота, которая учитывает ряд параметров, нелинейно влияющих на показатели работы грохота. На рисунке 1.11 показана реализация виртуального процесса движения сыпучей среды по грохоту.

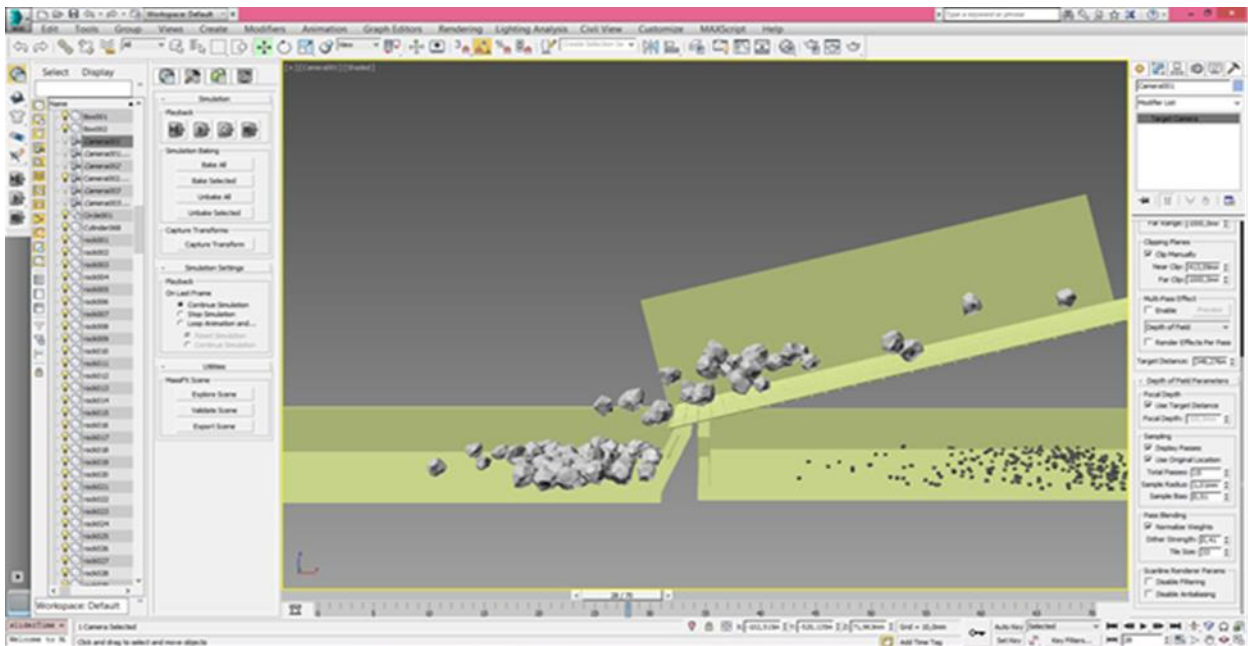


Рисунок 1.11. Виртуальный процесс движения сыпучей среды по грохоту

К сожалению, рассмотрена только круговая траектория колебаний сита грохота и, следовательно, расчеты скоростей транспортирования относятся только к этому случаю.

Процесс сортировки древесной щепы на аппарате с поэтажной компоновкой сит рассмотрен в диссертационной работе Кульбицкого А.В. [19]. Используя логистический подход к описанию процесса грохочения, автор вывел уравнение кинетики фракционирования, соответствующее классическим уравнениям Е.А. Непомнящего, А. Майнеля, Х. Шуберта, где используются эмпирические коэффициенты, зависящие от режимных параметров грохочения и физико-механических свойств материала. Используя предложенную методику, автор определяет соотношение рабочих длин верхнего и нижеследующих сит, что позволяет повысить качество фракционирования кондиционной щепы на целлюлозно-бумажном комбинате. Однако методика расчета основных показателей процесс сводится к рассмотрению работы односитового грохота. Влияние кинетики процесса грохочения на верхнем сите на процесс классификации на нижнем сите не выявлено.

В докторской диссертации А.Е. Пелевина, посвященной тонкому гидравлическому грохочению, предлагается модель расчета вероятности проникновения частиц через отверстия сита, которая отличается от модели Годена – Андреева [100]. Эта вероятность учитывает фракционный состав исходного сыпучего материала по крупности и сегрегацию частиц. Модель применяется для грохотов с направленными прямолинейными колебаниями сита. В модели рассматривается возможность проникновения через отверстия сита нескольких частиц.

В кандидатской диссертации Е.Б. Волкова [101] разработана математическая модель фракционирования сыпучих материалов на неподвижном грохоте, результаты которой используются в динамической модели грохочения. Впервые рассматривается влияние на процесс таких факторов как высота и скорость подачи материала на грохот. Автор применяет модель движения одиночной частицы по неподвижному и подвижному ситу, предполагая, что закономерности одного процесса можно переносить на другой.

Многообразие математических моделей процесса грохочения обусловлено огромным количеством конструкций аппаратов для отсева сыпучих материалов.

Однако теории грохочения, которая учитывала бы влияние формы колебаний сита на протекание процессов миграции частиц по виброоживленному слою и проникновения проходových частиц через отверстия сита не существует.

### **1.3. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований**

По настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Для эффективного ведения процесса грохочения в современном производстве нерудных сыпучих материалов применяются грохота со сложной траекторией колебаний сита.
2. Теории грохочения, которая описывает кинетику извлечения частиц проходových фракций при сложных пространственных траекториях колебаний сита не существует.
3. Для строительства автомобильных дорог необходимы высококачественные сыпучие материалы: щебень, гравий, песок. Требования к фракционному составу сыпучих материалов постоянно возрастают. Появились требования к фракциям, где размер частиц определяется до десятых долей миллиметра.
4. Грохочение конкретного сыпучего материала должно проводиться при режиме вибрации, который обеспечивает максимальные показатели работы грохота.
5. Вероятно существование наперед заданной траектории движения сита, обеспечивающей благоприятный режим для проникновения мелких частиц через отверстия сита.

Поэтому в работе были поставлены следующие задачи исследования.

1. Разработать математическую модель процесса грохочения, учитывающую пространственную траекторию колебаний просеивающей поверхности.
2. Разработать методику расчета скорости проникновения проходových частиц через просеивающую поверхность, учитывающую соотношение

размера частиц к размеру отверстия сита, амплитуды и частоты горизонтальных и вертикальных колебаний грохота, частоту соударений частиц с просеивающей поверхностью.

3. Провести экспериментальные исследования процесса грохочения сыпучих материалов на установке периодического действия, доказать адекватность предложенных моделей процессу грохочения.
4. Разработать рекомендации по совершенствованию работы грохотов в промышленных условиях, обеспечивающих высокую эффективность процесса фракционирования.
5. Разработать новую конструкцию вибрационного грохота, обеспечивающую интенсивное воздействие сита на слой сыпучего материала за счет создания пространственных траекторий движения просеивающей поверхности с независимыми параметрами колебаний в плоскости сита и в направлении перпендикулярном этой плоскости.

## **ГЛАВА 2. НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ КОЛЕБАНИЙ СИТА**

### **2.1. Конструкции вибрационных грохотов с пространственной траекторией колебаний сит**

Грохочение конкретного сыпучего материала имеет свои особенности и должно проводиться при режиме вибрации, который обеспечивает максимальные показатели работы грохота. Поэтому вероятно существование определенной траектории движения сита, создающей благоприятный режим для проникновения мелких частиц через отверстия сита.

Существуют сложные технологические проблемы при промышленном грохочении, которые до сих пор еще не нашли решения. Это классификация так называемых «трудногрохотимых» материалов, в которых содержание частиц, близких по величине к размеру отверстия сита, велико. Попадая в ячейку сита, частицы такой крупности испытывают сильное трение со стороны стенок отверстия и заклинивают его. Другая проблема промышленного грохочения, когда аппараты установлены в карьерах по добыче гравийно-песчаных смесей и работают с влажными материалами. То есть многообразие физико-механических свойств сыпучих материалов должно оказывать существенное влияние на подбор колебательных режимов классифицирующих аппаратов. Реализация фракционирования «трудногрохотимого» или влажного сыпучего материала на различных аппаратах должна иметь возможность менять колебательные режимы в зависимости от свойств сыпучей среды.

В 1983 году учеными кафедры прикладной и теоретической механики Ивановского энергетического института Кораблевым С.С., Мизоновым В.Е., Огурцовым В.А. и Покровским А.Ю. была предложена схема виброгрохота, защищенная авторским свидетельством [111], сито которого совершает сложные траектории движения: круговые, прямолинейные, эллиптические с различными углами наклона оси эллипса к просеивающей поверхности, а также многие другие

траектории, включая, кривые Лиссажу. На рисунке 2.1 представлена схема данного грохота.

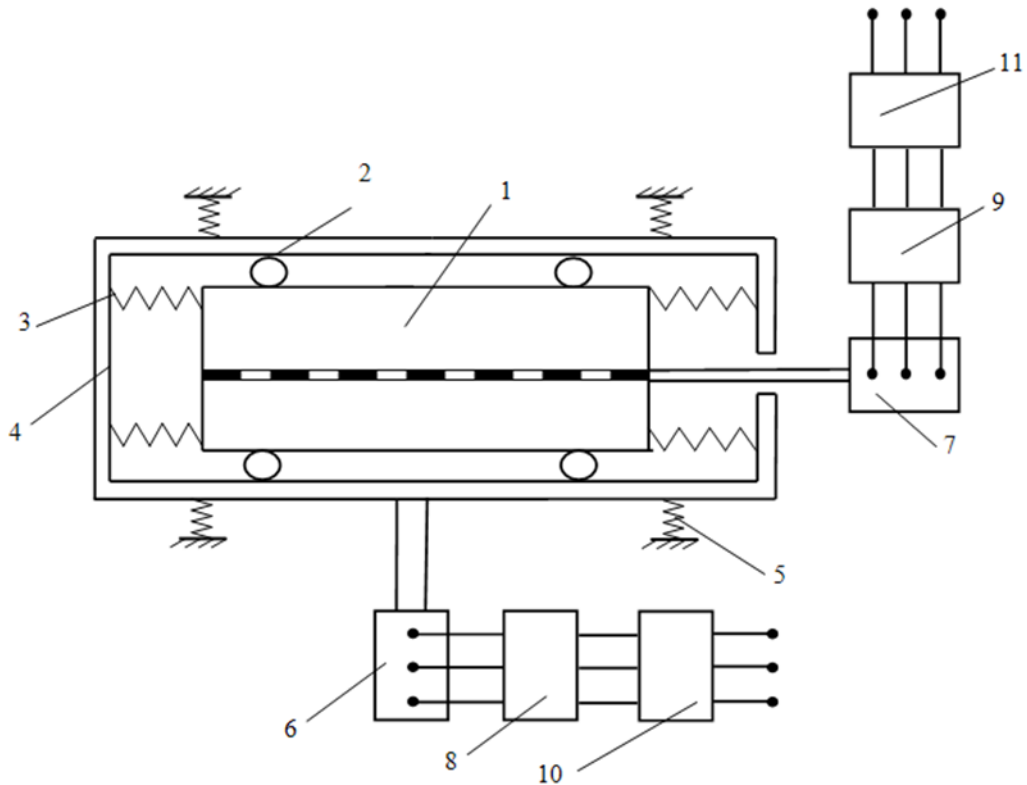


Рисунок 2.1. Вибрационный грохот, реализующий различные траектории движения сита: 1 – короб с ситом; 2 – кинематические пары; 3 – упругие элементы; 4 – подвижная рама; 5 – амортизаторы; 6 – вибропривод, обеспечивающий вертикальные колебания рамы и короба с ситом; 7 – вибропривод, обеспечивающий горизонтальные колебания короба с ситом; 8 – преобразователь частоты вертикальных колебаний сита; 9 – преобразователь частоты горизонтальных колебаний сита; 10 – фазовращатель, задающий начальную фазу вертикальных колебаний сита; 11 – фазовращатель, задающий начальную фазу горизонтальных колебаний сита

Короб с просеивающей поверхностью, перемещается в горизонтальной плоскости внутри подвижной рамы по закону

$$x = A_x \sin(\omega_x t + \varphi_x), \quad (1.1)$$

где  $A_x$  - горизонтальная амплитуда колебаний сита,  $\omega_x$  - частота колебаний сита в горизонтальном направлении,  $\varphi_x$  - начальная фаза колебаний сита в горизонтальном направлении.

Подвижная рама совершает колебания относительно фундамента по закону

$$y = A_y \sin(\omega_y t + \varphi_y), \quad (1.2)$$

где  $A_y$  - вертикальная амплитуда колебаний сита,  $\omega_y$  - частота колебаний сита в вертикальном направлении,  $\varphi_y$  - начальная фаза колебаний сита в вертикальном направлении.

Амплитуда колебаний короба по оси  $x$  меняется с помощью вибропривода, частота регулируется преобразователем частоты, начальная фаза колебаний задается фазовращателем. Колебания короба с просеивающей поверхностью относительно подвижной рамы может осуществляться с помощью кинематических пар. Амплитуда колебаний подвижной рамы по оси  $y$  задается с помощью своего вибропривода, частота – преобразователем частоты, присоединенном к этому виброприводу, начальная фаза – фазовращателем.

Такая конструкция вибрационного грохота обеспечит получение различных форм траекторий колебания просеивающей поверхности при выставлении различных значений параметров  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ . Конструкция этого вибрационного грохота имеет более широкие возможности, чем конструкция инерционных и самобалансных грохоты, которые создают прямолинейные и круговые траектории колебаний сита. Предлагаемый грохот может создавать более сложные траектории колебаний сита, которые, вероятно, могут дать больший эффект фракционирования, чем типовые аппараты.

Дальнейшим развитием конструкции вибрационных грохотов со сложной траекторией колебаний сита представляли варианты схем, разработанные Мизоновым В.Е. и Огурцовым В.А., их последователями и учениками. Например, вариант схемы, изображенной на рисунке 2.2, защищенной патентом на полезную модель [112, 113]. Данный грохот отличался от предыдущего наличием



скользящей пары, которая повышает долговечность и надежность работы такого грохота.

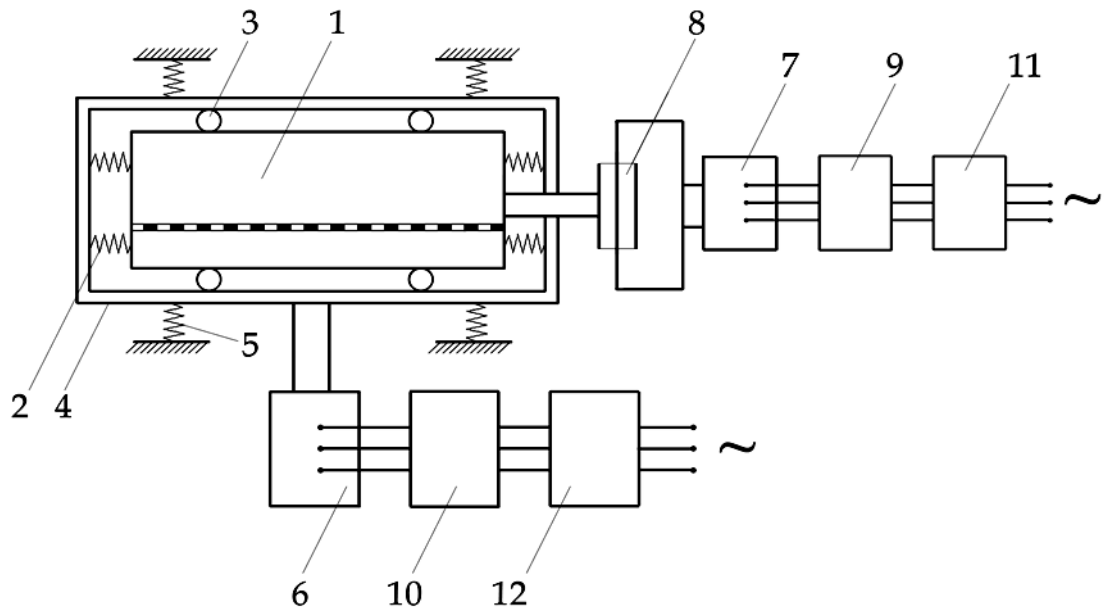


Рисунок 2.2. Усовершенствованный вибрационный грохот:

1 – короб с ситом; 2 – упругие элементы; 3 – кинематические пары; 4 – подвижная рама; 5 – амортизаторы; 6 – вибропривод, обеспечивающий вертикальные колебания короба с ситом; 7 – вибропривод, обеспечивающий горизонтальные колебания короба с ситом; 8 – скользящая пара; 9 – преобразователь частоты горизонтальных колебаний сита; 10 – преобразователь частоты вертикальных колебаний сита; 11 – фазовращатель, задающий начальную фазу горизонтальных колебаний сита; 12 – фазовращатель, задающий начальную фазу вертикальных колебаний сита

Если собственная частота колебаний короба на упругих элементах, расположенных между коробом и подвижной рамой, близки к частоте вибровозбудителя, обеспечивающего колебания короба, то создается резонансный

режим горизонтальных колебаний. Упругие элементы имеют жесткость, определяемую как

$$c_x \approx k_x^2 m_1, \quad (1.3)$$

где  $k_x$  – собственная частота колебаний короба,  $m_1$  – масса короба с просеивающей поверхностью и сыпучим материалом.

Если упругие элементы, установленные между подвижной рамой и фундаментом, имеют жесткость определяемую как

$$c_y \approx k_y^2 (m_1 + m_2), \quad (1.4)$$

где  $k_y$  – собственная частота колебаний подвижной рамы,  $m_2$  – масса подвижной рамы, то образуется резонансный режим колебаний подвижной рамы в вертикальной плоскости.

Резонансные режимы колебаний грохота могут обеспечить высокие значения амплитуд колебаний сита при небольшой мощности виброприводов, что является дополнительным преимуществом предлагаемых аппаратов перед типовыми.

Недостатком таких грохотов является ограниченность траекторий колебаний точек сита одной плоскостью, перпендикулярной просеивающей поверхности. Тогда на частицы, которые находятся на грохоте, действуют силы инерции, лежащие также в одной плоскости, что ограничивает процесс самоочищения сит. Если сито совершает колебания по объемной траектории, то возможности по самоочистке отверстий сит грохота расширяются.

На рисунке 2.3 показан грохот, сито которого совершает пространственные траектории колебаний [114]. Отличительной особенностью данного грохота от аналогичных машин является то, что короб с ситом соединен с вертикальным эксцентриковым валом, который приводится во вращение в подвижной раме в горизонтальной плоскости. Подвижная рама может совершать вертикальные колебания, которые создаются и регулируются электромагнитным вибровозбудителем. Амплитуда вертикальных колебаний регулируется эксцентриситетом эксцентрикового вала, частота – размером диаметров шкивов.

Таким образом, предлагаемый вибрационный грохот, позволяет получить пространственные траектории колебаний просеивающей поверхностью.

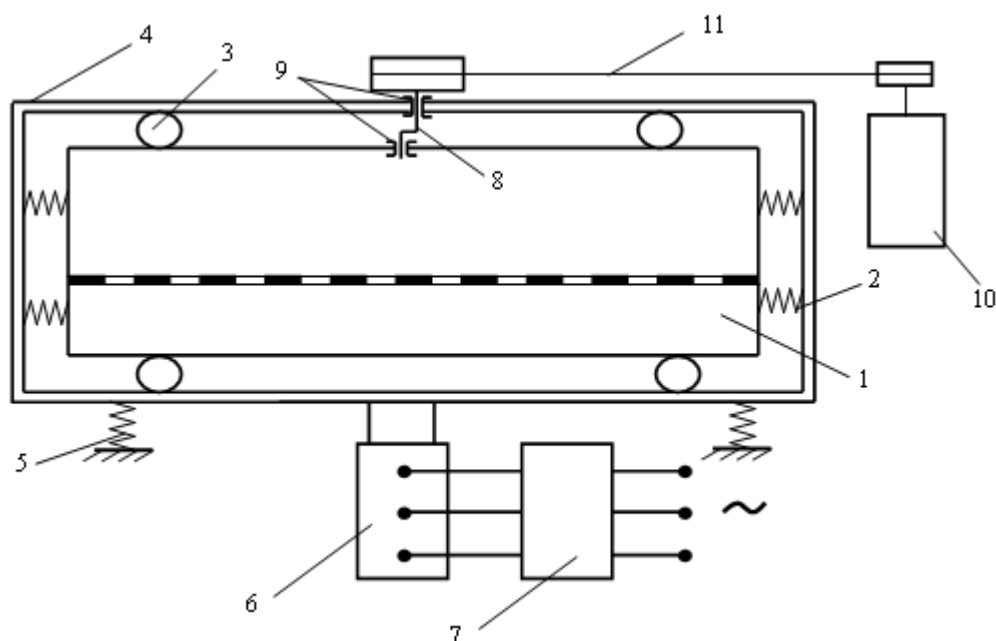


Рисунок 2.3. Конструкция вибрационного грохота, создающего пространственные траектории колебаний сита: 1 – короб с ситом; 2 – упругие элементы; 3 – кинематические пары; 4 – подвижная рама; 5 – амортизаторы; 6 – вибропривод, обеспечивающий вертикальные колебания рамы и короба с ситом; 7 – преобразователь частоты; 8 – вертикальный эксцентриковый вал; 9 – подшипники, жестко закрепленные в подвижной раме; 10 – электродвигатель; 11 – ременная передача

Траектории движения точек сита конструкций грохотов, описанных в [111 – 114], лежат в плоскости наименьшего ската, перпендикулярной просеивающей поверхности (рисунок 2.4). Силы, действующие на частицу сыпучего материала, также расположены в этой плоскости.

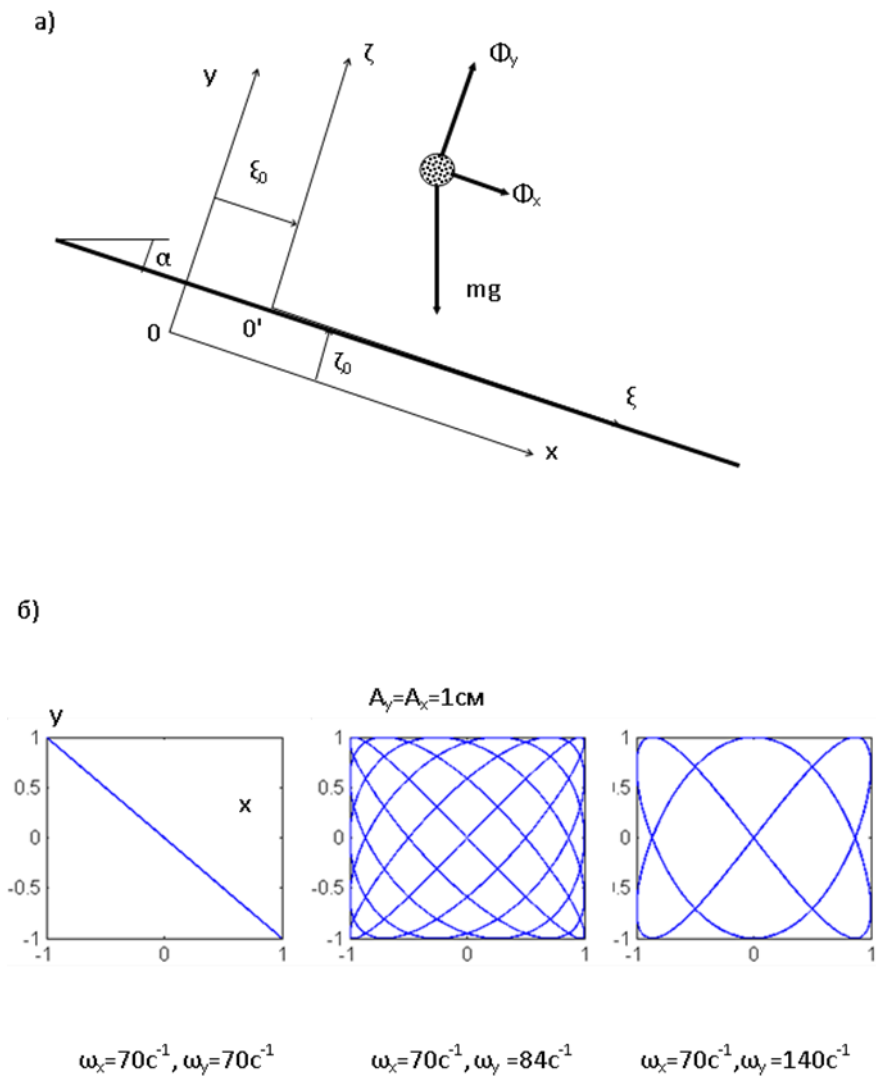


Рисунок 2.4. Расчетная схема движения частицы сыпучего материала над ситом грохота (а) и траектории колебаний точек сита грохота (б)

Меняя соотношения частот продольных и поперечных колебаний, можно получать различные формы траекторий колебаний сита грохота. Это могут быть типовые траектории колебаний (прямая, окружность, эллипс) и траектории колебаний сложных форм, включая кривые Лиссажу.

В работах Алешиной А.П. [27,28] рассматриваются силы инерции, которые действуют на частицу сыпучей среды, находящуюся на просеивающей поверхности вибрационного грохота. Эти силы обуславливают процесс проникновения частицы через отверстия сита. При размере частицы близком к размеру отверстия сита именно эти силы определяют процесс самоочистки ячеек сита. Точки сита инерционного или самобалансного грохота совершают колебательное движение по траекториям, которые лежат в плоскости ската, перпендикулярной плоскости просеивающей поверхности. В это случае силы инерции, которые действуют на частицу, находящуюся на сите, тоже лежат в этой плоскости (рисунок 2.5). По осям  $x$  и  $z$  силы инерции определяются как

$$F_x^{\text{ин}} = F_z^{\text{ин}} = mA\omega^2, \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса частицы,  $A$  – амплитуда колебаний грохота,  $\omega$  – частота колебаний грохота, при траекториях движения точек сита, которыми являются окружности.

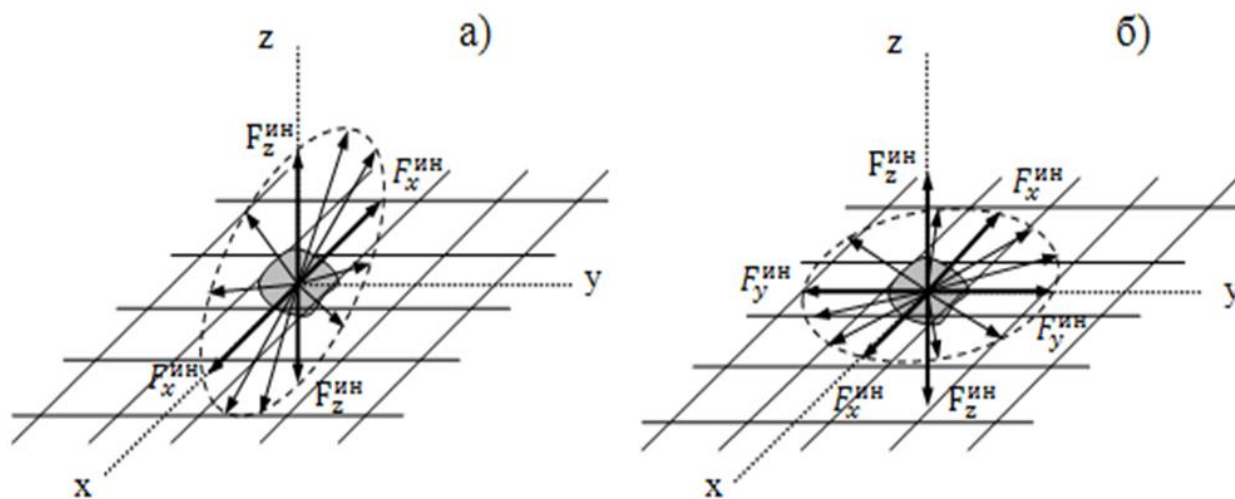


Рисунок 2.5. Распределение сил инерции, действующих на частицу, находящуюся в отверстии сита: а) – схема действия сил для типового грохота; б) - схема действия сил для грохота с пространственной траекторией колебаний сита

Силы инерции, действующие на частицы, находящиеся на грохоте, короб которого совершает независимые вертикальные и горизонтальные колебания [27,28], определяются как

$$F_x^{ин} = mA_x \omega_x^2, \quad (2.2)$$

$$F_z^{ин} = mA_z \omega_z^2, \quad (2.3)$$

где  $A_x$  – амплитуда колебаний грохота по оси  $x$ ,  $\omega_x$  – частота колебаний грохота по оси  $x$ ,  $A_z$  – амплитуда колебаний грохота по оси  $z$ ,  $\omega_z$  – частота колебаний грохота по оси  $z$ . Годограф сил инерции располагается в плоскости наибольшего ската, как и годограф сил инерции инерционного грохота.

Данная схема грохота, показанного на рисунке 2.4, позволяет существенно расширить диапазон действия сил инерции и обеспечить эффективное проникновение проходových частиц через отверстия сита.

Недостатком грохота является наличие вертикальных колебаний вала с кривошипом и неуравновешенных сил инерции короба, действующих на кривошип, что снижающих долговечность работы таких грохотов.

## **2.2. Предлагаемая конструкция вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита**

Нами предлагается вибрационный грохот (рисунок 2.6), защищенный патентом на полезную модель [115]. Основу создания данного аппарата составили приведенные выше конструкции виброгрохотов со сложной пространственной траекторией колебаний сита.

Грохот включает короб с просеивающей поверхностью, который соединен упругими элементами и кинематическими парами с подвижной рамой. Рама установлена на фундаменте с помощью амортизаторов. К раме присоединен вибропривод, обеспечивающий возможность ее колебаний в вертикальном

направлении, подключенный к источнику питания через преобразователь частоты. Рама вместе с коробом совершает вертикальные колебания, амплитуда и частота которых меняется виброприводом. Короб шарнирно соединен скользящей парой с вертикально установленным в раме кривошипом, вертикальный вал которого связан с электродвигателем через ременную передачу и снабжен маховиком с грузом, уравнивающим силы инерции короба. Кривошип обеспечивает горизонтальное круговое вращение короба с ситом внутри подвижной рамы. Амплитуда вращения регулируется эксцентриситетом кривошипа, частота – размерами шкивов ременной передачи.

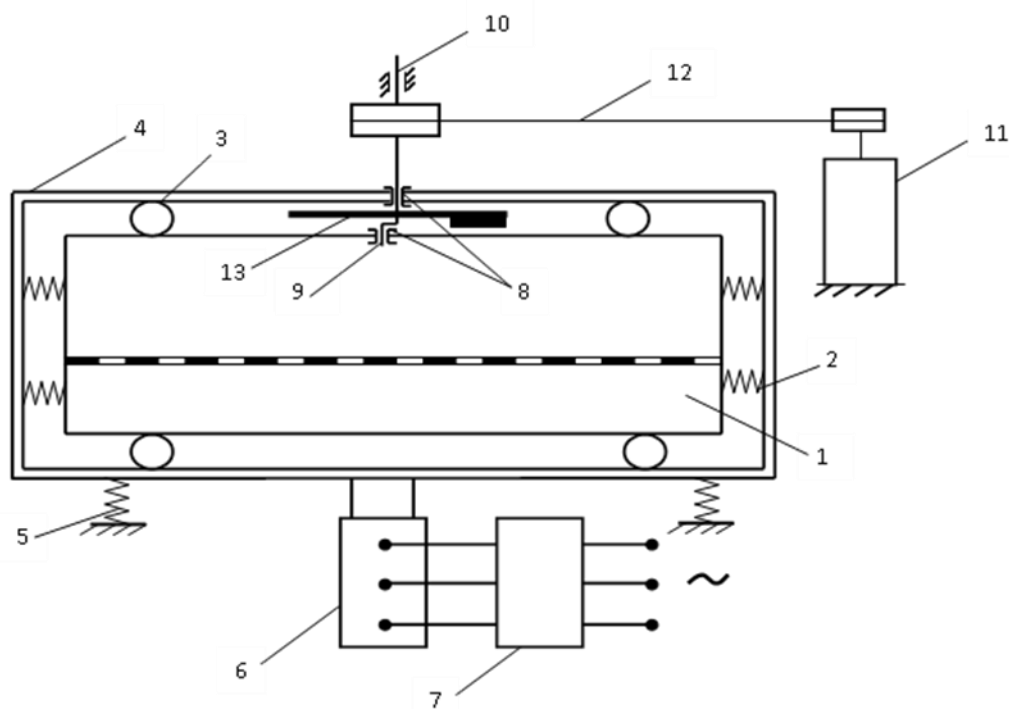


Рисунок 2.6. Предлагаемая конструкция вибрационного грохота:  
 1 – короб с ситом; 2 – упругие элементы; 3 – кинематические пары;  
 4 – подвижная рама; 5 – амортизаторы; 6 – вибропривод,  
 обеспечивающий вертикальные колебания рамы и короба с ситом;  
 7 – преобразователь частоты; 8 – скользящая пара; 9 – кривошип;  
 10 – вертикальный вал; 11 – электродвигатель; 12 – ременная передача; 13  
 – маховик с грузом

Предлагаемое выполнение вибрационного грохота, позволяет повысить долговечность вала с кривошипом за счет отсутствия их вертикальных колебаний и уравнивания сил инерции короба маховиком с грузом.

На рисунке 2.7. показана пространственная траектория движения точек сита предлагаемой конструкции вибрационного грохота. Амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний  $A_x = A_y = 5$  мм, частоты  $\omega_x = 100$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_y = 70$  с<sup>-1</sup>, соответственно.

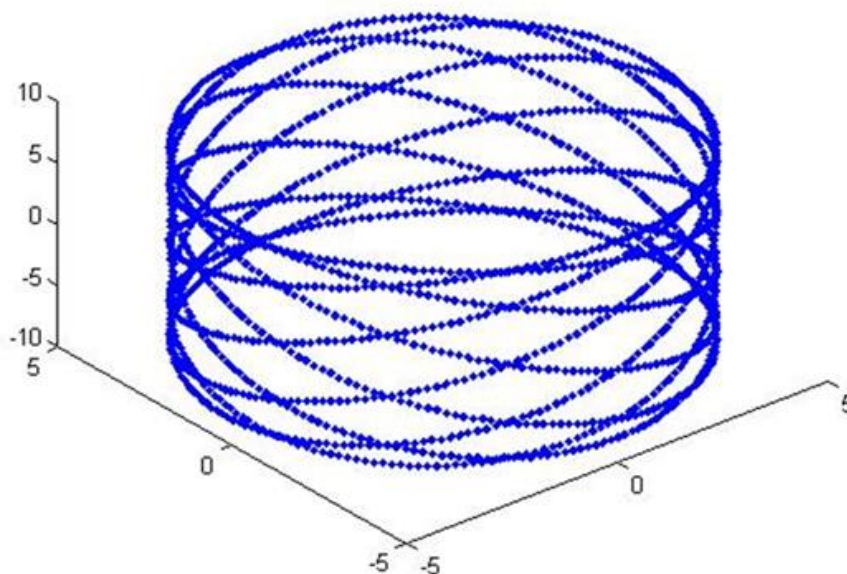


Рисунок 2.7. Пространственная траектория движения точек сита предлагаемой конструкции вибрационного грохота

Предлагаемый грохот позволяет мобильно менять колебательные режимы движения просеивающей поверхности в зависимости от физико-механических свойств сыпучего материала. Грохот может работать в периодическом и непрерывном режиме. Для непрерывного режима, как правило, наклоняют сито грохота, что способствует увеличению скорости перемещения сыпучего материала по просеивающей поверхности.



### 2.3. Выводы по главе 2.

По настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Конструкции вибрационных грохотов, описанные в данной главе (авторское свидетельство № 1025462, патенты на полезную модель №№ 82602, 86894) создают сложные траектории колебаний сит, но эти траектории находятся в плоскости, перпендикулярной просеивающей поверхности. Силы инерции, действующие на частицу, находящуюся на сите, так же лежат в этой плоскости. Это ограничивает их влияние на процесс проникновения частиц через отверстия сита.
2. Предлагаемая конструкция грохота (патент на полезную модель №166168) может создавать пространственные траектории колебаний сита, что существенно расширяет диапазон действия сил инерции, приложенных к частицам, которые находятся на сите или между прутками проволоки сита.
3. Вертикальные силы инерции способствуют самоочистке отверстий сит, горизонтальные - процессу «проталкивания» частиц, если они заклинили отверстие сита.
4. Траектории колебаний сита могут меняться с помощью виброприводов, создающих вертикальные и горизонтальные составляющие пространственных колебаний.

### ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ КОЛЕБАНИЙ СИТ

В основу математической модели процесса грохочения сыпучих материалов на аппаратах со сложной пространственной траекторией колебаний сит положен вероятностный подход и, в частности, теория цепей Маркова. Данный подход позволяет учитывать как многообразие свойств сыпучих материалов, так и многообразие режимов колебаний просеивающих поверхностей грохотов.

#### 3.1. Математическая модель процесса грохочения, основанная на теории цепей Маркова

Рассмотрим движение проходových мелких частиц некоторой фракции по виброоживленному слою порции сыпучего материала, который перемещается по ситам грохота. Слой разбит на  $n-1$  ячеек толщиной  $\Delta u$  (рисунок 3.1, а). К ячейкам цепи слоя добавлена ячейка  $n$ , соответствующая подситовому пространству. Вероятности  $S_i$ , нахождения частицы в некоторый момент времени в  $i$ -ой ячейке, адекватны относительной концентрации частиц рассматриваемой фракции в этой ячейке [1,4]. Набор вероятностей образует вектор-столбец состояния ячеек цепи:

$$S = [S_1 S_2 \dots S_m]^T, \quad (3.1)$$

где индекс  $T$  означает транспонирование вектора [1,4].

Через малый промежуток времени  $\Delta t$  осуществляются переходы рассматриваемых частиц из  $i$ -ой ячейки (рисунок 3.1, б) в соседние: вверх с вероятностью  $d$ , обусловленной диффузионным переносом; вниз с вероятностью  $d+v$ , обусловленную диффузионным и сегрегационным переносом. Вероятности перехода частиц из предпоследней ячейки цепи (рисунок 3.1, в) следующие: вверх  $-d$ , вниз  $-v_f$  (вероятность выхода частиц в подситовое пространство).

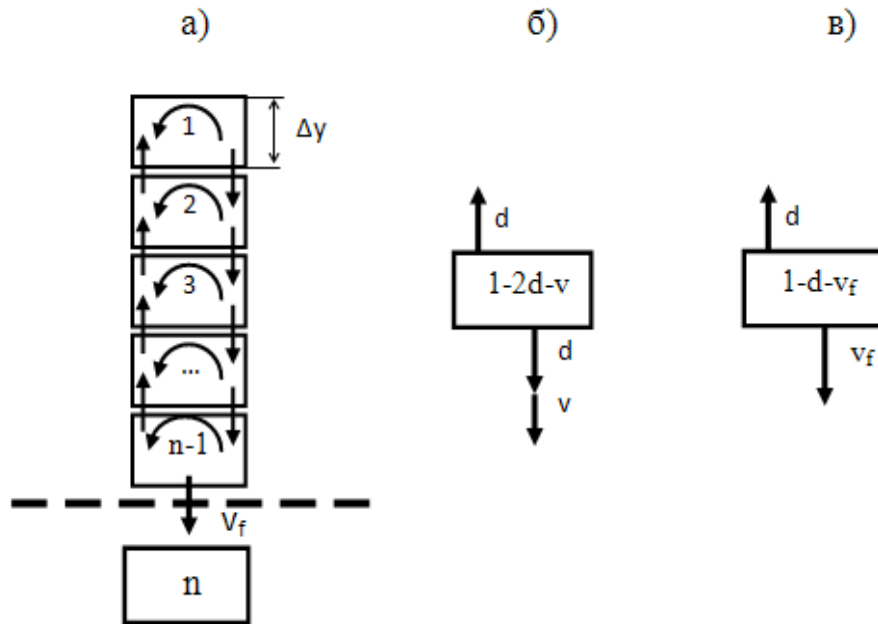


Рисунок 3.1. Схема ячеечной модели процесса (а), переходные вероятности из  $i$ -ой ячейки (б), переходные вероятности из предпоследней ячейки слоя сыпучего материала (в)

Изменение относительной концентрации частиц в ячейках цепи во времени  $t_k = (k-1)\Delta\tau$  ( $k$  – номер временного перехода) описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (3.2)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, определяемая как

$$P = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v+d & 1-v-2d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v+d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-d-v_f & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Выход частиц в подрешетное пространство на каждом переходе может

быть рассчитан по формуле

$$q(k) = S_{n-1}^k v_f . \quad (3.4)$$

Вероятность выхода частиц в подситовое пространство определяется как

$$v_f = \mathcal{G} p_f \Delta \tau , \quad (3.5)$$

где  $\mathcal{G}$  – число соударений частицы с ситом в единицу времени;  $p_f$  – вероятность прохождения частицы через отверстие сита при одном соударении.

Кинетика извлечения проходových частиц рассчитывается как

$$E(k) = \sum_{k=1}^k q(k) . \quad (3.6)$$

Стохастические коэффициенты ( $d$ -безразмерный коэффициент макродиффузии и  $v$ -безразмерная скорость сегрегации) определяются для проходových частиц некоторой фракции из опытов периодического грохочения. Методика их определения будет изложена в главе 4. Безразмерная скорость проникновения частиц данной фракции через отверстия сита  $v_f$  определится компьютерным методом. Для расчета этой скорости необходимо определить число соударений частицы рассматриваемой фракции с поверхностью сита в единицу времени и вероятность прохождения этой частицы через отверстие сита при одном соударении. Эти параметры должны соответствовать определенному режиму вибрации сита грохота.

### **3.2. Определение числа соударений частиц с просеивающей поверхностью грохота**

Большинство авторов, моделирующих процесс проникновения частиц через отверстия просеивающей поверхности при грохочении, рассматривают взаимодействие одиночной частицы с вибрирующим ситом. Такая модель является весьма приближенной. Она в принципе не позволяет учесть взаимодействия частиц друг с другом при их столкновениях.

Число соударений частиц с просеивающей поверхностью может быть

выявлено на основе простейшей одномерной версии метода дискретных элементов, рассматривающей поведение не отдельной частицы, а ансамбля частиц над вибрирующим ситом. Реальные частицы условно заменяются эквивалентными телами правильной формы – шарами, диаметры которых равны и соответствуют характеристике крупности сыпучей среды. Количество частиц выбирается в соответствии с высотой слоя сыпучего материала на сите.

Расчетная схема процесса движения частиц над ситом показана на рисунке 3.2.

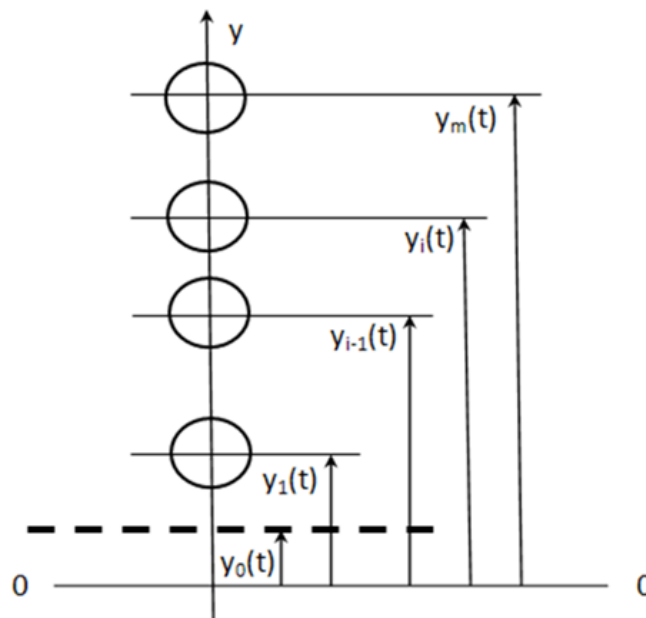


Рисунок 3.2. Расчетная схема процесса соударения частиц друг с другом и с поверхностью сита

Число соударений частиц с ситом определяется вертикальной составляющей пространственных колебаний просеивающей поверхности грохота, которая меняется по закону

$$y_0(t) = A \sin \omega t, \quad (3.7)$$

где  $A$  и  $\omega$  – амплитуда и частота вертикальной составляющей колебаний.

Над поверхностью с возможностью свободного движения в вертикальном

направлении движутся  $m$  шарообразных частиц радиусом  $r$  с координатами центров  $y_j(t)$ . Считается, что в промежутках времени между столкновениями частицы движутся по закону свободного падения. Кинематические уравнения расчета этого движения имеют вид:

$$v_j^{i+1} = v_j^i - g\Delta t \quad , \quad (3.8)$$

$$y_j^{i+1} = y_j^i + v_j^i \Delta t \quad , \quad (3.9)$$

где  $v$  – скорость частицы,  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени,  $i$  – номер шага.

На каждом временном шаге положения частиц проверяются на наличие или отсутствие удара.

Соотношения удара рассчитываются различно для нижней частицы ( $j=1$ ) и остальных ( $j=2, \dots, m$ ) частиц.

Для  $j=1$ : если  $y_1^{i+1} \leq y_0^{i+1} + r$ , то

$$y_1^{i+1} := y_0^{i+1} + r \quad , \quad (3.10)$$

$$v_1^{i+1} := -(v_1^{i+1} - v_0^{i+1})k_1 + v_0^{i+1} \quad , \quad (3.11)$$

где  $k_1$  – коэффициент восстановления скорости при ударе нижней частицы о поверхность сита,  $:=$  – оператор присваивания.

Для  $j=2, \dots, m$ : если  $y_j^{i+1} \leq y_{j-1}^{i+1} + 2r$ , то

$$y_j^{i+1} := y_{j-1}^{i+1} + 2r \quad , \quad (3.12)$$

$$v_{j-1}^{i+1} := \frac{1-k}{2}v_{j-1}^{i+1} + \frac{1+k}{2}v_j^{i+1} \quad , \quad (3.13)$$

$$v_j^{i+1} := \frac{1+k}{2}v_{j-1}^{i+1} + \frac{1-k}{2}v_j^{i+1} \quad , \quad (3.14)$$

где  $k$  – коэффициент восстановления скорости при ударе частиц друг о друга.

На рисунке 3.3 показан кадр демонстрации движения ансамбля из 5-ти частиц на экране монитора компьютера. На экране можно следить за перемещением частиц друг относительно друга и относительно подвижной поверхности. Программа позволяет отслеживать законы движения каждой из 5-ти

частиц и определяет число соударений нижней частицы с поверхностью, которая совершает колебания с заданными амплитудо-частотными характеристиками.

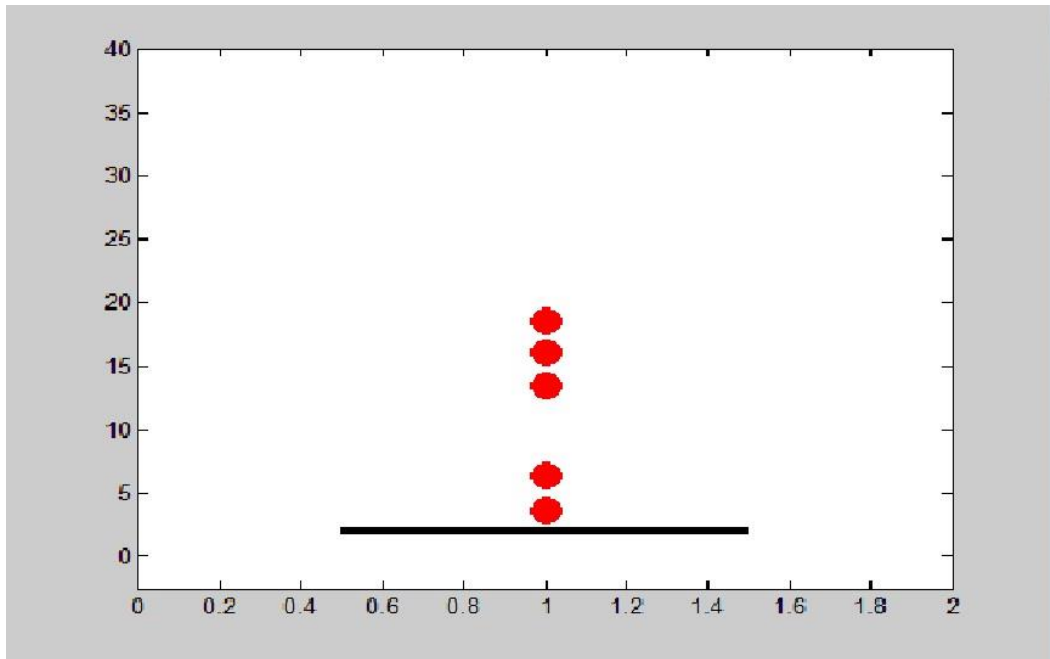


Рисунок 3.3. Движение ансамбля из 5-ти частиц на экране монитора компьютера

На рисунке 3.4. представлен закон движения нижней частицы ансамбля из 5-ти частиц над ситом, совершающем колебания с амплитудой 5 мм и частотой  $100 \text{ c}^{-1}$ .

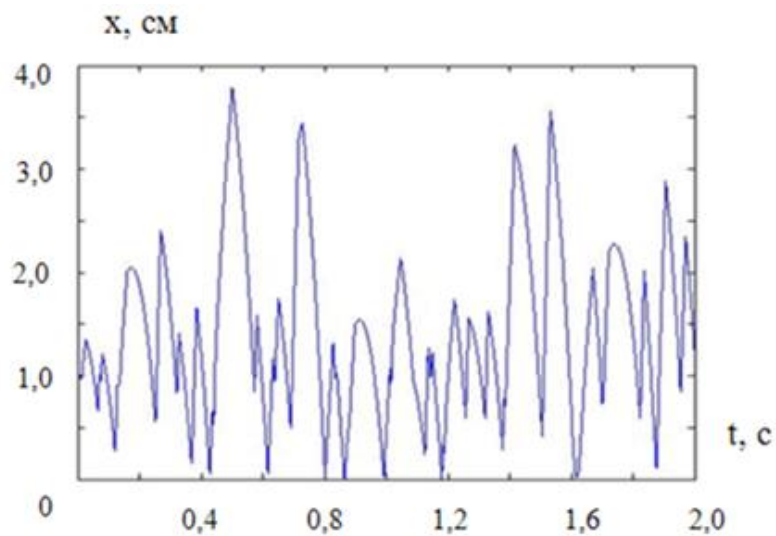


Рисунок 3.4. График закона движения нижней частицы ансамбля из 5-ти частиц

## над СИТОМ

На рисунке 3.5 показано влияние частоты колебаний просеивающей поверхности на частоту контактов частицы с ситом  $\vartheta$  при различных амплитудах его колебаний.

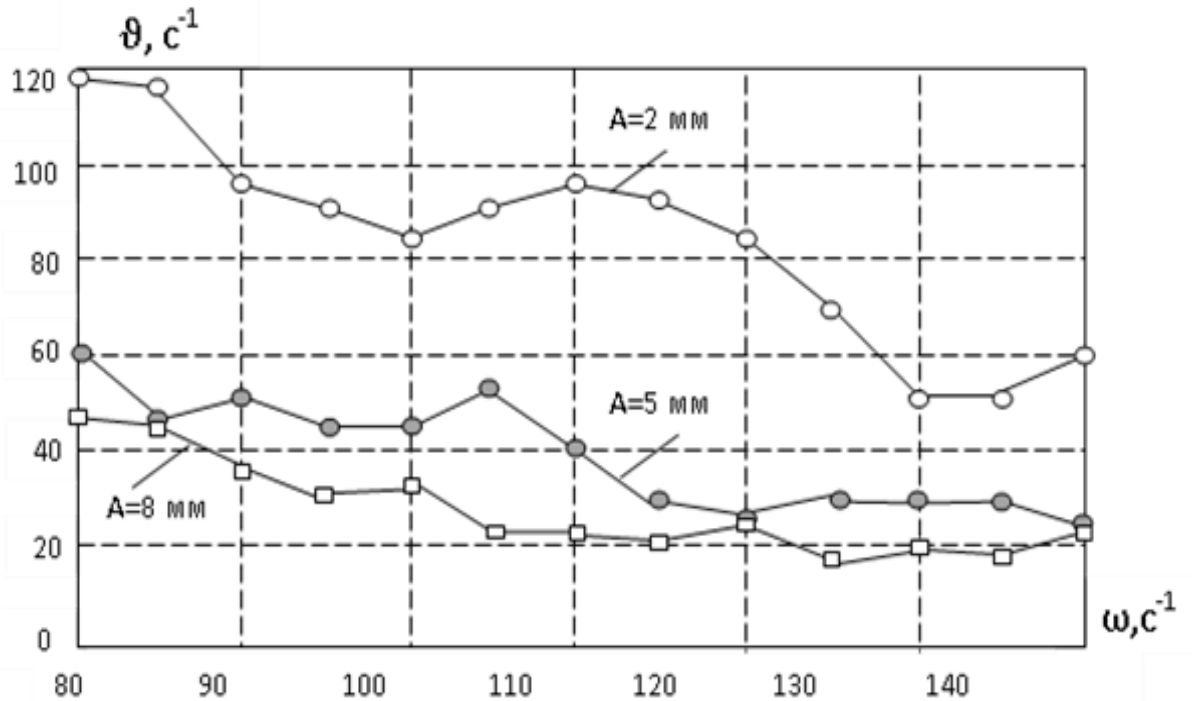


Рисунок 3.5. Влияние частоты колебаний просеивающей поверхности на частоту контактов частицы с ситом

При небольших амплитудах (2мм) частота контактов нижней частицы слоя и поверхности чувствительна к частоте колебаний этой поверхности. Кривая зависимости имеет максимумы и минимумы. На наш взгляд, нижняя частица при некоторых частотах ( $115c^{-1}$ ) вынуждающих колебаний сита «активизируется». Количество ее соударений с ситом растет. При дальнейшем увеличении вынуждающей частоты количество соударений падает, частица ведет себя «более спокойно». При больших амплитудах колебаний сита частота контактов нижней частицы слоя менее чувствительна к влиянию частоты вынуждающих колебаний.

Следует отметить, что максимальное число соударений, которое наблюдается при небольших амплитудах, не обеспечивает максимальную эффективность процесса. Небольшие амплитуды не создадут интенсивного вибровоздействия



сита на слой сыпучего материала, мелким частица понадобится большое время для достижения просеивающей поверхности.

Число соударений частиц с ситом определяется, таким образом, как если бы соударения частиц происходили бы со сплошной поверхностью.

### **3.3. Имитационная модель определения вероятности беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита вибрационного грохота при одном соударении**

Вероятность беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита при одном попадании на просеивающую поверхность, как правило, определится по формуле Годена – Андреева [1]

$$p_f = \varphi \left(1 - \frac{\delta}{D}\right)^2, \quad (3.15)$$

где  $\varphi$  – коэффициент живого сечения сита;  $\delta$  – диаметр частицы;  $D$  – размер отверстия. Для квадратной формы отверстий сита коэффициент живого сечения

$$\varphi = D^2 / (D+d)^2, \quad (3.16)$$

где  $d$  – диаметр проволоки сита. Таким образом, в отверстие сита пройдут только те частицы, центры которых находятся внутри квадрата  $(D - \delta) \times (D - \delta)$ .

Однако угол атаки частицей поверхности сита зависит от направления ее вектора скорости и направления векторов скоростей точек сита, определяемых параметрами его колебаний. Описать такую зависимость математически весьма сложно. Поэтому в данной работе предлагается имитационная модель процесса проникновения частицы через отверстие сита, которое совершает колебания в вертикальной или горизонтальной плоскости с различными амплитудами и частотами, реализованная с помощью программы Autodesk 3dsMax [29,30].

Рассмотрим пример такого виртуального моделирования, когда частица диаметром 3 мм, положение которой над ситом задавалось случайным образом, двигалась по закону свободного полета к ситу, которое совершало колебательное движение. За процессом падения частицы и ее проникновения через отверстие

сита можно было наблюдать в режиме реального времени на экране монитора компьютера. Размер отверстия сита составлял 5 мм, диаметр проволоки – 1 мм.

Частица падает из исходного положения, которое задается случайным образом, на подвижное сито. Она либо свободно поникает через отверстие сита, не задев его проволоки, либо, также проникает через отверстие, но задев его проволоки. При этом компьютер фиксирует изменение координаты от времени полета в каждом опыте.

На рисунке 3.6 представлено изменение вертикальной координаты падения частицы от времени, по которому проверялось наличие или отсутствие соприкосновения частицы с проволокой сита.

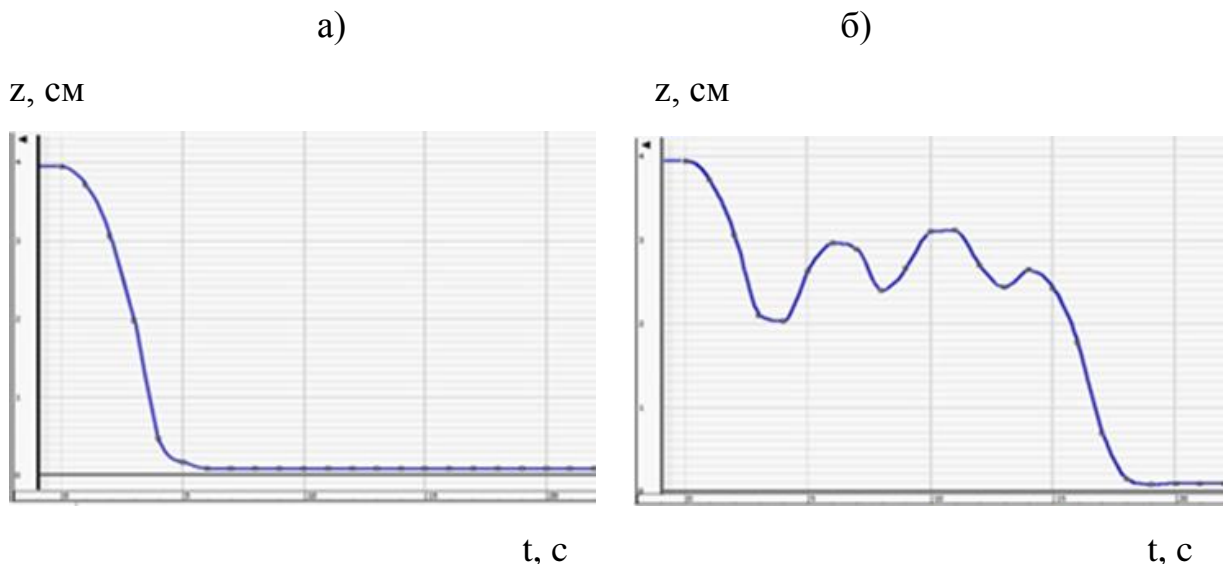


Рисунок 3.6 . Изменение вертикальной координаты падения частицы от времени:

а – частица беспрепятственно проходит через сито;

б – частица задевает проволоку сита

Вероятность прохождения частицы через просеивающую поверхность при одном попадании на просеивающую поверхность определялась как отношение числа опытов, когда частица не задевала проволоку, к общему числу опытов.

Для сокращения времени и количества компьютерных экспериментов с одной частицей в одном опыте над ситом располагалось 100 частиц, положение которых задавалось случайным образом (рисунок 3.7, а). Одновременно достигнув поверхности сита, некоторые частицы свободно проникали через

просеивающую поверхность. Другие частицы задевали проволоку сита (рисунок 3.7, б).

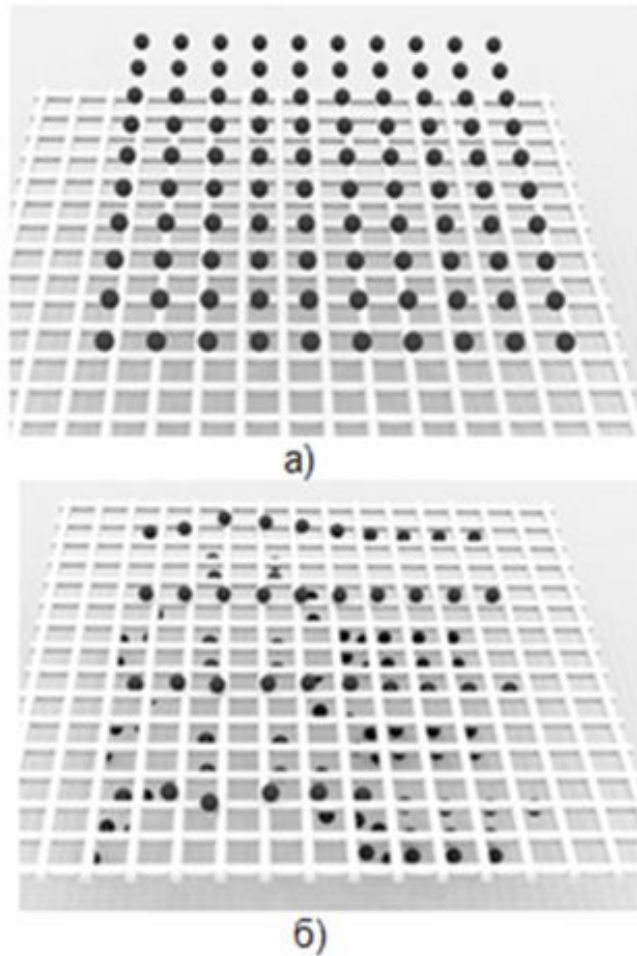


Рисунок 3.7 . Проникновение частиц через отверстия сита:

а) исходное положение частиц, б) положение частиц, которые свободно проникли через отверстия сита или задели проволоку сита

На рисунке 3.8 показаны кадры визуальной демонстрации процесса проникновения частиц через отверстия сита. Рассматривались кадры в замедленном времени с разных ракурсов тот момент виртуального эксперимента, когда частицы подлетают к поверхности сита и проникают через нее. Определялись частицы, которые задели проволоку сита, не задевали ее и частицы, у которых визуально трудно определить задевали они проволоку или нет.

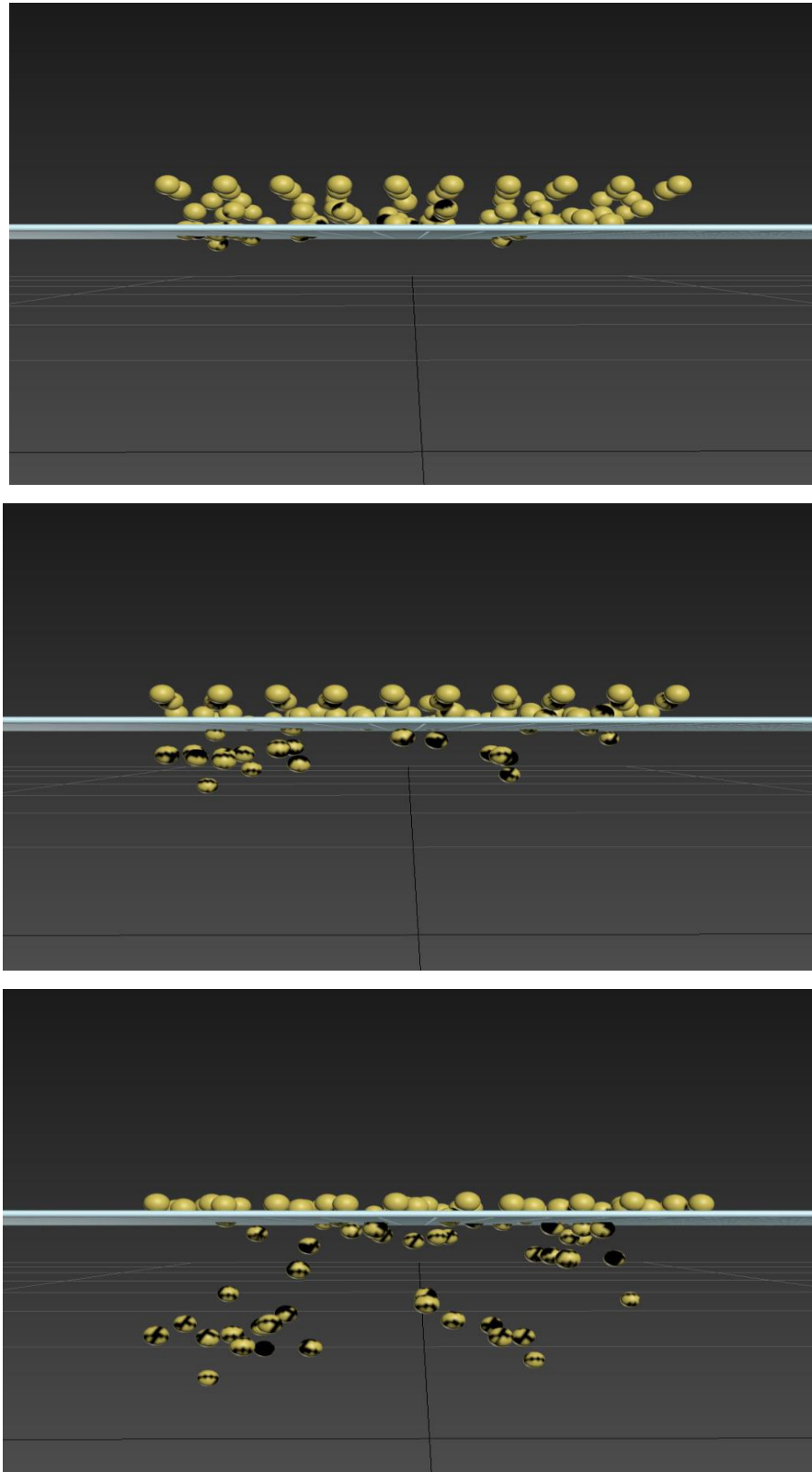


Рисунок 3.8. Кадры визуальной демонстрации процесса проникновения частиц через отверстия сита

Каждая частица имела свой номер. Программа позволяла выводить на экран монитора компьютера график закона изменения вертикальной координаты падения каждой частицы от времени.

Подсчитывалось количество частиц, свободное проникновение которых не вызывало сомнений. Если для частицы касание проволоки вызывало сомнение, то рассматривался график закона падения частицы. Если график имел хоть малейший излом, то считалось, что частица задела проволоку сита.

На рисунках 3.9, 3.10, 3.11 показаны примеры графиков изменения координат падения некоторых частиц от времени.

На рисунке 3.9. показан график изменения координаты падения части № 70 от времени. График имеет несколько изломов. Это означает, что частица несколько раз задела проволоку сита, прежде чем провалиться в подситовое пространство.

На рисунке 3.10 показан график падения частицы № 116, которая свободно проникает через отверстия сита, не задевая его проволоку. Графиком кривой изменения координаты падения частицы является парабола, которая не имеет изломов.

При проведении компьютерного эксперимента графики изменения координаты для частиц, которые двигались также как частицы № 70 и № 116 не рассматривались.

На рисунке 3.11 показан график изменения координаты падения частицы № 57 от времени, у которой визуально трудно было определить, задевала она проволоку сита или нет. На графике виден один излом. Это означает, что частица задела проволоку сита. При проведении эксперимента у частиц, падение которых было подобно падению частицы № 57, внимательно рассматривались графики изменения координаты.

Менялось исходное положение ста частиц над ситом, и эксперимент проводился заново.

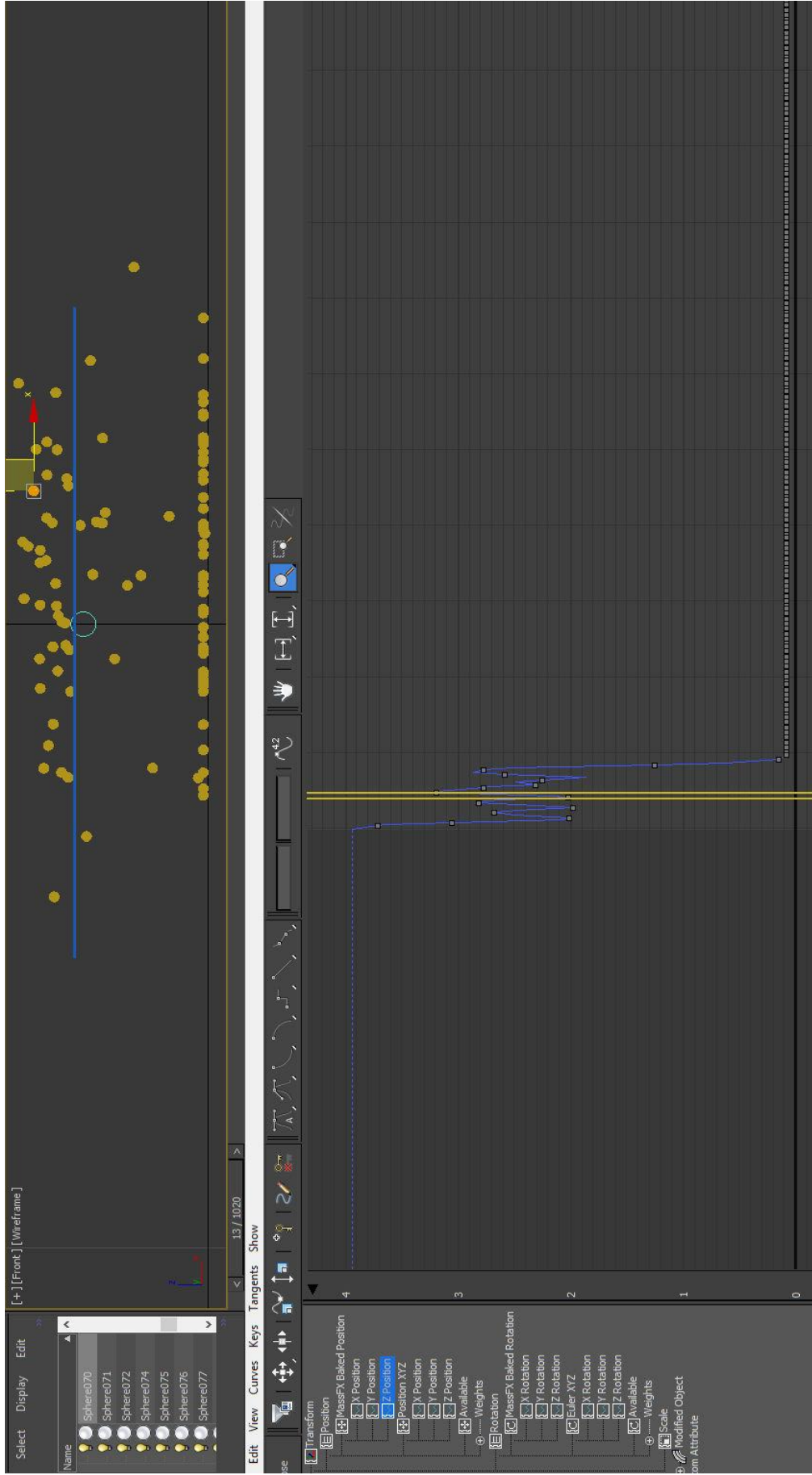


Рисунок 3.9. Закон движения частицы № 70

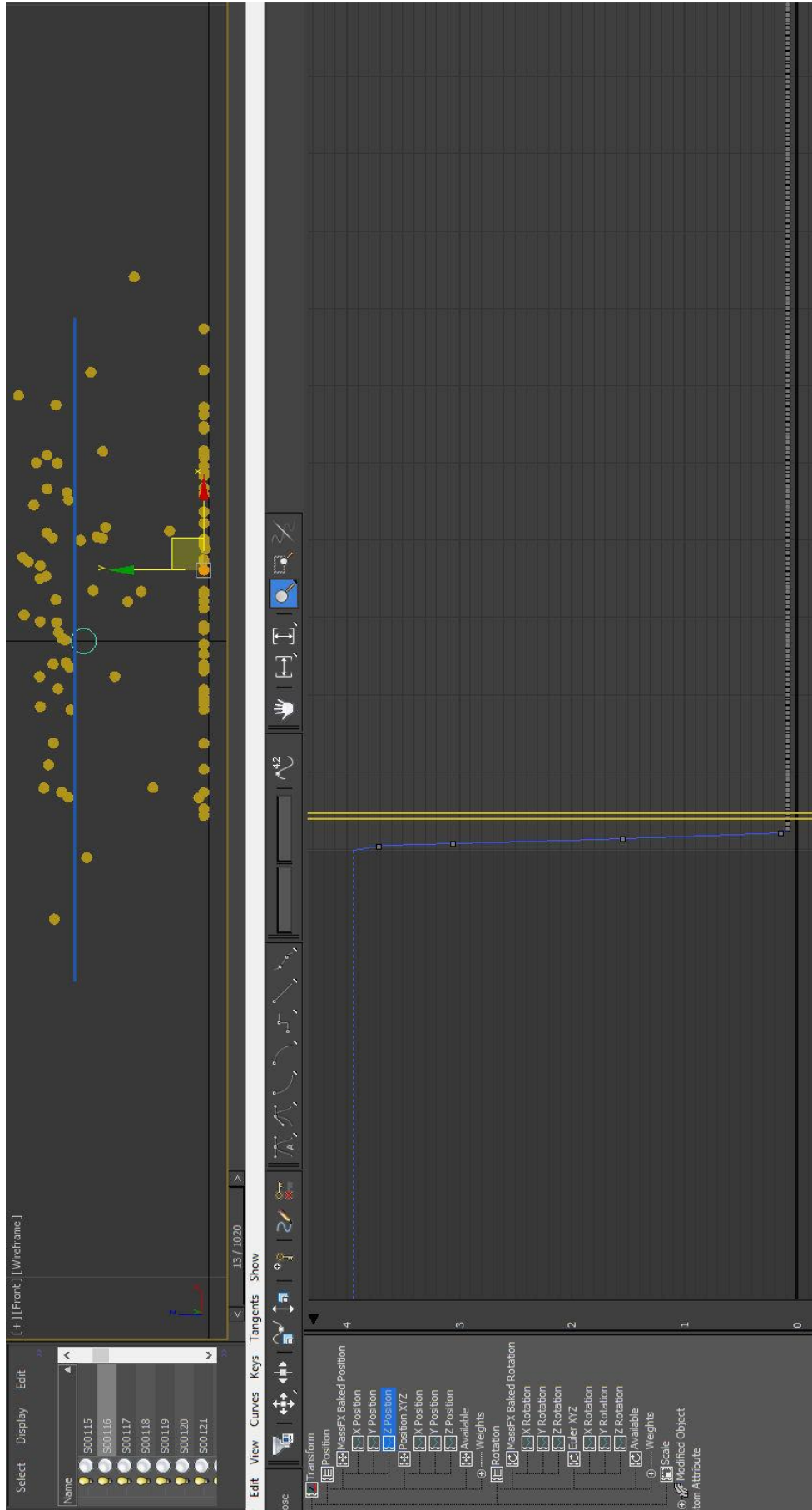


Рисунок 3.10. Закон движения частицы № 116

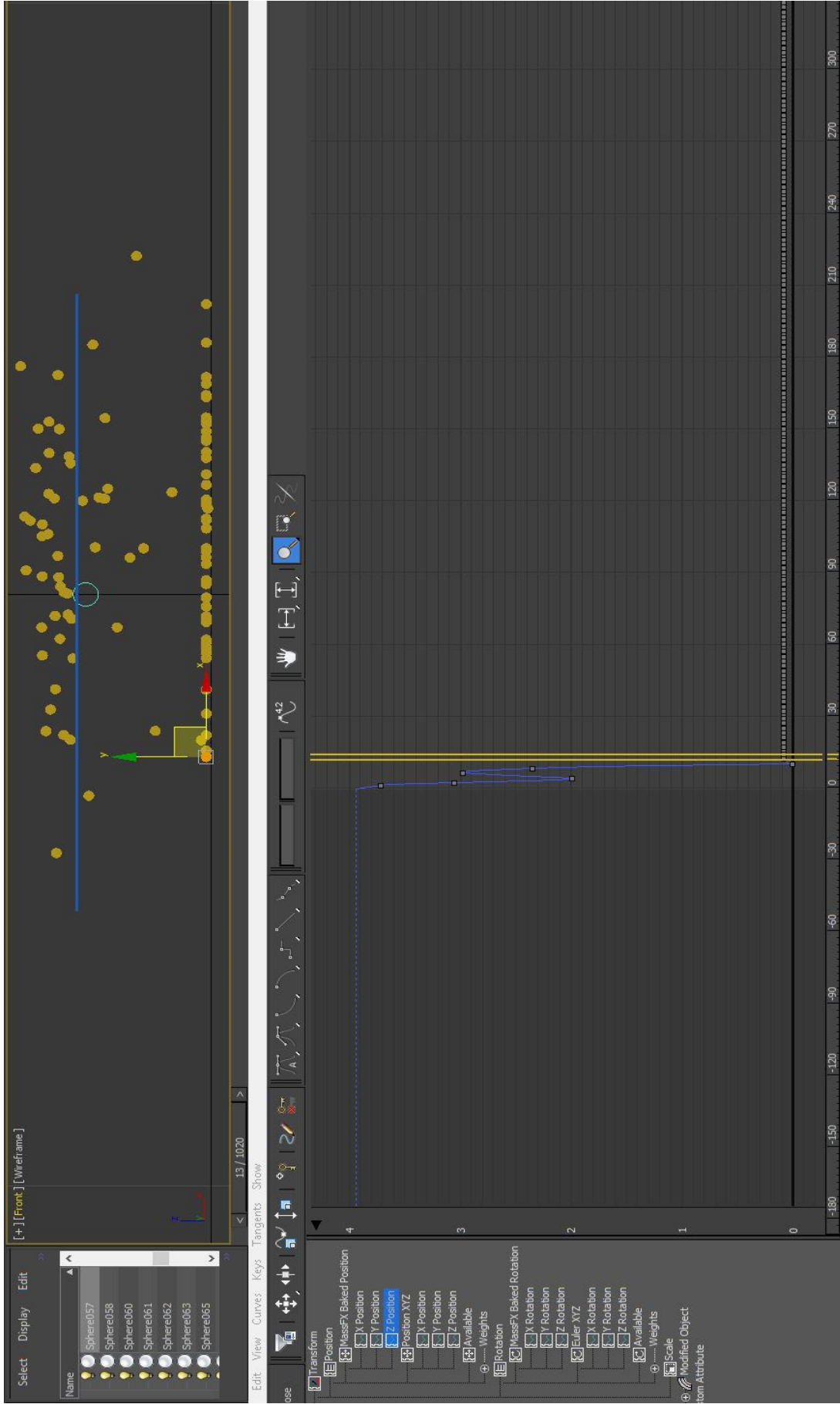


Рисунок 3.1.1. Закон движения частицы № 57



Количество начальных положений частиц составляло около ста. Таким образом, количество всех компьютерных экспериментов доходило до  $10^4$ .

При фиксированных значениях размера частицы, частоты и амплитуды колебаний сита менялось начальное положение частиц. Опыты прекращались тогда, когда вероятность беспрепятственного проникновения частиц через сито становилась практически постоянной, то есть изменение вероятности не превышало 1 %.

На рисунке 3.12. представлена зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности. Кривая 1, рассчитанная по уравнению (3.15), соответствует неподвижному сити. Ломанная кривая 2 построена с помощью имитационной модели процесса проникновения частиц через сито, совершающего круговые колебания в вертикальной плоскости. Ломанная кривая 3 соответствует случаю, когда сито совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости. Амплитуда вертикальных и горизонтальных колебания – 2 мм, частота –  $70 \text{ с}^{-1}$ .

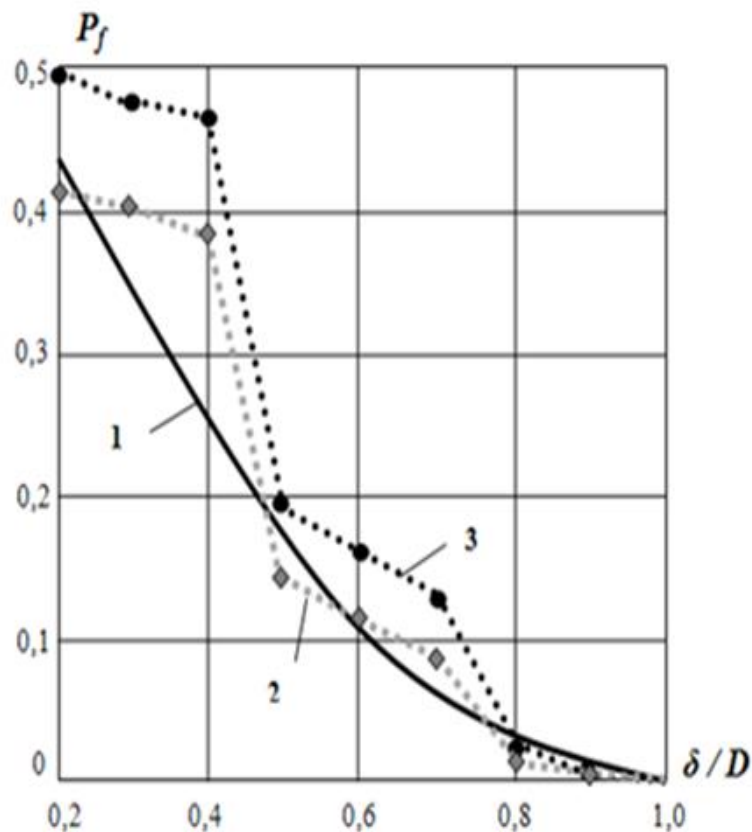


Рисунок 3.12. Зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности

Из рисунка 3.12 следует, что вероятности проникновения частиц через отверстия сита при одном соударении, когда сито неподвижно и совершает колебания, могут существенно отличаться. Учет подвижности сита при определении скорости проникновения частиц через просеивающую поверхность повышает точность расчета кинетики грохочения.

### 3.4. Влияние порозности сыпучего слоя на основные характеристики процесса грохочения

При подаче сыпучего материала на грохот высота слоя из-за вибровоздействия сита на материал увеличивается. Проходным частицам требуется большее время для достижения просеивающей поверхности. В данной работе предлагается при расчете производительности грохота учитывать важную характеристику слоя, которой является величина его средней по высоте порозности – доли свободного пространства между частицами в объеме, который занимает слой сыпучего материала на сите грохота. В одномерной модели движения частиц над вибрирующим ситом порозность есть доля свободного пространства между частицами в объеме, ограниченном параллелепипедом с квадратным основанием размером  $2r$  и может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon^i = 1 - \frac{m\pi r}{3(y_m^i - y_1^i + 2r)} \quad (3.17)$$

При плотном контакте частиц величина порозности не зависит от числа частиц и составляет  $\varepsilon = 1 - \pi/6 \approx 0,477$ .

На рисунке 3.13 в качестве примера приведен график колебаний верхней границы слоя из пяти частиц. Ее положение оказывается случайным процессом, статистические характеристики которого выглядят довольно стабильными.

Мгновенная порозность меняется вслед за колебаниями верхней границы слоя, то есть его высоты, но ее среднее значение  $\varepsilon_m$  за достаточно большой

промежуток времени остается постоянным.

Комплексной характеристикой интенсивности колебаний сита служит число Фруда  $Fr=A\omega^2/g$ , где  $g$  - ускорение свободного падения.

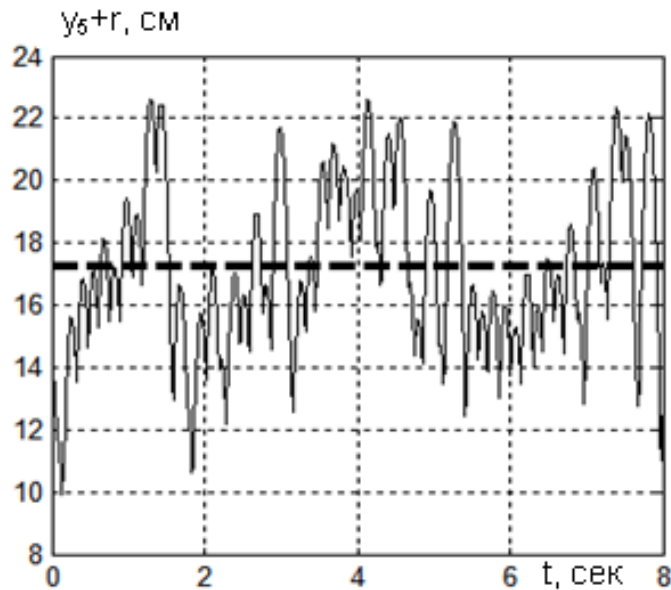


Рисунок 3.13. Пульсации верхней границы ансамбля из 5-ти частиц ( $k=0,7$ ;  $Fr=2$ ;  $A=1$  см; ---- - средний уровень границы)

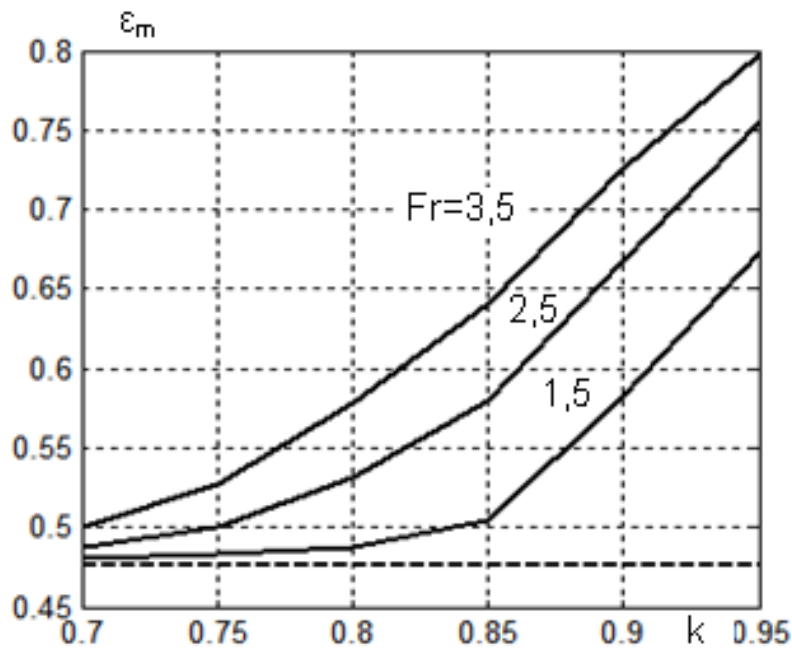


Рисунок 3.14. Влияние коэффициента восстановления скорости на среднюю порозность слоя при различных значениях числа Фруда ( $m=6$ ;  $A=1$  см; ---- - порозность при плотном контакте)

На рисунке 3.14 показано влияние коэффициента восстановления скорости на величину средней по времени порозности при различных значениях числа Фруда для слоя из шести частиц.

При коэффициенте восстановления, приближающемся к 0,7, порозность слоя мало отличается от таковой при плотном контакте частиц при всех значениях числа Фруда. Это происходит потому, что энергия, передаваемая колеблющейся поверхностью нижней частице, при низком коэффициенте восстановления рассеивается при взаимных ударах частиц, высота слоя становится меньше, как и его порозность. С ростом интенсивности колебаний и коэффициента восстановления порозность увеличивается, но становится весьма чувствительной к этим параметрам.

По этой же причине рассеяние энергии должно увеличиваться с увеличением числа частиц в слое, то есть его начальной высоты. Очевидно, что порозность зависит от числа частиц в слое и параметров колебаний грохота. На рисунке 3.15 показано, как меняется порозность с увеличением числа частиц в слое при двух значениях числа Фруда.

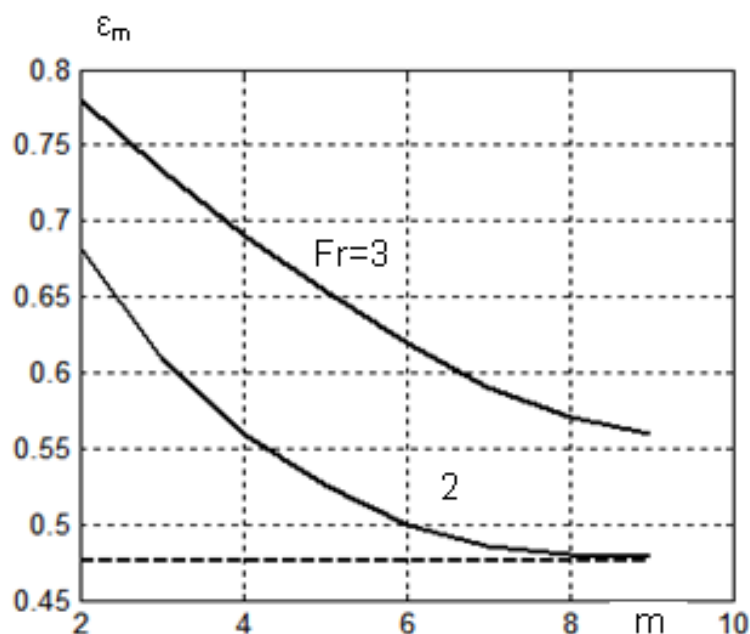


Рисунок 3.15. Влияние числа частиц в слое на среднюю порозность при различных значениях числа Фруда ( $k=0,7$ ;  $A=1$  см; ---- - порозность при плотном контакте)

При  $Fr=2$  и  $m=8$  она фактически достигает предельного значения и все частицы колеблются как одно целое.

Учет порозности слоя сыпучего материала позволяет определить истинную высоту этого слоя и достоверно определить производительность грохота, так как представление сыпучего материала, подаваемого на сито, сплошным поршневым потоком дает завышенные результаты основных показателей процесса: производительности аппарата и эффективности грохочения.

На рисунке 3.16 показаны законы движения ансамбля из пяти частиц по вертикальной оси и среднее положение каждой из них. По оси абсцисс отложено число шагов интегрирования по времени, по оси ординат – положение каждой частицы в зависимости от времени движения.

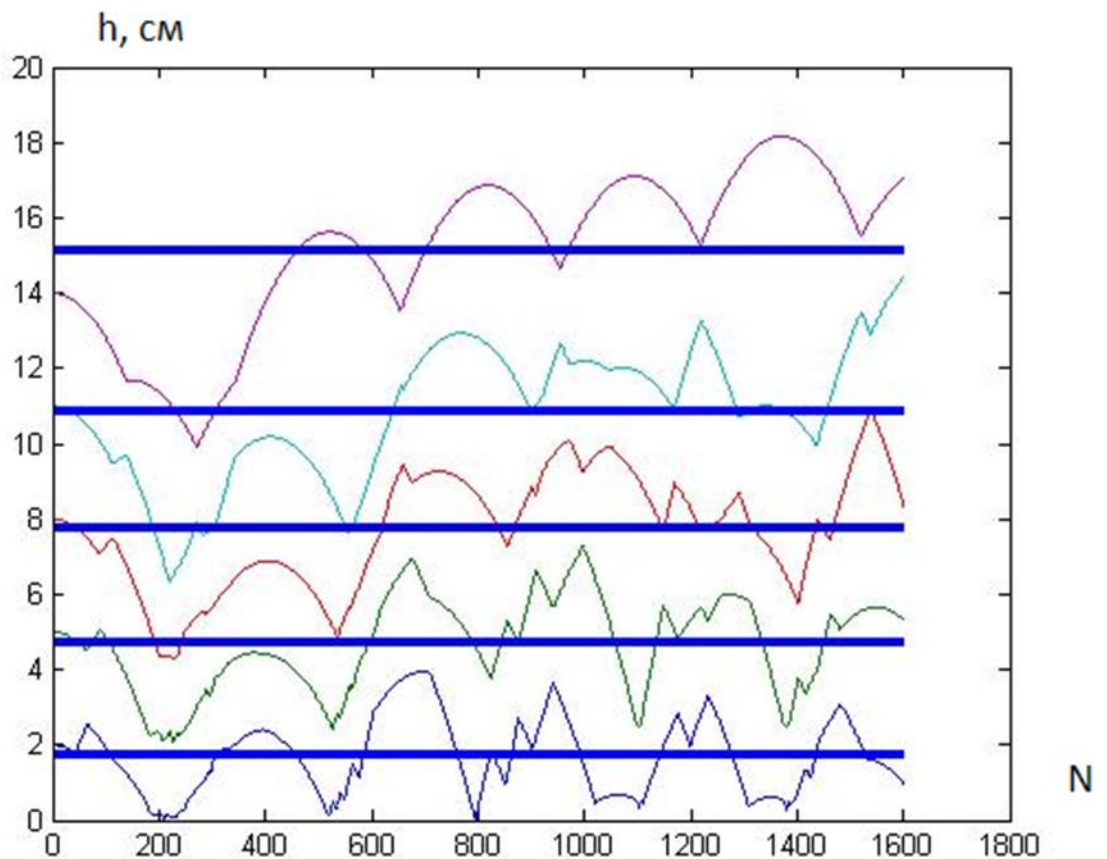


Рисунок 3.16. Положение каждой из 5 частицы в зависимости от времени движения

На рисунке 3.17 показано влияние числа частиц, участвующих в их движении по вертикальной оси, на количество ударов нижней частицы о сито.

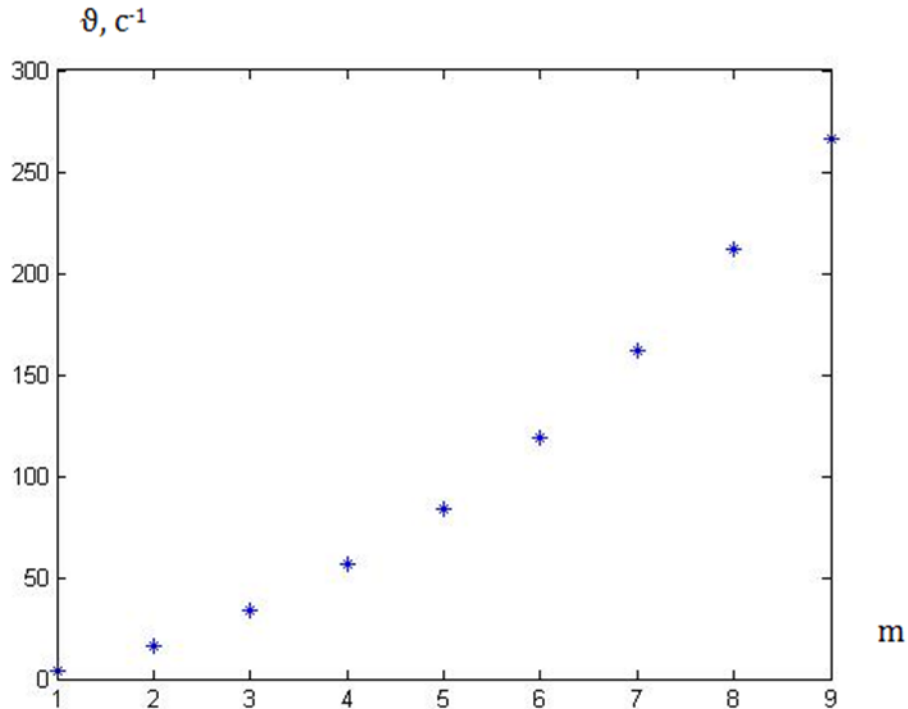


Рисунок 3.17. Зависимость числа ударов нижней частицы о сито от числа частиц в слое

Из рисунка 3.17 видно, что с ростом числа частиц в ансамбле количество соприкосновений их с ситом так же растет.

### 3.5. Выводы по главе 3

По результатам моделирования процесса фракционирования сыпучих материалов на вибрационных грохотах с пространственной траекторией колебаний сит можно сделать следующие выводы:

1. Ячеечная модель процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах позволила получить кинетику процесса.
2. Модель определения вероятности проникновения частиц через отверстия

сита позволяет учитывать сложную пространственную форму колебаний сита грохота.

3. Моделирование процесса проникновения частиц через отверстия просеивающей поверхности, рассматривающее взаимодействие одиночной частицы с вибрирующим ситом, является весьма приближенным, так как не позволяет учесть взаимодействия частиц друг с другом при их столкновениях.

4. Для построения математического описания процесса движения ансамбля частиц над ситом грохота и определения числа соударений частиц с ним применена одномерная версия метода дискретных элементов. Она базируется на динамическом описании движения каждой частицы ансамбля и изменении скоростей частиц при ударе друг о друга. Модель учитывает вертикальную составляющую пространственных колебаний сита.

5. Показано, что вероятности проникновения частиц через отверстия сита при одном соударении, когда сито неподвижно и совершает колебания, существенно отличаются.

6. Предложена имитационная модель определения вероятности беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита вибрационного грохота при одном соударении, уточняющая модель Годена-Андреева. Модель учитывает горизонтальную составляющую пространственных колебаний сита.

7. Учет порозности слоя сыпучего материала позволяет определить истинную высоту этого слоя и достоверно определить производительность грохота

## **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ГРОХОЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

Экспериментальное исследование процесса непрерывного грохочения сводится к отбору проб сыпучего материала, поступающего на сито грохота, надситового продукта, покидающего сито и подситового продукта, состоящего из частиц, прошедших через отверстия сита. Данной эмпирической информации недостаточно для управления процессом грохочения. Использовать данную информацию для идентификации математической модели, предложенной в диссертации, процессу непрерывного промышленного или лабораторного грохочения нельзя, так как предлагаемая нами модель требует введения в нее стохастических коэффициентов: скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии частиц проходовых фракций. Поэтому нами предлагается рассматривать процесс грохочения порции сыпучего материала, перемещающегося по ситам грохота, из которой извлекаются мелкие частицы проходовых фракций. Тогда информацию, необходимую для нашей математической модели, можно получать из лабораторных опытов периодического грохочения.

### **4.1. Методика и цели экспериментальных исследований**

Так как создание экспериментальной установки, сито которой совершало бы пространственные колебания, на настоящий момент не представляется возможным из-за технических и финансовых трудностей. Создание такого промышленного аппарата на настоящий момент также не реально. К сожалению, нет российских предприятий, производящих мощные электромагнитные вибровозбудители. Производство скользящих кинематических пар в условиях кризиса тяжелой и станкостроительной промышленности на настоящий момент не возможно. Поэтому эксперименты проводились на установках, имитирующих



процесс грохочения существующих промышленных инерционных грохотов.

Нами предлагается не воссоздавать непрерывный процесс грохочения в лабораторных условиях, а воспользоваться результатами исследований процесса периодического грохочения.

Использовались установки двух типов. Первая установка предназначалась для грохочения двухкомпонентной смеси частиц в плоскости. Вторая – для грохочения реальных песчано-гравийных смесей в условиях, близких к промышленным. Описание и результаты лабораторных испытаний изложено ниже.

Траекториями колебаний рабочих органов установок являлись окружности, то есть траектории или близкими к ним, которые создаются инерционными промышленными грохотами, в плоскости, перпендикулярной просеивающей поверхности. Так как окружность имеет вертикальную и горизонтальную составляющие, то информация, необходимая для введения в математическую модель имеется.

Конечным результатом каждого эксперимента, проводимого на этих установках, являлась кинетика грохочения, то есть степень извлечения частиц проходовых фракций из исходной смеси в различные моменты времени как наиболее информативная характеристика процесса.

Результаты эксперимента на установке первого типа можно было наблюдать визуально и фиксировать на фотокамеру. Для получения результатов эксперимента на установке второго типа приходилось отбирать пробы материала, делать ситовой анализ и взвешивание проб.

Целями экспериментальных исследований являлось:

- 1) создание расчетно-экспериментального метода определения стохастических параметров, вводимых в модель грохочения;
- 2) доказательство адекватности предлагаемой ячеечной модели реальному процессу грохочения;
- 3) проверка предлагаемой гипотезы по определению скорости проникновения частиц через отверстия сита.

## 4.2. Расчетно-экспериментальное исследование кинетики грохочения двухкомпонентной смеси на лабораторной установке периодического действия

На установке периодического грохочения плоского типа (рисунок 4.1) проводилось расчетно-экспериментальное исследование процесса фракционирования сыпучего материала по вибрирующей просеивающей поверхности. Использовалась лабораторная установка, представляющая собой плоский экран из прозрачных пластин, внутри которого находились плоские частицы: крупные диаметром 11 мм, мелкие – 4 мм.

Экран был разделен на две части проволочным ситом. Частицы перемещались в надситовом пространстве друг относительно друга. Мелкие частицы проникали в подситовое пространство через отверстия сита, которые имели размеры 5 или 10 мм.

Плоский экран, 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.

На рисунке 4.1 показано положение мелких частиц в надситовом и подситовом пространстве в различные моменты времени.

Серия экспериментов проводилась при следующих условиях: амплитуда колебаний экрана, а, следовательно, и сита – 5 мм, частота –  $100,5 \text{ с}^{-1}$ , размер отверстий сита – 10 мм. Количество опытов в серии, проводимых при одинаковых условиях, равнялось пяти.

По предлагаемой математической модели для данных условий грохочения в результате расчета определена вероятность проникновения частиц через отверстия сита, которая составила  $v_f = 0,21$ . При этом принималось количество частиц в слое  $m=5$ . Количество мелких частиц и их концентрация невелики. Поэтому средний размер частиц, расположенных по высоте слоя, принимался равным 11 мм. Количество соударений нижней частицы слоя с ситом,

определенное по предлагаемой методике (см. раздел 3.2 третьей главы), составило  $\vartheta = 58$  ударов в секунду при таком режиме колебаний. При этом в расчет вводился шаг интегрирования по времени  $\Delta t = 0,0001$  с. Вероятность свободного проникновения проходовой частицы через отверстие сита, определенная по предлагаемой имитационной модели (см. раздел 3.4 третьей главы) при таком режиме колебаний  $p_f = 0,405$ . Коэффициент живого сечения данного сита при размере отверстия 10 мм и диаметре проволоки равном 1 мм составил  $\varphi = 0,9$ . Время одного перехода в матрице переходных вероятностей ячеечной модели (см. раздел 3.1 третьей главы)  $\Delta \tau = 0,01$  с.

Высота слоя при выключенном вибраторе составила 56 мм. После запуска вибростенда по ряду фотоснимков виброожиженного слоя определялась его средняя высота. Она составила 87,5 мм. При расчете кинетики грохочения в программу модели вводилось пять ячеек слоя и шестая ячейка подситового пространства. Высота одной слоя  $\Delta y = 17,5$  мм.

Набор вероятностей в начальный момент времени образует следующий вектор-столбец состояния ячеек цепи

$$S^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Тогда матрица переходных вероятностей примет вид

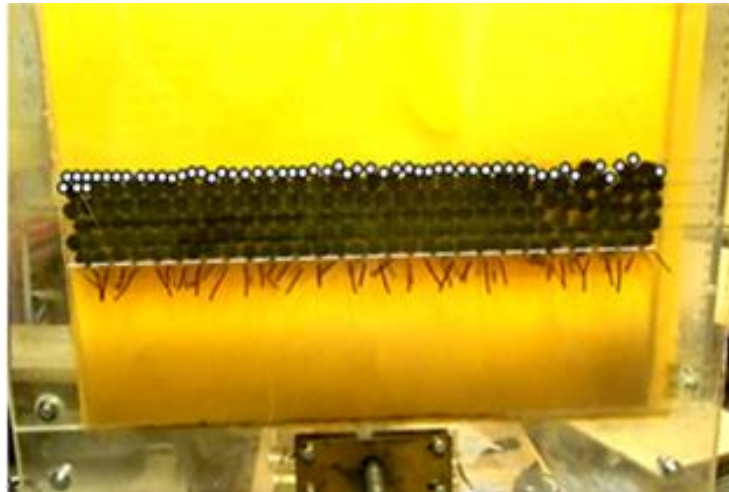
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v+d & p_{s2} & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v+d & p_{s3} & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v+d & p_{s4} & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v+d & p_{s5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Расчет кинетики грохочения проводился по формулам (3.10) – (3.6).

$t_0=0$



$t_1=10$  с



$t_2=15$  с



Рисунок 4.1. Лабораторная установка

Идентификация расчетных и средних опытных данных кинетики извлечения мелких фракций из исходной смеси позволила найти стохастические коэффициенты модели: безразмерный коэффициент макродиффузии  $d=0,0013$  и безразмерную скорость сегрегации  $v=0,015$ . На рисунке 4.2 приведены опытные и расчетные кинетики грохочения двухкомпонентной смеси. Кривая 1 кинетики и точки соответствуют экспериментальным данным, полученным из серии опытов при грохочении двухкомпонентной смеси при данном режиме.

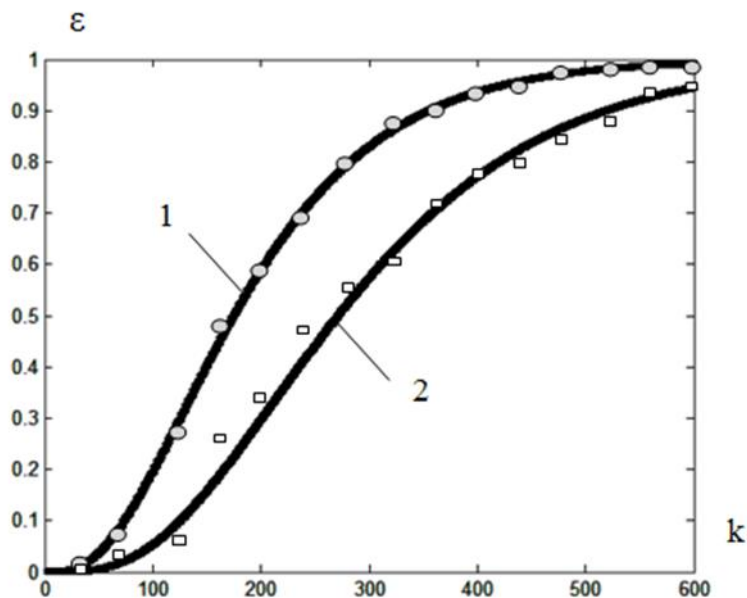


Рисунок 4.2. Кинетика грохочения двухкомпонентной смеси частиц

Кривая 2 получена расчетным путем для другой серии опытов, которые проводились в тех же условиях, но размер отверстия сита составил 5 мм. Для этой серии опытов расчетная вероятность проникновения частиц через отверстия сита составила  $v_f = 0,011$ . Расчеты производились по тому же алгоритму, но с учетом уменьшения размера отверстий сита.

Для построения кривой 2 использовались стохастические коэффициенты, полученный из первой серии опытов. Расхождение экспериментальных и

опытных данных не превышало 10 %, что доказывает адекватность предлагаемой модели кинетики грохочения исследуемому процессу и прогностические возможности методики определения вероятности проникновения частиц через отверстия сита.

Произведена проверка адекватности модели определения порозности виброоживленного слоя сыпучего материала, которая отслеживается по колебаниям верхней границы слоя. На рисунке 4.3 показана одна из фотографий слоя сыпучего материала того же опыта, на которой отмечена переменная и средняя граница слоя. Средняя высота слоя, определённая по средней границе, показанная на данной фотографии составила 84 мм.

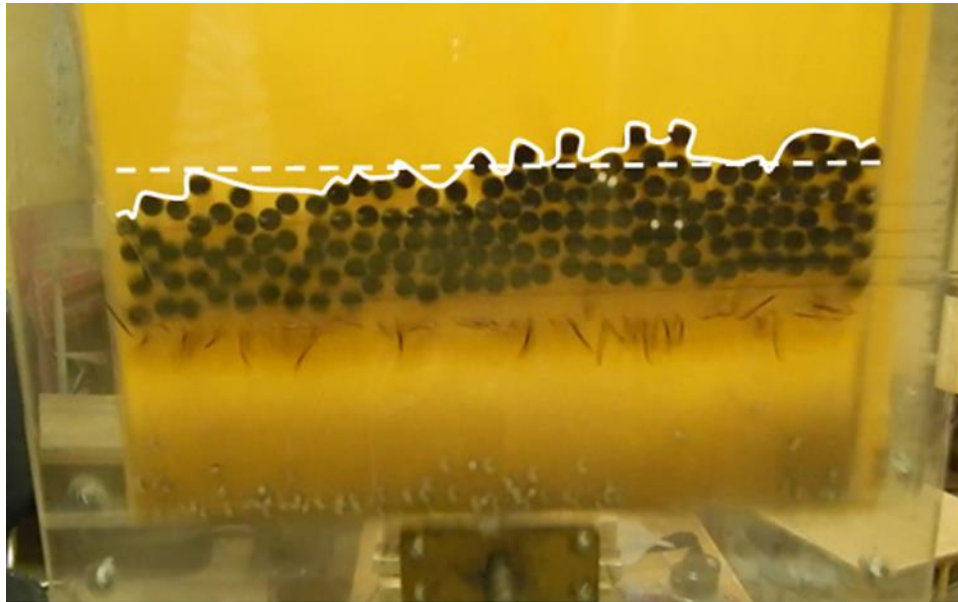


Рисунок 4.3. Определение средней высоты виброоживленного слоя

Как отмечалось ранее, средняя высота слоя составила 87,5 мм. Расчетная высота виброоживленного слоя определялась при следующих параметрах: число частиц по высоте слоя – 5; амплитуда колебаний сита – 5 мм; частота –  $100,5 \text{ с}^{-1}$ ; коэффициент восстановления скорости при ударе металлических частиц друг о друга и о металлическое сито – 0,7. Расчетная высота составила 91,6 мм, что отличается от опытного значения менее 5 %.

### **4.3. Расчетно-экспериментальное исследование кинетики грохочения многокомпонентной смеси на лабораторной установке периодического действия**

Опыты по периодическому грохочению реальных многокомпонентных смесей проводились на установка, показанной на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4. Вид установки по периодическому грохочению многокомпонентных смесей

Установка представляет собой короб с ситом, который может совершать круговые колебания с помощью эксцентрикового вала, приводимого во вращение электродвигателем. Установка реализует принцип работы гирационного грохота. В качестве сыпучего материала использовалась гравийно-песчаная смесь, которая является исходным сырьем, поступающим для фракционирования на промышленные грохоты.

На установке по периодическому грохочению многокомпонентных смесей проводились две серии опытов. Первая, с материалом, поступающим на нижнее сито грохота с размером ячейки 5 мм, работающего на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область, ООО «Тейковская земельная компания»). Вторая, сыпучим гравийно-песчаным материалом, поступающим на нижнюю просеивающую деку ирландской мобильной сортировочной дизельной установки Maximus 516, которая работает на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область).

Опыты проводились по той же методике, что и опыты по грохочению бинарной смеси частиц в плоской установке.

Сыпучая смесь предварительно взвешивалась, за тем подвергалась ситовому анализу, который проводился в ручную. Остаток на ситах так же взвешивался. Использовались весы аналитические ВЛР-200 2М второго класса точности и стандартные сита.

Пред грохочением взвешенные пробы тщательно перемешивались и выкладывались на сито неподвижного короба. Высота слоя, определенная с помощью прикидочных расчетов и, примерно, соответствовала высоте слоя при промышленном грохочении. Частота вращения двигателя соответствовала частоте колебаний сита промышленного грохота. Контроль за совпадением частот проводился с помощью прибора «Вибротест – МГ4». Амплитуда колебаний, равная эксцентриситету вала, выставлялась с помощью регулировочных винтов и соответствовала амплитуде колебаний промышленного сита.

Включался двигатель, сыпучий материал переходил в виброоживленное состояние. Мелкие проходные частицы начинали проникать через отверстия сита. Они собирались в коробки – кюветы, которые менялись через каждые 5 секунд. Весь процесс длился не более 30 секунд, что примерно соответствовало времени пребывания частиц на сите промышленного грохота. Содержимое в кюветах подвергалось ситовому анализу. Частицы каждой фракции взвешивались. По средним результатам 5 опытов определялись опытные значения извлечения



частиц каждой проходовой фракции из исходного материала в фиксированный момент времени.

Первая серия опытов проводилась с материалом, попадающим на сито с размером отверстий 5 мм. Опыт исследования процесса грохочения, накопленный Огурцовым В.А., Брик Е.Р., Алешиной А.П., Огурцовым Ал.В., позволил нам сделать предположение о том, что нижнее сито грохота, работающего на асфальтобетонном заводе ДС-168, представляющего собой перфорированный лист с круглыми отверстиями диаметром 5 мм, следует заменить на металлическую сетку квадратного сечения с размером 5x5 мм, что в последствии было подтверждено расчетно-экспериментальными исследованиями. Такое сито было установлено в короб лабораторного грохота.

Режим колебаний лабораторной установки соответствовал режиму колебаний грохота АБЗ. Частота равнялась 16,5 Гц. Амплитуда колебаний подбиралась следующим образом. Сито промышленного грохота совершало направленные колебания под углом  $45^\circ$  к просеивающей поверхности с амплитудой 5 мм. Таким образом, горизонтальная и вертикальная составляющие амплитуды равнялись 3,5 мм. Такая амплитуда круговых колебаний выставлялась для лабораторной установки. По нашему мнению, это несоответствие не окажет существенного влияния на результаты исследований. Траектория круговых колебаний так же имеет вертикальную и горизонтальную составляющие.

Вертикальная составляющая колебаний определяет процесс сегрегации мелких частиц в среде крупных. Так же она определяет количество соударений нижних частиц слоя сыпучего материала с ситом.

Горизонтальная составляющая колебаний определяет процесс проникновения отдельной частицы через отверстия сита.

Следовательно, колебательный режим лабораторной установки соответствовал колебательному режим грохота АБЗ.

В таблице 4.1 приведен фракционный состав исследуемой сыпучей среды, поступающей на нижнее сито грохота, которая была взята для тестовых экспериментов в лаборатории ИВГПУ.

Таблица 4.1. Фракционный состав сыпучей среды, поступающей  
на сито грохота АБЗ

Наименование остатка	Остатки на ситах, % по массе						Проход через сито с сеткой № 0,16
	7,5	5,0	2,5	1,25	0,315	0,16	
Частный	34,33	20,65	17,77	9,32	8,89	3,45	5,59
Полный	34,33	54,98	72,75	82,07	90,96	94,41	

При одинаковых условиях была проведена серия из пяти опытов. Подситовой сыпучий материал, собранный в кюветы подвергался ситовому анализу на ситах 2,5 мм, 1,25 мм, 0,315 мм и 0,16 мм и взвешивался. Таким образом, подситовой продукт состоял из 4 фракций. Результаты экспериментов позволили построить опытные кинетики грохочения каждой фракции.

По методике, изложенной в главе 3, определялось число соударений частиц с ситом грохота в секунду для вибрационного режима установки. Определялась вероятность свободного проникновения частиц через отверстия сита для каждой проходовой фракции.

Используя ячеечную модель, проводилась идентификация расчетной и опытной кинетики грохочения, которая позволила определить параметры модели: безразмерный коэффициент диффузии, безразмерную скорость сегрегации и безразмерную скорость проникновения проходových частиц через отверстия сита.

На рисунках 4.5, 4.6, 4.7 и 4.8 показаны расчетные кинетики грохочения и опытные значения излечений частиц каждой проходовой фракции из исходной смеси.

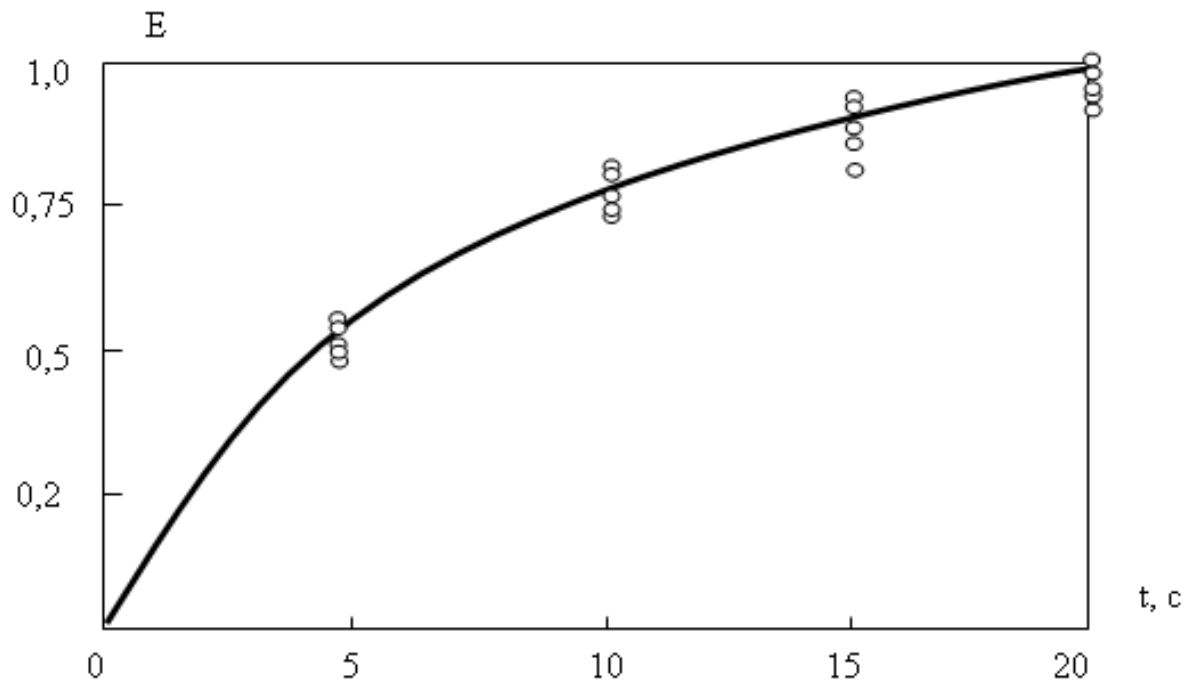


Рисунок 4.5. Кинетика грохочения фракции 0 – 0,315 мм (I серия опытов)

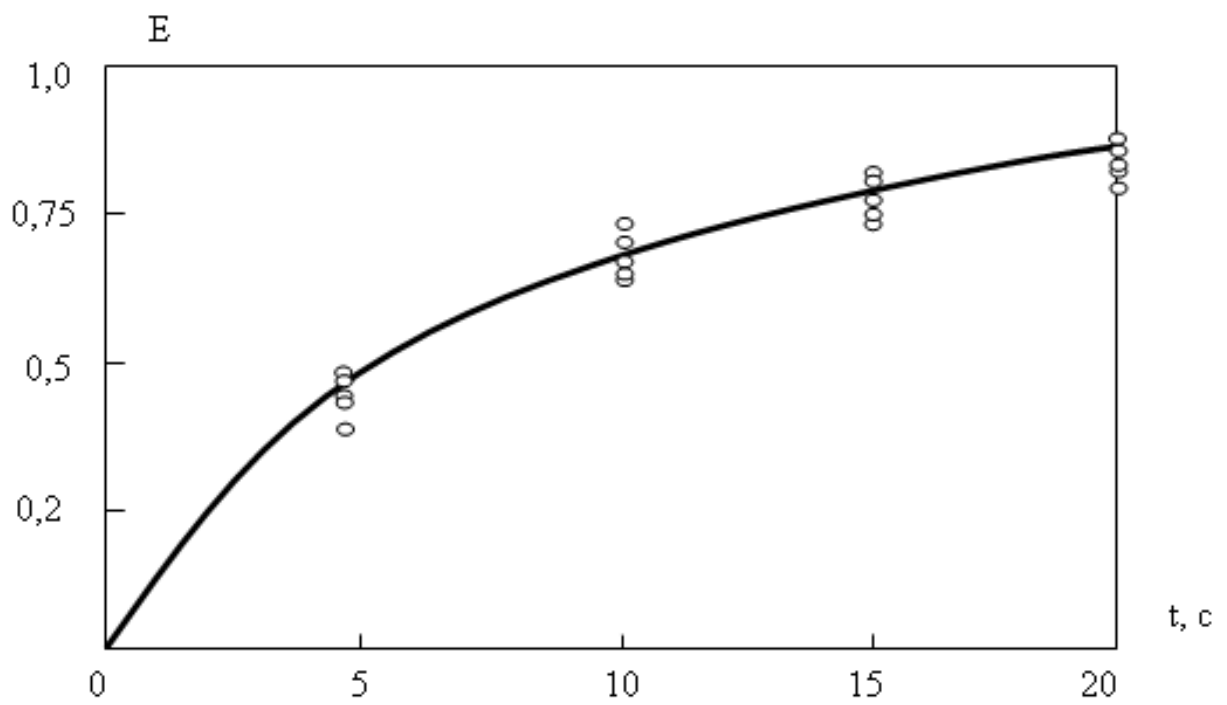


Рисунок 4.6. Кинетика грохочения фракции 0,315 – 1,25 мм (I серия опытов)

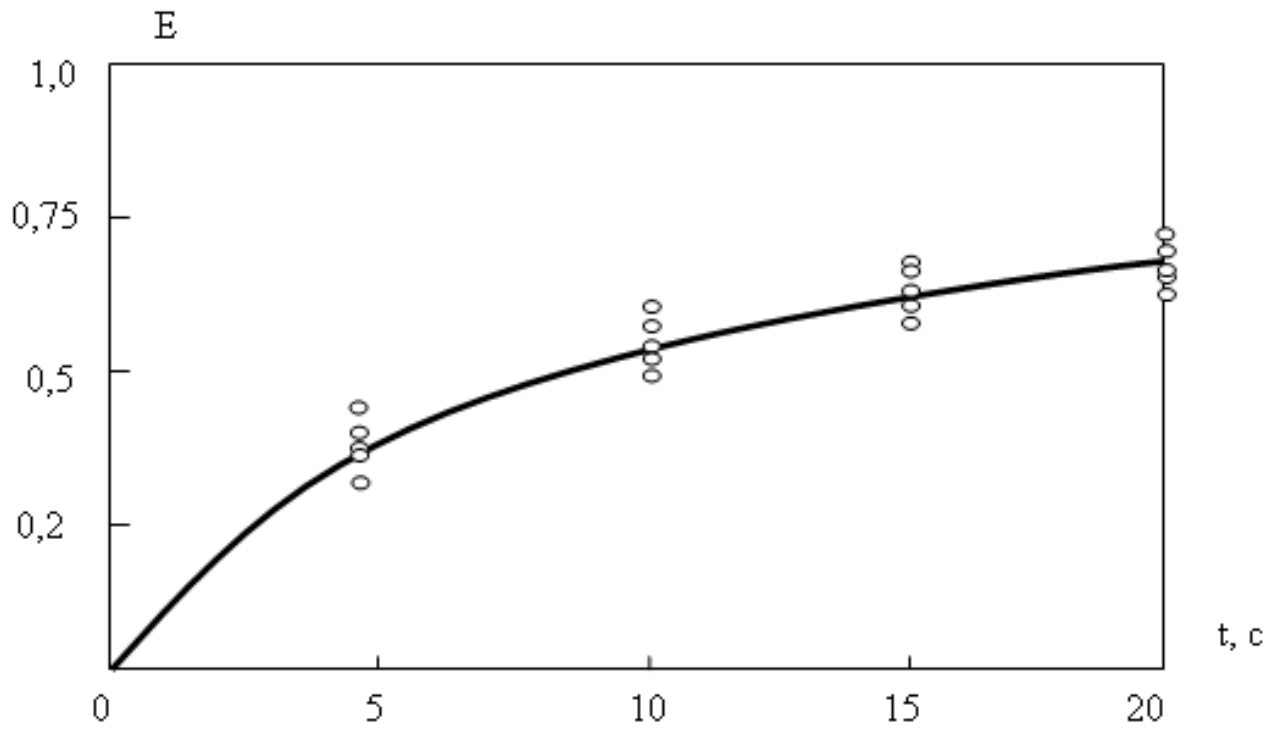


Рисунок 4.7. Кинетика грохочения фракции 1,25 – 2,5 мм (I серия опытов)

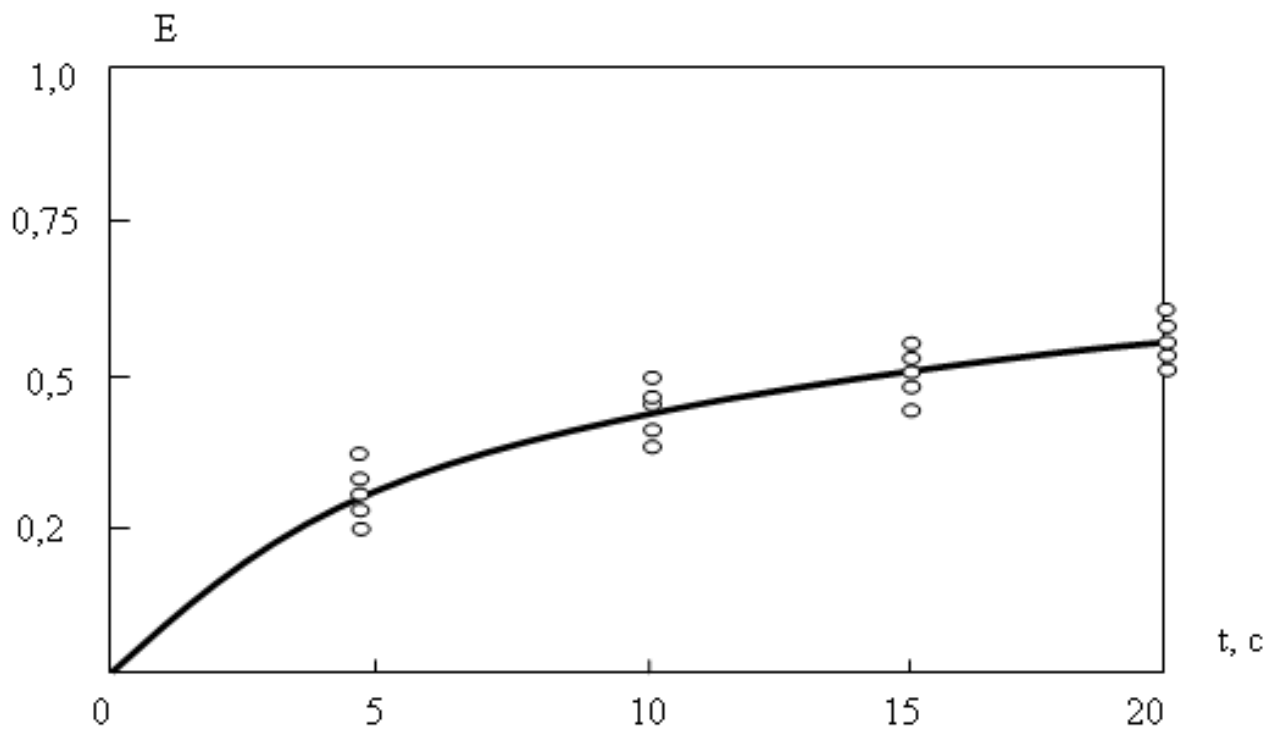


Рисунок 4.8. Кинетика грохочения фракции 2,5 – 5,0 мм (I серия опытов)

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Стохастические коэффициенты ячеечной модели, полученные из первой серии опытов

Класс крупности, мм	Безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия сита	Безразмерный коэффициент макроdiffузии	Безразмерная скорость сегрегации
0 - 0,315	0,423	0,0156	0, 266
0,315 – 1,25	0,367	0,0132	0,198
1,25 – 2,5	0,141	0,0054	0, 097
2,5 – 5,0	0,106	0,0032	0, 077

Вторая серия опытов проводилась с сыпучим гравийно-песчаным материалом, поступающим на нижнее сито с размером квадратной ячейки размером 5x5 мм ирландской мобильной сортировочной установки Maximus 516, которая работает на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область).

По результатам исследования фракционного состава сыпучей среды в разных точках карьера, проведенном сотрудниками ООО «Фурмановская земельная компания», был определен средний фракционный состав и приготовлена смесь для проведения опытов на лабораторной установке.

Из материала были удалены камни крупнее 20 мм, так как их содержание в добываемом сырье невелико.

Проводилась вторая серия опытов по методике, изложенной выше. На установке был выставлен следующий вибрационный режим: частота колебаний сита – 4 мм, частота колебаний – 13 Гц. Количество опытов в серии 5. Подситовой материал собирался в кюветы, которые менялись через каждые 5 секунд. По окончании опыта материал из каждой рассеивался на ситах и взвешивался.

Результаты опытов и расчётные кривые кинетики грохочения частиц каждой фракции представлены на рисунках 4.9, 4.10, 4.11 и 4.12.

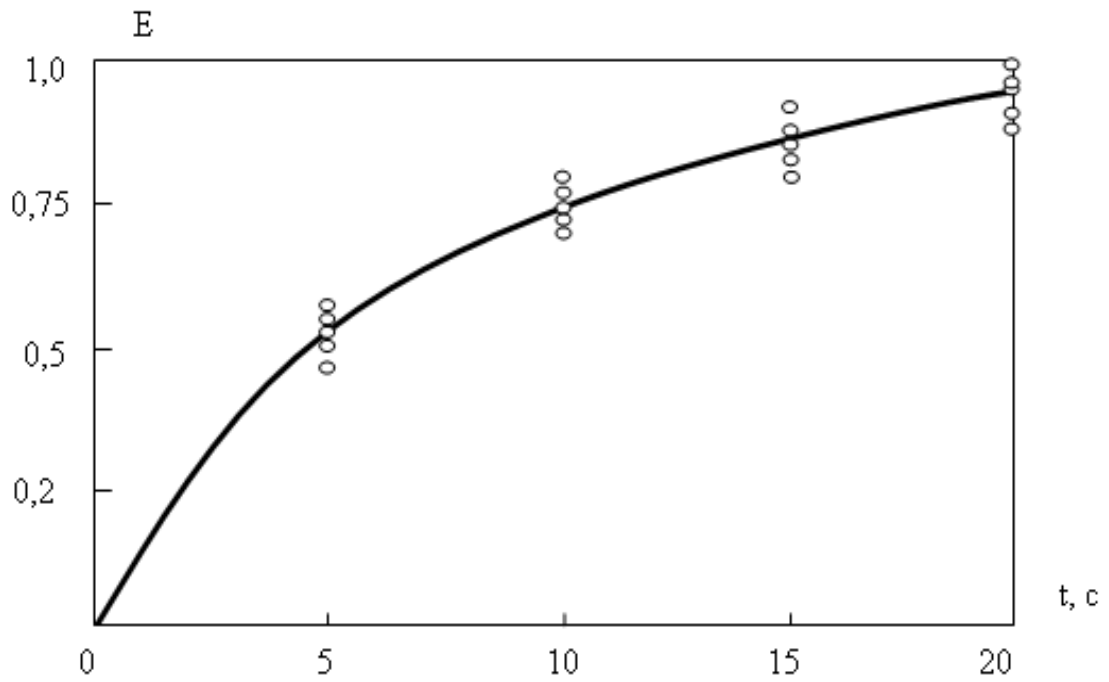


Рисунок 4.9. Кинетика грохочения фракции 0 - 0,315 мм (II серия опытов)

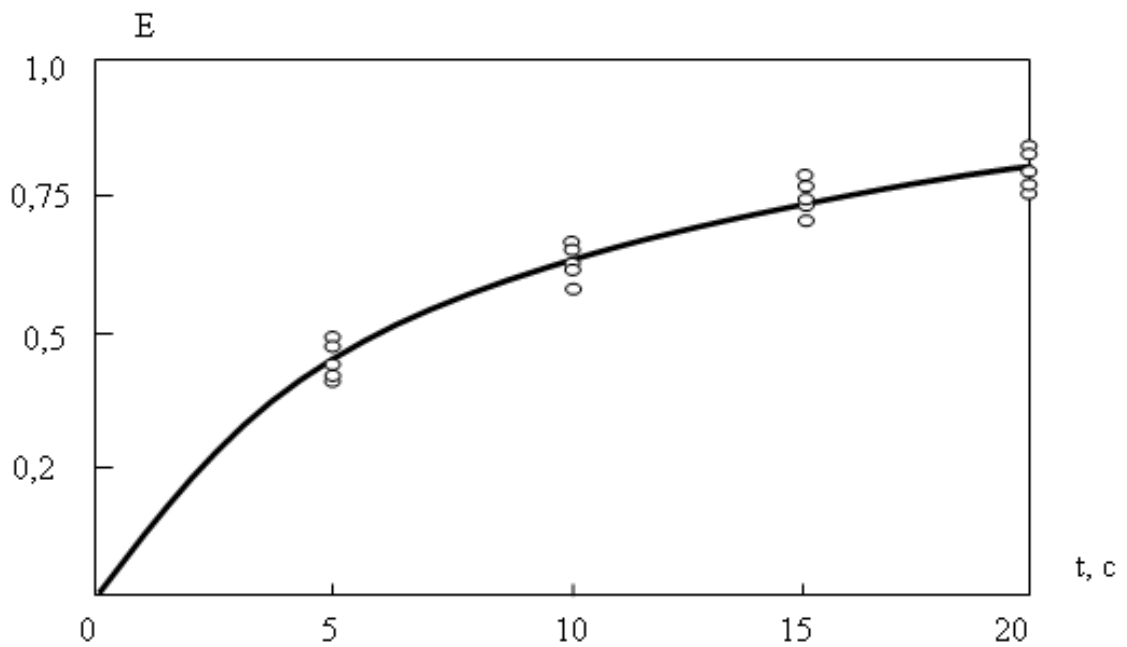


Рисунок 4.10. Кинетика грохочения фракции 0,315 - 1,25 мм (II серия опытов)

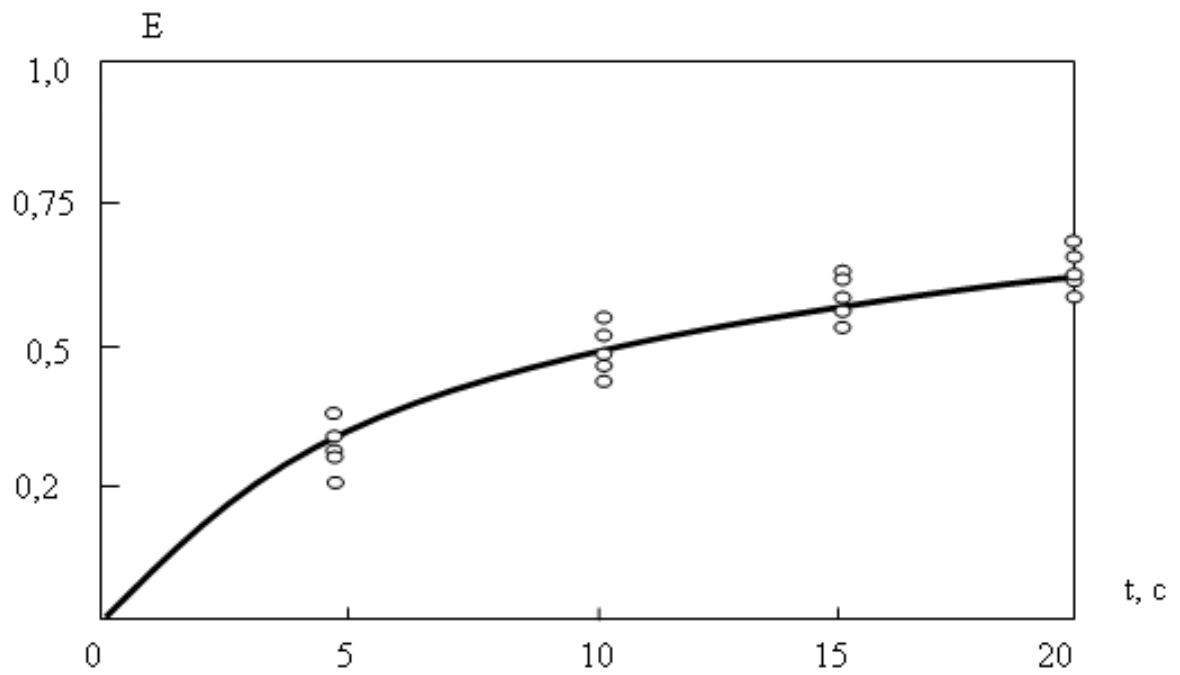


Рисунок 4.11. Кинетика грохочения фракции 1,25 – 2,5 мм (II серия опытов)

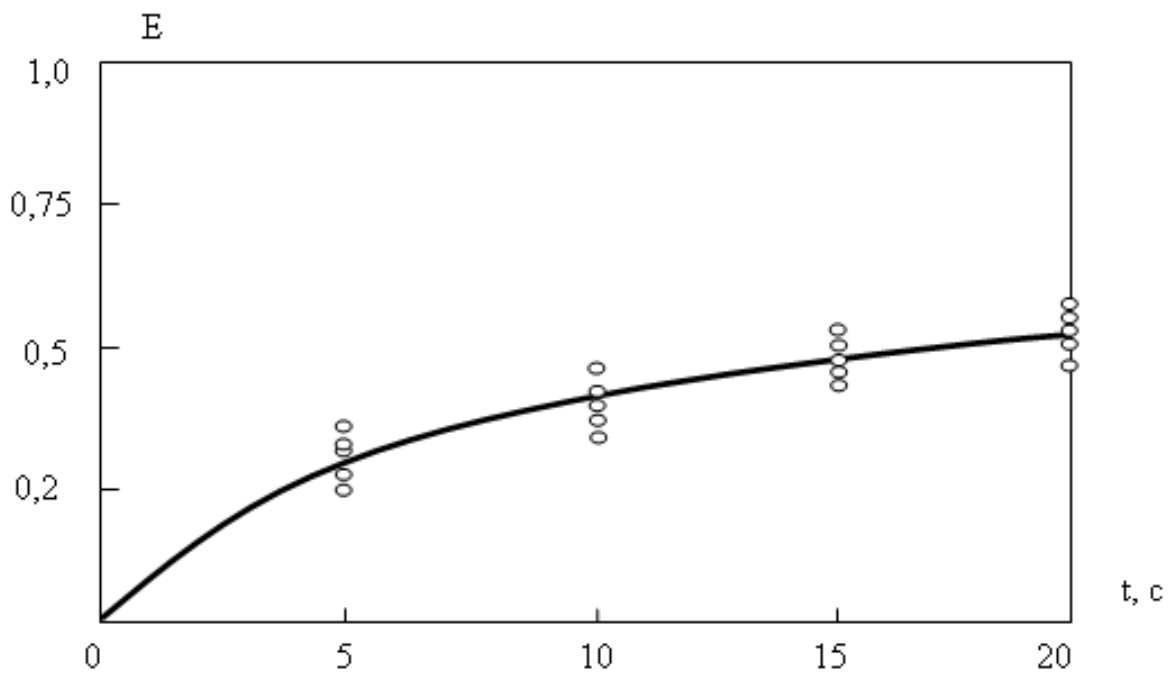


Рисунок 4.12. Кинетика грохочения фракции 2,5 – 5,0 мм (II серия опытов)

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Стохастические коэффициенты ячеечной модели, полученные из второй серии опытов

Класс крупности, мм	Безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия сита	Безразмерный коэффициент макродиффузии	Безразмерная скорость сегрегации
0 - 0,315	0,401	0,0198	0, 256
0,315 – 1,25	0,367	0,0132	0,198
1,25 – 2,5	0,231	0,0054	0, 107
2,5 – 5,0	0,176	0,0032	0, 097

#### 4.4. Выводы по главе 4

1. Разработаны установки, позволившие реализовать процесс периодического грохочения.
2. Удовлетворительное совпадение результатов расчётных и опытных данных доказывает достоверность расчета при использовании ячеечной модели процесса грохочения и методики определения скорости проникновения проходových частиц через отверстия сита .
3. Произведена проверка адекватности модели определения порозности виброожиженного слоя сыпучего материала.
4. Разработан алгоритм определения стохастических параметров ячеечной модели процесса грохочения с помощью тестовых опытов для промышленных условий.



## ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

### 5.1. Применение разработанных моделей и программно-алгоритмического обеспечения на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область)

Производство асфальтобетонной смеси на асфальтобетонном заводе ДС-168 подразделяется на следующие процессы:

- складирование и предварительное дозирование материалов;
- сушка и подогрев минеральных материалов;
- грохочение и дозирование горячих минеральных материалов;
- складирование и дозирование связующего – битума;
- перемешивание компонентов, отгрузка или промежуточное складирование готовой смеси.

На рисунке 5.1 показан вид асфальтобетонного завода ДС-168. Конструкция установки выполнена по вертикальной схеме, в смесительной башне которой объединены все основные модули – агрегаты, включая бункер готовой смеси, что позволяет отказаться от скипового подъёмника, как нетехнологичного и сложного агрегата.

Линейный грохот находится в «голове» смесительной башни и служит для разделения исходной смеси материала на необходимые фракции, размер зерна которых определяется размером ячеек сит грохота.

Грохот конструктивно выполнен единым узлом и монтируется на промежуточном бункере горячего материала. Внутри неподвижного несущего корпуса грохота находится подвижный корпус с ситами, который вывешен на пружинах-демпферах.

На верхней части подвижного корпуса крепится траверса с двумя вибраторами, которые в процессе работы вызывают направленные линейные колебания, вынуждающие двигаться падающую минеральную смесь песка и гравия в нужном направлении. На входе грохота с загружающего рукава горячего

элеватора стоит управляемая с центрального компьютера, заслонка, которая направляет поток материала либо на сита грохота, либо сразу в большой карман промежуточного бункера без разделения смеси на фракции (положение заслонки определяется рецептурой приготавливаемого асфальта).

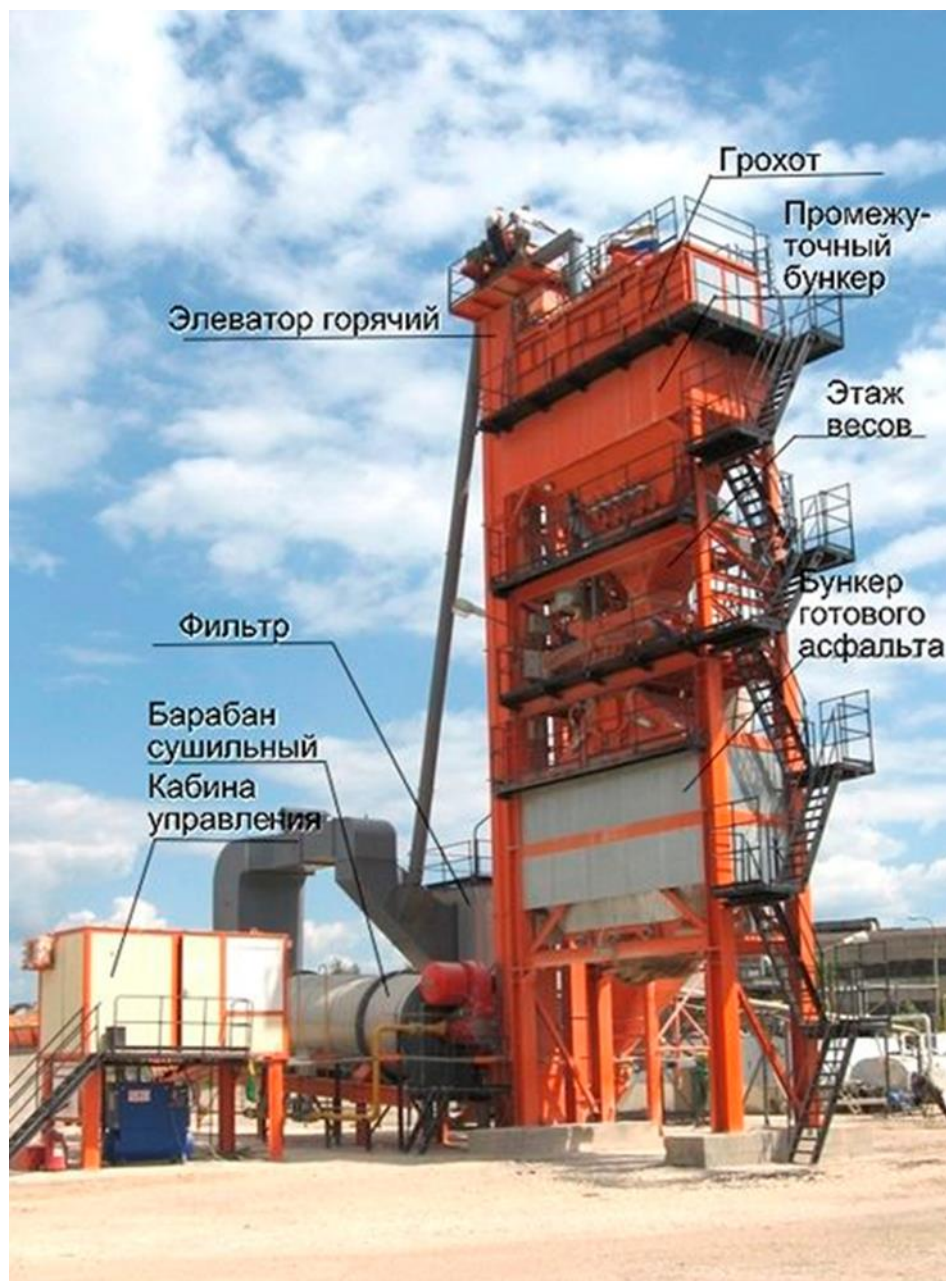


Рисунок 5.1. Асфальтобетонный завод ДС-168

Промежуточный бункер горячих минералов является цельной сварной конструкцией, затворная часть которого выполнена отдельным узлом, и крепиться

к нижней части бункера через присоединительный фланец. Промежуточный бункер разделен внутренними перегородками на пять карманов, соответственно предназначенных для четырех фракций исходного минерального сырья после его разгрохотки.

Стенки бункера выполнены двойными, что позволяет поддерживать заданную температуру горячих минеральных фракций. Затворы нижней части закрываются и открываются при помощи пневмоцилиндров в соответствии с заданной рецептурой приготавливаемого асфальта.

Также в рамную конструкцию промежуточного бункера вписан бункер для сбора собственной пыли, которая загружается в него элеватором пыли и в случае переполнения бункера сбрасывается в ёмкость для хранения собственной пыли. Промежуточный бункер устанавливается и монтируется на весовом модуле, затворы бункера материала и собственной пыли соединены с соответствующими весами материала и собственной пыли.

Также в рамную конструкцию бункера вписан бункер для добавок-пластификатора, которые загружаются в него либо вручную через верхний люк, либо закачиваются по трубопроводу снизу нагнетающим пневмопитателем.

На нижнем фланце бункера смонтирован шлюзовой затвор барабанного типа, который дозирует добавку-пластификатор попадающего в весы. Весовой модуль представляет из себя рамную конструкцию на которой смонтированы весы материала, рассчитанные на массу до двух тонн, весы минерального порошка, весы горячего битума и весы добавок..

Ёмкости весов вывешены на раме через тензометрические датчики балочного типа, сигнал с которых поступает на центральный компьютер управления АБЗ. Затворы всех весов открываются пневмоцилиндрами.

Весы битума закрыты утеплителем и имеют аварийный датчик выключения битумного насоса на случай переполнения резервуара весов. Весовой модуль устанавливается и монтируется на смесительном модуле, затворы весов вводятся в крышку мешалки и герметизируются гибкими рукавами.

Смесительный модуль включает в себя мешалку производительностью 160

тонн смеси в час, которая смонтирована на раме, устанавливаемой на бункер готового асфальта.

Конструкция мешалки двухвальная с перемешивающими лопатками. Валы приводятся во вращение двумя электродвигателями мощностью 22 кВт через ременную передачу и синхронизирующий зубчатый редуктор. Затвор мешалки открывается пневмоцилиндрами через рычаги замкового типа. Время замеса составляет около 40 секунд.

Бункер готового асфальта установлен на опорных колоннах и конструктивно состоит из двух основных загрузочных карманов ёмкостью 25 тонн каждый, центрального кармана для прямой загрузки асфальта ёмкостью пять тонн и бокового кармана для сбора негабаритного материала.

Принцип работы асфальтобетонного завода ДС-168.

Сырой материал и песок загружаются автопогрузчиком в бункера-дозаторы. Далее по заданной рецептуре материал из бункеров отгружается ленточными питателями на сборный транспортер, с него материал поступает на загрузочный транспортер и загружается в сушильный барабан. В сушильном барабане материал сушится и нагревается до температуры 150-180 градусов. Из сушильного барабана материал стекает в горячий элеватор. Далее смесь материала поднимается горячим элеватором на смесительную башню и попадает в грохот. В грохоте происходит разделение смеси на четыре отдельные фракции: больше 50 мм, 10 – 50 мм, 5 -10 мм, 0 – 5 мм.

Из грохота готовые фракции материала ссыпаются в соответствующие карманы бункера горячих материалов. Из бункера горячих материалов каждая фракция в соответствии с заданной рецептурой отгружается в весы материала. После взвешивания горячий материал, смесь минерального порошка и собственной пыли, которые находятся в весах пыли, а также горячий битум, который находится соответственно в весах битума, сбрасываются в смеситель и интенсивно перемешиваются. Далее готовая асфальтовая смесь из смесителя сбрасывается в соответствующий карман бункера готовой смеси и отгружается потребителю, по мере требования.

При приготовлении асфальтобетонной смеси контролируют: качество всех компонентов, температурный режим подготовки битума, температуру нагрева минеральных материалов, температуру готовой асфальтобетонной смеси, качество готовой смеси.

На АБЗ проводят входной, операционный и приемочный контроль.

При входном контроле устанавливают соответствие качества исходных материалов каждой поступающей на АБЗ партии стандартам. Качество поверхностно-активных веществ оценивают по показателю сцепления смеси битума и ПАВ с поверхностью минеральной части асфальтобетонной смеси по ГОСТ 12801-84. Операционный контроль осуществляют не реже 1 раза в 10 смен, определяя зерновой состав щебня (гравия), песка, материалов из отсевов дробления и минерального порошка, содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне (гравии) и песке, влажность неактивированного минерального порошка и порошковых отходов промышленности, гидрофобность активированного минерального порошка.

Показатели физико-механических свойств должны соответствовать требованиям, предъявляемым ГОСТ 9128-84 к данному виду асфальтобетона.

Зерновой состав и содержание битума рекомендуется определять одним из ускоренных способов, приведенных в ГОСТ 12801-84. Помимо этого, для контроля зернового состава минеральной части рекомендуется отбирать "сухие" замесы из смесителя, т.е. смесь минеральных материалов без битума. Осуществляется контроль качества исходных материалов

Для обеспечения выпуска качественной продукции заводская лаборатория осуществляет систематический контроль поступающих на завод материалов, она же контролирует технологический процесс приготовления смесей и готовую продукцию.

Щебень из плотных горных пород и гравий, щебень из шлаков, входящие в состав смесей, должны соответствовать требованиям ГОСТ 8267 и ГОСТ 3344 соответственно. Допускается применять щебень и гравий, выпускаемые по зарубежным нормам, при условии соответствия их качества требованиям

стандарта. Средневзвешенное содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы в смеси фракций щебня и гравия должно быть, % по массе, не более: 15 - для смесей типа А и высокоплотных; 25 - для смесей типов Б, Бх и высокопористых; 35 - для смесей типов В, Вх и пористых. Гравийно-песчаные смеси по зерновому составу должны соответствовать требованиям ГОСТ 23735, гравий и песок, входящие в состав этих смесей, - ГОСТ 8267 и ГОСТ 8736 соответственно.

Для приготовления смесей и асфальтобетонов применяют щебень и гравий фракций от 5 до 10 мм, свыше 10 до 20 (15) мм, свыше 15 до 20 мм, свыше 20 (15) до 40 мм, а также смеси указанных фракций. Природный песок и песок из отсевов дробления горных пород должны соответствовать требованиям ГОСТ 8736 и ГОСТ 31424, при этом марка по прочности песка из отсевов дробления горных пород и содержание глинистых частиц, определяемых методом набухания, для смесей и асфальтобетонов конкретных марок и типов должны соответствовать нормативным требованиям. Общее содержание зерен мельче 0,16 мм (в том числе пылевидных и глинистых частиц) в песке из отсевов дробления не нормируется.

Минеральный порошок, входящий в состав смесей и асфальтобетонов, должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 52129. Допускается применять в качестве минеральных порошков для пористого и высокопористого асфальтобетона, а также для плотного асфальтобетона II и III марок техногенные отходы промышленного производства (измельченные основные металлургические шлаки, золы-уноса, золошлаковые смеси, цементная пыль-уноса).

Очевидно, что соответствие фракционного состава разработанному рецепту смеси радикально влияет на ее качество, и что это качество зависит от качества отсева каменных материалов, которое обеспечивает грохот.

При анализе работы АБЗ нами было обнаружено, что засоренность фракций частицами других размеров достигает от 15 % до 25%, а фракционный состав сухой смеси сильно отличается от заданного рецептом. Это отличие объясняется неточной работой грохота. На заводе процессу грохочения уделяется

недостаточное внимание. По фракции 5 – 10 мм в ряда испытаниях, проведенного нами вместе с сотрудниками завода, определилось сильное замелчение фракции. Эффективность работы сита с размером отверстия 5 мм должна быть не ниже 85 %. Результаты испытаний показали, что эффективность работы сита лишь в некоторых случаях составляла 82,5 %.

Грохот работает в следующем режиме: производительность – 90 т/час; амплитуда колебаний – 5 мм; частота колебаний – 16,5 Гц; площадь просеивания – 6,7м<sup>2</sup>, угол направленных колебаний к поверхности сита – 45°.

Сито, которое должно отделять фракцию 0 – 5 мм, представляло собой штампованный лист с круглыми отверстиями, расположенными шахматном порядке, размером 5 мм. Коэффициент живого сечения сита составил 45 %.

Для получения требуемой чистоты отсева нами было предложено заменить перфорированный лист на металлическую канилированную сетку с размерами квадратных отверстий 5x5 мм и диаметром проволоки 2 мм. Живое сечение такого сита составит 51 %. Его прочность за счет толстой проволоки почти не уступает перфорированному ситу. При данной производительности грохота, площади сита и параметрах вибрации предложенное сито обеспечит эффективность отсева 85 %.

## **5.2. Методика определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» (г. Иваново)**

Группа компаний Ивановское карьероуправление разрабатывает несколько месторождений гравийно-песчаного материала в Фурмановском, Тейковском, Ильинском, Комсомольском и Южском районах Ивановской области. К ним относятся:

- 1 «Душиловский» участок Новинкинского песчанл-гравийно-валунного месторождения в Фурмановском районе Ивановской области.
- 2 Голчаново-Мельцаевское месторождение песков в Фурмановском районе Ивановской области.
- 3 Хмельниковское песчано-гравийное месторождение в Тейковском районе Ивановской области.
4. Красницкое песчано-гравийное месторождение в Тейковском районе ивановской области.
5. Осиновский участок Усть-Лапшинского песчано-гравийного месторождения в Тейковском районе Ивановской области.
6. Мытищенское песчано-гравийного месторождение в Комсомольском районе Ивановской области.
7. Сафроновское гравийно-песчаное месторождение в Ильинском районе Ивановской области.
8. Участок «Петряйка» Петряйко-Левинского песчано-гравийного месторождения в Ильинском районе Ивановской области.
- 9 Левинский и Спиркинский участки Петряйко-Левинского песчано-гравийного месторождения в Ильинском районе Ивановской области.
10. Осиновское песчано гравийное месторождение в Ильинском районе Ивановской области.

Месторождения разрабатываются открытым способом. Вскрыша производится при помощи бульдозеров и гидравлических экскаваторов с



обратной лопатой с погрузкой в автосамосвалы. Добыча производится гидравлических экскаваторов с обратной лопатой с погрузкой в мобильные дизельные установки, где производится предварительное обогащение материала. В забое происходит разделение на 3 фракции 0-5мм (песок), 5-20мм (гравий) и 20-100 мм.

Душиловский участок месторождения расположен в наиболее высокой части Новинкинского месторождения. Высотные отметки Новинкинского месторождения лежат в пределах 150-160 м абсолютной высоты, а на Душиловском участке они достигают 174,9 м.

В "шапке" основного пласта полезной толщи Душиловского участка имеются дополнительные скопления гравийно-валунного материала. Этим, наиболее молодым образованиям краевой зоны поздней стадии московского оледенения присуща большая концентрация валунно-гравийного материала, высокая его глинистость и, местами, сцементированность железисто-глинистым и известково-глинистым цементом, вплоть до образования породы типа слабого конгломерата. Данные подтверждаются отчётом о детальной разведке Душиловского участка Новинкинского песчано-гравийно-валунного месторождения в Фурмановском районе Ивановской области", составленным сотрудниками Ивановского карьероуправления.

Вскрыша месторождения представлена:

- почвенно-растительным слоем мощность от 0,2 – 0,3 м;
- озерно-болотными отложениями Микулинского межледниковья.

Мощность озерно-болотных отложений колеблется от 1,2 до 4,0 м. Встречаются они во вскрыше полезного ископаемого в виде линз между покровными отложениями и песчано-гравийной толщей.

Покровные отложения представлены суглинками светло – коричневыми с единичными включениями гравия и валунов. Средняя мощность вскрыши по месторождению составляет 4,4м и колеблется от 2,2 до 10,4м.

Полезная толща представлена песчано-гравийно-валунными образованиями озов и камов. В составе песчано-гравийно-валунной толщи встречаются линзы,

гнезда и прослой супесей, коричневых суглинков с гравием, иногда сильно запесоченными. Средняя мощность по месторождению составляет 13,1м и колеблется от 3,4 до 22,8м. Характер залегания полезной толщи линзообразный. В краевых частях линз полезная толщина постепенно, а местами и резко, выклинивается.

В юго-восточной части месторождения в районе между шурфами 180, 187,190 в процессе разработки выявлено резкое снижение качества горной массы со снижением выхода каменного материала до 30%. Данное ухудшение горно-геологических условий при геологоразведочных работах не выявлено. По трудности разработки вскрышные породы отнесены к 3-й группе, полезная толщина - к 4-й группе.

Гравий и валуны в основном представлены крепкими изверженными и осадочными породами (диабазами, гранитами, песчаниками, кварцитом, известняками и доломитом), среди которых в валунах преобладают диабазы (40,26%), карбонатные породы (21,57%) и граниты (17,15%) от общего количества разобранных камней. В гравии преобладают диабазы, известняки и доломиты (в сумме 61,45%), кварциты и песчаники (18,54%), граниты составляют в среднем 10,55%. Все пробы по дробимости относятся к маркам от М-600 до М-800.

По истираемости гравия в полочном барабане гравий относится к маркам И-1, по морозостойкости гравий отнесен к марке от F-150 до F-200, плотность горной массы в плотном состоянии составляет  $2,4\text{т/м}^3 - 2,5\text{ т/м}^3$ . Коэффициент разрыхления – 1,25.

На участке «Душиловское» в карьере сотрудниками ООО «Фурмановская земельная компания» были взяты пробы сыпучего материала в различных точках Новинкинского песчано-гравийно-валунного месторождения, которые показали следующее. Месторождение полезного ископаемого характеризуется плохой сортированностью материала, большой глинистостью (от 10 до 21,6%). Содержание крупноблочного материала и валунов составляет в среднем 64,29 %. Восточная часть месторождения, где в настоящее время ведутся работы,

характеризуются высокой глинистостью пород (до 20%), встречаются участки связанности их железисто-известковым составом. Результаты проведенных испытаний приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Испытания песчано-гравийной смеси

Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф №1
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
<b>70</b>	0
<b>5</b>	39,9
<b>3</b>	14,9
<b>менее 3</b>	45,2
<b>Глина в комках, %</b>	11
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф №2
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
<b>70</b>	15,68
<b>5</b>	17,65
<b>3</b>	15,99
<b>менее 3</b>	50,68
<b>Глина в комках, %</b>	12,1
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф № 3
Название поставщика материала:	Душиловский участок

Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
<b>70</b>	16,9
<b>5</b>	43,16
<b>3</b>	7,59
<b>менее 3</b>	32,34
<b>Глина в комках, %</b>	4,83
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф № 4
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
<b>70</b>	0
<b>5</b>	18,29
<b>3</b>	6,66
<b>менее 3</b>	75,05
<b>Глина в комках, %</b>	1,42
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф № 5
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
<b>70</b>	0
<b>5</b>	39,03
<b>3</b>	9,07
<b>менее 3</b>	51,9
<b>Глина в комках, %</b>	5,87
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016

Наименование материала:	шурф № 6
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
70	0
5	26,42
3	5,77
менее 3	67,81
<b>Глина в комках, %</b>	4,78
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2017
Наименование материала:	шурф № 7
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
70	7,38
5	44,68
3	14,46
менее 3	33,48
<b>Глина в комках, %</b>	7,2
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94
Дата отбора пробы:	23.06.2016
Наименование материала:	шурф № Е 16
Название поставщика материала:	Душиловский участок
Наименование показателя	Фактические данные
<b>Зерновой состав: частные остатки на ситах, %</b>	
70	11,3
5	40,86
3	11,49
менее 3	36,35
<b>Глина в комках, %</b>	11,8
<b>Средняя пылевидных и глинистых, %</b>	14,94



Рисунок 5.2. Мобильная сортировочная дизельная установка Maximus 516

На рисунке 5.2. показана мобильная сортировочная дизельная установка Maximus 516 (производство Ирландия), работающая на этом участке. Установка состоит из пластинчатого питателя, горизонтального двухситного грохота, течек, а также различных транспортировочных элементов. Загружаемый материал подается непосредственно в установку через колосниковую решетку и ленточный питатель с загрузочным бункером объемом 8 м<sup>3</sup>. Загрузочный бункер оборудован колосниковой решеткой с ячейкой 100x100 мм. Установка сортирует материал на следующие фракции: 0-5 мм, 5-20 мм, 20-100 мм. Подситовой продукт (0-5 мм) направляется на сборный конвейер 1400x7300, затем на поперечный конвейер 800x2500, который перебрасывает его на боковой отвальный поворотный конвейер 800x9300, который в свою очередь транспортирует продукт в конус готового продукта.

Продукт с нижнего сита через нижнюю течку попадает на отвальный конвейер 650x6500, который транспортирует их в конус готового продукта 5-20 мм. Надситный продукт (20-100 мм) с верхнего сита грохота через верхнюю течку попадает на отвальный конвейер 800x6500, который транспортирует материал в конус готового продукта. Анализ работы грохота и фракционный состав сыпучей среды показал, что наиболее нагруженным является нижнее сито с размером ячейки 5x5 мм. Качество получаемой продукции удовлетворительное. Однако производительность установки составляет 125 – 150 т/час. Увеличение производительности (по паспорту она должна составлять 600 т/час) приводило к ухудшению качества выпускаемой продукции.

Для увеличения выпуска продукции руководство ООО «Фурмановская земельная компания» планировало приобретение аналогичной установки.

Проведя лабораторные расчетно-экспериментальные исследования по периодическому грохочению сыпучей среды, поступающей на нижнее сито грохота, а также рассмотрев возможности сортировочной установки российского производства, мы пришли к выводу, что мобильная сортировочная дизельная установка Maximus 516 может быть заменена на передвижной сортировочный узел УМС-400 с грохотом KPI-JCI 6202-32LP (ЗАО «ДРОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области).

На рисунке 5.3 показан вид сортировочного узла. Горизонтальный грохот KPI-JCI 6202-32LP расположен в центре сортировочной установки. Материал проходит через 2 яруса сит, проваливаясь в их ячейки, и сортируется на каждом из них по фракциям в зависимости от размера ячеек соответствующего яруса. Площадь просеивающих поверхностей 11,6 м<sup>2</sup>, что почти соответствует площади сит установки Maximus 516. Ширина нижней деки - 1500мм. Частота вращения дебалансов 675-875 об/мин, что соответствует частоте колебаний сит 11,3 – 14,6 Гц. Амплитуда колебаний - 4 мм.



Рисунок 5.3 Вид сортировочного узла УМС-400

На рисунке 5.4 показана схема установки УМС-400 с гусеничным гидроприводом.

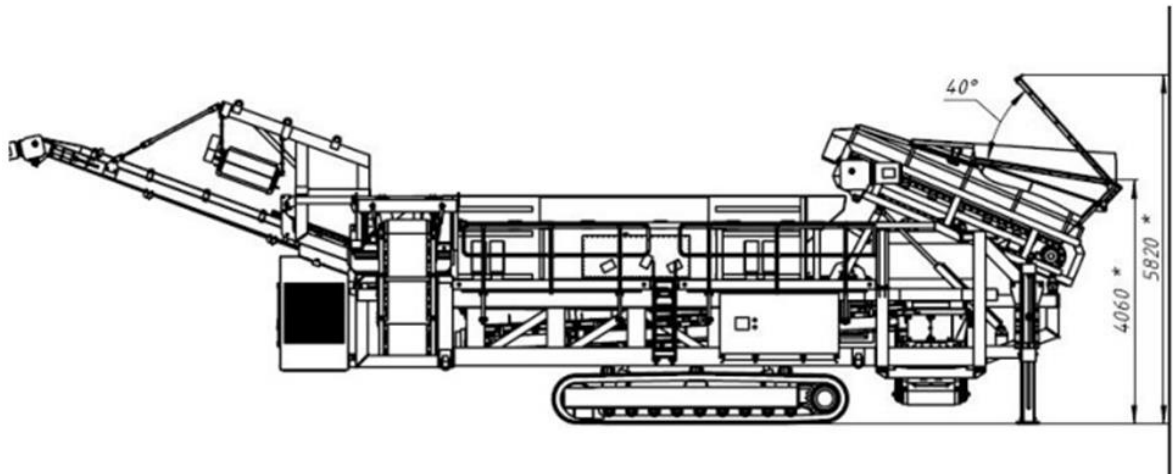


Рисунок 5.4. Схема установки УМС-400



По желанию заказчика, грохот может быть оснащен колосниковой решеткой (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5. Колосниковая решетка грохота

Объемный расход сыпучего материала, подающийся на начальном участке нижнего сита грохота, можно рассчитать как

$$V = Bhv_{тр}, \quad (5.1)$$

где  $V$  – объемный расход сыпучего материала, поступающего на нижнее сито грохота с учетом вибрационного расширения,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $B$  – ширина сита грохота,  $\text{м}$ ;  $h$  – высота слоя сыпучего материала,  $\text{м}$ ;  $v_{тр}$  – скорость транспортирования сыпучего материала по ситам грохота,  $\text{м}/\text{с}$ . С учетом порозности слоя сыпучего материала, рассчитанной по методике, изложенной в главе 3, производительность грохота по исходному питанию для данного вибрационного режима определится как

$$Q = 3,6V\rho(1 - \varepsilon_m), \quad (5.2)$$

где  $Q$  – производительность грохота, т/ч;  $\rho$  – удельный вес сыпучего материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_m$  – средняя порозность виброожиженного слоя сыпучего материала.

Качество продуктов отсева по предприятию ООО «Фурмановская земельная компания» должно составлять 90 %. Расчетно-экспериментальными исследованиями было подтверждено, что грохот установки УМС-400 обеспечит требуемое качество отсева.

Расчет производительности грохота, когда сыпучий материал, перемещающийся по ситам, считается поршневым потоком, дает завышенный результат. С учетом вибрационного расширения слоя сыпучего материала для обеспечения заданного качества продуктов отсева производительность грохота должна быть уменьшена в 2,3 раза. Хотя по паспорту производительность грохота может составлять 400 т/час, в соответствии с проведенными расчетами, рекомендовано не поднимать производительность грохота выше 130 т/час.

Расчет экономической целесообразности нашего предложения показал следующее. Расход солярки для дизельной установки – 14 литров в час. Смена составляет 12 часов. За смену расходуется 168 литров дизельного топлива. Цена 1 литра на 1 января 2017 года – 36,6 рублей за литр. За год (355 дней) денежный расход составит 2182824 рубля.

Расход электроэнергии мобильной установки УМС-400 в час составит 46,8 кВт, за смену – 561,6 кВт. По тарифу энергосбытовых организаций Тейковского района на 1 января 2017 года 1 кВт для промпредприятий стоит 4,14 рублей. За год (355 дней) денежный расход составит 800544 рубля.

Тогда ожидаемый экономический эффект составит

$$2182824 - 800544 = 1382280 \text{ рублей}$$

### 5.3. Выводы по главе 5

1. Разработанные модели, программное обеспечение и решение на их основе конструкторский и проектных задач применялись на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область, ООО «Тейковская земельная компания»), где за счет замены просеивающей поверхности грохота уменьшена замельченность товарной фракции 5 – 10 мм.

2. Используя методику определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» был рекомендован передвижной сортировочный узел УМС-400 производства ЗАО «ДОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области, обеспечивающий необходимую производительность и качество отсева, для работы на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область).

3. Ожидаемый экономический эффект от внедренных предложений составит 1382 тысячи рублей.

4. Результаты расчетно-экспериментальных исследований, проведенных по ячеечной модели процесса вибрационного грохочения, доказали ее адекватность для определения технологических параметров промышленных аппаратов.

5. Анализ результатов компьютерных экспериментов показал, что для режимов колебаний грохотов, работающих в карьерах дорожно-строительных предприятий, когда амплитуда колебаний сита меняется в пределах от 2 до 10 мм, а частота колебаний – от 16 до 24 Гц, а качество продуктов отсева должно составлять не менее 85 %, расчет производительности грохотов, когда сыпучий материал, перемещающийся по ситам, считается поршневым потоком, дает завышенный результат. С учетом вибрационного расширения слоя сыпучего материала, для обеспечения заданного качества продуктов отсева максимальная производительность грохота (по паспорту фирмы-изготовителя) должна быть уменьшена в 1,9 – 2,3 раза.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Итоги исследования и рекомендации**

1. Анализ современных работ, в которых изложены математические модели процесса грохочения, показал, что влияние траектории колебаний сита грохота на кинетику извлечения частиц мелких фракций из сыпучей среды, подаваемой на просеивающую поверхность не изучено. При определении вероятности проникновения мелких частиц через отверстия сита грохота используется модель движения одиночной частицы. Не учитывается силовое взаимодействие частиц при определении характеристик виброожиженного слоя сыпучего материала на сите грохота. Данные допущения, используемые в моделях при расчете степени извлечения мелких частиц из исходного материала и производительности грохота, приводят к их существенному завышению. Достоверные значения этих параметров получены из разработанной методики расчета кинетики грохочения для аппаратов со сложной пространственной траекторией колебаний сита.
2. Предложена методика определения скорости проникновения проходových частиц через просеивающую поверхность. Учтены закономерности движения и силового взаимодействия ансамбля частиц над ситом грохота, позволившие рассчитать частоту соударений частиц с просеивающей поверхностью. Определена вероятность проникновения частиц через отверстия сита при их одноразовом контакте, в зависимости от соотношения размера частиц к размеру отверстия сита, амплитуды и частоты колебаний грохота. Данная методика может использоваться для аппаратов с типовой траекторией колебаний сита.
3. Предложена новая конструкция вибрационного грохота со сложной пространственной траекторией колебаний сита. Расчет кинетики грохочения сыпучих материалов на новом аппарате по предложенной методике позволил спрогнозировать существование более эффективных режимов грохочения на ситах такого грохота, чем на ситах грохотов с типовыми траекториями колебаний. Скорость проникновения частиц через отверстия сита на новом аппарате может превышать аналогичную скорость на типовом в 1,8 раза.

4. Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований показал, что учет влияния интенсивности колебаний сита, определяемой критерием Фруда, меняющегося в пределах от 2,1 до 11,6 для режимов колебаний грохотов, работающих на предприятиях стройиндустрии, на порозность в слое сыпучего материала, позволяет определить истинную высоту этого слоя и повышает точность расчетов степени извлечения частиц проходовых фракций из исходного сырья на 25% .

5. Разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских задач применялись на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область), где за счет замены просеивающей поверхности грохота увеличена степень извлечения частиц проходовых фракций с 82, % до 85 % и снижена 2,4 раза засоренность пылевидными и глинистыми включениями сыпучей среды, направляемой в смеситель для приготовления асфальтобетонной смеси. Используя методику определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» была предложена замена ирландской мобильной сортировочной дизельной установки Maximus 516 на передвижной сортировочный узел УМС-400 производства ЗАО «ДОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области для работы на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область), обеспечивающий необходимую производительность и качество отсева. Ожидаемый экономический эффект от данного предложения составит 1382 тысяч рублей в год.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Планируется изготовление опытного образца сортировочной установки с пространственной траекторией колебания сита. Будет проведено совершенствование методики определения стохастических коэффициентов модели, основанной на статистическом анализе экспериментальных данных по грохочению широкого спектра сыпучих материалов на аппаратах различных типов и модификаций. На основе вновь разработанной методики возможно определение оптимальных технологических режимов грохочения дробильно-сортировочных предприятий, позволяющих получать либо максимальную степень извлечения мелких фракций из исходного сырья при заданной производительности аппарата, либо максимальную производительность грохота при заданном качестве фракционирования.

**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. 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.
4. Огурцов, В.А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация / В.А. Огурцов // // Дис. ... докт. техн. наук. Иваново.: ИГАСУ. – 2010. – 303 с.
5. Вайсберг, Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. - М.: Недра, 1986. - 144 с.
6. Богданов, В.С. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов / Учебник. В.С. Богданов, С.Б. Булгаков, Г.Д. Федоров // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 446 с.
7. Богданов, В.С. Процессы в производстве строительных материалов и изделий / Учебник. В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 512 с.
8. Богданов, В.С. Процессы в производстве строительных материалов / В.С. Богданов, Д.В. Богданов, И.А. Семикопенко// - Старый Оскол. - 2018, - 436 с.

8. Непомнящий, Е.А. Стохастическая теория гравитационного обогащения в слое конечной толщины/ Е.А. Непомнящий // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1966. - №7. – С. 172 – 176.
9. 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.
10. Непомнящий, Е.А. Кинетика некоторых процессов переработки дисперсных материалов / Е.А. Непомнящий // ТОХТ. – 1973, т. 7. – № 5. – С. 754 – 763.
11. Григорьева, Е.Д. Методика расчета показателей процесса грохочения / Е.Д. Григорьева, Е.А. Непомнящий // Труды ВНИИ абразивов и шлифования. – 1971. - №3. – С. 38 – 41.
12. 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.
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. «ЛесаРоссии XXI века», СпбГЛТА, 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. 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.
25. Брик, Е.Р. Исследование кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на грохотах с многоярусной компоновкой сит / Е.Р. Брик // Автореф. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИГАСУ. – 2011. – 16 с.
26. Алешина, А.П. Исследование процессов виброгрохочения песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций / А.П. Алешина // Дис. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИВГПУ. – 2015, - 127 с.

27. Алешина, А.П. Исследование процессов виброгрохочения песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций / А.П. Алешина // Автореф. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИВГПУ. – 2015, - 17 с.
28. Огурцов, А.В. Совершенствование технологии и оборудования процессов виброгрохочения на основе имитационного моделирования / А.В. Огурцов // Дис. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИВГПУ. – 2011. – 123 с.
29. Огурцов, А.В. Совершенствование технологии и оборудования процессов виброгрохочения на основе имитационного моделирования / А.В. Огурцов // Автореф. ... канд. техн. наук. Иваново.: ИВГПУ. – 2011. – 17 с.
30. Тихонов, О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1973. – 240 с.
31. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделение минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. - 208 с.
32. Астафьева, Е.А. Статистическая теория грохочения полидисперсных смесей / Е.А. Астафьева, О.Н. Тихонов, В.А. Перов // Обогащение руд. ИПИ. – 1980. – С. 165 – 177.
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. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с. с иллюстрациями.
36. ГОСТ 32703 - 2014 “Щебень и гравий из горных пород для строительных работ”
37. ГОСТ 8736 - 2014 “Песок для строительных работ”

38. 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.
39. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов / Учебник. В.С. Богданов, С.Б. Булгаков, Г.Д. Федоров // – Белгород, «Везелица». - 2007. - 446 с.
40. 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.
41. Вайсберг, Л.А., Рубисов, Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процесса и технологический расчет грохотов. - Спб.: Институт «Механобр». - 1994. - 47 с.
42. Вайсберг, Л.А. Теоретические основы грохочения. Учеб. пособие .– Спб.: – СПбГГИ (технический университет). – 2003. – 61 с.
43. Вайсберг, Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. - М.: Недра, 1986. - 144 с.
44. 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.
45. 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.
46. 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.

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

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

49. 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.

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

51. 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.

52. 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.

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

54. Мизонов, В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков / В.Е Мизонов// Теоретические основы химической технологи. – 1984. – т.18. – №6. – С. 811– 815.

55. Кондратьев, А.В. Влияние формы дисков валковой сортировки на эффективность грохочения гравия/ А.В. Кондратьев, С.М. Кочкян, С.П.

Смордов, В.А. Русинкевич // Механизация строительства. 2014. № 1 (835). С. 36-38.

56. 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.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. Вавилов, А.В. Моделирование процессов грохочения и конструкций грохотов для получения качественных заполнителей при отдельном приготовлении бетонов / А.В. Вавилов, М.Т. Елеукенов // Вестник ВКГТУ.- №2.- 2014.- С. – 31-34.

61. Вайсберг, Л.А. Массво-балансовая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1988. - №5, С. 5 – 9.

62. Вайсберг, Л.А. К развитию массво-балансовой модели вибрационного грохочения / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1989. - №2, С. 3 – 5.

63. Вайсберг, Л.А. К технологическому расчету вибрационных грохотов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1991. - №5, С. 19 – 23.

64. 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.
65. Вавилов, А.В. Спиральные вибрационные грохоты / А.В. Вавилов, Н.Т. Сурашов Д.Е. Елемес, – Алматы: КазНТУ, 2010. –126 с.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. Букреев, Д.А. Грохоты с активной декой AURY Flip Flop / Д.А. Букреев, В.С. Греку // Уголь. 2017. № 11. С. 64 - 65.
70. 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.
71. Митрофанов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в псевдоожиженном 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.
72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. Гриценко, М.А. Исследование сегрегации частиц в виброожиженном слое при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье / М.А. Гриценко, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, В.А. Огурцов // Вестник МГСУ. - №1. – 2017. – С. 70 – 76.

76. Балагуров, И.А. К расчету характеристик виброожиженного слоя сыпучего материала/ И.А. Балагуров, М.А. Гриценко, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов// Вестник ИГЭУ. – Вып. 4 – 2015. – С. 55-58.

77. Огурцов, В.А. Определение вероятности проникновения частиц мелкодисперсного материала через отверстия ситового тканого полотна при вибросепарации / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, М.А. Гриценко, А.В. Огурцов// Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С. 201 – 204

78. Гриценко, М.А. Новые требования к фракционному составу щебня и гравия и их влияние на приготовление асфальтобетонной смеси / М.А. Гриценко // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Поиск-2016». Иваново: ИВГПУ, 2016. №1, С. 500 – 501.

79. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики грохочения сыпучих материалов с учетом условий проникновения частиц через отверстия сита / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.В. Тошачова, М.А. Гриценко//Сборник научных трудов инж.-строит. ин-та ИВГПУ, Вып.2. Иваново: ИВГПУ, 2017. С. 3 – 11.

80. Жуков, В.П. Расчет процесса периодического грохочения порошков /

В.П. Жуков // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. - № 1. – С. 17 - 18.

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

82. Жуков, В.П. Пути повышения качества нерудных материалов / В.П. Жуков // Промышленность строительных материалов Москвы: Реф. Сб. – М.: Наука. – 1986. - № 6. – С. 17 – 20.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.



89. Рудакова, Е.В. Определение рациональных режимов грохочения в спирально-винтовом инерционном грохоте /Е.В. Рудакова // Дис. ... канд. техн. наук. Белгород: БГТУ. – 2014. 156 с.
90. Смирнов, С.Ф. Расчетно – экспериментальные исследования классификации в струйной мельнице кипящего слоя /С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов,Н. Otwinowski, P. Kaniowski// «Строительные материалы».– 2009. – №.2. – С. 61 – 63.
91. Смирнов, С.Ф. Расчетно-экспериментальные исследования классификации материала в струйной мельнице кипящего слоя //С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков,Н.Отwinowski, P. Kaniowski// Тез. докл. XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». Т.2 – Иваново, 2009. – С. 99.
92. 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.
93. Жуков, В.П. Математическая модель классификации материала в кипящем слое / В.П. Жуков, С.Ф. Смирнов, Н. Otwinowski, D. Urbaniak //Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 3. – С. 22 – 24.
94. Жуков, В.П. Расчетно-экспериментальные исследования классификации материала в кипящем слое / 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.
95. Смирнов, С.Ф.Кинетика измельчения в струйной мельнице кипящего слоя / С.Ф. Смирнов, L. Pastucha, D. Urbaniak, T. Wylecial Tomas // Сборник трудов 22-й международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ –22». – Псков. – 2009. –Т.9. – С. 80 – 81.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. Пелевин, А.Е. Научные основы процесса тонкого гидравлического вибрационного грохочения и разработка новых схем обогащения магнетитовых руд / А.Е. Пелевин // Дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2011. – 399 с.

100. Волков, Е.Б. Обоснование режимных и конструктивных параметров вибрационных грохотов / Е.Б. Волков// Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УГГУ. – 112 с.

101. 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.

102. Межеумов, Г.Г. Оптимизация замкнутого цикла измельчения цемента с использованием ячейной 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.

103. 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.

104. 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.

105. 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

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. А. с. 1025462 СССР, МКИ<sup>3</sup> 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.

111. Пат. на полезную модель 82602 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> 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.

112. Пат. на полезную модель 86894 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> 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.

113. Патент на полезную модель №144326 Российская Федерация. В 07В 1/40. Вибрационный грохот / Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Огурцов А.В., Алешина А.П.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; опубл. 20.08.2014. Бюл. №33. – 2 с.

114. Патент на полезную модель №166168 Российская Федерация. В 07В 1/40. Вибрационный грохот / Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Балагуров И.А., Алешина А.П., Гриценко М.А.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; опубл. 20.11.2016 Бюл. №32. - 3 с.

115. 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.

116. 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.

118. 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.

119. 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.

120. 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.

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

122. 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.

123. 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.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. 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.

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

129. 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.)

130. 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.

131. 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.

132. 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.

133. Meinel, A. Über einige Zusammenhänge zwischen der Einkorndynamik und der stochastischen Sientheorie bei der Klassierung auf Stoel-schwingmaschinen [Text] / A. Meinel, H. Schebert // Aufbereitungs Technik. – 1972. – № 7. – S. 408-416.

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

135. 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.

136. 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.

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

138. 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.

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

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

141. 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

142. 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

143. 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.

144. 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.



## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



**Общество с ограниченной ответственностью  
«Тейковская земельная компания»**

Юридический адрес: 153521 г. Ивановская об. Ивановский район, с. Ново-Талицы, ул. Автоторовская, д.2  
Почтовый адрес: 153521 г. Ивановская об. Ивановский район, с. Ново-Талицы, ул. Автоторовская, д.2 тел. 8  
(4932) 588-299, эл.адрес: tzk2012@bk.ru  
ОГРН 1123702024148 ИНН 3702679068 КПП 371101001

**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор

ООО «Тейковская земельная компания»

Гришанов А.Н.

21.02. 2017 г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Мы, нижеподписавшиеся, от ООО «Тейковская земельная компания» начальник ПТО Абызова Л.В., гл. механик Егоров А.Ю., от Ивановского государственного политехнического университета, зав. каф. технологии строительного производства д.т.н., проф Огурцов В.А. и аспирант Гриценко М.А., составили настоящий акт о том, что на асфальтобетонном заводе по рекомендации сотрудников Ивановского государственного политехнического университета была выполнена модернизация линейного грохота заключающаяся в замене просеивающей поверхности, что позволило получить по разным фракциям отклонения от заданного рецепта не более 3%.

**ООО «Тейковская земельная компания»**

Начальник ПТО Абызова Абызова Л.В.

Гл. механик Егоров Егоров А.Ю.

**От ИВГПУ**

Д.т.н., проф. Огурцов Огурцов В.А.

Аспирант Гриценко Гриценко М.А.

**Программа для определения числа соударений ансамбля частиц с ситом  
грохота и порозности слоя сыпучего материала**

```

clear all

g=980;

d=1;%ball diameter

k=.9;%restitution coefficient

k1=(1-k)/2;k2=(1+k)/2;

t(1)=0;dt=0.0005;

Fr=2;A=1;w=(Fr*g/A)^.5;

N=1600;

for i=1:N+1;t(i)=(i-1)*dt;

x0(i)=A*sin(w*t(i));

v0(i)=A*w*cos(w*t(i));

a0(i)=-A*w^2*sin(w*t(i));

end

x10=2*d;

m=5;% number of balls

for j=1:m;x(j,1)=x0(1)+(j-1)*3*d+x10;v(j,1)=0;

end %initial positions and velocities of balls (centers)

xr(1,1)=x0(1)+d;

for i=1:N+1;t(i)=(i-1)*dt;end %current time

```

```

for i=1:N

    % free falls for ball 1

    v(1,i+1)=v(1,i)-g*dt;

    x(1,i+1)=x(1,i)+v(1,i)*dt;

    % impacts wall and ball 1

    if x(1,i+1)<=x0(i+1)+d;

        x(1,i+1)=x0(i+1)+d;

        v(1,i+1)=-v(1,i+1)-v0(i+1))*k+v0(i+1);

    end

    xr(1,i+1)=x(1,i+1)-x0(i+1);

    %the same for other balls

    for j=2:m

        v(j,i+1)=v(j,i)-g*dt;

        x(j,i+1)=x(j,i)+v(j,i)*dt;

        if x(j,i+1)<=x(j-1,i+1)+2*d;

            x(j,i+1)=x(j-1,i+1)+2*d;

            vv=v(j-1,i+1);

            v(j-1,i+1)=vv*k1+v(j,i+1)*k2;

            v(j,i+1)=vv*k2+v(j,i+1)*k1;

        end

```

```

    end

end

for j=1:m;xm(j)=mean(x(j,:));

end % mean height of balls

for i=1:N+1;por(i)=1-m*pi*d/3/(x(m,i)-x(1,i)+2*d);

end;

porm=mean(por)

for i=1:N+1;dx(i)=(x(m,i)-x(1,i)-2*d*(m-1))/(m-1);

end;

dxm=mean(dx)

    figure(1);plot(x');hold on;for j=1:m;plot([1 N],[xm(j) xm(j)],'linewidth',3);

end;

hold off; %-d);hold on;plot(x(2,:)-d*3,'r');plot(x0,'k');hold off

figure(2); for i=1:1500;for j=1:m;

plot(x(j,i)+d*0+((j-1)*2*d)*0,'or','MarkerSize',12.5,'MarkerFaceColor','r');

hold on;plot([.5 1.5],[x0(i) x0(i)],'k','linewidth',3);axis([0 2 -1.5 40]);

end;

pause(.001);

hold off;

end

    %upper level - current and mean

```

```
figure(3);plot(t,x(m,:)+d*0);  
  
hold on;plot([0 t(N+1)],[xm(m) xm(m)],'linewidth',3);hold off  
  
figure(4);plot(t,por);  
  
hold on;plot([0 t(N+1)],[porm porm],'linewidth',2)  
  
hold on;axis([0 t(N+1) 0 1]);  
  
plot([0 t(N+1)], [.4764 .4764], '--', 'linewidth', 2);
```

## Протокол испытания щебня

Дата отбора пробы: 26.01.2016			
Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20 не мытый			
Наименование показателя	Требование ГОСТ 8267-93	Фактические данные	Соответствует /не соответствует ГОСТ
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	<b>соответствует</b>
Днб	10	3,87	<b>соответствует</b>
0,5(Днб+Днм)	30-60	47,83	<b>соответствует</b>
Днм	90-100	93,77	<b>соответствует</b>
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе, % не более	3,0	3,28	<b>не соответствует</b>
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,4	<b>не соответствует</b>
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	85,6	<b>соответствует</b>
Марка щебня по прочности	М400-1000	400	
Содержание зерен слабых пород, % не более	10	18,2	<b>не соответствует</b>
Содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы, % не более	50	26,4	<b>соответствует</b>
<b>Протокол испытания щебня</b>			
Дата отбора пробы: 08.02.2016			
Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20 не мытый			
Наименование показателя	Требование ГОСТ 8267-93	Фактические данные	Соответствует /не соответствует ГОСТ
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	<b>соответствует</b>
Днб	10	19,02	<b>не соответствует</b>
0,5(Днб+Днм)	30-60	67,05	<b>не соответствует</b>
Днм	90-100	97,55	<b>соответствует</b>
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе, % не более	1,0	0,95	<b>соответствует</b>



в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,02	<b>соответствует</b>
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	95,6	<b>соответствует</b>
Марка щебня по прочности	M400-1000	800	
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	18,4	<b>соответствует</b>

**Протокол испытания щебня**

Дата отбора пробы: 15.02.2016

Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20 не мытый  
щель 16

<b>Наименование показателя</b>	<b>Требование ГОСТ 8267-93</b>	<b>Фактические данные</b>	<b>Соответствует /не соответствует ГОСТ</b>
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	<b>соответствует</b>
Днб	10	3,01	<b>соответствует</b>
0,5(Днб+Днм)	30-60	48,05	<b>соответствует</b>
Днм	90-100	97,09	<b>соответствует</b>
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе,% не более	1,0	1,86	<b>не соответствует</b>
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,29	<b>не соответствует</b>
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	93,9	<b>соответствует</b>
Марка щебня по прочности	M400-1000	800	
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	17,9	<b>соответствует</b>

**Протокол испытания щебня**

Дата отбора пробы: 19.02.2016

щель 16

Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20 не мытый

<b>Наименование показателя</b>	<b>Требование ГОСТ 8267-93</b>	<b>Фактические данные</b>	<b>Соответствует /не соответствует ГОСТ</b>

Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0,12	соответствует
Днб	10	5,54	соответствует
0,5(Днб+Днм)	30-60	59,92	соответствует
Днм	90-100	95,74	соответствует
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе, % не более	1,0	1,73	не соответствует
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,66	не соответствует
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	68,7	соответствует
Марка щебня по прочности	М400-1000	800	
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	11,9	соответствует
<b>Протокол испытания щебня</b>			
Дата отбора пробы: 21.02.2016 мытый			
Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20			
<b>Наименование показателя</b>	<b>Требование ГОСТ 8267-93</b>	<b>Фактические данные</b>	<b>Соответствует /не соответствует ГОСТ</b>
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	соответствует
Днб	10	3,39	соответствует
0,5(Днб+Днм)	30-60	56,84	соответствует
Днм	90-100	96,71	соответствует
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе, % не более	1,0	0,58	соответствует
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,03	соответствует
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	78,6	соответствует
Марка щебня по прочности	М400-1000	800	

Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	10,3	<b>соответствует</b>
<b>Протокол испытания щебня</b>			
Дата отбора пробы: 21.02.2016			
мытый			
Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20			
<b>Наименование показателя</b>	<b>Требование ГОСТ 8267-93</b>	<b>Фактические данные</b>	<b>Соответствует /не соответствует ГОСТ</b>
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	<b>соответствует</b>
Днб	10	1,72	<b>соответствует</b>
0,5(Днб+Днм)	30-60	48,8	<b>соответствует</b>
Днм	90-100	96,21	<b>соответствует</b>
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе, % не более	1,0	0,66	<b>соответствует</b>
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,04	<b>соответствует</b>
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	78,2	<b>соответствует</b>
Марка щебня по прочности	М400-1000	800	
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	15,7	<b>соответствует</b>
<b>Протокол испытания щебня</b>			
Дата отбора пробы: 26.02.2016			
Наименование материала: щебень из гравия для строительных работ фр. 5-20			

Наименование показателя	Требование ГОСТ 8267-93	Фактические данные	Соответствует /не соответствует ГОСТ
Зерновой состав Полные остатки на ситах, % не более			
1,25 Днб	0,5	0	<b>соответствует</b>
Днб	10	4,45	<b>соответствует</b>
0,5(Днб+Днм)	30-60	54,5	<b>соответствует</b>
Днм	90-100	94,56	<b>соответствует</b>
Содержание пылевидных, илистых, глинистых частиц по массе,% не более	2,0	1,74	<b>соответствует</b>
в том числе глины в комках, % по массе не более	0,25	0,13	<b>соответствует</b>
Содержание дробленных зерен по массе, % не менее	60	80,9	<b>соответствует</b>
Марка щебня по прочности	М400-1000	600	
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % не более	50	11,7	<b>соответствует</b>