

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Алешина Анна Павловна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВИБРОГРОХОЧЕНИЯ  
ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ  
ЧАСТИЦ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
В.А. Огурцов

Иваново - 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЧАСТИЦ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ.....	10
1.1. Общая характеристика процесса фракционирования сыпучих материалов. Основные конструкции классифицирующего оборудования.....	11
1.2. Моделирование процессов фракционирования сыпучих материалов в виброожигенном слое .....	16
1.3. Требования к фракционному составу сыпучих материалов для некоторых видов производств .....	26
1.4. Основные показатели процесса грохочения.....	30
1.5. Исследование фракционных составов песчано-гравийных смесей, добываемых в карьерах предприятий нерудной промышленности Ивановской области.....	33
1.6. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований .....	37
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ.....	40
2.1. Нелинейная модель процесса фракционирования сыпучей среды с высоким содержанием мелких частиц в исходном материале .....	41
2.2. Моделирование кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты.....	47
2.3. Выводы по главе 2 .....	52
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ В ВИБРООЖИЖЕННОМ СЛОЕ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	54
3.1. Общие замечания по методике экспериментального исследования процессов. Цели экспериментальных исследований .....	54
3.2. Исследование миграции частиц по виброожигенному слою при их	

перемешивании .....	59
3.3. Исследование миграции частиц по виброожиженному слою при виброгрохочении.....	64
3.4. Исследование кинетики фракционирования бинарной сыпучей смеси на лабораторной установке периодического действия.....	71
3.5. Выводы по главе 3 .....	79
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	81
4.1. Исследование фракционных составов песчано-гравийных смесей, добываемых в карьере месторождения «Жирославка» предприятия ООО «Хромцовский карьер».....	81
4.2. Выбор классифицирующего оборудования, работающего с гравийно-песчаными смесями с низким содержанием каменного материала на ООО «Хромцовский карьер» .....	82
4.3. Технологические и технические результаты от внедрения мероприятий.....	89
4.4. Новая конструкция вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита .....	91
4.5. Выводы по главе 4 .....	96
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	123

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность работы.* Для эффективного удовлетворения потребностей предприятий дорожного строительства, производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций в сыпучих материалах высокого качества необходимо увеличение выпуска нерудных строительных материалов (щебня, гравия и песка). Предприятия, ведущие разработку минерально-сырьевых месторождений, сталкиваются с проблемой фракционирования песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций. Так содержание песка по фракции 0-5 мм в добываемом сырье может достигать 90,9% (месторождение «Новинкинское», Фурмановский район, Ивановская область). Перспективы увеличения запасов строительного камня по геологоразведочным работам на вновь разрабатываемых месторождениях весьма ограничены. Это обстоятельство приводит к тому, что приходится учитывать низкое качество исходного сырья при выборе сортировочных агрегатов, работающих в карьерах, и расчете их технологических режимов.

Промышленные предприятия, эксплуатирующие зарубежные вибрационные грохоты, цена которых значительно выше отечественных аналогов, попадают в постоянную зависимость от иностранных фирм по поставке запасных частей, так же более дорогих, чем запчасти для отечественных машин. Следует, однако, признать, что зарубежные классифицирующие аппараты все же превосходят отечественные машины по прочностным характеристикам, поэтому они могут создавать более интенсивные динамические режимы вибровоздействия просеивающих поверхностей на слой сыпучего материала. Поэтому представляется актуальным определение эффективных режимов фракционирования отечественных аппаратов, рассчитанных с помощью современных математических моделей и разработку на основе этих моделей новых типов вибрационных грохотов, имеющих более высокую степень надежности и долговечности в сравнении с существующими зарубежными и отечественными аналогами.

Все отмеченное и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в рамках основных научных направлений ИВГПУ «Моделирование механических процессов производства строительных материалов с целью повышения эффективности технологического оборудования» (шифр НИОКР в ФГНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти» 01201054797).

**Цель работы** – повышение эффективности процессов фракционирования сыпучего материала в технологических и проектных мероприятиях с помощью разработки и применения математической модели, учитывающей высокое содержание частиц мелких фракций в исходном сырье.

**Объектом исследования** в работе являлись процессы фракционирования сыпучих материалов в виброожиженном слое.

**Предметом исследования** – закономерности формирования фракционных массопотоков в сыпучей среде, подверженной виброожижению.

**Задачи исследования.**

1. Для повышения эффективности и производительности виброгрохотов разработать научные подходы к математическому моделированию процессов фракционирования сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в виброожиженном слое, обеспечивающие прогнозирование конечных результатов этих процессов на вибрационных грохотах различных типов.

2. Разработать нелинейную ячеечную математическую модель, основанную на теории цепей Маркова, для описания миграции частиц к поверхности сита, в которой скорость сегрегации из ячейки зависит от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи.

3. Усовершенствовать математическую модель, описывающую процесс проникновения частиц проходовых фракций, учитывая стохастические свойства сыпучей среды и убывание высоты слоя материала по мере извлечения мелкой фракции, которое замедляет кинетику процесса при высокой степени извлечения.

4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных математических моделей процессов виброгрохочения сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье на лабораторной установке периодического действия.

5. Разработать методику определения стохастических коэффициентов модели миграции частиц по виброожиженному слою сыпучих материалов из кинетики тестовых опытов их фракционирования на установке периодического действия.

6. Разработать новую конструкцию вибрационного грохота, обеспечивающую повышение эффективности процесса фракционирования за счет создания пространственной траектории колебаний сита с помощью независимых источников возбуждения.

#### ***Научная новизна результатов работы.***

1. На основе теории цепей Маркова разработана нелинейная математическая модель миграции и фракционирования частиц в виброожиженном слое песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье, где число ячеек цепи, соответствующее высоте слоя, меняется по мере выхода мелкой фракции. Для описания миграции частиц к поверхности сита используется нелинейная модель, в которой скорость сегрегации из ячейки зависит от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи.

2. Теоретически и экспериментально показано, что поведение материала в виброожиженном состоянии аналогично поведению капельной жидкости, а скорость прохода мелкой фракции сквозь сито может рассматриваться как скорость ее истечения под напором. Введение в матрицу переходных вероятностей зависимости интенсивности извлечения от высоты слоя, вызванного уходом мелкой фракции, оказывает значительное влияние на распределение содержания мелкой фракции по высоте слоя и ее извлечение в мелкий продукт.

#### ***Практическая значимость работы.***

1. На основе разработанной математической модели процессов

фракционирования сыпучих материалов с повышенным содержанием частиц мелкой фракции в исходном сырье предложен инженерный метод расчета вибрационных грохотов различных типов.

2. Предложен и реализован экспериментальный метод определения стохастических параметров процесса виброперемешивания сыпучего материала, основанный на кинетике тестового виброгрохочения этого материала на лабораторной установке периодического действия.

3. Предлагаемая методика может использоваться на стадии выбора типа грохотов для работы на вновь разрабатываемых месторождениях песчано-гравийных смесей.

4. Предложено аппаратное оформление вибрационного грохота, защищенное патентом РФ на полезную модель, в которой интенсифицируется процесс фракционирования.

5. Разработанные модели и их программно - алгоритмическое обеспечение нашли свое применение в ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область) и были использованы для расчета процессов, имеющих схожее математическое описание (виброперемешивание, псевдооживление, теплообмен) в практике выполнения промышленных и исследовательских проектов в ООО «ШагСтрой» (г. Иваново).

6. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, инженеров и аспирантов на кафедре «Технология строительного производства» Ивановского государственного политехнического университета.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы расчетные и экспериментальные методы исследования. В качестве расчетного метода применено математическое моделирование процессов грохочения сыпучих материалов, основанное на теории цепей Маркова, с реализацией на персональном компьютере при помощи среды MATLAB.

**Автор защищает:**

1. нелинейную математическую модель грохочения сыпучих сред высоким

содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье;

2. экспериментальные исследования фракционирования сыпучих материалов на лабораторной установке периодического действия, положенные в основу метода расчета промышленных грохотов;

3. новую конструкцию вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования стохастических процессов, совпадением экспериментальных и расчетных данных в пределах допустимой погрешности.

#### ***Апробация результатов работы.***

Основные положения диссертации были заслушаны и одобрены на следующих международных отечественных и зарубежных конференциях: 65,66 Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и магистрантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 2012 - 2013; VII - IX Региональных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Иваново, 2012 - 2014; XIX Международной научно-технической конференции, Иваново: ИГАСУ, 2012; Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии», Иваново, ИГЭУ, 2013; XVI Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и молодых ученых «Строительство-формирование среды жизнедеятельности», Москва, МГСУ, 2013; V Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов», Иваново, ИИ ГПС МЧС, ИГХТУ, 2014; Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК», Иваново, ИГХТУ, 2014.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 5 работ в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК Минобрнауки РФ, 1 патент РФ на полезную модель, 2 свидетельства о регистрации программ для

ЭВМ.

***Структура и объем работы.*** Диссертация представлена на 127 страницах и состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка литературы (167 наименований) и приложений.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЧАСТИЦ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ**

Объектом исследования является среда сыпучих материалов, подверженная вибровоздействию, которую представляем совокупностью разнородных взаимодействующих частиц, причем содержание мелких частиц в смеси существенно больше, чем крупных, и мелкие частицы, мигрируя по виброожигенному слою и достигая просеивающей поверхности, проникают через отверстия сита. Частицы в смеси могут отличаться размерами, плотностью, формой и другими свойствами. Если некоторый объем с сыпучей средой заставить совершать колебательные движения, то частицы будут перемещаться друг относительно друга.

Выделяют два основных механизма движения частиц внутри слоя [1]. Это диффузионный механизм, когда частицы двигаются друг относительно друга по аналогии с молекулярной диффузией в жидкостях и газах. Вторым механизмом движения частиц является сегрегация (расслоение), с помощью которой группы частиц перемещаются друг относительно друга. Как правило, мелкие частицы стремятся переместиться вниз виброожигенного слоя, а более крупные вверх.

Учитывая физическую картину процесса, в данной работе будем рассматривать конструкции аппаратов для фракционирования сыпучих материалов, когда частицы различной крупности движутся по слою, подверженному вибровоздействию со стороны просеивающей поверхности и мелкие частицы проникают через отверстия этой поверхности. Причем, в сыпучем материале, поступающем на грохот, концентрация частиц мелких фракций значительно превышает концентрацию частиц крупных фракций.

## 1.1. Общая характеристика процесса фракционирования сыпучих материалов. Основные конструкции классифицирующего оборудования

*Фракционирование (классификация, грохочение, рассев)* - процесс разделения сыпучего кускового и зернистого материала на продукты различной крупности (классы) с помощью просеивающих поверхностей с калиброванными отверстиями (колосниковых решеток, листовых решет, проволочных сит) [2]. В результате операции фракционирования получают верхний (надрешетный) и нижний (подрешетный) продукты. Материал, поступающий на грохочение, называют *исходным*, продукты грохочения – *классами*. Класс, используемый в производстве как готовый товарный продукт, называется *сортом* [2,3].

При грохочении материал, двигаясь по ситам грохота, подвергается с его стороны вибровоздействию. Ввиду ограниченности длины грохота не все частицы с размерами меньше размера отверстия сита успевают просеяться, часть из них остаётся в надрешётном продукте, засоряя его и уменьшая массу подрешётного.

Операция грохочения часто совмещается с операцией дробления, например, при производстве сыпучих строительных материалов.

По технологическому назначению различают следующие виды операций грохочения [4]:

1) *вспомогательное* – применяемое в схемах дробления исходного сырья для улучшения работы дробилок. При этом дробилка освобождается от значительной части зерен, размер которых меньше выпускной щели дробилки. Вспомогательное грохочение подразделяется на:

- а) *предварительное* – перед дробилкой;
- б) *контрольное (поверочное)* – после дробилки, при этом грохот работает в замкнутом цикле с дробилкой и контролирует крупность продукта дробления;
- в) *совмещенное* – операции предварительного и контрольного грохочения объединяются в одну.

2) *подготовительное* – для разделения материала на несколько классов крупности, предназначенных для последующей обработки. Применяется перед операциями обогащения.

3) *самостоятельное* – для выделения классов, являющихся готовыми продуктами (сортами) и отправляемых потребителю. Здесь требуется высокая эффективность грохочения, так как необходимо точное разделение материала по крупности.

4) *обезвоживающее* – для удаления основной массы воды, содержащейся в продукте после мокрого обогащения, или для отделения суспензии после обогащения в тяжелых суспензиях.

По принципу действия грохоты различных типов аналогичны: просеивание мелких классов происходит при движении материала по просеивающей поверхности. Перемещение материала осуществляется под действием: силы тяжести (гравитационное перемещение), вибраций сита (вибрационное перемещение), струи воды (гидравлическое перемещение). В практике обогащения полезных ископаемых применяются грохоты следующих типов: 1) неподвижные колосниковые; 2) валковые; 3) барабанные вращающиеся; 4) плоские качающиеся; 5) полувибрационные (гирационные); 6) вибрационные с круговыми вибрациями (инерционные с дебалансным вибратором и самоцентрирующиеся); 7) вибрационные с прямолинейными вибрациями (с самобалансным вибратором, электровибрационные и резонансные); 8) дуговые сита. Выпускаются грохоты легкого, среднего и тяжелого типов [2-5]. Маркировка: Г – грохот, И – инерционный, С – самобалансный, Р – резонансный, Л – легкого типа, С – среднего типа, Т – тяжелого. Легкие грохоты применяют для отсева материала с насыпной массой  $1.0 \text{ т/м}^3$ , средние – 1.6, тяжелые – 2.7. За буквами следуют цифры: первая цифра за буквами обозначает ширину грохота (3 – 1250 мм, 4 – 1500, 5 – 1750, 6 – 2000, 7 – 2500, 8 – 3000), вторая цифра – число сит. Например, грохот ГИЛ 72 – грохот инерционный легкий, ширина сита 2500 мм, двухситовой [2-5].

*Грохот инерционный* (рисунок 1.1, а) состоит из корпуса на пружинах, в котором закреплено просеивающее сито. Сито установлено с наклоном. Вибратор закреплен на корпусе грохота со стороны подачи материала, а электродвигатель - на раме грохота. Передача вращения от электродвигателя к вибратору осуществляется через специальную эластичную круговую муфту. Наклонное расположение просеивающего сита и вертикальное расположение вибратора обеспечивают параметры колебаний сит, при которых воздействие вибрации на просеиваемый материал создают интенсивное его подбрасывание над ситом, что обеспечивает высокую эффективность грохочения [2-5].

Инерционные грохота делятся на легкие (ГИЛ), средние (ГИС) и тяжелые (ГИТ) по весу просеиваемой массы.

*Резонасные виброгрохоты* представлены на рисунке 1.1, г, у которых в качестве вибровозбудителя используются электромагнитные вибраторы. При пропускании электрического тока через катушку электромагнит притягивает якорь, соединенный тягой с планками, между которыми зажато сито. При движении вверх якорь ударяется об упоры, что вызывает резкий толчок, при этом подача тока в катушку прекращается, и якорь с пружиной отжимается вниз. Амплитуда колебаний изменяется путем изменения расстояния между упорами и якорем с помощью штурвала. При нормальной частоте электрического тока электромагнитный вибратор сообщает просеивающей поверхности 3000 кол/мин и амплитуду, равную приблизительно 0,3 мм [5]. Преимуществами электромагнитных грохотов являются отсутствие вращающихся и трущихся частей, а также виброизоляция корпуса грохота; недостатком — неравномерное распределение амплитуды колебаний по поверхности сита: большая — в средней части и меньшая — по краям, а так же сложность конструкции (много шарниров, пружин, резиновых упругих элементов) и большая металлоемкость.

*Гиационными* называются наклонные, четырехподшипниковые грохоты с эксцентриковым приводом (рисунок 1.1, б).

В грохотах может быть по одному, по два сита и более. Крепятся они к раме грохота параллельно: сверху сито с более крупными отверстиями, под ним с более

мелкими. С каждого сита получают определенную фракцию сортируемого материала.

Достоинством гирационных грохотов является малая чувствительность к колебаниям нагрузки, но они более металлоемки и сложны конструктивно, чем инерционные [5]. Поэтому их выпуск в России прекращен, а на работающих дробильно-сортировочных предприятиях отечественные гирационные грохоты заменены инерционными. Однако за рубежом продолжается выпуск и совершенствование четырехподшипниковых эксцентриковых аппаратов, например грохот Niagara® фирмы Haver & Boecker (Германия) [3].

Горизонтальный грохот с прямолинейными (направленными) колебаниями может быть выполнен не только как качающийся, но и в виде вибрационного. В этом случае приводной механизм его представляет собой двухвальный вибровозбудитель. В связи с фазовым уравниванием дебалансов вибровозбудителя грохоты такого типа называются *самобалансными* (рисунок 1.1, в) [3-5].

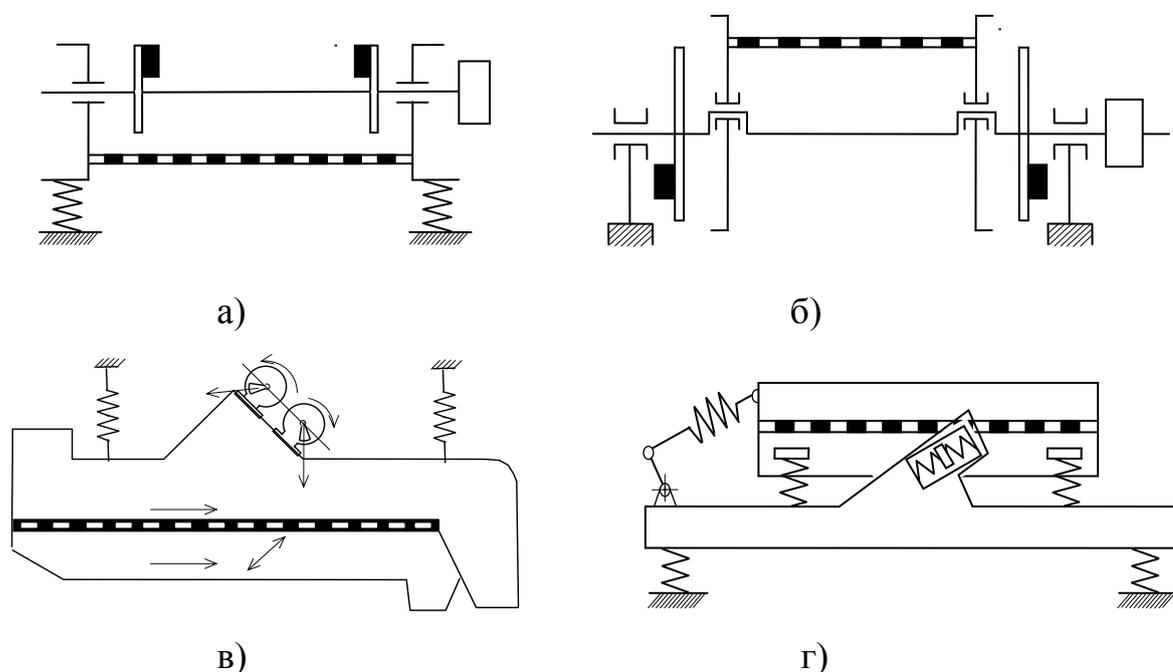


Рисунок 1.1. Вибрационные грохоты, на которых сыпучая среда подвергается виброожигению: а) инерционный грохот; б) гирационный грохот; в) самобалансный грохот; г) резонансный грохот

Самобалансные грохоты явились дальнейшим развитием инерционных грохотов, так как прямолинейные гармонические колебания короба генерируются силой инерции двух противоположно вращающихся дебалансных грузов.

Валы вибровозбудителя могут быть связаны между собой с помощью зубчатой передачи или динамически. За грохотом с зубчатым вибровозбудителем закрепилось название самобалансного, а за грохотом без зубчатых передач – *самосинхронизирующегося*.

Эти грохоты находят все большее применение на всех операциях грохочения, в том числе в технологических схемах среднего и мелкого дробления.

Опыт эксплуатации грохотов показывает, что существуют сложные технологические проблемы, которые еще не нашли решения и негативно влияют на показатели процесса грохочения. Одной из таких проблем является грохочение влажного материала. Повышенная влажность приводит к залипанию отверстий сита, а в итоге – к снижению эффективности отсева. Вторая проблема – классификация трудногрохотимых материалов, когда процентное содержание зерен граничной крупности значительное. Попадая в ячейку сита, они испытывают сильное трение со стороны стенок отверстия и заклинивают его [2,3].

Для решения этих проблем используются следующие способы: сообщение просеивающей поверхности больших ускорений, механическое воздействие на них, применение динамически активных просеивающих поверхностей, которые могут совершать дополнительные колебания относительно короба грохота [3].

Анализируя основные типы грохотов, их конструкции и способы вибровоздействия просеивающих поверхностей на сыпучий материал, будем рассматривать их как аппараты, где происходят процессы продольного и поперечного движения частиц в виброоживленном слое. При этом просеивающая поверхность может занимать как наклонное, так и горизонтальное положение.

## 1.2. Моделирование процессов фракционирования сыпучих материалов в виброоживленном слое

Математическая модель процесса фракционирования, как и реальные аппараты, реализующие этот процесс, преобразовывает входные характеристики сыпучих материалов в выходные. Математические модели, описывающие данные процессы, выделяют один или несколько аспектов моделируемых процессов, так как учесть все аспекты процессов невозможно [3]. Модели, выделяющие разные аспекты процессов, существенно отличаются друг от друга. Данные модели можно условно разделить на детерминистические, вероятностные и смешанные. Хотя детерминистические модели рассматривают упрощенные ситуации движения частиц в слое сыпучего материала, но они могут использоваться для создания единой обобщенной теории грохочения. Так модели, рассмотренные в работах [5-7], описывают процессы движения одиночной частицы по просеивающей поверхности грохота и ее проникновения через отверстия сита.

Исследование процессов грохочения сыпучих материалов на статистической основе является, по мнению некоторых ученых, в настоящее время наиболее перспективным. За основу принимается тот факт, что процесс фракционирования носит стохастический характер из-за случайных свойств сыпучих материалов и самого процесса грохочения. Для описания кинетики процесса предлагается использовать аппарат теории марковских процессов [1-3, 8-11, 144-147].

Поскольку, в данной работе ставится задача учета в моделях, описывающих рассматриваемы процессы, широкого ряда случайных характеристик физико-механических свойств сыпучих материалов, а так же разнообразие конструкций аппаратов для их реализации, то с нашей точки зрения наиболее приемлемым является вероятностный подход к описанию процессов фракционирования. Данный подход использует дисперсионное уравнение или его разностные представления [1,3], которое имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div}(-c \cdot \vec{V} + D \cdot \operatorname{grad} c). \quad (1.1)$$

Следует отметить, что данное уравнение описывает процесс перемешивания сыпучих материалов [1].

Если  $c(\vec{r}, t)$  имеет смысл плотности вероятности распределения частиц определенной фракции сыпучего материала по виброожиженному слою, то уравнение (1.1) называется уравнением Колмогорова – Фоккера - Планка, а  $D$  – стохастический параметр,  $V$  – транспортным коэффициентом.

Если  $c(\vec{r}, t)$  имеет смысл распределения концентрации частиц определенной фракции сыпучего материала по виброожиженному слою, то уравнение (1.1) называется уравнением конвективной диффузии, где  $D$ - коэффициент макродиффузии, а  $V$  – скоростью конвективного переноса. Согласно [1], уравнение (1.1) считается модельным применительно к процессам переработки сыпучих материалов.

Уравнение (1.1) использовалось Е.А. Непомнящим, его учениками и последователями для описания процессов фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах и перемешивания в виброожиженном слое [8-11].

Как правило, уравнение (1.1) упрощается до линейного случая одномерного дисперсионного уравнения и принимает вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1.2)$$

где  $x$  – координата, определяющая положение частицы рассматриваемой фракции сыпучего материала,  $t$  – время процесса. В большинстве работ [3-11] считается, что  $D$  и  $V$  постоянные величины, которые учитывают физико-механические свойства частиц определенной фракции сыпучего материала, технологические параметры и особенности конструкций аппаратов, реализующих рассматриваемые процессы.

В работах Е.А. Непомнящего и его последователей [8-11] для уравнения (1.1) используются различные начальные и граничные условия, учитывающие начальное распределение частиц рассматриваемой фракции сыпучего материала по высоте виброожиженного слоя. Если рассматривается процесс перемешивания, то учитывается отсутствие потока частиц через верхнюю и нижнюю границы

этого слоя. Если рассматривается процесс фракционирования, то учитываются условия проникновения рассматриваемых частиц через просеивающую поверхность виброгрохота. В работах [144, 145] немецких исследователей А. Майнеля и Х. Шуберта, использующих для моделирования процесса грохочения уравнение (1.2), в качестве граничного условия применяют модель «поглощающего экрана», считая, что проходные частицы любого размера, попадающие на просеивающую поверхность, сразу проникают через отверстия сита. Авторы работ [12-16, 144-147] используют более сложные модели процесса проникновения проходных частиц через просеивающую поверхность, которые могут учитывать соотношение размеров этих частиц к размерам отверстия сита грохота, параметры вибровоздействия сита на сыпучий слой и другие. Следует отметить, что чем больше число факторов, учитываемых при рассмотрении процесса проникновения частиц через отверстия сита, тем сложнее решение уравнения (1.1). Это решение описывает распределение частиц рассматриваемой фракции по высоте виброоживленного слоя в различные моменты времени и представляет собой ряды Фурье, вид которых представлен в работе [3,8-13, 144,145, 154-156]. Эти ряды имеют плохую сходимость, поэтому результаты расчетов распределения рассматриваемых частиц по высоте грохотимого слоя и кинетика их извлечения в подситовое пространство имеют высокую погрешность при малом времени грохочения. Кроме того, решение уравнения (1.1) включает дополнительные трансцендентные уравнения, определяющие собственные числа тригонометрических рядов Фурье. Решение трансцендентных уравнений требует привлечения численных методов. Поэтому получение в чистом виде аналитических зависимостей распределения рассматриваемых частиц по высоте слоя и их кинетики грохочения невозможно.

Процесс грохочения древесной щепы, как вероятностный, рассмотрен в работах [19-21]. Авторы, используя логистический подход, моделируют процесс фракционирования и получают уравнение кинетики классификации, соответствующее классическому виду этого уравнения. Авторы, рассматривая работу двухситового грохота, определяют рациональное соотношение длин сит,

что позволяет повысить качество фракционирования кондиционной щепы на целлюлозно-бумажных комбинатах. Однако влияние кинетики процесса грохочения на верхнем сите на процесс классификации на нижнем сите не выявлено.

В работах сотрудников Днепропетровского института геотехнической механики (Украина) В.П. Надутого и Е.С. Лапшина [22-28] используются марковские цепи для описания процесса фракционирования сыпучих материалов. Авторы рассматривают процессы сегрегации мелких частиц в виброожиженном слое, их проникновение через отверстия сита и процесс транспортирования всего сыпучего материала по просеивающей поверхности грохота. Считается, что сегрегация зависит от случайных свойств сыпучего материала и параметров вибровоздействия сита на слой. Оптимальным режимом грохочения считается режим, при котором число частиц, перешедших в нижнюю ячейку слоя из верхних ячеек равно числу частиц, ушедших из нижней ячейки в подситовое пространство. Однако авторы не раскрывают связи матрицы переходных вероятностей предлагаемой модели с технологическими параметрами грохочения, считая стохастические коэффициенты постоянными в течение всего времени процесса.

В.Е. Мизонов, его последователи и ученики [29,46-48, 51-57, 148, 151] считают, что случайные процессы доминируют в поведении ансамбля частиц, подверженному виброожижению, что свойственно процессам виброгрохочения, вибросортировки и виброперемешивания. Наиболее наглядными с их точки зрения являются ячеечные модели и модели, основанные на теории цепей Маркова.

Авторы работ [1, 3, 29, 36] рассматривают набор частиц, участвующих в некотором процессе, когда частицы составляют сыпучий слой, подверженный вибровоздействию. Содержанием этого процесса является миграция частиц в виброожиженном слое. В первом приближении авторы полагают, что определяющим является движение вдоль одной оси. Модель становится одномерной. Слой вдоль оси разбивают на  $m$  ячеек, которые являются ячейками

идеального смешивания. Вероятности принадлежать к одной из ячеек для частиц рассматриваемой фракции сыпучей среды в общем случае различны и меняются с течением времени. Число частиц участвующих в процессе велико, поэтому вероятность нахождения частиц рассматриваемой фракции в ячейке адекватна их относительной концентрации. Таким образом, частица может находиться в одной из  $m$  ячеек, то есть свойство ее принадлежности к ячейке есть дискретная величина. Весь набор этих дискретных величин образует модельное пространство всевозможных состояний системы, которое характеризуется набором вероятностей каждого из состояний  $S_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ , а  $\sum_{i=1}^m S_i = 1$ . Полный набор вероятностей в ячейках цепи образует вектор состояния

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Пусть в момент времени  $t_k$  зафиксированы вероятности пребывания частиц рассматриваемой фракции в каждой ячейке цепи  $S_i^k$ . Будем регистрировать эти вероятности состояния. Тогда моменты фиксации состояния процесса будут  $t_k = (k - 1)\Delta t$ ,  $k=1,2,\dots$ , где  $k$  – номер перехода – является целочисленным аналогом времени [1,3, 13-18, 29, 151].

Частицы в течение промежутка времени  $\Delta t$  мигрируют в системе, переходя из одного состояния в другое. Считается, что величина  $\Delta t$  достаточно мала, чтобы в течение одного перехода частицы могли переместиться только в соседние ячейки, но не далее. Эти возможные переходы показаны на рисунке 1.2 стрелками.

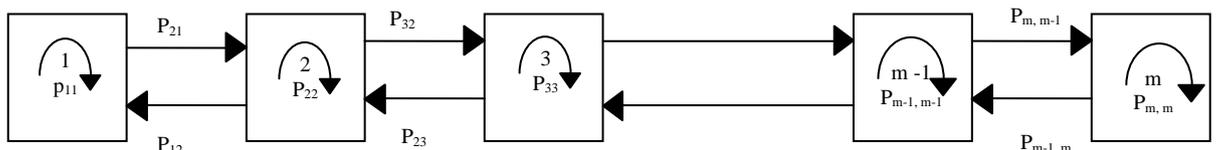


Рисунок 1.2. Графическое представление одномерной цепи Маркова

В результате одного перехода вектор состояния изменится и станет  $S_i^{k+1}$ . Эволюция состояния цепи может быть описана матричным рекуррентным равенством:

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (1.4)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей или матрица переходов, имеющая следующий вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & p_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{m-1,m-1} & p_{m-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{m,m-1} & p_{mm} \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

В этой матрице  $j$ -й столбец состоит из вероятностей перехода из  $j$ -го состояния. В общем случае имеются только два ограничения для вероятностей перехода  $p_{ij}$ , которые непосредственно следуют из математической постановки задачи:

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \quad (1.6)$$

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1.7)$$

Свойства матрицы  $P$  зависят от моделируемого процесса. Для процессов фракционирования и перемешивания в виброожиженном слое ось  $x$  располагается по вертикали. При учете сегрегации мелких частиц в полидисперсной смеси вероятности перемещения этих частиц из ячейки вверх и вниз не равны друг другу. При изучении процесса фракционирования рассматривается миграция мелких частиц в виброожиженном слое сыпучей среды. При этом мелкие фракции сегрегируют вниз. На рисунке 1.3 выделены случайная диффузионная составляющая  $d$  и конвективная составляющая  $v$ . Эти величины связаны с параметрами уравнения конвективной диффузии (1.2) соотношениями

$$v = V\Delta t / \Delta x, \quad (1.8)$$

$$d = D\Delta t/\Delta x^2, \quad (1.9)$$

где  $V$  – размерная скорость сегрегации,  $D$  – размерный коэффициент макродиффузии. Размерные и безразмерные стохастические коэффициенты считаются постоянными в течение всего времени процесса.

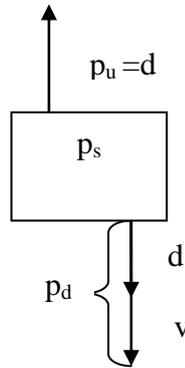


Рисунок 1.3. Схема переходных вероятностей ячейки слоя

Авторы [1, 29, 145-148, 151], рассматривая процессы перемешивания сыпучих материалов, вводят понятие абсорбирующей ячейки, фактически вводя единый вид рассмотрения процессов фракционирования (грохочения) и перемешивания. При этом абсорбирующая ячейка играет роль подситового пространства грохота. Тогда матрица переходных вероятностей  $\mathbf{P}$  из (1.5) принимает вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & p_{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{d1} & p_{s2} & p_{u3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{d2} & p_{s3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{d3} & 0 & p_{u5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{s5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{d5} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

В.А. Огурцов, развивая данный подход к описанию процесса грохочения сыпучих материалов, вводит ограничение выхода в эту ячейку из нижней ячейки виброожиженного слоя [13,17,18]. Эта вероятность отличается от других вероятностей перехода вниз. Она зависит от соотношения размеров проходных

частиц и отверстий сита грохота, а так же от параметров вибровоздействия просеивающей поверхности на слой сыпучего материала. Тогда матрица (1.10) принимает вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v+d & p_{s2} & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v+d & p_{s3} & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v+d & p_{s4} & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v+d & p_{s5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

В [3] предложена методика определения вероятности  $v_f$  для частиц, проникающих в подситовое пространство. Методика основана на модели движения одиночной частицы по вибрирующей поверхности сита грохота. Вычисляется число соударений ее с просеивающей поверхностью за время одного перехода  $\Delta t$ . При этом делаются следующие допущения: проникающая частица считается шарообразной, ее удар о просеивающую поверхность принимается абсолютно неупругим. Для определения числа соударений частицы с просеивающей поверхностью использовалась программа для ЭВМ для численного интегрирования дифференциальных уравнений движения одиночной частицы по вибрирующему сити грохота.

Так же к недостаткам предлагаемой в [3] модели можно отнести следующие допущения: высота слоя сыпучего материала в течение всего процесса грохочения считается постоянной, что не позволяет рассматривать случаи грохочения сыпучего материала, когда содержание мелких фракций велико. На рисунке 1.4. представлен реальный пример движения сыпучего материала по сити промышленного грохота, работающего на дробильно- сортировочном заводе ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область). Из рисунка видно, что высота сыпучего слоя существенно меняется при движении материала по просеивающей поверхности сита грохота.



Рисунок 1.4. Пример движения сыпучего материала по ситы промышленного грохота.

Кроме того, считается, что приведенные стохастические коэффициенты диффузии  $d$  и сегрегации  $v$  постоянны для рассматриваемой фракции сыпучей среды в течение всего времени пребывания грохотимого материала на поверхности сита грохота. Тогда при переходе мелких фракций из одной ячейки слоя в другую математически возможно переполнение нижних ячеек частицами сыпучей среды, что не соответствует реальной физической картине процесса.

Авторы работы [1] используют тестовые опыты по виброперемешиванию сыпучих материалов для определения стохастических коэффициентов диффузии и сегрегации для расчетов основных показателей процесса по предлагаемым моделям. При экспериментальном исследовании заранее продумывается способ отбора проб из лабораторного аппарата. При этом определяются места отбора проб и их число. Для того чтобы исследовать распределение частиц рассматриваемой фракции по высоте слоя сыпучего материала в различные моменты времени, приходится останавливать лабораторную установку и вводить пробоотборник в нужную точку пространства слоя. Очевидно, что при этом структура слоя изменится, и содержание частиц для остановленного процесса будет отличаться от содержания частиц в исследуемой точке пространства слоя, подверженному вибровоздействию.

Аналогичным методом отбора проб для определения стохастических коэффициентов пользовались О.Н. Тихонов и его последователи [30-32], используя тестовые опыты по перемешиванию сыпучих материалов для расчета параметров математической модели. Следует отметить, что О.Н. Тихонов на основе уравнений массопереноса, имеющих вид, подобный уравнению Колмогорова – Фоккера – Планка, получил уравнения движения частиц в сыпучем слое.

В работе Е.П. Астафьевой [32], использующей уравнения массопереноса О.Н. Тихонова, считается, что сегрегаций сыпучего материала можно пренебречь и учитывать только диффузионный механизм движения частиц в виброоживленном слое.

В работах Е.Р. Брик [33-36] проведено исследование кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на грохотах с многоярусной компоновкой сит, которое является дальнейшим продолжением и развитием работ [3, 12-18]. Е.Р. Брик разработан подход к математическому моделированию виброклассификации сыпучих материалов, обеспечивающий прогнозирование степени засоренности товарных фракций некондиционными мелкими частицами. Проведено исследование влияния кинетики грохочения проходových частиц на верхнем сите на процесс извлечения некондиционной мелочи на нижнем сите. При этом высота сыпучего слоя на верхнем и нижнем сите считалась постоянной, а стохастические коэффициенты - неизменными в течение всего времени процесса.

Работы [3, 12-18, 34-36] по моделированию процесса фракционирования сыпучих материалов в виброоживленном слое не рассматривают вариант, когда содержание мелких частиц в исходном сырье, поступающем на грохот, высокое. Однако грохочение сыпучих материалов в промышленных условиях часто соответствует данным условиям. Особенно это проявляется при фракционировании песчано-гравийных смесей на вновь разрабатываемых месторождениях.

Исследование конструкций виброгрохотов и смесителей сыпучих материалов, в которых не используются внутренние перемешивающие устройства показал, что движение сыпучей среды по рабочему пространству этих аппаратов имеет схожие черты. Наличие подрешетного пространства в некоторых конструкциях вибрационных смесителей делает их аналогичными конструкциям вибрационных грохотов. Так как физическая природа процессов грохочения и перемешивания одинакова, то и моделирование этих процессов имеет много общего, что видно из работ Е.А. Непомнящего, О.Н. Тихонова, С.В. Федосова, В.Е. Мизонова, их учеников и последователей. Анализ теоретических моделей, на которых основывается данная работа, показал, что математическое описание условий проникновения частиц исследуемой фракции в подситовое пространство для процесса перемешивания в вибрационных смесителях использует модель «поглощающего экрана», а для процесса фракционирования – модель движения одиночной частицы на вибрирующей поверхности, требует уточнения стохастических свойств сыпучей среды.

### **1.3. Требования к фракционному составу сыпучих материалов для некоторых видов производств**

Сыпучие материалы, к которым относятся гравий, щебень и песок, применяемые в качестве заполнителя для бетона, а так же сыпучие материалы для дорожных и других видов строительных работ, должны отвечать определенным требованиям качества к фракционному составу.

Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Введение в бетон заполнителей позволяет резко сократить расход цемента, являющегося наиболее дорогим и дефицитным компонентом [37]. Кроме того, заполнители улучшают технические свойства бетона.

Щебень, гравий и щебень из гравия, применяемые для тяжелого бетона, в качестве заполнителя делят на следующие фракции: 5-10 мм; 10-20 мм; 20-40 мм;

40-70 мм [38]. Щебень — остроугольные куски горных пород размером от 5 до 70 мм, получаемые при механическом или природном дроблении бута (рваный камень) или естественных камней. Его используют в качестве крупного заполнителя для приготовления бетонных смесей, устройства оснований.

Щебень из гравия должен содержать дробленые зерна в количестве не менее 80% по массе. Допускается по согласованию изготовителя с потребителем выпуск щебня из гравия с содержанием дробленых зерен не менее 60 % [38]. Форму зерен щебня и гравия характеризуют содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы.

Щебень в зависимости от содержания зерен пластинчатой и игловатой формы подразделяют на пять групп, которые должны соответствовать указанным в таблице 1.1 [38].

Таблица 1.1. Основные группы щебня и содержание зерен пластичной и игловатой формы

Группа щебня	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, %
1	До 10 включ.
2	Св. 10 до 15
3	Св. 15 до 25
4	Св. 25 до 35
5	Св. 35 до 50

Гравий не должен содержать зерен пластинчатой и игловатой формы более 35% по массе.

Природный песок - неорганический сыпучий материал с крупностью зерен до 5 мм, образовавшийся в результате естественного разрушения скальных горных пород и получаемый при разработке песчаных и песчано-гравийных месторождений без использования или с использованием специального обогащительного оборудования [39].

Содержание зерен крупностью свыше 10 и 5 мм и менее 0,16 мм не должно превышать значений, указанных в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Содержание зерен различной крупности в песке

Класс и группа песка	Содержание зерен крупностью, %		
	Св.10 мм	Св. 5 мм	Менее 0,16 мм
I класс			
Повышенной крупности, крупный и средний	0,5	5	5
Мелкий	0,5	5	10
II класс			
Очень крупный и повышенной крупности	5	20	10
Крупный и средний	5	15	15
Мелкий и очень мелкий	0,5	10	20
Тонкий и очень тонкий	Не допускается	Не допускается	Не нормируется

Если песок крупный, то это еще не значит, что он вполне пригоден для бетона. Крупный песок может иметь большой объем пустот, который придется заполнять цементным тестом, что увеличивает себестоимость бетона.

Крупные пористые заполнители для приготовления легких бетонов должны применяться в виде отдельных фракций размером зерен от 5 до 10 мм, свыше 10 до 20 мм [37,38]. Допускается применение смеси фракций 5 - 20 мм преимущественно для конструкционных бетонов на щебнеподобных заполнителях. Наибольший размер зерен крупного пористого заполнителя должен быть не более  $\frac{3}{4}$  расстояния между арматурными стержнями,  $\frac{1}{3}$  толщины изделия и конструкции.

Применение фракции 20 - 40 мм допускается для конструкционно-теплоизоляционных бетонов крупнопористой структуры и в ограниченном количестве для бетонов плотной и поризованной структуры, особенно на щебневидных заполнителях из пористых горных пород.

От качества щебня в значительной мере зависят потребительские свойства (ровность, коэффициент сцепления и т. д.) и долговечность автомобильных дорог. Особенно это относится к щебню, применяемому для устройства верхних слоев

дорожной одежды, непосредственно воспринимающих высокие механические нагрузки от движущегося транспорта, находящихся под воздействием природных факторов и антигололедных химических средств.

Щебень, применяемый в дорожном хозяйстве, условно можно разделить на три группы [40]:

- щебень для устройства оснований дорожных одежд (любые, но преимущественно осадочные скальные и рыхлые горные породы с крупностью фракций 5-20, 20-40, 40-70 мм);

- щебень для нижних слоев покрытий (метаморфические и изверженные горные породы с крупностью фракций 5-20 и 20-40 мм);

- щебень для верхних слоев покрытий из асфальтобетонных смесей и поверхностной обработки (изверженные и частично метаморфические горные породы крупностью щебня от 5 до 20 мм) с содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы не более 15%, который принято называть кубовидным.

На работу щебня в слоях дорожной одежды большое влияние оказывает форма его зерен. Установлено, что асфальтобетонные смеси на кубовидном щебне обладают лучшей уплотняемостью за счет взаимного перемешивания и взаимозаклинивания зерен. Отрицательное действие зерен лещадной формы проявляется при поверхностной обработке асфальтобетонных покрытий с использованием фракционированного щебня, когда при укладке щебня большая часть таких зерен. В этом случае их содержание в щебне не должно превышать 10%.

Отрицательное воздействие на свойства асфальтобетона оказывает и повышенное количество в щебне пылевато-глинистых примесей, которые препятствуют контакту битума с поверхностью щебня. Поэтому их содержание не должно превышать 1 % для приготовления асфальтобетонной смеси, 0,5 % - для поверхностной обработки.

Основным сырьем при производстве серной кислоты служит серный колчедан. Крупность кусков рядового колчедана при сжигании в печах обычно колеблется от 6 до 10 мм [7].

В энергетике предъявляются высокие требования к фракционному составу сыпучих материалов, так, например, при подготовке углей для сжигания на тепловых электростанциях. В замкнутых системах измельчения используются вибрационные грохоты, которые предназначены для отделения крупных фракций от мелких. Повышение эффективности грохочения способствует уменьшению возврата крупных частиц на повторное измельчение в мельницу, что позволяет повысить производительность процесса и снизить энергозатраты систем пылеприготовления [42].

#### 1.4. Основные показатели процесса грохочения

В технической литературе и проспектах фирм-производителей виброгрохотов указываются основные технические характеристики классифицирующего оборудования, к которым относятся: производительность по питанию, крупность разделения, количество просеивающих поверхностей, размеры сит (длина и ширина), угол наклона сит, амплитуда и частота колебаний и другие. Значения основных показателей процесса грохочения носят рекомендательный характер. В Российской Федерации существует несколько методов расчета технологических показателей работы виброгрохотов [2, 3, 60, 61], но большинство из них ограничены расчетами только производительности и эффективности грохочения.

Расчет производительности грохотов, используемых в строительстве, производится по следующей эмпирической формуле [60, 61]:

$$Q = mqFK_1K_2K_3, \quad (1.12)$$

где  $m$  – коэффициент, которым в совокупности учитывается возможная неравномерность питания и зернового состава материала, форма зерен и тип

грохота;  $q$  – удельная производительность  $1 \text{ м}^2$  сита;  $F$  – площадь сита грохота;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание нижнего класса в исходном материале;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание в нижнем классе зерен размером меньше  $1/2$  размера отверстия сита;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий угол наклона грохота.

Эффективность грохочения определяют по эмпирической формуле [60,61]:

$$E = eK_1K_2K_3, \quad (1.13)$$

где  $e$  – эталонная эффективность для средних условий грохочения;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий угол наклона грохота;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание нижнего класса в исходном материале;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание в нижнем классе зерен размером меньше половины размера отверстия сита.

Специалисты из научно-производственной корпорации «Механобр» считают, что достоверность расчета производительности грохотов и эффективности их работы эмпирическими методами достаточно низка [2, 43, 44]. Кроме того опытные данные, которые положены в основу эмпирических методов, устарели и не отражают особенности процесса фракционирования на современных грохотах.

Одним из основных параметров, характеризующих процесс грохочения, является эффективность классификации (степень извлечения проходových частиц из исходной смеси), под которой понимают отношение массы частиц, прошедших через отверстия сита, к массе частиц того же размера, содержащихся в исходном материале [1- 8]

$$\varepsilon = \frac{Q_n}{Qc}, \quad (1.14)$$

где  $Q$  – производительность грохота по исходному материалу;  $c$  – содержание проходových частиц в исходном материале;  $Q_n$  – производительность грохота по подрешетному продукту.

Уравнение баланса для проходových частиц имеет вид

$$Qc = Q_n + Q_n \nu, \quad (1.15)$$

где  $Q_n$  – производительность грохота по надрешетному продукту;  $v$  – засоренность, то есть содержание проходových частиц в надрешетном продукте.

Если крупные частицы не попадают в подситовой продукт, тогда засоренность надрешетного продукта проходowymi частицами определится [2]

$$v = c(1 - \varepsilon)/1 - c \varepsilon. \quad (1.16)$$

Качество товарного продукта (его гранулометрический состав), в известной мере, зависит от эффективности грохочения, которая для реального грохота может быть достаточно высокой. Но полностью качество товарного продукта определяется засоренностью его частицами некондиционного размера, то есть соотношением массы посторонних зерен к массе частиц товарного продукта. Эффективность работы грохота может принимать достаточно высокие значения. При этом засоренность товарного продукта, которая зависит от содержания мелких проходových частиц в исходном материале, как видно из уравнения (1.16), может принимать значения выше допустимых.

Для определения основных технологических показателей грохочения в последнее время используются программные средства имитационного моделирования. Например, хорошие результаты дает пакет моделирования динамики движения и механического взаимодействия большого количества частиц с учетом взаимодействия сыпучей среды с движущимися элементами классифицирующего оборудования Bulk Flow Analyst<sup>TM</sup> [62]. Известен так же программный вычислительный комплекс имитационного моделирования, основанный на методе дискретных элементов (Discrete Element Method). С его помощью в ОАО «Механобр-Техника» производится расчет процесса грохочения и подбор необходимых размеров просеивающих поверхностей для конкретных технологических случаях. Комплекс используется при организации производства грохотов и поставке их потребителям несколькими фирмами в США и Германии [44, 63-65, 160-163]. Существует еще несколько перспективных программных пакетов, как правило, принадлежащих зарубежным разработчикам для исследования новых технологий грохочения со сложным возбуждением рабочих органов грохотов [62, 66-68]. Однако эти программы не учитывают

особенности фракционирования сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье.

### **1.5. Исследование фракционных составов песчано-гравийных смесей, добываемых в карьерах предприятий нерудной промышленности Ивановской области**

Возрастающие в настоящее время требования к качеству продукции предприятий, производящих сыпучие строительные материалы, к уменьшению затрат электроэнергии на выпуск единицы продукции и к повышению производительности труда определяют необходимость совершенствования технологий, модернизацию оборудования для фракционирования сыпучих материалов.

Анализ научной и патентной литературы показал, что применение узких фракций сыпучих материалов с низким содержанием некондиционных частиц положительно влияет на конечные результаты технологических процессов различных производств. Объемы использования гравия, щебня и песка в качестве сырья для изготовления цементобетонных и асфальтобетонных конструкций постоянно увеличиваются. Это приводит к тому, что в Ивановской области возрастает количество карьеров, где производится добыча нерудных строительных материалов. Вновь разрабатываемые месторождения имеют низкое содержание валунов и гравия. Поэтому возникает необходимость переработки сыпучего сырья непосредственно в карьере, где происходит предварительное обогащение сыпучих смесей. Песок и гравий мелких фракций извлекается с помощью грохотов из общей добываемой массы, что позволяет снизить транспортные расходы на доставку сыпучего материала и снизить объем перерабатываемой массы на дробильно-сортировочных заводах или дробильно-сортировочных установках.

Разработка валунно-гравийно-песчаных месторождений в Ивановской области проводится на карьерах, принадлежащих производственному

объединению «Ивавтодор» концерна «Росавтодор», ООО «Хромцовский карьер», ТОО «Дорожник», АО «Красный Октябрь», АООТ «ДСУ-1», ГП ДСУ №25, АП «Гаврилово-Посадский ДПМК», АО «Дормостстрой» и другим организациям. Предприятия, ведущие разработку минерально-сырьевых месторождений, сталкиваются с проблемой фракционирования гравийно-песчаных смесей с низким содержанием каменного материала. Так содержание песка по фракции 0-5 мм в добываемом сырье может достигать 90,9%. Это высокое содержание мелких фракций в добываемой песчано-гравийной смеси наблюдается при производстве песка и гравия в месторождение «Новинкинское» Фурмановского района Ивановской области.

Перспективы увеличения запасов строительного камня по геологоразведочным работам на вновь разрабатываемых месторождениях Ивановской области весьма ограничены. Это обстоятельство приводит к тому, что приходится учитывать низкое качество исходного сырья при выборе сортировочных агрегатов, которые могут устанавливаться в карьерах. Расчет технологических режимов классифицирующего оборудования должен учитывать эти особенности. Достоверных методик определения основных характеристик процесса (производительности грохота и эффективности фракционирования), а так же параметров вибровоздействия сита на сыпучий материал (амплитуды и частоты колебаний), угла наклона просеивающей поверхности к горизонту, учитывающих особенности грохочения конкретного материала, не существует.

В таблице 1.3, в качестве примера, приведены результаты полевого грохочения гравийно-песчаного материала по шурфам, пройденным при проведении геологоразведочных работ в районе Хмельницкого месторождения (Тейковский район).

Таблица 1.3. Результаты полевого грохочения гравийно-песчаного материала по шурфам, пройденным при проведении геологоразведочных работ в районе Хмельницкого месторождения

Номер шурфа	Процентное содержание по фракциям							
	Валунов более 70 мм	70-40 мм	40-20 мм	20-10 мм	10-5 мм	Всего гравия 5-70 мм	Гравия и валунов	Песка 5 мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	9,5	12,5	9,5	8,8	40,3	40,3	59,7
2	-	3,3	13,4	13,4	17,1	47,2	47,2	52,8
3	-	0,4	3,3	4,3	8,2	16,4	16,4	83,6
4	-	-	1,4	2,9	6,5	10,8	10,8	89,2
5	-	1,2	7,6	13,7	11,1	33,6	33,6	66,4
6	-	7,7	10,8	10,8	8,7	38,0	38,0	62,0
7	4,3	13,0	13,6	11,2	9,7	47,5	51,8	48,2
8	5,5	9,8	14,4	9,1	9,8	43,1	48,6	51,4
9	-	2,1	3,6	5,3	5,5	16,5	16,5	83,5
10	-	0,6	11,8	13,0	11,2	36,6	36,6	63,4
11	-	2,1	7,2	8,5	7,5	25,3	25,3	74,7
12	-	10,3	12,2	10,1	8,4	41,8	41,8	58,2

С начала 2014 года ООО «Цитадель» производит разработку Голчаново-Мельцаевского месторождения (рисунок 1.5). В карьере добывается песок и гравий. Нами были взяты несколько проб сыпучей смеси для ситового анализа, который показал, что содержание песка фракции 0 – 5 мм может составлять до 90% от общей массы исследуемого материала.



Рисунок 1.5. Предварительное обогащение песчано-гравийной смеси в карьере Голчаново-Мельцаевского месторождения

В таблице 1.4 приведены результаты ситового анализа гравийно-песчаных материалов различных месторождений Ивановской области, которые показывают, что содержание частиц мелких фракций в исходном сырье колеблется от 42,5 до 90,9%.

Таблица 1.4. Результаты ситового анализа песчано-гравийных материалов месторождений Ивановской области

Название месторождения	Содержание фракций, %	Размер фракций, мм					
		>70	40-70	20-40	10-20	5-10	<5
Петрайко-Левинское, Ильинский район	среднее	19,16	7,82	9,24	8,07	6,51	56,7
	макс	27,9	13,4	12,7	10,9	7,8	72,3
	мин	0	5,1	7,0	5,4	5,6	42,0
Новинкинское, Фурмановский район	среднее	11,71	5,47	9,7	9,61	7,74	63,39
	макс	26,4	13,6	16,3	16,6	15,5	90,9
	мин	0	0	1,8	3,2	3,8	42,5
Ямновское, Заволжский район	среднее	3,07	10,17	9,57	9,43	7,27	60,5
	макс	3,8	10,8	9,8	9,6	7,7	63,4
	мин	3,1	9,3	9,3	9,2	6,7	58,3

## 1.6. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований

Анализ современного состояния проблемы процессов фракционирования сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье на вибрационных грохотах, их моделирования и расчета показал:

1. Математическим подходом, соответствующим физической картине процессов, происходящих в виброоживленном слое сыпучей среды, является вероятностное их описание. Данный подход учитывает как случайные свойства частиц, так и многообразие конструкций классифицирующего оборудования.

2. Наиболее удобным инструментом для моделирования закономерностей миграции частиц исследуемой фракции в процессе их движения по виброоживленному слою является теория цепей Маркова, описывающая эволюцию вероятностей состояний в пространстве состояний.

3. Рассматривая модели фракционирования сыпучих материалов различных авторов, придерживающихся вероятностного описания процесса грохочения, отмечаем, что случай, когда содержание мелких частиц в исходном сырье велико, авторами данных моделей не выделяется. При этом стохастические коэффициенты считаются постоянными в течение всего времени грохочения, а высота слоя материала – неизменной. Это вносит искажение в расчеты кинетики грохочения, которая является наиболее информативной характеристикой грохота, определяющего его работоспособность в тех или иных технологических условиях. Авторы моделей процесса, которые используют стохастические и детерминистические подходы, если и учитывают уменьшение высоты слоя материала, движущегося по просеивающей поверхности грохота, то констатируют это как факт и не рассматривают влияние уменьшения высоты слоя на кинетику грохочения.

4. Экспериментальное определение стохастических коэффициентов для математического описания процесса миграции частиц по виброоживленному слою требует нескольких остановок лабораторной установки в течение времени опыта и изъятия проб из сыпучей среды при его переведении из динамического

положения в статическое, что вносит погрешность в определение значений этих коэффициентов.

5. Авторы, использующие линейные ячеечные модели для описания процесса грохочения, не учитывают следующего обстоятельства. Если число мелких проходových частиц велико, то происходит переполнение нижних ячеек слоя сыпучего материала, что недопустимо как с физической, так и с математической точки зрения.

В связи с этим в работе были поставлены следующие задачи исследования.

1. Для повышения эффективности и производительности виброгрохотов разработать научные подходы к математическому моделированию процессов фракционирования сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в виброожиженном слое, обеспечивающие прогнозирование конечных результатов этих процессов на вибрационных грохотах различных типов.

2. Разработать нелинейную ячеечную математическую модель, основанную на теории цепей Маркова, для описания миграции частиц к поверхности сита, в которой скорость сегрегации из ячейки зависит от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи.

3. Усовершенствовать математическую модель, описывающую процесс проникновения частиц проходových фракций, учитывая стохастические свойства сыпучей среды и убывание высоты слоя материала по мере извлечения мелкой фракции, которое замедляет кинетику процесса при высокой степени извлечения.

4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных математических моделей процессов виброгрохочения сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье на лабораторной установке периодического действия.

5. Разработать методику определения стохастических коэффициентов модели миграции частиц по виброожиженному слою сыпучих материалов из кинетики тестовых опытов их фракционирования на установке периодического действия.

6. Разработать новую конструкцию вибрационного грохота, обеспечивающую повышение эффективности процесса фракционирования за счет создания пространственной траектории колебаний сита с помощью независимых источников возбуждения.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ

От эффективности и производительности грохота во многом зависит качество получаемых на нем полуфабрикатов и эффективность технологических линий с его участием. В настоящее время известен широкий спектр конструкций грохотов, обзор которых приведен в главе 1, среди которых наиболее распространенными являются вибрационные грохоты. Необходимость сочетать высокую производительность грохота с разумными габаритами сита приводит к тому, что исходный материал подается на грохот достаточно высоким слоем, вмещающим по высоте большое число частиц различного размера. Наложение вибрационного воздействия приводит к псевдооживлению материала, когда его частицы могут мигрировать друг относительно друга. Таким образом, сам процесс грохочения складывается из двух составляющих: стохастическое (диффузионно-сегрегационное) движение частиц мелкой фракции по высоте слоя, их миграция к поверхности сита и прохождение мелких частиц сквозь отверстия сита в подситовой продукт. Технологическая эффективность грохочения зависит от этих составляющих, и нахождение данной зависимости является сложной задачей математического моделирования процесса [120].

Впервые применение стохастических методов к моделированию кинетики грохочения было описано в трудах Е.А. Непомнящего, развитых в последствии сотрудниками научно-производственной корпорации «Механобр» [2,8-10, 43-45, 149]. Все эти работы, так или иначе, базируются на теории марковских процессов и ориентированы на получение аналитических расчетных зависимостей для эффективности грохочения, для чего вводятся специальные допущения, зачастую весьма далеко идущие.

Развитие средств компьютерной поддержки инженерных расчетов выдвинуло на передний план стохастические модели, основанные на теории цепей Маркова. Теоретические основы применения теории цепей Маркова к

моделированию процессов в дисперсных средах описаны в работах профессора В.Е. Мизонова [1,3, 29, 46-57, 146-148].

Детальное описание приложения этого подхода в работах его учеников и последователей к моделированию и расчету процессов в кипящем слое, тепломассопереноса, измельчения с экспериментальной проверкой расчетных результатов подтвердило прогностические возможности данного метода [58, 59, 69-83, 86-110, 125,126].

В работах В.А. Огурцова [13-18, 33-35] предложено описание кинетики грохочения на основе теории цепей Маркова. Рассчитанная на его основе кинетика грохочения хорошо соответствовала экспериментальным данным до степени извлечения мелкой фракции на 70...80%, но при больших степенях извлечения давала завышенные результаты. Это было вызвано тем, что модель не учитывала нелинейность конвективной миграции частиц в слое, а, главное, отсутствием изменения высоты слоя по мере извлечения мелкой фракции и связанных с ним изменением характеристик составляющих процесса [120]. Ниже предлагается ячеечная модель процесса, свободная от этих допущений.

### **2.1. Нелинейная модель процесса фракционирования сыпучей среды с высоким содержанием мелких частиц в исходном материале**

Расчетная схема процесса показана на рисунке 2.1, а. Смесь мелкой и крупной фракции, представляющая исходный материал, расположена слоем высотой  $h_0$  на вибрирующем сите. В результате наложения вибрации мелкая фракция мигрирует вниз к поверхности сита, причем этот процесс сопровождается диффузионным перемешиванием частиц фракции. Достигнув поверхности сита, частицы мелкой фракции, преодолев препятствие к прохождению ячейками сита, выводятся в подрешетный продукт. В пределе в подрешетный продукт уходит вся мелкая фракция, но этот процесс может занимать длительное время. По мере ухода мелкой фракции меняется и высота ее слоя над ситом [120].

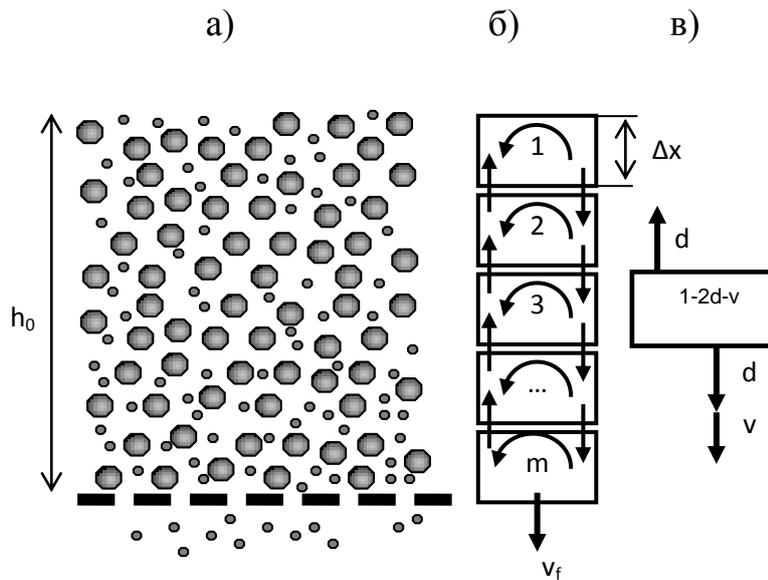


Рисунок 2.1. Расчетная схема процесса (а), его ячеечная модель (б) и доли переноса фракции из ячейки (в)

На рисунке 2.1, б показана ячеечная модель процесса, в которой высота слоя разбита на  $m$  ячеек идеального перемешивания высотой  $\Delta x = h/m$ . Считается, что каждая ячейка вмещает единичную объемную порцию компонентов или смеси независимо от ее состава. Процесс наблюдается в дискретные моменты времени  $t_k = (k-1)\Delta t$ , где  $\Delta t$  – продолжительность, а  $k$  – номер временного перехода (дискретный аналог времени). В течение времени перехода частицы могут перейти в соседние ячейки, то есть вверх или вниз, и остаться в ячейке. Направления возможных переходов показаны на рисунке 2.1, б стрелками. Для мелкой фракции доли частиц, переносимых из ячеек вниз, больше, чем доли частиц переносимых вверх, что вызвано конвективным переносом мелкой фракции к поверхности сита (рисунок 2.1, в). Из этих долей можно выделить симметричную (диффузионную) составляющую  $d$  и несимметричную составляющую  $v$ , обусловленную конвективным переносом. Эти составляющие связаны с натуральными характеристиками процесса соотношениями  $d = D\Delta t / \Delta x^2$  и  $v = V\Delta t / \Delta x$ , где  $D$  – коэффициент макродиффузии, а  $V$  – размерная скорость

сегрегации, то есть конвективного переноса [1, 3, 119, 120].

Из нижней ячейки частицы мелкой фракции могут уйти в подрешетный продукт и навсегда покинуть процесс, в результате чего высота слоя убывает с течением времени, что не может не отразиться на самой скорости выхода мелкой фракции под сито.

В каждый момент времени распределение содержания мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом  $\mathbf{S}^k$  размером  $m \cdot 1$ . Эволюция этого вектора с течением времени (от перехода к переходу) описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}^k, \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{P}$  – переходная матрица (матрица переходных вероятностей), которая для закрытого сита имеет вид:

$$\mathbf{P}^k = \begin{bmatrix} p_{s1}^k & p_{u2}^k & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{d1}^k & p_{s2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{d2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & p_{s(m-1)}^k & p_{um}^k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{d(m-1)}^k & p_{sm}^k \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где  $p_u^k$  – вероятности перейти в течение  $\Delta t$  в верхнюю соседнюю ячейку,  $p_d^k$  – вероятности перейти в течение  $\Delta t$  в нижнюю соседнюю ячейку и  $p_s^k$  – вероятности в течение  $\Delta t$  остаться в данной ячейке [119-121].

В соответствии с принимаемыми допущениями эти вероятности рассчитываются по следующим формулам:

$$p_{ui}^k = d = \text{const}; \quad (2.3)$$

$$p_{di}^k = d + v_0(1 - S_{i+1}^k); \quad (2.4)$$

$$p_{si}^k = 1 - p_{ui}^k - p_{di}^k, \quad (2.5)$$

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. Равенство (2.5) следует из условия

нормировки.

Переходная матрица (матрица переходных вероятностей) для закрытого сита примет вид

$$P = \begin{bmatrix} 1 - d - v_1^k & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d + v_1^k & 1 - 2d - v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d + v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 - 2d - v_{m-1}^k & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d + v_{m-1}^k & 1 - d \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Особенностью данной матрицы является то, что скорость сегрегации не считается постоянной, как это принято в большинстве работ, а меняется от ячейки к ячейке и от перехода к переходу.

Для того чтобы, ввести ее зависимость от текущего состояния процесса, допустим, что скорость сегрегации мелкой фракции сквозь чистую крупную максимальна и равна  $v_0$ , а скорость сегрегации мелкой фракции в чистую мелкую же равна нулю (материал не сегрегирует сам в себя) [119]. При этом естественно сделать допущение, что скорость сегрегации в зависимости от содержания мелкой фракции в ячейку линейно зависит от содержания мелкой фракции в этой ячейке, то есть

$$v_i^k = v_0(1 - S_{i+1}^k). \quad (2.7)$$

Следует учесть, что максимальное содержание фракции в ячейке принято равным единице.

Таким образом, в описанной выше модели внутренних переходов в слое переходная матрица становится зависящей от текущего вектора состояния, то есть модель становится нелинейной.

На рисунке 2.2 показано сравнение эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя по линейной ( $v = \text{const}$ ) и нелинейной модели при  $d=0,2$ ;  $v_0=0,2$ ;  $v_f=0,02$ ;  $C_0=0,8$ .

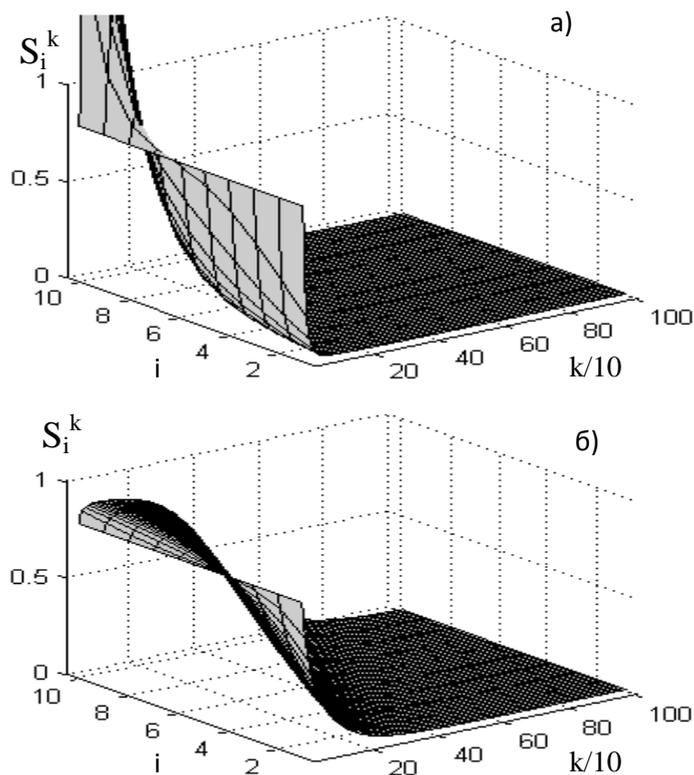


Рисунок 2.2. Эволюция распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя по линейной (а) и нелинейной (б) модели

Очевидно, что линейная модель, в которой перенос мелкой фракции в сторону сита ничем не ограничен, приводит к неустранимому физическому противоречию, когда в примыкающих к ситу ячейках оказывается больше материала, чем они могут вместить. Этого не происходит в нелинейной модели, где перенос ограничен формулой (2.7). В нижних ячейках может скопиться материала больше, чем было ранее, но никогда его содержание не превзойдет предельной емкости ячеек [119].

Принципиальное изменение характера движения материала внутри слоя, естественно, отражается на выходе мелкой фракции в подрешетный продукт. Степень влияния учета нелинейности иллюстрирует рисунок 2.3 а, где приведена кинетика извлечения, рассчитанная при тех же параметрах, что и для рисунка 2.2. Сравнение графиков показывает, что линейная модель дает сильно завышенные

результаты по времени извлечения. Так времена извлечения до 80% отличаются в 2 раза. При этом меняется не только скорость вывода мелкой фракции, но и сам характер кинетических кривых. Об этом можно судить по графикам рисунке 2.3 б, где аргумент нормирован на величину  $k_{50}$  – продолжительность процесса до извлечения половины мелкой фракции для каждой кривой. Видно, что до извлечения половины фракции характер кривых практически одинаков, но после этого график по нелинейной модели все более отстает от графика по модели линейной.

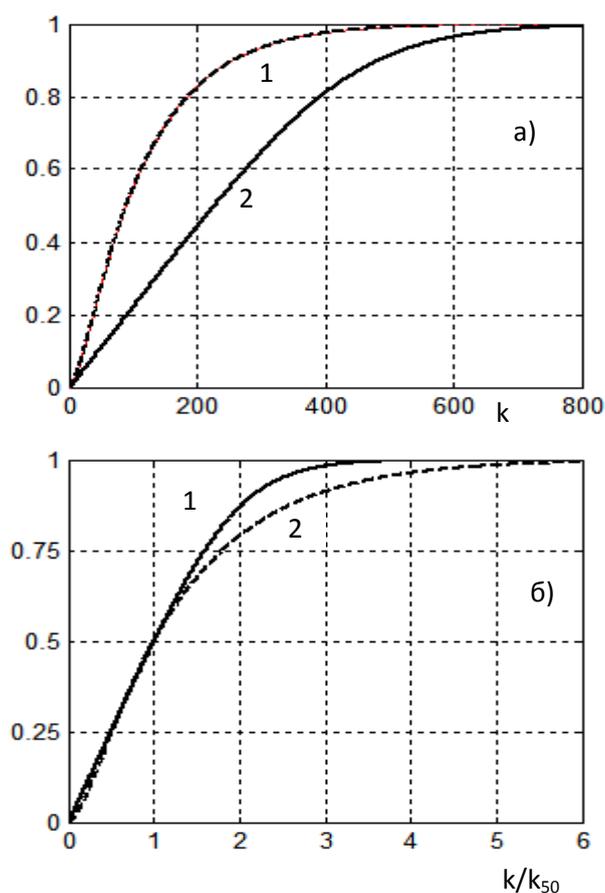


Рисунок 2.3. Сравнение кинетики извлечения по линейной (1) и нелинейной (2) модели

Таким образом, предложенная нелинейная модель кинетики грохочения дает более адекватное описание реального процесса и свободна от физических противоречий, вносимых линейной моделью [119].

## 2.2. Моделирование кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты

Изменение высоты слоя учитывается в матрице  $\mathbf{P}$  следующим образом. Убывание мелкой фракции происходит более интенсивно в верхних ячейках цепи. Если в какой-то ячейке с номером  $i$  содержание мелкой фракции  $S_i^k$  становится меньше некоторого наперед заданного малого значения  $\beta$ , то содержание  $S_i^k$  переносится в следующую ячейку  $i+1$ , содержание фракции в ячейке  $i$  приравнивается к нулю и приравнивается нулю вероятность перехода из этой ячейки вверх ( $p_{ui}^k=0$ ), что запирает  $i$  верхних ячейки цепи, а оставшиеся внизу ячейки составляют новую высоту слоя [120].

Выход мелкой фракции в подрешетный продукт может быть описан за пределами матрицы  $\mathbf{P}$  следующим образом. Пусть на каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния  $\mathbf{S}^k$  матрицей  $\mathbf{P}$  из нижней ячейки цепи выводится доля  $v_f^k$  содержащейся в ней мелкой фракции, то есть ее выход составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (2.8)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f^k), \quad (2.9)$$

где  $:=$  - оператор присваивания.

Полный выход мелкой фракции за  $(k+1)$  переход рассчитывается по формуле

$$Q^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}, \quad (2.10)$$

а его относительное значение по отношению к первоначальному содержанию этой фракции, являющееся искомой степенью извлечения  $\varepsilon$ , вычисляется как

$$\varepsilon^{k+1} = \frac{Q^{k+1}}{C_0 m}, \quad (2.11)$$

где  $C_0$  – относительное содержание мелкой фракции в сырье при ее равномерном распределении по высоте слоя.

Принципиальным вопросом рассматриваемого моделирования является вопрос о том, как зависит величина  $v_f^k$  от высоты слоя. Если считать  $v_f^k = \text{const}$ , то учет переменной высоты слоя практически ничего не дает, поскольку от него отсекаются верхние ячейки, уже содержащие очень малое количество мелкой фракции. Однако, если считать, что материал находится в виброожигенном состоянии, то его поведение аналогично поведению капельной жидкости, а скорость прохода мелкой фракции сквозь сито может рассматриваться как скорость ее истечения под напором, определяемым высотой слоя  $h_0$  (рисунок 2.1,а) или числом работающих ячеек  $m-i$ . Поэтому в первом приближении можно принять, что

$$v_f^k = v_{f0} \sqrt{\frac{m-i(k)}{m}}, \quad (2.12)$$

где  $(m - i(k))$  – выраженная через число ячеек переменная высота слоя,  $v_{f0}$  – скорость истечения при начальной высоте слоя  $m$  [120].

Равенства (2.1)-(2.12) полностью описывают кинетику нелинейного процесса грохочения при слое материала переменной высоты на сите грохота.

Рассмотрим некоторые результаты численных экспериментов с этой моделью. На рисунке 2.4 показано сравнение эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя при постоянной ( $v_f = \text{const}$ ) и переменной (2.12) скорости извлечения при  $d=0,05$ ;  $v_0=0,5$ ;  $v_{f0}=0,05$ ;  $C_0 = 0,8$ .

Очевидно, что модель с постоянной скоростью извлечения дает заметно более быстрое убывание высоты слоя и, в конечном счете, более быстрое полное извлечение мелкой фракции, причем высота слоя меняется практически по линейному закону, что не согласуется с известными опытными данными [43,44].

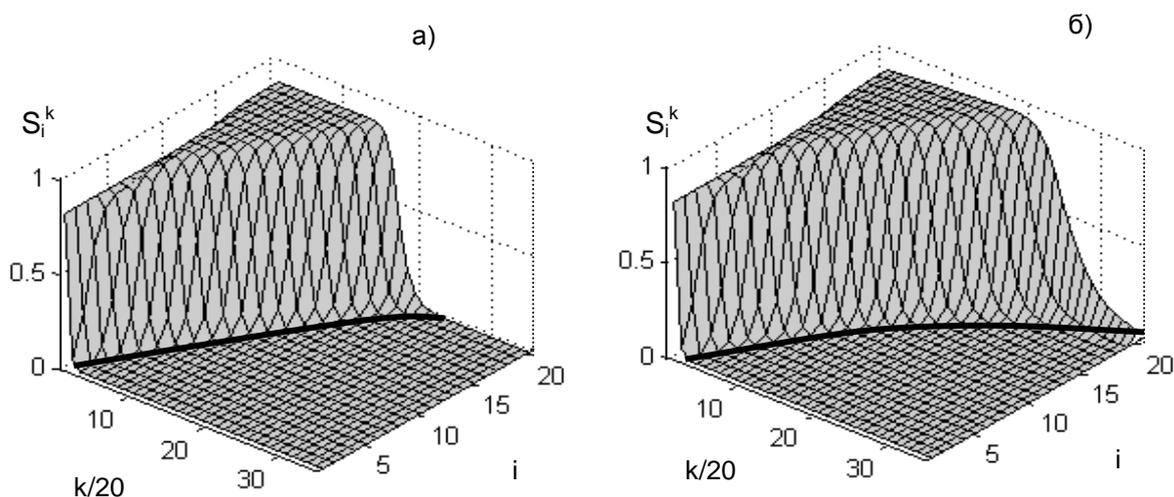


Рисунок 2.4. Эволюция распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя при постоянной (а) и переменной (б) скорости извлечения (жирная линия – изменение высоты слоя)

При скорости извлечения, зависящей от высоты слоя мелкой фракции, на начальной стадии кинетика распределения в обоих случаях почти одинакова, однако с дальнейшим убыванием скорости извлечения в случае (б) процесс заметно замедляется. Это же можно наблюдать и на рисунке 2.5, где нанесены графики кинетики извлечения, рассчитанные по обеим моделям.

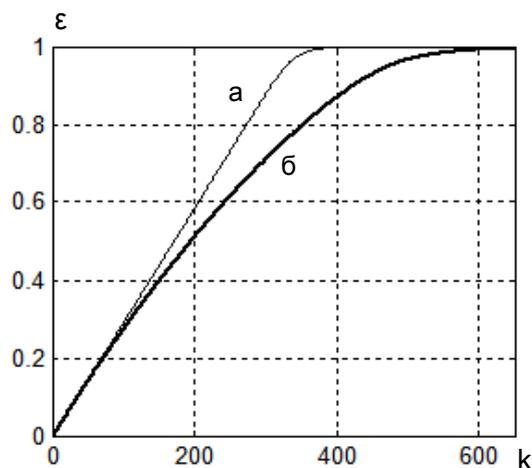


Рисунок 2.5. Кинетика извлечения мелкой фракции при постоянной (а) и переменной (б) скорости извлечения

Введение зависимости интенсивности извлечения от высоты слоя, вызванного уходом мелкой фракции, повышает на 15% точность определения степени извлечения в ее рабочем диапазоне 70 – 85%. Последнее позволяет положить эту модель в основу инженерного метода расчета процесса и повысить его прогностическую ценность [120].

Введение в модель расчета процесса грохочения сыпучего материала с повышенным содержанием мелких фракций в исходном сырье стохастического коэффициента в  $v_{f0}$  позволяет учитывать случайные физико-механические свойства частиц проходовых фракций и параметры вибровоздействия сита на слой сыпучего материала. Это позволяет избежать допущений модели движения одиночной частицы на просеивающей поверхности грохота для описания процесса проникновения частиц через сито [3, 12-18].

На рисунке 2.6 показано зависимость высоты слоя порции сыпучего материала при перемещении его по просеивающей поверхности грохота от времени грохочения. Начальная высота слоя материала, поступающего на грохот, определяется количеством ячеек. В данном примере  $m=20$ . Время грохочения равно количеству переходов ( $k=700$ ).

Зависимость высоты слоя от времени грохочения (а) на рисунке 2.6 построена при постоянных стохастических параметрах. Зависимость (б) построена при постоянном безразмерном коэффициенте диффузии  $d$  и при уменьшающихся безразмерных коэффициентах скорости сегрегации  $v_0$  и скорости проникновения частиц через отверстия сита  $v_{f0}$ .

Из рисунка 2.6 видно, что при линейной модели грохочения высота слоя убывает с течением времени грохочения быстрее, чем при нелинейной. Линейная модель дает завышенные результаты уменьшения высоты слоя. Это обусловлено тем, что завышена степень извлечения проходовых фракций. Данное обстоятельство может привести к искаженному описанию кинетики фракционирования.

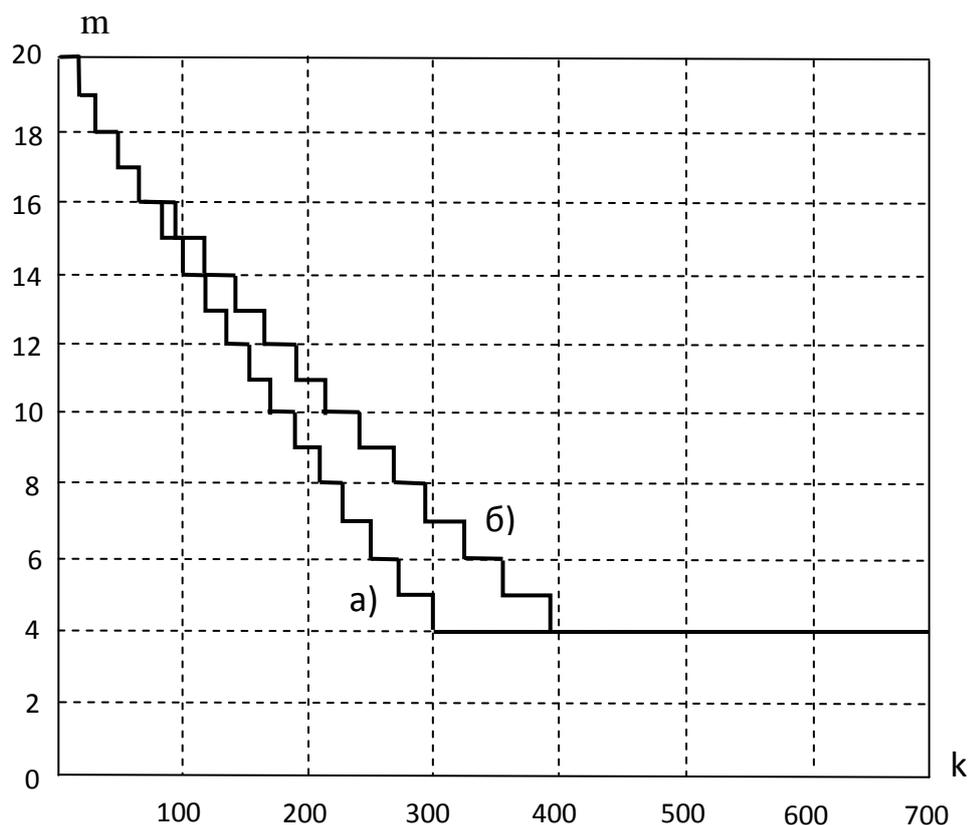


Рисунок 2.6. Зависимость высоты слоя от времени грохочения: а) – линейная модель; б) – нелинейная модель

На рисунке 2.7 показан пример эволюции состояния проходовой фракции при следующем режиме грохочения. В начальный момент времени частицы этой фракции находятся в первых двух ячейках слоя, причем мелкие частицы полностью занимают объем этих ячеек. Считаем, что общее количество мелких частиц принимаем равным двум единицам, то есть, в первой и второй ячейке находится по единице частиц проходовой фракции. Весь слой разбит на четыре ячейки.

Данный пример будет использован для описания экспериментальных процессов фракционирования двухкомпонентной смеси на лабораторном грохоте периодического действия, когда начальное положение рассматриваемой проходовой фракции может быть как равномерно распределенным по высоте слоя, так и сосредоточенным в одной или нескольких ячейках слоя.

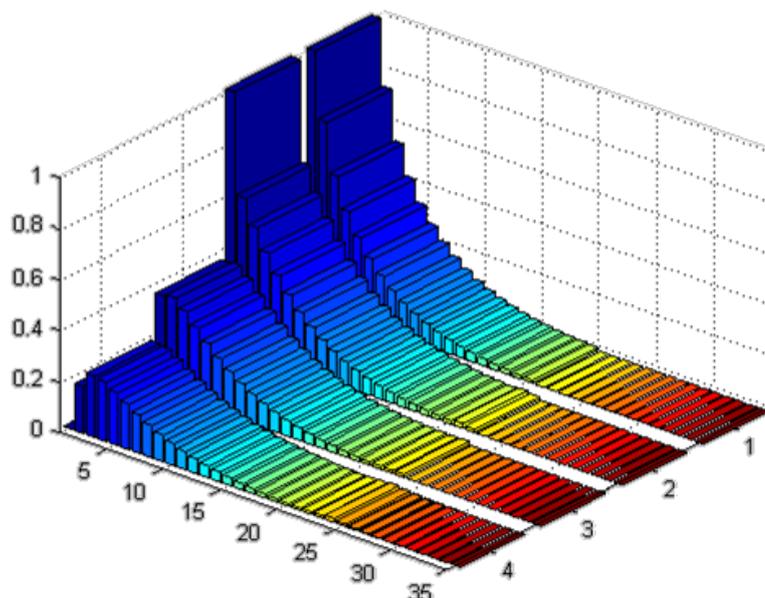


Рисунок 2.7. Эволюция состояния проходовой фракции ( $d = 0,05$ ;  $v_0 = 0,02$ ;  $v_{f0} = 0,05$ )

Расчеты эволюции состояния частиц мелких фракций раскрывают возможности алгоритма модели, реализованной в среде MATLAB. Предложенная модель грохочения и ее программные приложения позволяют рассматривать различные варианты подачи сыпучего материала на просеивающую поверхность грохота.

### 2.3. Выводы по главе 2

По результатам моделирования процесса фракционирования сыпучих материалов с высоким содержанием мелких частиц в исходном сырье можно сделать следующие выводы:

1. Для решения поставленной задачи может использоваться теория цепей Маркова, где число ячеек цепи, соответствующее высоте слоя, меняется по мере выхода мелкой фракции.

2. Для описания сегрегационной миграции частиц к поверхности сита используется нелинейная модель, в которой доли сегрегационного переноса

зависят от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи.

3. Показано, что введение зависимости интенсивности извлечения от высоты слоя, вызванного уходом мелкой фракции, оказывает значительное влияние на распределение содержания мелкой фракции по высоте слоя и ее извлечение в мелкий продукт. Особенно это проявляется при высокой степени извлечения.

4. Учет изменения высоты слоя при грохочении позволяет более адекватно описывать кинетику грохочения и достоверно прогнозировать характеристики вибрационного грохота.

5. Определена зависимость вероятности проникновения частиц проходовых фракций через отверстия сита от уменьшающейся высоты слоя. Показано, что поведение материала в виброоживленном состоянии аналогично поведению капельной жидкости, а скорость прохода мелкой фракции сквозь сито может рассматриваться как скорость ее истечения под напором.

6. Введение в модель расчета процесса грохочения сыпучего материала с повышенным содержанием мелких фракций в исходном сырье стохастического коэффициента в  $v_{f0}$  позволяет учитывать случайные физико-механические свойства частиц проходовых фракций и параметры вибровоздействия сита на слой сыпучего материала. Введение стохастического параметра  $v_{f0}$  в математическую модель процесса фракционирования позволяет избежать упрощенной физической картины проникновения проходовых частиц через отверстия сита грохота, когда этот процесс представляется моделью движения одиночной частицы через просеивающую поверхность.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ В ВИБРООЖИЖЕННОМ СЛОЕ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

#### **3.1. Общие замечания по методике экспериментального исследования процессов. Цели экспериментальных исследований**

Так как математические модели процессов движения частиц при фракционировании и перемешивании в виброожигенном слое строятся на основе классического уравнения конвективной диффузии, приведенного в главе 1, которое базируется на вероятностном подходе для описания стохастических процессов миграции частиц, то одна из лабораторных установок была разработана таким образом, что исследование закономерностей миграции частиц проходило при одинаковых условиях как для процесса грохочения, так и для процесса перемешивания. Установка представляла собой рабочий орган, где слой из частиц различной крупности подвергался вибровоздействию. Для упрощения исследования физической картины процессов фракционирования и перемешивания опыты проводились на двухкомпонентной смеси. Для удобства и наглядности исследования процесс миграции частиц по виброожигенному слою осуществлялся в плоскости экрана, состоящего из прозрачных пластин, расстояние между которыми равнялось толщине одной частицы. Таким образом, получалась плоская картина перемещения частиц при их перемешивании и фракционировании.

В математической модели, изложенной в главе 2, введено понятие «вектор состояния». Эволюцию вектора состояния определяет выражение (2.1), которое описывает распределение мелких частиц в ячейках слоя. Определяя изменение величин относительного содержания мелких частиц в каждой ячейке в различные моменты времени можно описать состояние слоя сыпучего материала на просеивающей поверхности грохота. Таким образом, вектор состояния моделирует объект исследования – слой сыпучего материала. Лабораторная

установка позволяла отслеживать изменение концентрации частиц по слою и исследовать изменение состояние частиц в ячейках слоя.

Матрица переходных вероятностей (2.2) определяет закономерности движения частиц по слою и изменения их относительной концентрации в ячейках слоя, таким образом, моделирует вибровоздействие сита на слой сыпучего материала с помощью стохастических коэффициентов. То есть матрица переходных вероятностей моделирует вибрационный грохот или аппарат для перемешивания частиц без дополнительных внутренних устройств [121].

Если содержание мелких частиц в исходной смеси велико, то, как при процессе фракционирования, так и при процессе перемешивания происходит уменьшение скорости сегрегации при перемещении мелких частиц к нижней границе слоя. Это обусловлено тем, что мелкие частицы, находящиеся в поле силы тяжести, подвергаются случайным соударениям с крупными частицами сыпучей среды. Это определяет осредненное перемещение мелких частиц вниз. Через некоторое время происходит их скопление в нижних областях слоя сыпучего материала. Сегрегация мелких частиц в среде, где они находятся в избытке, замедляется.

При исследовании закономерностей процесса грохочения такое же принципиальное значение, как и при перемешивании двухкомпонентной смеси частиц, имеет характер движения мелких частиц внутри слоя. Естественно, что меняющаяся скорость сегрегации при избыточном содержании мелочи в исходной смеси отразится на эволюции распределения частиц по слою сыпучего материала.

Для проверки адекватности описания миграции частиц в виброожиженном слое с помощью нелинейной модели была создана установка, позволяющая отслеживать миграцию частиц двухкомпонентной смеси в виброожиженном слое (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1. Установка для плоской модели миграции частиц в виброоживленном слое (процесс перемешивания)

Рабочим органом установки (рисунок 3.1) является плоский экран из прозрачных пластин, внутри которого помещались металлические шайбы размерами 5 и 11 мм, которые могли перемещаться друг относительно друга в пространстве между пластинами. Экран являлся разъемным, что давало возможность создать любое начальное распределение мелких частиц в среде крупных. На рисунке 3.1. представлено начальное распределение частиц для их последующего периодического перемешивания. Мелкие частицы светлого цвета сосредоточены на верху слоя, который в дальнейшем был подвергнут вибровоздействию. Мелкие частицы перемещались в среде крупных темного цвета, перемешиваясь с ними.

Рабочий орган совершал круговые колебания под действием кинематического вибропривода, который представлял собой эксцентриковый вал, соединенный с электродвигателем. Его схема показана на рисунке. 3.2.

Проводилась киносъемка процесса, как перемешивания, так и фракционирования, из которой с помощью компьютера были получены фотографии распределения частиц по слою в различные моменты времени.

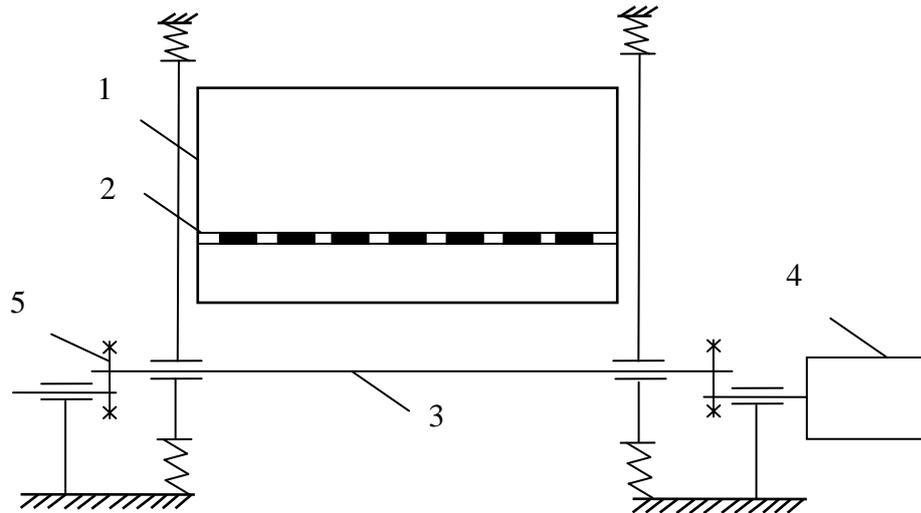


Рисунок 3.2. Схема установки для периодического грохочения и перемешивания бинарной смеси: 1 – прозрачный экран, 2 – сменное сито, 3 – эксцентриквал, 4 – электродвигатель с регулируемым числом оборотов, 5 – винты для изменения амплитуды колебаний рабочего органа

Частота колебаний рабочего органа 1 регулируется числом оборотов двигателя 4, амплитуда – винтами 5. Частота колебаний измерялись прибором ВИБРОТЕСТ - МГ4, который состоит из первичного преобразователя инерционного типа и электронного блока. Общий вид прибора представлен на рисунке 3.3.

Вибропреобразователь использует прямой пьезоэлектрический эффект: электрический заряд чувствительного элемента пропорционален ускорению, действующему на преобразователь. Вибропреобразователь закреплялся на рабочем органе установки магнитным креплением. Сигнал с вибропреобразователя поступал на электронный блок, где происходила обработка результатов измерений и его индикация на цифровом дисплее.

Амплитуда колебаний рабочего органа 1 равна эксцентриситету вала 3.



Рисунок 3.3. Вид прибора ВИБРОТЕСТ - МГ4

Сменное сито 2 устанавливалось в том случае, если проводились опыты по периодическому грохочению бинарной смеси.

Целями экспериментальных исследований являлось:

1) создание методики определения стохастических коэффициентов процесса миграции частиц по виброожиженному слою: скорости сегрегации, коэффициента макродиффузии и скорости проникновения мелких частиц через отверстия сита, если проводились опыты по фракционированию сыпучей смеси;

2) доказательство адекватности предлагаемой нелинейной модели, описывающей миграцию частиц рассматриваемой фракции по слою бинарной смеси при периодическом режиме работы установки изучаемым процессам по локальным параметрам (эволюции состояния частиц мелкой фракции в слое для процессов фракционирования и перемешивания) и интегральным характеристикам процесса фракционирования (кинетика грохочения);

3) сравнение значений стохастических коэффициентов для описания процессов фракционирования и перемешивания, если эти процессы проводились с одним и тем же материалом при одинаковых параметрах вибровоздействия рабочего органа на слой сыпучей смеси.

### 3.2. Исследование миграции частиц по виброожигенному слою при их перемешивании

Для исключения влияния механизма проникновения мелких частиц через отверстия сита на процессах миграции нижняя граница слоя на лабораторной установке была закрыта. Таким образом, реализовывался процесс перемешивания смеси частиц. Этот процесс моделируется рекуррентным матричным равенством (2.1), приведенном в главе 2 и матрицей переходных вероятностей (2.6), особенностью которой является то, что скорость сегрегации не считается постоянной, а меняется от ячейки к ячейке и от перехода к переходу. Процессу перемешивания соответствует закрытый вид матрицы (2.6) [121].

В таблице 3.1 и на рисунке 3.4 приведены расчетные и опытные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя. Размер мелких частиц – 5 мм, крупных – 11 мм. Полное время процесса – 60 секунд. Амплитуда колебаний – 10 мм, частота – 15 Гц. Количество опытов, проводимых при одинаковых условиях - 4. Велась непрерывная съемка процесса перемешивания. При компьютерной обработке материалов съемки были выделены контрольные моменты времени фиксации процесса – 10, 20, 30, 40 секунд. Средняя высота слоя при выключенном режиме вибрации составила 55 мм. Число ячеек в слое равнялось  $m = 4$ . Число временных переходов – 300 ( $\Delta t = 0,2$  с). Время одного перехода выбрано из результатов численных экспериментов с моделью процесса. Естественно, что, чем меньше интервал времени  $\Delta t$ , тем точнее результаты вычислений, но как показывает практика вычислений, дальнейшее уменьшение  $\Delta t$ , не оказывает значительного влияния на результаты вычислений.

Опыты проводились при концентрации мелких частиц в сыпучей смеси равной 50%. В начальный момент времени мелкие частицы располагались в двух верхних ячейках слоя. Хотя начальная концентрация мелких частиц в сыпучей смеси, которая используется в опытах, меньше, чем концентрация мелочи в реальной песчано-гравийной смеси, тем не менее, количество мелких частиц в

опытах больше, чем число этих же частиц, которые могут поместиться в ячейке.

Таблица 3.1. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя при перемешивании частиц бинарной смеси

Время перемешивания	t <sub>1</sub> = 10 с		t <sub>2</sub> = 20 с		t <sub>3</sub> = 30 с		t <sub>4</sub> = 40 с		
	№ слоя	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
1		0,477	0,557	0,325	0,213	0,175	0,1	0,025	0,063
		0,541		0,2		0,125		0,063	
		0,475		0,225		0,15		0,088	
		0,575		0,275		0,1		0,125	
2		0,557	0,636	0,477	0,411	0,331	0,225	0,093	0,186
		0,689		0,398		0,345		0,292	
		0,636		0,305		0,318		0,199	
		0,716		0,345		0,133		0,159	
3		0,437	0,49	0,583	0,53	0,477	0,596	0,583	0,623
		0,464		0,557		0,61		0,636	
		0,384		0,49		0,557		0,689	
		0,49		0,61		0,583		0,557	
4		0,398	0,398	0,875	0,914	1,193	1,166	1,206	1,219
		0,424		0,928		1,06		1,246	
		0,371		0,888		1,14		1,325	
		0,451		0,861		1,166		1,219	

Высота ячейки в слое определялась следующим образом. По фотографии измерялась высота виброожигенного слоя, которая, естественно превышала высоту слоя бинарной смеси при выключенном виброприводе. Эта высота делилась на четыре равные по высоте ячейки. В дальнейшем в расчеты вводилась высота виброожигенного слоя. Общее количество частиц в слое составляло: крупных – 99, мелких – 475. В фиксированный момент времени определялась относительная концентрация мелких частиц в слое, которая рассчитывалась как отношение количества мелких частиц в каждом слое к их общему числу.

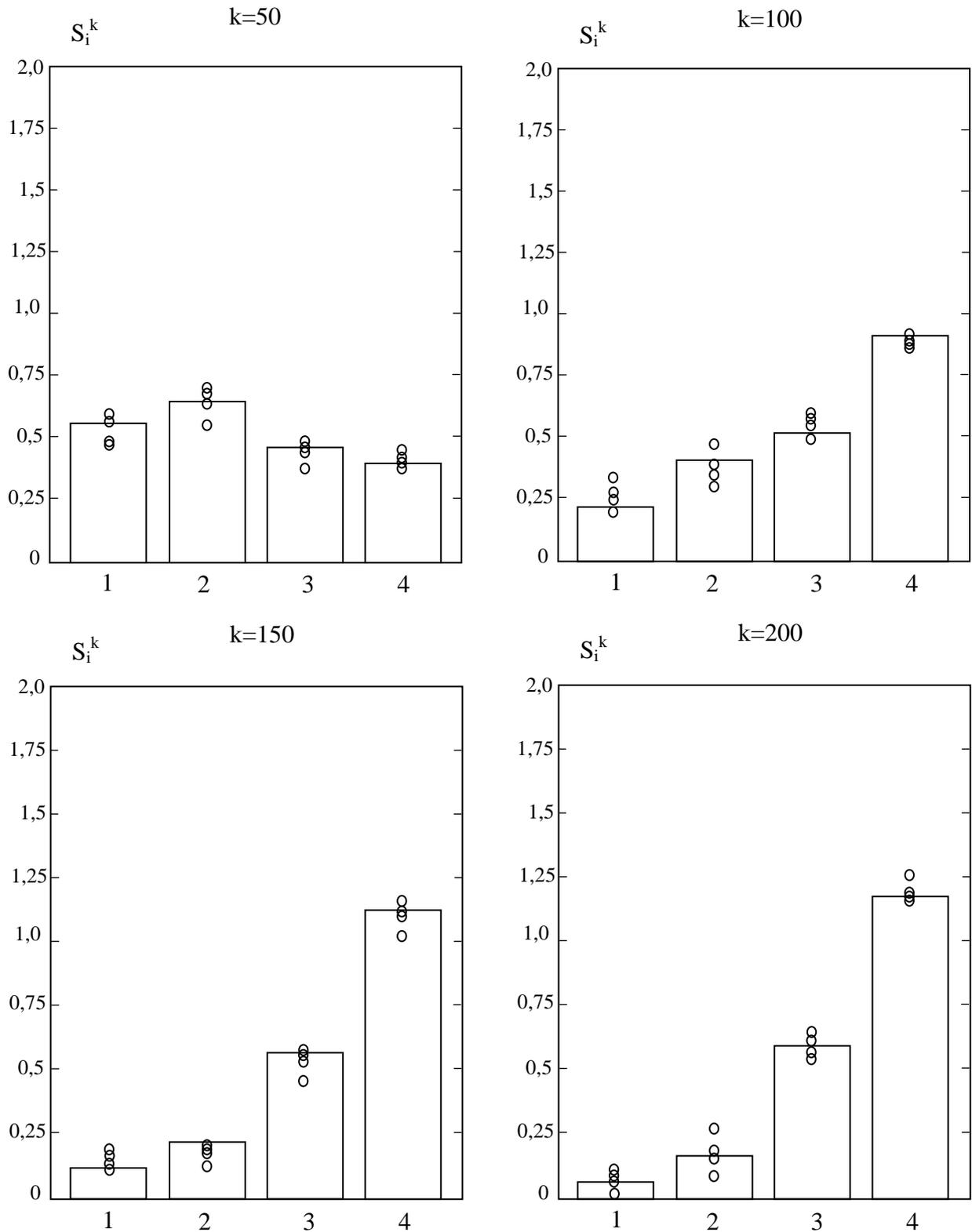


Рисунок 3. 4. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя

На рисунке 3.5. представлены результаты фотосъемки одного опыта из серии экспериментов по перемешиванию бинарной смеси, каждый из которых проводился при одинаковых параметрах вибровоздействия рабочего органа на слой материала.

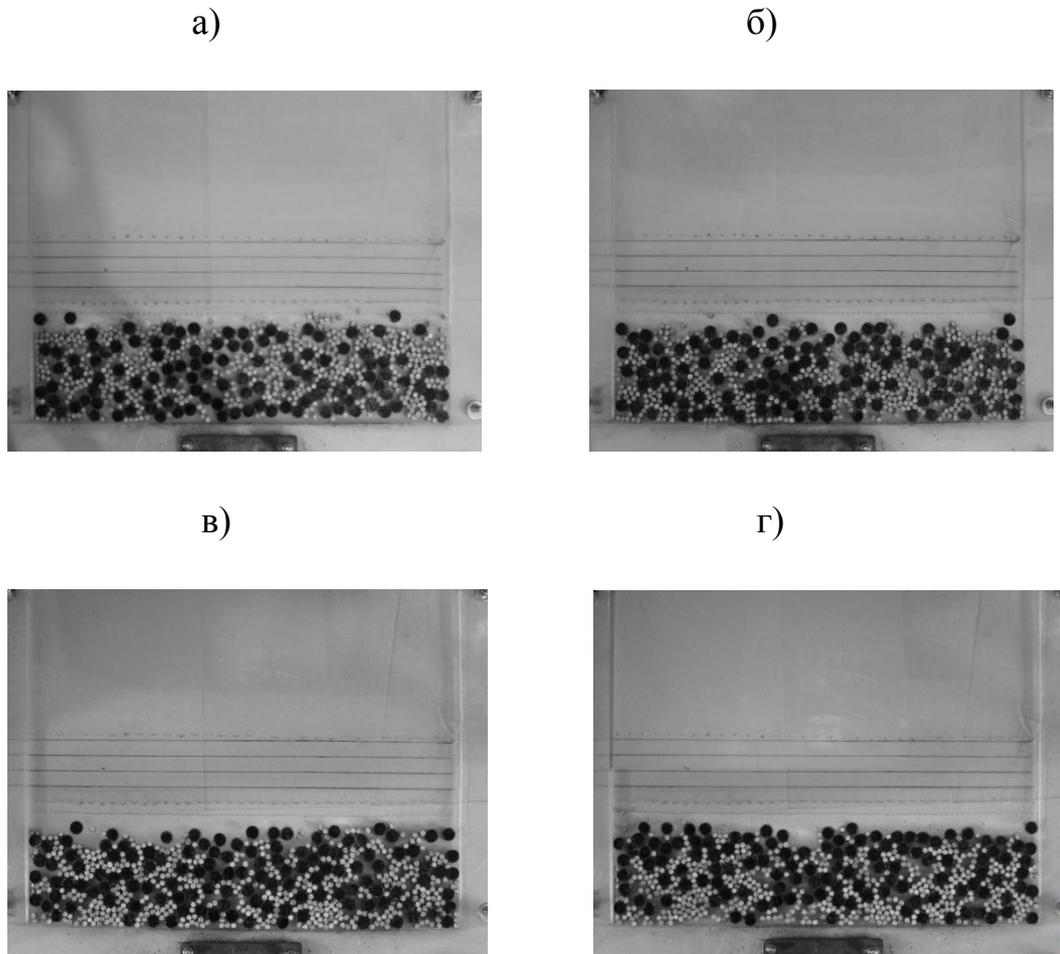


Рисунок 3.5. Результаты фотосъемки процесса перемешивания бинарной смеси частиц в различные моменты времени: а, б, в, г – время процесса – 10, 20, 30, 40 секунд

Из рисунка 3.4 видно, что расчетные и опытные распределения мелких частиц в ячейках слоя, особенно при их малой концентрации в одной ячейке в некоторые моменты времени существенно отличаются, но среднее отклонение по всем опытам составляет менее 10%, что свидетельствует об удовлетворительном совпадении расчетных и опытных данных, так как сравниваются локальные характеристики процесса. Это подтверждает правомерность применения

предлагаемой нелинейной ячеечной модели к описанию процесса движения мелких частиц по виброожигенному слою.

Очевидно, что модель с постоянной скоростью сегрегации не может описать процесс миграции смеси частиц с высоким содержанием мелочи. Нелинейная модель обеспечивает адекватное описание этого процесса. Последнее позволяет положить эту модель в основу инженерного метода расчета процесса грохочения.

Методика определения стохастических параметров математической модели (коэффициентов макродиффузии и сегрегации) для процесса перемешивания заключалась в идентификации эволюции состояния частиц мелкой фракции в слое, полученной экспериментальным и расчетным путем.

Для описания результатов экспериментальных исследований использовались следующие уравнения модели. Серии опытов по перемешиванию мелких частиц с крупными в слое, когда в начальный момент времени они были сосредоточены в двух верхних ячейках, соответствует начальный вектор-столбец состояния слоя ячеечной модели:

$$\mathbf{S}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Матрица переходных вероятностей, соответствующая процессу перемешивания примет вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & d & 0 & 0 \\ v_1 + d & p_{s2} & d & 0 \\ 0 & v_2 + d & p_{s3} & d \\ 0 & 0 & v_3 + d & p_{s4} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

В каждый момент времени распределение содержания мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом  $\mathbf{S}^k$ . Эволюция этого вектора с течением времени описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}^k, \quad (3.3)$$

Для определения стохастических коэффициентов процесса проводилась идентификация расчетных и опытных значений концентраций мелких частиц в соответствующих ячейках слоя по методу наименьших квадратов с использованием стандартной программы для ЭВМ в среде MATLAB. Безразмерная скорость сегрегации и безразмерный коэффициент диффузии определялись из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений относительной концентрации мелких частиц, находящихся в ячейках слоя в различные моменты времени.

В результате сравнения расчетных и осредненных опытных данных эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя позволила определить стохастические коэффициенты модели:  $v_0=0,026$ ,  $d=0,005$ .

### **3.3. Исследование миграции частиц по виброожигенному слою при виброгрохочении**

На этой же установке были проведены опыты по извлечению мелких частиц из бинарной сыпучей смеси. Для этого было смонтировано сито между прозрачными пластинами и создано подситовое пространство (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6. Установка для исследования миграции частиц в виброожигенном слое (процесс грохочения)

На рисунке 3.7 представлены результаты кинетики серии опытов по грохочению бинарной смеси, каждый из которых проводился при одинаковых параметрах вибровоздействия рабочего органа на слой материала: частота колебаний рабочего органа – 15 Гц, амплитуде колебаний - 10 мм. Слой в начальный момент времени при выключенной установке, так же как и в опытах по перемешиванию частиц, составлял 55 мм. Начальная концентрация мелких частиц в смеси составляла 50%. Количество опытов, проводимых при одинаковых условиях, было равно 4. Число ячеек принималось  $m=4$ . Общее количество частиц в слое составляло: крупных – 99, мелких – 475. В начальный момент времени мелкие частицы были сосредоточены в двух верхних ячейках. Число временных переходов – 300 ( $\Delta t=0,2$  с). Размер отверстия сита составлял 8 мм.

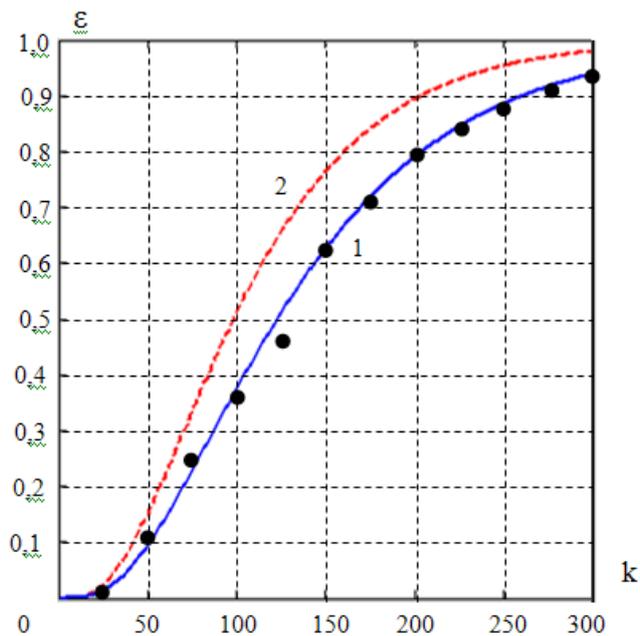


Рисунок 3.7. Кинетика грохочения проходových частиц: 1- кривая извлечения, рассчитанная по нелинейной модели и опытные данные; 2 – кривая извлечения, рассчитанная по линейной модели

Сравнение расчетной и экспериментальной кинетик грохочения позволили определить безразмерные стохастические параметры модели (коэффициент диффузии, начальная скорость сегрегации, начальная скорость проникновения частиц через отверстия сита). Они составили  $v_0=0,026$ ,  $d=0,005$ ,  $v_{f0} = 0,21$ . Для

определения коэффициентов использовался метод наименьших квадратов. Экспериментальные данные для описания кинетики грохочения получены как среднее значение степени извлечения мелких частиц из исходной смеси в серии из четырех опытов, проводимых при одинаковых условиях.

Из рисунке 3.7 (кривая 2) видно, что линейная модель дает завышенные результаты степени извлечения мелких фракций. Таким образом, при высокой степени извлечения 70-85% учет изменения высоты слоя позволяет повысить точность определения стохастических коэффициентов из кинетики грохочения.

Результаты расчетов проверялись идентификацией экспериментального и расчетного распределения частиц мелкой фракции по виброожиженному слою. В таблице 3.2 и на рисунке 3.8 представлены опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и относительное количество их извлечения в подситовое пространство. На рисунке 3.8 расчетные значения извлечения мелкой фракции в различные моменты времени выделены серым цветом. Их расхождение с экспериментальными значениями составило 0,9%. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по распределению относительной концентрации мелких частиц по ячейкам слоя более существенно, особенно для ячеек, у которых большинство мелких частиц перешло в нижние ячейки слоя, а далее в подситовое пространство. При количестве переходов  $k = 200$ , что соответствует времени грохочения 40 секунд, слой уменьшается на одну ячейку. Результаты расчетов также подтверждают уменьшение высоты слоя на одну ячейку при  $k = 200$ . При обработке экспериментальных данных оказалось, что среднее значение расхождений опытных и расчетных концентраций мелких частиц по всем ячейкам слоя в рассмотренные моменты времени составило 12,2%, что практически совпадает с результатами обработки опытов эволюции распределения мелких частиц по слою при их перемешивании с крупными частицами.

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных кинетик грохочения и распределений относительной концентрации мелких частиц по

высоте слоя при их фракционировании свидетельствует о том, что предложенная нелинейная модель грохочения сыпучих смесей адекватно описывает как извлечение мелких частиц из исходной смеси. Это касается как кинетики грохочения, так и распределения частиц по высоте слоя в различные моменты времени (эволюции состояния ячеек цепи).

Таблица 3.2. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания частиц мелкой фракции по высоте слоя и их относительное количество в подситовом пространстве

Время грохочения	t <sub>1</sub> = 10 с		t <sub>2</sub> = 20 с		t <sub>3</sub> = 30 с		t <sub>4</sub> = 40 с		
	№ слоя	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
1		0,585	0,624	0,312	0,364	0,169	0,182	0	0
		0,702		0,364		0,117		0	
		0,65		0,455		0,195		0	
		0,624		0,39		0,221		0	
2		0,754	0,689	0,52	0,468	0,351	0,351	0,208	0,156
		0,65		0,455		0,312		0,182	
		0,676		0,403		0,39		0,117	
		0,585		0,429		0,377		0,156	
3		0,455	0,481	0,312	0,442	0,273	0,325	0,325	0,234
		0,481		0,468		0,286		0,156	
		0,416		0,403		0,416		0,221	
		0,52		0,364		0,364		0,247	
4		0,143	0,108	0,026	0,104	0,156	0,078	0,026	0,039
		0,273		0,104		0,104		0,052	
		0,182		0,156		0,026		0,078	
		0,091		0,13		0,065		0,117	
Подситовое пространство		0,246	0,234	0,767	0,78	1,287	1,287	1,564	1,56
		0,234		0,79		1,326		1,554	
		0,246		0,793		1,3		1,562	
		0,234		0,78		1,261		1,548	

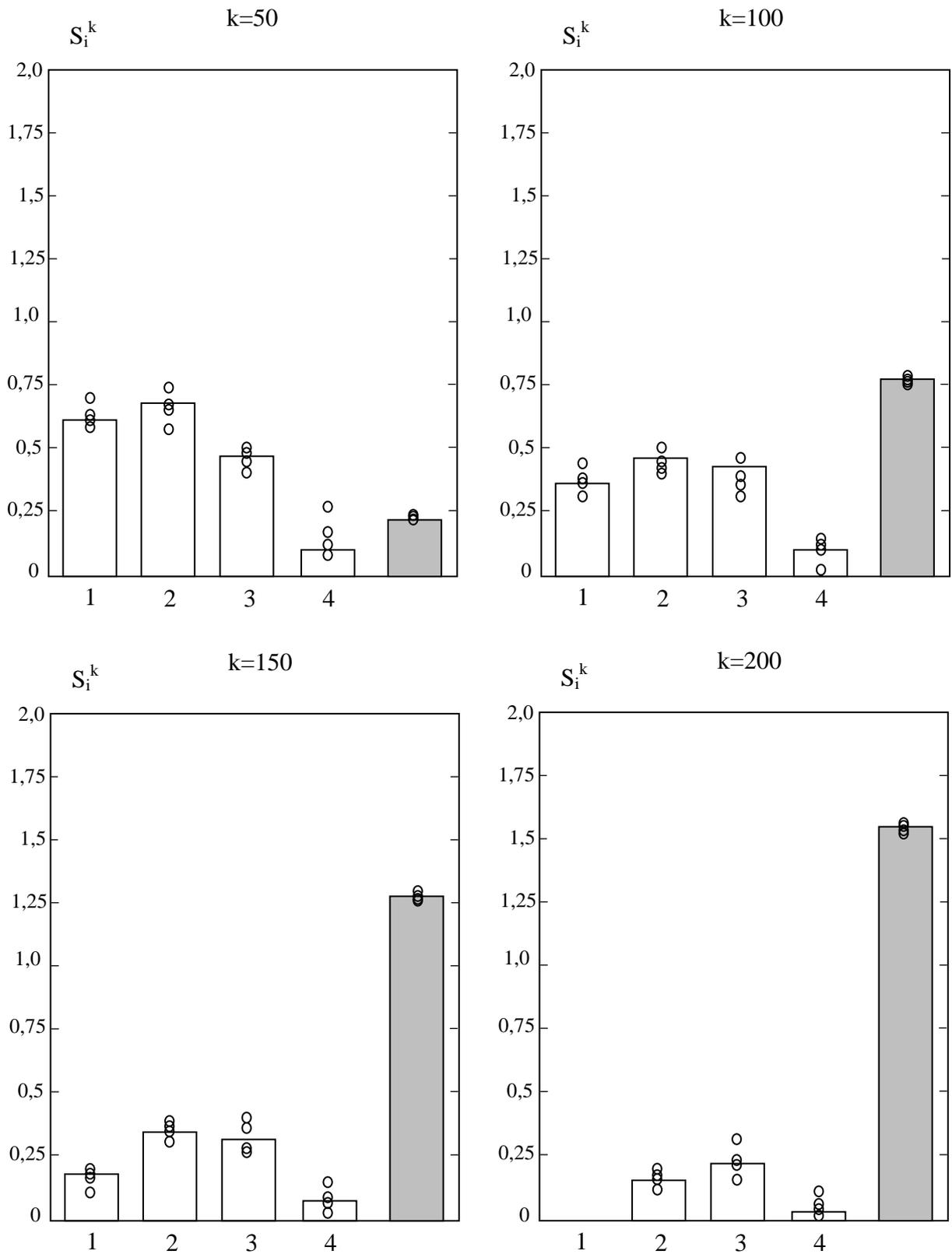
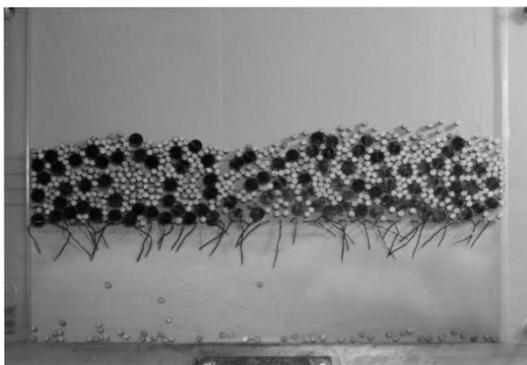
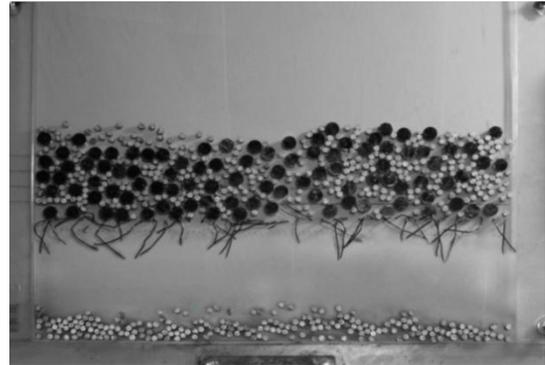


Рисунок 3. 8. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и их относительное количество в подситовом пространстве

На рисунке 3.9 представлены результаты распределения мелких частиц по слою и их перехода в подситовое пространство одного из серии опытов по извлечению мелких частиц из исходной сыпучей смеси. Пространство над ситом было разделено на четыре ячейки одинаковой высоты. Производился подсчет количества частиц в ячейках слоя и в подситовом пространстве, как в данном опыте, так и в других опытах, проводимых в одинаковых условиях.



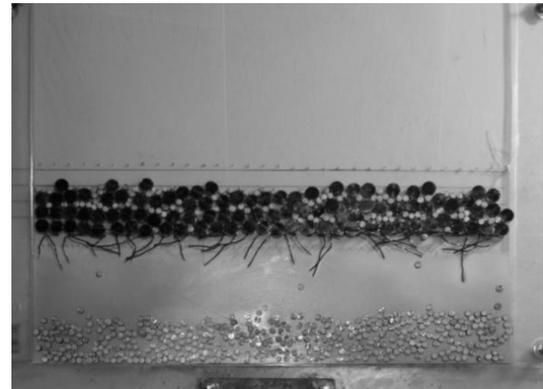
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9. Результаты фотосъемки процесса фракционирования бинарной смеси частиц в различные моменты времени: а, б, в, г – время процесса – 10, 20, 30, 40 секунд

Для удобства подсчета мелкие частицы выделены белым цветом. Рассчитывались средние значения результатов серии из четырех опытов. Проводилась идентификация экспериментальных данных с расчетными

параметрами модели для определения стохастических коэффициентов процесса.

Для математического описания серии опытов по фракционированию мелких частиц из двухкомпонентной смеси использовались уравнения модели, учитывающие особенности опытов. В начальный момент времени мелкие частицы были сосредоточены в двух верхних ячейках. Такому распределению соответствует вектор-столбец состояния слоя ячеечной модели:

$$\mathbf{s}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Матрица переходных вероятностей, соответствующая процессу фракционирования имела вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & d & 0 & 0 \\ v_1 + d & p_{s2} & d & 0 \\ 0 & v_2 + d & p_{s3} & d \\ 0 & 0 & v_3 + d & p_{s4} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Выход мелкой фракции в подрешетный продукт описывался за пределами матрицы  $\mathbf{P}$  аналогично описанию матрицы переходных вероятностей, представленной в главе 2. На каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния  $\mathbf{S}^k$  матрицей  $\mathbf{P}$  из нижней ячейки цепи выводилась доля  $v_f^k$  содержащейся в ней мелкой фракции, то есть ее выход составлял

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (3.6)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равнялась

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f^k), \quad (3.7)$$

где  $:=$  - оператор присваивания.

Полный выход мелкой фракции за  $(k+1)$  переход рассчитывался по формуле

$$Q^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}, \quad (3.8)$$

а его относительное значение по отношению к первоначальному содержанию этой фракции, являющееся искомой степенью извлечения  $\varepsilon$ , вычислялся как

$$\varepsilon^{k+1} = \frac{Q^{k+1}}{Q_0}, \quad (3.9)$$

где  $Q_0$  – относительное содержание мелкой фракции в исходном сырье.

Обработка экспериментальных данных с помощью модели показала, что значения безразмерных стохастических коэффициентов (коэффициент диффузии, начальная скорость сегрегации, начальная скорость проникновения частиц через отверстия сита) для процессов перемешивания и фракционирования одной и той же сыпучей смеси практически совпадают. При этом параметры вибровоздействия на слой (амплитуда и частота колебаний рабочего органа установки), начальная высота слоя, начальное распределение мелких частиц, а так же их относительная начальная концентрация выбирались одинаковой для серий опытов процессов перемешивания и фракционирования.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что стохастические параметры модели, определенные из экспериментальной кинетики грохочения сыпучей смеси можно использовать как для расчета распределения мелких частиц по высоте слоя в различные моменты времени при грохочении, так и для их распределения по высоте слоя при их перемешивании с крупными частицами, если перемешивание осуществляется при тех же условиях, что и фракционирование сыпучей смеси, с той лишь разницей, что нижняя граница слоя закрыта.

#### **3.4. Исследование кинетики фракционирования бинарной сыпучей смеси на лабораторной установке периодического действия**

Экспериментальное исследование процессов фракционирования и перемешивания двухкомпонентной смеси, когда частицы перемещались в плоскости между прозрачными пластинами рабочего органа лабораторной

установки, показали, что кинетика грохочения может служить исходным материалом для расчета стохастических коэффициентов модели этих процессов. Для доказательства возможности использования результатов тестовых опытов периодического грохочения различных сыпучих материалов для расчета реальных процессов непрерывного промышленного грохочения была разработана и создана лабораторная установка, вид которой представлен на рисунке 3.10, а принципиальная схема на рисунке 3.11.

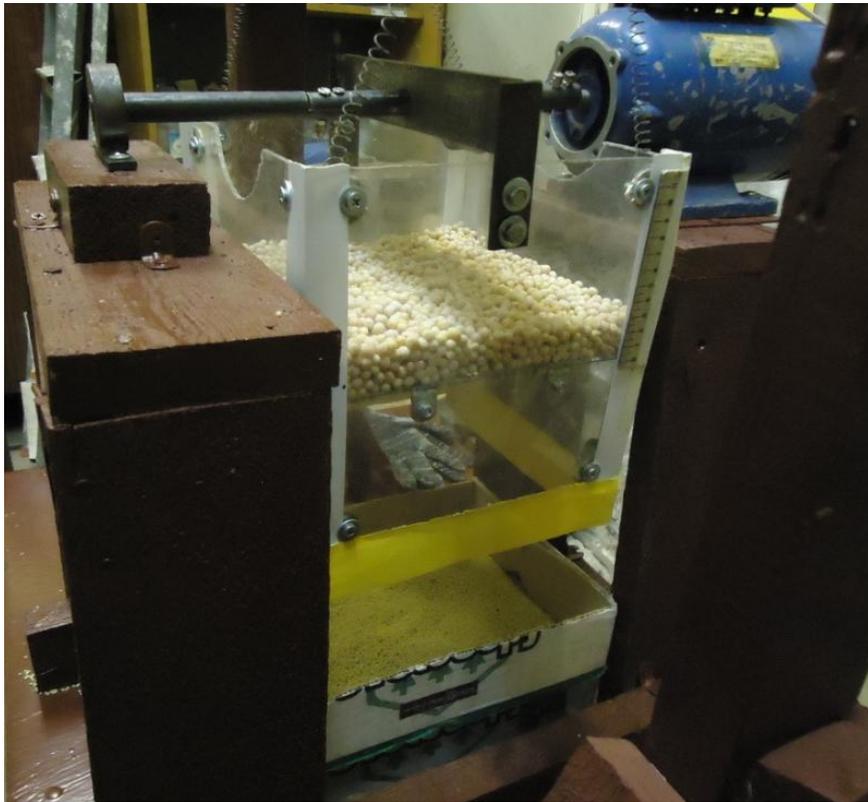


Рисунок 3.10. Лабораторная установка для периодического грохочения реальных сыпучих материалов

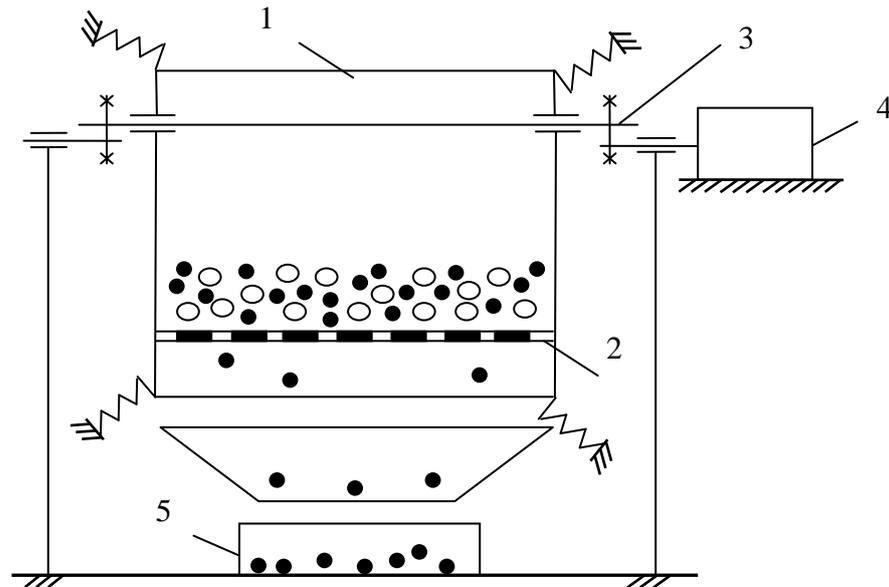


Рисунок 3.11. Схема установки для периодического грохочения реальных сыпучих материалов: 1 – короб, 2 – сменное сито, 3 – эксцентриковый вал с винтами для изменения амплитуды колебаний рабочего органа, 4 – электродвигатель с регулируемым числом оборотов, 5 – кювета для сбора подситового продукта

Задачами данных экспериментальных исследований являлись:

1. Исследование процесса периодического грохочения реальных сыпучих материалов.
2. Доказательство работоспособности модели и методики определения стохастических коэффициентов из тестовых опытов по периодическому грохочению сыпучих материалов не только на имитационной плоской установке, но и на объемной установке.
3. Отработка методики определения стохастических параметров модели для расчета процессов грохочения на промышленных аппаратах.

В качестве исходного материала использовалась двухкомпонентная смесь, состоящая из зерен гороха и пшена. На рисунке 3.12 показана фотография исходных компонентов.

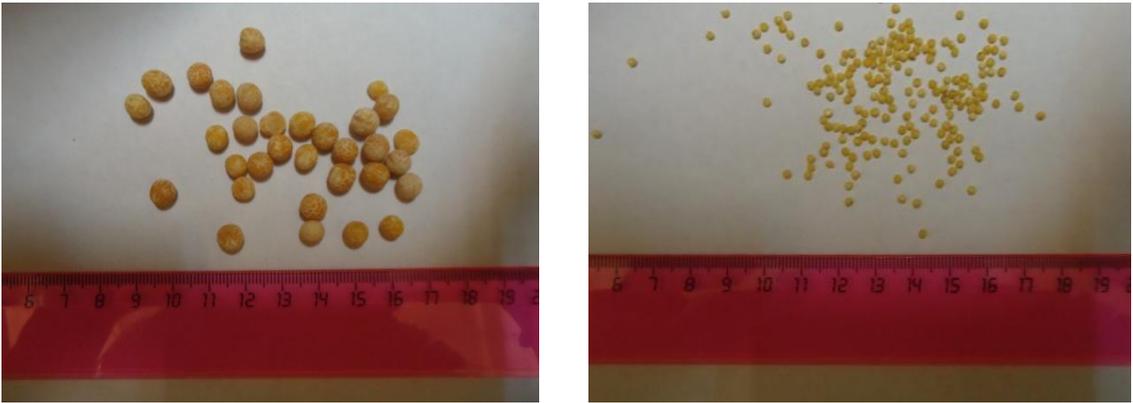


Рисунок 3.12. Исходные материалы для приготовления двухкомпонентной смеси.

На рисунке 3.13. показано положение сыпучей смеси на сите установки в начальный момент времени.



Рисунок 3.13. Начальное положение сыпучей смеси на сите установки

Опыты проводились при различном начальном распределении мелких частиц по высоте слоя. Компоненты смеси распределялись слоями по высоте или мелкие частицы равномерно перемешивались в среде крупных. Предлагаемая математическая модель процесса позволяет учитывать различные варианты распределения мелких частиц по высоте слоя. Менялись условия проведения опыта: начальная концентрация мелких частиц в исходной смеси, высота слоя

материала, размещенного в начальный момент времени на просеивающей поверхности лабораторной установки.

На рисунке 3.14 показана кинетика грохочения двухкомпонентной сыпучей смеси.

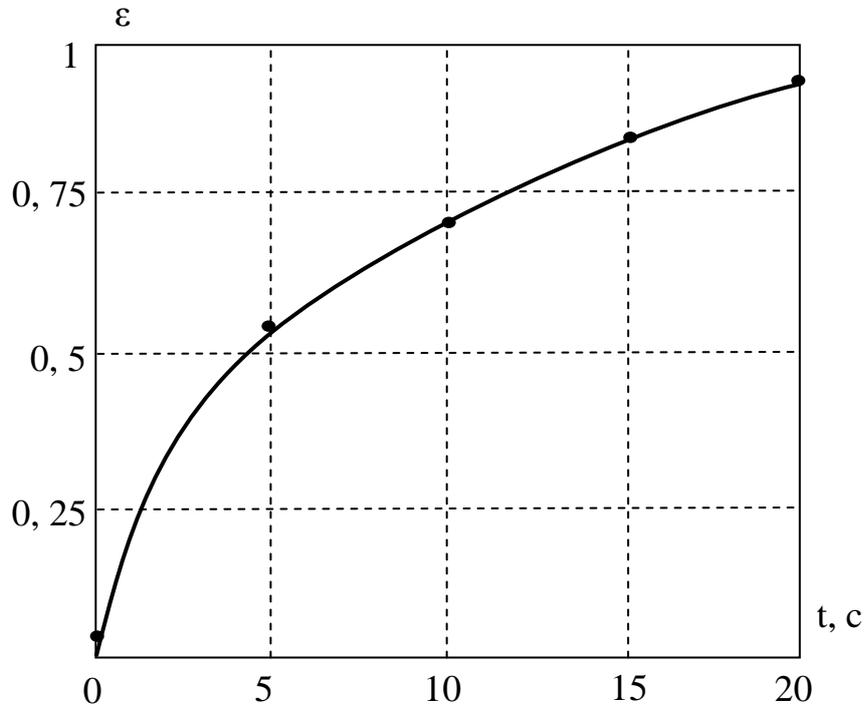


Рисунок 3.14. Кинетика грохочения двухкомпонентной смеси

Опыты проводились при следующих условиях. Начальная концентрация мелких частиц в смеси - 50 %, начальная высота слоя - 55 мм, амплитуда колебаний рабочего органа лабораторной установки – 8мм, частота – 16 Гц, начальное распределение мелких частиц по слою – равномерное.

Идентификация расчетных и опытных данных по извлечению мелких фракций из исходной смеси в различные моменты времени позволила определить следующие стохастические коэффициенты модели:  $v_0=0,092$ ,  $d=0,018$ ,  $v_{f0} = 0,17$ . Расчет проводился при следующих условиях: количество ячеек в слое  $m=8$ , время одного перехода  $\Delta t = 0,2$  с.

Определялась зависимость эффективности фракционирования от начальной концентрации мелких фракций в исходной смеси. Опыты проводились следующим образом. Подготавливалась двухкомпонентная смесь, состоящая из

зерен гороха и пшена. Начальная концентрация зерен пшена в исходной смеси менялась от 20 до 80%. Для равномерного распределения мелких частиц по высоте слоя сыпучего материала смесь тщательно перемешивалась. Определялась масса материала при разной исходной концентрации мелких зерен в смеси, которая помещалась на сито установки, при этом начальная высота слоя во всех опытах составляла 50 мм. Включался вибропривод лабораторной установки, начинался процесс грохочения. Частицы проходовой фракции собирались в кюветы, которые менялись через каждые 5 секунд. Каждый опыт длился не более 30 секунд. Этого времени было достаточно для полного извлечения зерен пшена из смеси. Производилось взвешивание пшена в каждой кювете. Результаты эксперимента занесены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3. Результаты экспериментов по грохочению двухкомпонентной смеси по определению влияния начальной концентрации мелких частиц на степень их извлечения

Начальное отношение мелких частиц к крупным в исходной смеси, %	Общая масса навески, кг	Масса мелких зерен в кювете, кг				
		№ кюветы				
		1	2	3	4	5
20/80	0,63492	0,23182	0,19992	0,08783	0,03968	0,01477
30/70	0,77457	0,35254	0,22739	0,07088	0,02455	0,00915
50/50	1,01989	0,40193	0,4261	0,06241	0,01699	0,00634
70/30	1,33317	0,58667	0,40564	0,0392	0	0
80/20	1,47282	0,95614	0,36472	0	0	0

На рисунке 3.15 показана зависимость извлечения мелких фракций от их начальной концентрации в исходном материале. Эксперименты по периодическому грохочению сыпучего материала проводились в течение 5 и 10 секунд. Опыты проводились при следующих условиях: начальная высота слоя сыпучей смеси на плоскости сита в коробе рабочего органа при выключенном

виброприводе составляла 50 мм, начальное распределение мелких частиц по слою – равномерное. Общая масса материала, загружаемого в рабочий орган установки, определялась в зависимости от начальной концентрации мелких фракций в исходной смеси. Амплитуда колебаний рабочего органа лабораторной установки – 8мм; частота – 16 Гц.

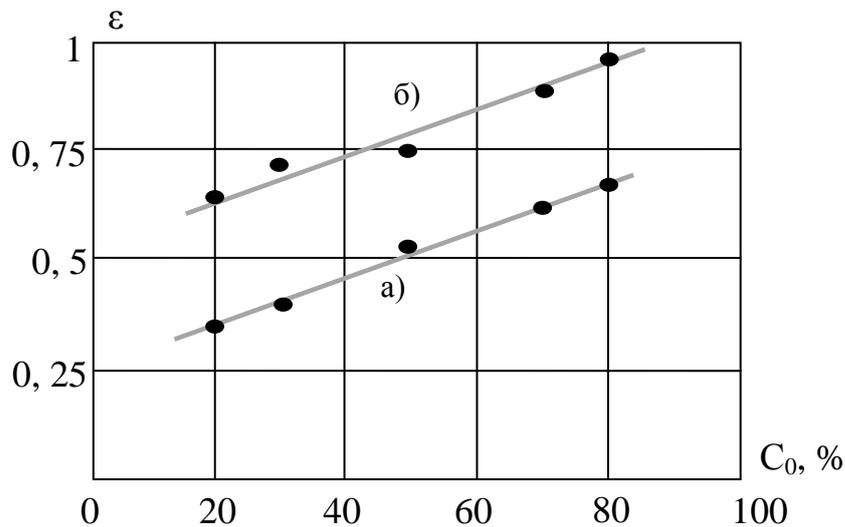


Рисунок 3.15. Зависимость извлечения мелких фракций от их начальной концентрации в исходном материале: (а) - время грохочения 5 секунд, (б) - время грохочения 10 секунд

Результаты исследований показывают практически линейную зависимость степени извлечения частиц проходовой фракции от ее начальной концентрации в исходном сырье.

Исследовалось влияние начальной высоты слоя сыпучего материала на сите короба установки на степень извлечения мелких фракций в фиксированные моменты времени. Опыты проводились при начальной концентрации мелких частиц в исходной смеси равной 80%. Менялась высота слоя материала, расположенного на сите. Включался вибропривод, материал подвергался вибровоздействию, мелкие фракции проваливались через отверстия сита и собирались в кюветы. Проводилось взвешивание массы проходových частиц в

каждой кювете. По окончании эксперимента, который длился не более 25 секунд, определялась масса всей сыпучей смеси. Результаты опытов занесены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. Результаты экспериментов по грохочению двухкомпонентной смеси по определению влияния начальной высоты слоя на степень извлечения проходовой фракции

Начальная высота слоя, см	Общая масса навески, кг	Масса мелких зерен в кювете, кг				
		№ кюветы				
		1	2	3	4	5
4	0,80449	0,61141	0,14181	0,03944	0	0
5	1,55064	1,13197	0,34114	0,04721	0	0
6	1,73908	1,31301	0,33912	0,0501	0,0032	0
7	2,48529	1,70184	0,48404	0,0729	0,0061	0,0022

На рисунке 3.16 показана зависимость извлечения мелких фракций от начальной высоты слоя сыпучего материала.

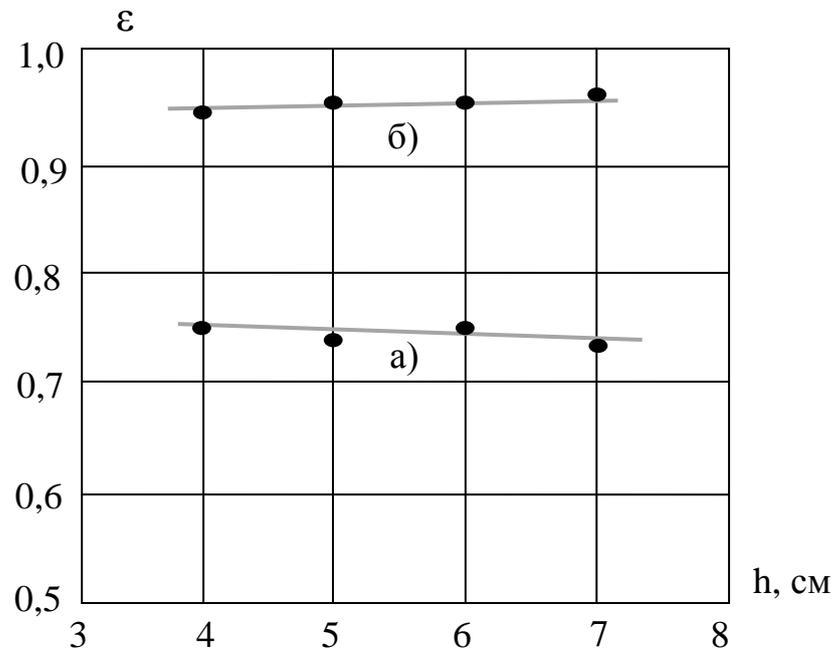


Рисунок 3.16. Зависимость извлечения мелких фракций от их начальной высоты слоя: (а) - время грохочения 5 секунд, (б) - время грохочения 10 секунд

Как видно из графика степень извлечения мелких фракций из исходного материала не зависит от начальной высоты слоя при одном и том же времени фракционирования. Это объясняется тем, что частицы мелких фракций имеют высокую скорость сегрегации, которая способствует быстрому разделению материала на слои с крупными и мелкими частицами. Крупные частицы практически мгновенно «всплывают» на поверхность виброожигенного слоя, не мешая просеиванию мелких частиц через отверстия сита.

Следовательно, тестовые опыты для определения стохастических параметров модели можно проводить в условиях, когда вибровоздействие сита лабораторной установки на сыпучий материал аналогично режиму колебаний промышленного грохота. Так как опыты по периодическому грохочению проводились в небольшом диапазоне изменения начальной высоты, то высота слоя сыпучего материала в лабораторной установке может отличаться от начальной высоты слоя в условиях промышленного грохочения.

### **3.5. Выводы по главе 3**

1. Разработана установка, позволившая реализовать процесс миграции частиц в виброожигенном слое, что дало возможность сравнения общих закономерностей движения частиц при грохочении и перемешивании бинарной смеси.

2. Безразмерные стохастические параметры моделей определялись идентификацией экспериментального и расчетного распределения частиц мелкой фракции по виброожигенному слою. Безразмерная стохастическая скорость проникновения частиц через отверстия сита определялась из кинетики грохочения.

3. Экспериментально доказано, что стохастические коэффициенты: безразмерный коэффициент диффузии и начальная безразмерная скорость сегрегации для процессов грохочения и перемешивания совпадают при одинаковых условиях проведения экспериментов. То есть, состав, количество

материала и начальное распределение частиц исходной сыпучей смеси для сравниваемых опытов не менялись, параметры вибровоздействия рабочего органа на сыпучий слой были одинаковы.

4. Доказана адекватность нелинейных моделей движения ансамбля частиц по виброожиженному слою при повышенном содержании частиц мелкой фракции в исходном сырье сравнением локальных параметров распределения частиц по слою сыпучего материала в различные моменты времени процессов фракционирования и перемешивания и интегральных характеристик кинетики грохочения.

5. Расчетно-экспериментальные исследования на лабораторной установке, воспроизводящей плоское движение частиц в слое, позволили сделать вывод о том, что стохастические коэффициенты для нелинейных моделей можно определять из кинетики грохочения сыпучих смесей на лабораторной установке периодического действия и использовать их для расчета закономерностей миграции частиц в виброожиженном слое для процессов фракционирования и перемешивания.

6. Исследование процесса периодического грохочения реальных сыпучих материалов показало работоспособность модели и методики определения стохастических коэффициентов из тестовых опытов по периодическому грохочению сыпучих материалов не только на имитационной плоской установке, но и на объемной установке.

7. Создана методика определения стохастических коэффициентов для расчета процессов грохочения на промышленных аппаратах непрерывного действия из лабораторных опытов по фракционированию песчано-гравийных смесей, которая используется для определения производительности и эффективности промышленного грохота.

## **ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Предлагаемый метод моделирования и расчетно-экспериментального исследования процесса грохочения сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье были применены для определения технологических параметров фракционирования вибрационных грохотов, работающих в реальных промышленных условиях.

### **4.1. Исследование фракционных составов песчано-гравийных смесей, добываемых в карьере месторождения «Жирославка» предприятия ООО «Хромцовский карьер»**

На ООО «Хромцовский карьер» имеются месторождения песчано-гравийных материалов: Спасский, Каликинский, Новинский, Хромцово-Потеряевский, Каменное болото, Малуевский, Потеряевский северный, Лагерный. В период с 2010 по 2012 год были произведены геологоразведочные работы на перспективном участке Жирославка. Ориентировочно предприятие приступит к разработке месторождения в 2015-2016 году. В таблице 4.1 показаны результаты расчетов запасов гравийно-песчаных смесей и содержание каменного материала на участке Жирославка.

Песчано-гравийная смесь, добываемая в карьерах, доставляется на дробильно-сортировочный завод. Предприятие специализируется на переработке песчано-гравийной смеси и выпуске следующей нерудной продукции: щебень гравийный фракции 5-20 мм, 20-40 мм; гравий фракции 5-20 мм; песок мелкий 1 класса с модулем крупности 1,5-2,0 мм; песок крупный 2 класса с модулем крупности 2,5-3,0 мм. Общий объем поставляемой нерудной продукции предприятием ООО «Хромцовский карьер» составляет 1,5 - 2 миллионов метров кубических в год.

Таблица 4.1 Результаты подсчета запасов гравийно-песчаного материала и содержания каменного материала на участке Жирославка

Категория запасов и номер блока	Средневзвешенное содержание, %				Запасы, тыс. м <sup>3</sup>					
	Камень общий, %	Валунов более 70 мм	Гравия 5-70 мм	Песка отсева менее 5 мм	Общие, тыс. м <sup>3</sup>	ПГС	камень	в том числе:		
						тонн	тонн	Валунов более 70 мм	Гравия 5-70 мм	Песка отсева менее 5 мм
Блок В	33,6	2,1	31,5	66,4	9645,9	17759,6	5967,2	202,6	3038,4	6404,9
Блок С <sub>1-1</sub>	36,2	3,7	32,5	63,8	17688,1	32566,6	11789,1	654,5	5748,6	11285,0
Блок С <sub>1-2</sub>	43,2	3,4	30,8	65,8	18049,8	33232,6	11365,5	613,7	5559,3	11876,8
Блок С <sub>1-3</sub>	28,6	1,5	27,1	71,4	4163,9	7666,4	2192,6	64,5	1128,4	2973
Итого В+ С <sub>1</sub>	0,0						0,0	1535,3	15474,7	32539,7
Блок С <sub>2-1</sub>	32,1	2,9	29,2	67,9	1493,6	2750,0	882,7	43,3	436,1	1014,2
Всего В+ С <sub>1</sub> + С <sub>2</sub>	34,3				51041,3	93975,2	32197,2	1578,6	15910,8	33553,9

Анализ исследований фракционных свойств песчано-гравийных смесей, которые будут добываться в месторождении «Жирославка» ООО «Хромцовский карьер», а так же добываемых в карьерах предприятий нерудной промышленности Ивановской области, показал, что перспективы увеличения запасов строительного камня по геологоразведочным работам на вновь разрабатываемых месторождениях весьма ограничены.

#### **4.2. Выбор классифицирующего оборудования, работающего с гравийно-песчаными смесями с низким содержанием каменного материала на месторождениях ООО «Хромцовский карьер»**

Для сокращения затрат на транспортирование песчано-гравийных смесей от карьера до дробильно-сортировочного завода нами предложено использовать технологическую схему предварительного обогащения для разделения исходного сырья на песок, гравий и валуны вблизи добычного забоя (рисунок 4.1).

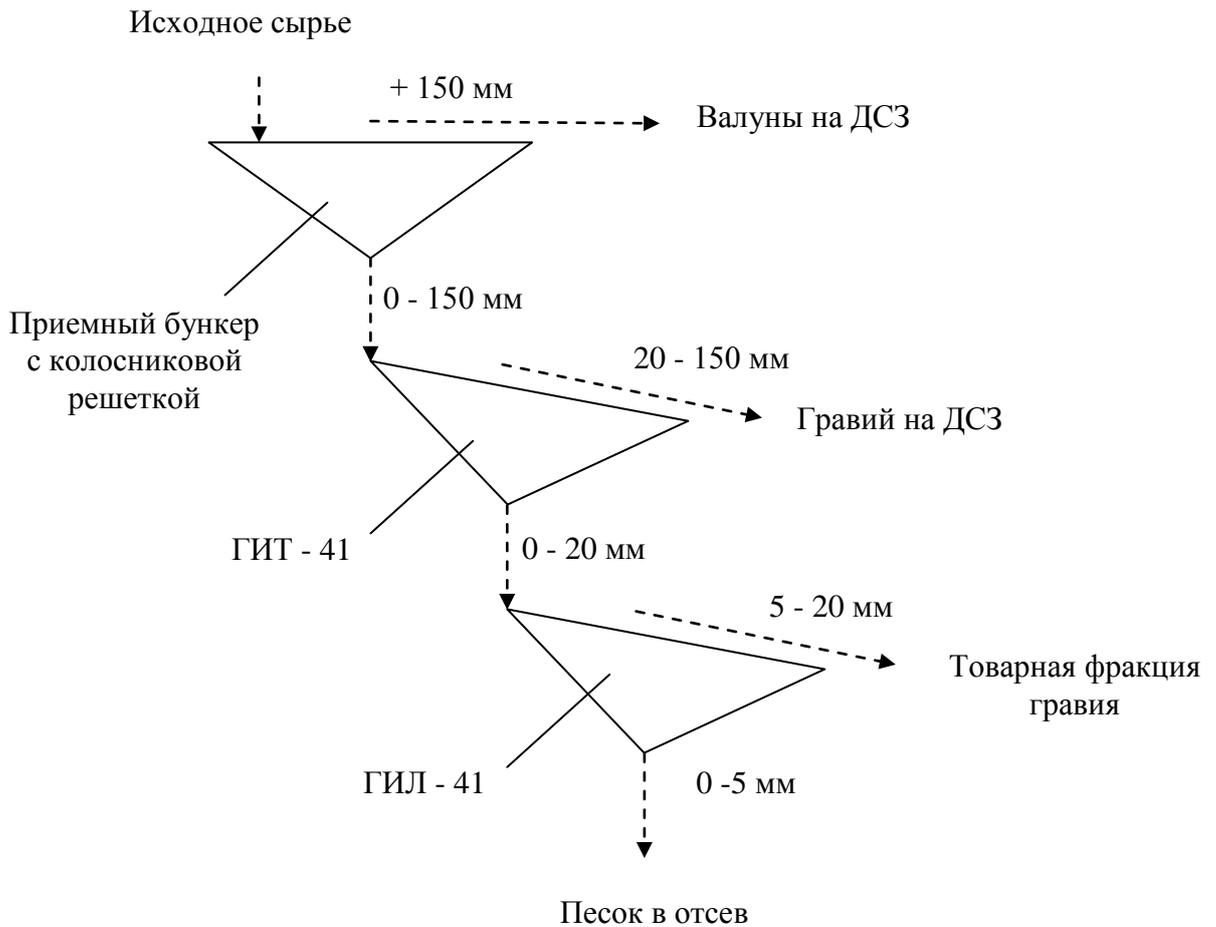


Рисунок 4.1. Предлагаемая технологическая схема предварительного обогащения песчано-гравийной смеси в карьере месторождения «Жирославка» ООО «Хромцовский карьер».

Планируется, что экскаватор ЭКГ-4,6Б производит выемку и погрузку песчано-гравийной смеси в приемный бункер с колосниковой решеткой с размером щели 150 мм. Из сыпучего материала удаляются валуны, размер которых превышает 150 мм. Оставшаяся смесь подается на грохот ГИТ – 41 первой ступени обогащения, технические характеристики которого указаны в таблице 4.4. Планируется, что на грохоте будет установлено сито с размером квадратной ячейки 20x20 мм, на котором происходит разделение сыпучего материала на классы крупности: надрешетный продукт с размерами фракций 20-150 мм и подрешетный продукт с размерами фракций 0-20 мм. Накопление

надрешетного продукта будет происходить непосредственно в карьере, который в дальнейшем отправится на переработку в дробильно-сортировочный завод. Подрешетный продукт подается на грохот ГИЛ-41 второй ступени обогащения, на котором будет установлено сито с размером ячейки 5x5 мм. На грохоте происходит разделение материала на надрешетный продукт с размерами фракций 5-20 мм и подрешетный продукт с размерами фракций 0-5 мм.

В таблице 4.2 указаны технические характеристики выбранных грохотов.

Таблица 4.2. Технические характеристики виброгрохотов

Параметры	ГИТ - 41	ГИЛ - 41
Возможная производительность по питанию, т/ч	До 850	До 150
Крупность разделения, мм	0 - 150	0 - 20
Размеры просеивающей поверхности, мм		
длина	3350	4250
ширина	1500	1500
Угол наклона сита, град	15 - 25	10 - 20
Амплитуда колебаний, мм	3-5	3-3,5
Частота колебаний, Гц	16	16
Мощность привода, кВт	15	11

Для обоснования выбора данного классифицирующего оборудования анализировался ситовой состав сыпучего материала, поступающего в приемный бункер. Отбирались точечные пробы, которые объединялись в пробу массой 10 килограмм. Согласно ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» был проведен ситовой анализ отобранной пробы сыпучего материала в лаборатории ООО «Хромцовский карьер». Полученные данные занесены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Характеристика крупности материала, поступающего на предварительное обогащение.

Полные остатки на ситах, мм	40	20	10	5	2.5	<2,5
Фактически, %	6,9	14,7	23,0	33,6	72,7	100
Фактически, кг	0,69	0,78	0,83	1,06	3,91	2,73

Для определения производительности предложенной технологической схемы и результатов фракционирования исходного сыпучего материала необходимо иметь кинетики грохочения частиц узкого класса крупности на просеивающих поверхностях каждого из предложенных грохотов. По кривым кинетик грохочения, зная время пребывания сыпучего материала на грохоте или скорость его транспортирования по просеивающей поверхности, можно определить эффективность грохочения как отдельных фракций, так и всего проходowego класса в целом, кроме того, определить засоренность товарных фракций, отправляемых на дробильно-сортировочный завод.

Чтобы иметь кривые кинетики грохочения проходových фракций на предложенных грохотах, необходимо знать стохастические параметры ячеечной модели, которые следует вводить в программы расчета технологических показателей грохотов.

Эти параметры определялись из тестовых опытов по периодическому грохочению песчано-гравийной смеси на лабораторной установке. Режим вибровоздействия сита на просеивающий материал, размеры и форма отверстий сита соответствовали условиям промышленного грохочения.

Песчано-гравийная смесь из карьера месторождения «Жирославка», характеристика крупности которой была определена в лаборатории предприятия ООО «Хромцовский карьер» и лаборатории ИВГПУ, подвергалась периодическому грохочению на лабораторной установке, описание которой приведено в главе 3. В коробе установки было закреплено сито, размер

отверстий которого составлял 20x20 мм. Методика эксперимента изложена в главе 3.

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

Таблица 4.4. Извлечение проходовых фракций в различные моменты времени в %

Класс крупности, мм	Время грохочения, с			
	5	10	15	20
0-2,5	81	98	100	100
2,5-5,0	73	94	100	100
5,0-10,0	66	89	100	100
10,0-15,0	48	84	100	100
15,0-20,0	39	79	98	100

По результатам эксперимента определены стохастические коэффициенты отдельных проходовых фракций (таблица 4.5), которые в дальнейшем использовались для расчетов прогнозируемых результатов фракционирования на грохоте ГИТ-41.

Таблица 4.5. Стохастические коэффициенты модели процесса грохочения различных фракций

Класс крупности, мм	Начальная безразмерная скорость сегрегации	Безразмерный коэффициент макродиффузии	Начальная безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия сита
0-2,5	0,087	0,022	0,056
2,5-5,0	0,076	0,019	0,045
5,0-10,0	0,052	0,015	0,026
10,0-15,0	0,023	0,01	0,018
15,0-20,0	0,007	0,005	0,006

В дальнейшем из фракций, которые были отсеяны на сите с размером ячейки 20x20 мм, была приготовлена исходная смесь для грохочения на лабораторной установке с размером отверстий сита 5x5 мм. Все фракции от 0 до 20 мм тщательно перемешивались. Таким образом, на сито подавалась смесь, в которой проходовые фракции имели равномерное распределение по высоте слоя сыпучего материала.

В таблице 4.6 приведены результаты извлечения проходовых фракций в различные моменты времени.

Таблица 4.6. Извлечение проходовых фракций в различные моменты времени, %

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

По результатам эксперимента определены стохастические коэффициенты отдельных проходовых фракций, которые в дальнейшем использовались для расчетов прогнозируемых результатов фракционирования на грохоте ГИЛ-41 (таблица 4.7).

Таблица 4.7. Стохастические коэффициенты модели процесса грохочения различных фракций

Класс крупности, мм	Начальная безразмерная скорость сегрегации	Безразмерный коэффициент макроdiffузии	Начальная безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия сита
0-1,0	0,253	0,018	0,034
1,0-2,5	0,112	0,011	0,026
2,5-5,0	0,091	0,008	0,019

Результаты расчетно-экспериментальных исследований позволили определить следующие показатели процесса фракционирования на грохотах ГИТ-41 и ГИЛ-41:

- производительность грохота ГИТ-41 – 60 т/час;
- общая эффективность фракционирования проходových фракций – 98,6%;
- засоренность гравия 20-150 мм мелкими частицами – 0,7%;
- амплитуда колебаний грохота – 5 мм;
- частота колебаний грохота – 16 Гц;
- угол наклона сита – 15 град;
- производительность грохота ГИЛ-41 – 51,2 т/час;
- общая эффективность фракционирования проходových фракций – 85,7%;
- засоренность товарного гравия 5-20 мм песком – 2,3%;
- амплитуда колебаний грохота – 3 мм;
- частота колебаний грохота – 16 Гц;
- угол наклона сита – 12 град.

Производительность всего узла ограничена производительностью грохота ГИЛ-41. При данной производительности должны выполняться требования к качеству фракционирования, установленные отделом технического контроля ООО «Хромцовский карьер». На грохоте ГИЛ-41 установлено сито с размерами ячеек 5x5 мм. Режим работы на данном сите с точки зрения фракционирования проходит в более тяжелых условиях, чем режим фракционирования на грохоте ГИТ-41. Для достижения требуемых показателей к конечным продуктам грохочения за счет увеличения времени пребывания сыпучего материала на втором грохоте длина его просеивающей поверхности выбрана 4250 мм. Это максимальная длина сита из типового ряда. Основной размер длин сит для грохотов ГИЛ-41 составляет 3700 мм. Увеличение длины просеивающей поверхности на 15 % обеспечивает повышение эффективности грохочения с 81% при типовой длине сита грохота до 85,7% при выбранной длине сита. При этом засоренность товарного продукта снизится с 3,7 % до 2,3 %.

Производительность грохота ГИТ-41 может быть значительно выше, чем 60 т/час. Однако данный грохот осуществляет предварительное фракционирование всей сыпучей смеси, поступающей на предложенный узел обогащения, поэтому его производительность ограничена производительностью предлагаемой технологической схемы.

Согласно методике, изложенной в [3], определялась скорость транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности грохотов. Для грохота ГИТ-41 она составила 0,265 м/с, а для грохота ГИЛ-41 - 0,25 м/с.

### **4.3. Технологические и технические результаты от внедрения мероприятий**

Объем нерудных строительных материалов, переработанных дробильно-сортировочным заводом ООО «Хромцовский карьер» за 2014 год составил 1517720 тонн. Сыпучие материалы поступают на ДСЗ из различных месторождений (Новинского, Хромцово-Потеряевского, Спасского основного, Каменное болото, Малуевского, Потеряевского северного, Лагерного), в том числе будут поступать из вновь разрабатываемого участка «Жирославка». Из предварительных расчетов сделанных нами совместно с представителями финансово-экономического отдела ООО «Хромцовский карьер» объем переработанных материалов в 2015 году составит 1615700 тонн. Подача сыпучего сырья из месторождения «Жирославка» на ДСЗ может осуществляться по следующим вариантам:

1) Гравийно-песчаная масса из карьера автосамосвалами БелАЗ-7540 доставляется в приемный бункер корпуса первичного дробления ДСЗ;

2) Используется предложенная нами технологическая схема предварительного обогащения для отбора некондиционных частиц вблизи добычного забоя, состоящая из последовательно расположенных грохотов ГИТ-41 и ГИЛ-41 отечественного производства.

До января 2014 года рассматривался вариант использования технологической схемы предварительного обогащения, состоящей из мобильных сортирующих установок зарубежного производства. Однако, учитывая изменение экономической ситуации в России, а так же падение курса рубля к иностранной валюте стоимость зарубежного оборудования превысила стоимость отечественных аналогов в 10 – 40 раз в ценах на 1.01.2015 года. Поэтому реализация данного варианта оказалась нецелесообразной.

Нами совместно с руководством предприятия ООО «Хромцовский карьер» и представителями производственно-технического и бюджетно-аналитического отделов рассматривались варианты эксплуатации вновь разрабатываемого месторождения «Жирославка» и проведена оценка предварительного экономического эффекта от внедрения предложенной схемы по переработке пасчано-гравийных смесей.

Расходы предприятия на затраты электроэнергии на переработку сыпучего сырья ДСЗ в 2014 году составили 21524707 рублей. За счет предложенной схемы произойдет уменьшение объема сыпучего сырья, поставляемого на ДСЗ в объеме 92000 тонн в год, что приведет к сокращению электроэнергии, затрачиваемой на переработку сыпучего сырья ДСЗ на 6,1%. Кроме того, снизятся затраты на транспортирование сыпучего сырья на ДСЗ, произойдет экономия топлива, горюче-смазочных материалов, заработной платы. В расходную часть предложения были внесены: стоимость грохотов ГИТ-41 и ГИЛ-41, расходы на монтаж и сборку участка предварительного обогащения, затраты на оснащение участка электрощитом и подводку кабеля от электрической подстанции ДСЗ до карьера, заработная плата персонала, обслуживающего карьер. По просьбе руководства предприятия статьи по расходам и доходам по предлагаемой схеме предварительного обогащения в диссертации не раскрываются.

По результатам проведенных исследований составлен акт о внедрении результатов данного диссертационного исследования по определению типов грохотов узла предварительного обогащения и их технических показателей,

который прилагается. Ожидаемый экономический эффект от предлагаемых мероприятий составит 1680000 рублей в год.

#### **4.4. Новая конструкция вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита**

Анализ патентной и технической литературы показал, что вибрационные грохоты, у которых просеивающие поверхности активно воздействуют на сыпучий слой, более эффективны, чем грохоты, у которых сита совершают колебания по стандартным траекториям: окружностям, эллипсам, прямым. В качестве активного вибровоздействия могут использоваться просеивающие поверхности, где происходит непосредственное виброударное возбуждение участков сита многочастотной механической системой «Kroosher» [2, 111, 112]. Другим способом повышения эффективности вибровоздействия сита на сыпучий материал является организация сложных траекторий колебаний просеивающих поверхностей грохотов.

Известны вибрационные грохоты, сита которых совершают независимые горизонтальные колебания внутри рамы, установленной на фундаменте посредством упругих элементов, которая сама совершает вертикальные колебания. Таким образом, устройства грохотов позволяет реализовывать различные траектории движения сита: круговые, прямолинейные, эллиптические с различными углами наклона оси эллипса к просеивающей поверхности, а также многие другие траектории, включая, кривые Лиссажу [113-117]. Следует отметить, что колебания по вертикальной и горизонтальной оси осуществляются с разными частотами и амплитудами.

Недостатком таких грохотов является сложность настройки упругих элементов на рабочий режим, в связи, с чем траектории движения просеивающей поверхности являются плохо управляемыми и нестабильными. Кроме того траектория колебаний точек сита лежит в плоскости перпендикулярной поверхности сита. Таким образом, на частицу находящуюся на поверхности сита,

действуют силы инерции, лежащие в одной плоскости. Если частица близка по размерам к диаметру отверстия сита, то она может заклинить его. Так как силы инерции ограничены одной плоскостью действия, то самоочищение отверстия сита так же ограничено. Если сито совершает колебания по объемной траектории, то возможности сил инерции по самоочистке отверстий сит расширяются.

Так же известны вибрационные грохоты [118], просеивающие поверхности которых совершают сложные колебания. Короб с просеивающей поверхностью совершает вертикальные колебания. Внутри короба имеется вибратор и приспособление для создания дополнительных боковых колебаний. За счет подбора оптимальных соотношений амплитуд происходит улучшение качества разделения. Недостатком данного грохота является ограничение траектории колебания сита одной плоскостью. Таким образом, силы инерции, действующие на частицы сыпучей среды, находятся в одной плоскости.

Нами предложена новая конструкция вибрационного грохота, у которого технический результат заключается в повышении качества продуктов отсева сыпучих материалов за счет создания пространственной траектории колебаний просеивающей поверхности, что приводит к увеличению подвижности частиц в слое сыпучего материала.

На рисунке 4.2 изображена, предложенная нами, конструкция вибрационного грохота.

Вибрационный грохот включает короб 1 с просеивающей поверхностью, соединенный упругими элементами 2 и кинематическими парами 3 с подвижной рамой 4, установленной на фундаменте посредством амортизаторов 5, и вибропривод 6, закрепленный на раме 4, обеспечивающий возможность ее колебаний в вертикальном направлении, подключенный к источнику питания через преобразователь частоты 7. Отличительной особенностью данного грохота от аналогичных просеивающих аппаратов является то, что короб 1 соединен с вертикальным эксцентриковым валом 8, приводящим в горизонтальное вращательное движение короб 1 с просеивающей поверхностью внутри

подвижной рамы 4, смонтированным в подшипниках 9, жестко закрепленных в коробе 1 и раме 4, соединенных с электродвигателем 10 ременной передачей 11.

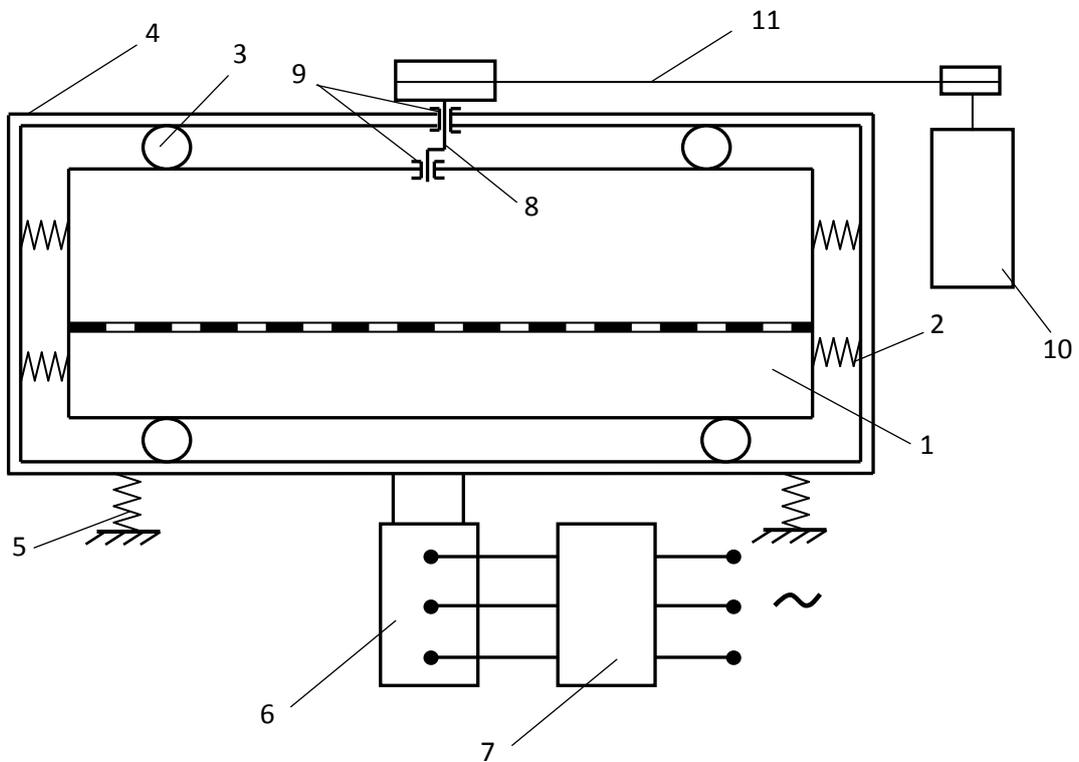


Рисунок 4.2. Новая конструкция вибрационного грохота

Вибрационный грохот работает следующим образом. Включается вибропривод 6. Он придает вертикальные колебания подвижной раме 4. Амплитуда колебаний подвижной рамы 4 по вертикальной оси регулируется виброприводом 6, частота регулируется преобразователем частоты 7. Включается электродвигатель 10 и приводит во вращение ведущий шкив ременной передачи 11. Ведомый шкив ременной передачи приводит во вращение вертикальный эксцентриковый вал 8, смонтированный в подшипниках 9 жестко закрепленных в подвижной раме 4 и коробе 1. Короб 1 с просеивающей поверхностью и находящимся на ней сыпучим материалом совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости внутри подвижной рамы 4. Круговые колебания обеспечиваются эксцентриковым валом 8. Горизонтальные круговые колебания короба 1 внутри подвижной рамы 4 осуществляются благодаря кинематическим

парам 3. Амплитуда круговых колебаний регулируется эксцентриситетом вала 8, частота регулируется размером диаметров шкивов.

Таким образом, предлагаемое выполнение вибрационного грохота, позволяет получить пространственные траектории колебаний короба с просеивающей поверхностью.

На рисунке 4.3 изображена частица, которая заклинила отверстие сита, так как ее размер совпадает с размерами отверстия. Если сито принадлежит типовому грохоту, то точки сита совершают колебательное движение по траекториям, лежащим в плоскости наибольшего ската, перпендикулярной плоскости просеивающей поверхности.

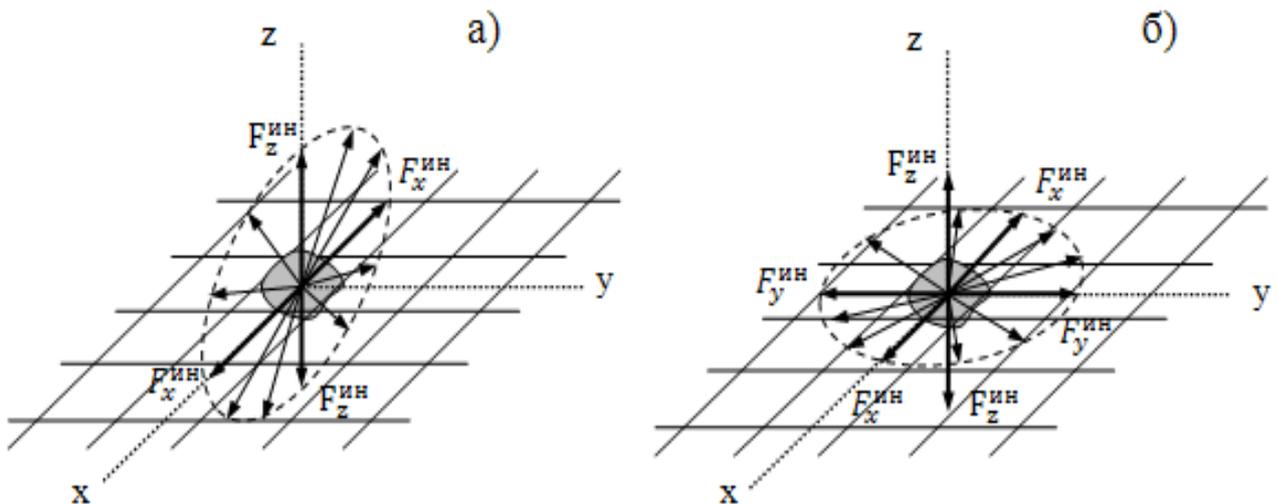


Рисунок 4.3. Распределение сил инерции, действующих на частицу, застрявшую в отверстии сита: а) – схема действия сил для типового грохота; б) - схема действия сил для грохота с пространственной траекторией колебаний сита

На рисунке 4.3, а показан годограф сил инерции, действующих на частицу. Силы инерции по осям  $x$  и  $z$  можно определить выражением

$$F_x^{\text{ин}} = F_z^{\text{ин}} = mA\omega^2, \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса частицы,  $A$  – амплитуда колебаний грохота,  $\omega$  – частота колебаний грохота, при траекториях движения точек сита, близких к окружностям.

Если сито принадлежит грохоту, короб которого совершает независимые вертикальные и горизонтальные колебания [114-116], то силы инерции определяются выражениями

$$F_x^{\text{ин}} = mA_x \omega_x^2, \quad (4.2)$$

$$F_z^{\text{ин}} = mA_z \omega_z^2, \quad (4.3)$$

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  $z$ . При этом годограф сил инерции располагается в плоскости наибольшего ската, как и годограф сил инерции типового грохота.

На рисунке 4.3, б показаны силы инерции, действующие на частицу, находящуюся в отверстии сита предложенного нами грохота пространственной траекторией колебаний [124]. Так как короб грохота с просеивающей поверхностью может совершать независимые колебания в горизонтальной плоскости, годограф сил инерции располагается также в горизонтальной плоскости. Силы инерции определяются выражением

$$F_x^{\text{ин}} = F_y^{\text{ин}} = mA_x \omega_x^2, \quad (4.4)$$

где  $A_x = A_y$  - амплитуда колебаний короба с ситом в горизонтальной плоскости,  $\omega_x = \omega_y$  - частота колебаний короба с ситом в горизонтальной плоскости. Силы инерции по оси  $z$  определяются выражением

$$F_z^{\text{ин}} = mA_z \omega_z^2, \quad (4.5)$$

где  $A_z$  - амплитуда колебаний подвижной рамы грохота по оси  $z$ ,  $\omega_z$  - частота колебаний подвижной рамы грохота по оси  $z$ .

Очевидно, что спектр сил инерции, действующих на частицу, способствующих проникновению ее через отверстия сита, в предложенном нами варианте грохота шире, чем для варианта сил инерции типового грохота.

В предложенной нами установке силы инерции, действующие на частицу, обеспечивают более качественную самоочистку просеивающих поверхностей, чем у типовых грохотов.

Предлагаемый вибрационный грохот как и грохота, послужившие аналогами нашему аппарату, имеет более широкие возможности, чем инерционные и самобалансные грохоты, которые традиционно используют на сортировочных предприятиях.

Грохот, как и его аналоги [114-116], может осуществлять высококомбинированный переход от одного колебательного режима к другому, если происходит изменение характеристик сыпучей среды или осуществляется переход к грохочению другого материала.

Изменение колебательного режима может осуществляться автоматически, что позволяет использовать грохот в автоматизированных технологических линиях. Это является дополнительным преимуществом предлагаемого аппарата перед типовыми. Силы инерции, имеющие большие значения чем в типовых аппаратах, не создают высоких локальных напряжений, как у инерционных и самобалансных грохотов, а распределяются на упругие элементы. Таким образом, допустимое ускорение колебаний грохота может быть выше, чем  $80 \text{ м/с}^2$  – допустимое ускорение колебаний инерционных и самобалансных грохотов.

Если упругие элементы, установленные между подвижной рамой и фундаментом, имеют жесткость, обеспечивающую околорезонансный режим колебаний, то при таком режиме работы грохота получаются высокие значения амплитуд колебаний при использовании источников возбуждения малой мощности.

#### **4.5 Выводы по главе 4**

1. Анализ исследований фракционных свойств песчано-гравийных смесей, добываемых в карьерах предприятий нерудной промышленности Ивановской области, показал, что перспективы увеличения запасов строительного камня по

геологоразведочным работам на вновь разрабатываемых месторождениях весьма ограничены.

2. В результате расчетно-экспериментальных исследований по периодическому грохочению на лабораторной установке выбрана технологическая схема предварительного обогащения песчано-гравийной смеси в карьере месторождения «Жирославка» ООО «Хромцовский карьер». Определены производительность выбранных грохотов ГИТ-41 и ГИЛ-41, технологические параметры их работы. Определены конечные характеристики фракций процессов классификации на предложенных грохотах. Увеличение длины просеивающей поверхности (типовая длина сита грохота ГИЛ-41 – 3700 мм) на 15 % обеспечивает повышение эффективности грохочения с 81% при типовой длине сита грохота до 85,7% при выбранной длине сита. При этом засоренность товарного продукта снизится с 3,7 % до 2,3 %.

3. Ожидаемый экономический эффект от предлагаемых мероприятий составит 1680000 рублей в год.

4. Предложена новая конструкция вибрационного грохота, защищенная патентом на полезную модель, обеспечивающая пространственную траекторию колебания просеивающей поверхности.

5. Технический эффект пространственных колебаний заключается в интенсификации вибровоздействия сита на среду сыпучего материала, что способствует повышению качества продуктов отсева материалов за счет увеличения подвижности частиц в слое.

6. Для грохочения сыпучих материалов на типовых аппаратах силы инерции, действующие на частицу, проникающую через отверстия сита, ограничены плоскостью действия, перпендикулярной просеивающей поверхности, то самоочищение отверстия сита так же ограничено. Для грохочения сыпучего материала на предложенном нами грохоте сито совершает колебания по объемной траектории. Годографы сил инерции являются пространственными, поэтому возможности самоочистке отверстий сит расширяются.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана модель фракционирования песчано-гравийных смесей с высоким содержанием частиц мелких фракций в исходном сырье, основанная на теории цепей Маркова, где число ячеек цепи, соответствующее высоте слоя, меняется по мере выхода мелкой фракции.

2. Для описания процесса сегрегации частиц к поверхности сита создана нелинейная модель, в которой доли сегрегационного переноса из ячейки зависят от содержания мелкой фракции в следующих ячейках цепи.

3. Показано, что введение зависимости интенсивности извлечения от высоты слоя, вызванного уходом мелкой фракции, повышает на 15% точность определения степени извлечения в ее рабочем диапазоне 70 – 85%.

4. Определена зависимость вероятности проникновения частиц проходовых фракций через отверстия сита от уменьшающейся высоты слоя. Показано, что поведение материала в виброожигенном состоянии аналогично поведению капельной жидкости, а скорость прохода мелкой фракции сквозь сито может рассматриваться как скорость ее истечения под напором.

5. Разработанные методы расчета и их программное обеспечение нашли свое применение в ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область). Предложена схема предварительного обогащения песчано-гравийной смеси с начальным содержанием песка (фракция 0-5 мм) 66,4% в карьере месторождения «Жирославка», состоящая из установленных последовательно грохотов ГИТ-41 и ГИЛ-41. Выбор максимальной длины сита из типового ряда для грохотов ГИЛ-41 обеспечит эффективность грохочения 85,7 % при засоренности надситового продукта 2,3%. Внедрение схемы предварительного обогащения приведет к сокращению электроэнергии, затрачиваемой на переработку сыпучего сырья ДСЗ на 6,1%. Снизятся затраты на транспортирование сыпучего сырья на ДСЗ, произойдет экономия топлива, горюче-смазочных материалов, заработной платы. Ожидаемый экономический эффект от предлагаемых мероприятий составит 1680000 рублей в год.

6. Предложена новая конструкция вибрационного грохота, у которого технический результат заключается в повышении качества продуктов отсева сыпучих материалов за счет создания пространственной траектории колебаний просеивающей поверхности, что приводит к увеличению подвижности частиц в слое сыпучего материала.

7. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, инженеров и аспирантов на кафедре «Технология строительного производства» Ивановского государственного политехнического университета.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Баранцева, Е.А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет/ Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, Ю.В. Хохлова// ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», Иваново, 2008. – 116 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. Мизонов, В.Е. Процессы сепарации частиц в виброожиженном 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.
4. Аккерман, Ю. Э. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Ю.Э. Аккерман, Букаты Б.Г., Кщевальтер Б.В. // 2-е изд. перер. и доп. – М.: Недра, 1982. – 367 с.
5. Сергеев В.П. Строительные машины и оборудование: Учеб. Для вузов по спец. «Строит. машины и оборудование». – М.: Высш. шк., 1987. – 376 с.: ил.
6. Процессы в производстве строительных материалов и изделий / Учебник. В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 512 с.
7. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. - М.: Химия. - 1977. 368 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. Стохастическая модель распределения проходových частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении / В.А. Огурцов // Строит. материалы.– 2007.– №11.– С.38 - 39.
14. 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.
15. 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.
16. Огурцов, В.А. Моделирование движения частиц над поверхностью сита виброгрохота / В.А. Огурцов // Строит. материалы. – 2008. – №8. – С. 72 - 73.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. Васильев, С.Б. Логистическое уравнение как модель фракционирования древесной щепы методом рассева / С.Б. Васильев, Г.Н. Колесников, А.В. Кульбицкий // Материалы третьей международной научно-практ. интернет-конф. «Леса России XXI века», Спб ГЛТА, 2010. С. 236-239.
22. 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.
23. 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.
24. Надутый, В.П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Киев.: Наукова думка. - 2005. – 180 с.
25. Надутый, В.П. Интенсификация процесса вибрационного грохочения с учетом сегрегации, просеивания и транспортирования / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Сб. докл. Междун. научн.-техн. конф: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – Екатеринбург. – 2002. – С. 76 - 80.
26. Надутый, В.П. Кинематика сыпучей среды при вибрационном грохочении / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Всеукр. Научн.-техн. журн.: Вибрация в технике и технологиях. – Винница. – 2003. - № 5 (31). – С. 51 – 54.

27. Лапшин, Е.С. Определение вероятности вибрационного просеивания случайно ориентированной в пространстве частицы / Е.С. Лапшин // Збагачення корисних копалин: Наук.- техн. зб. НГА Україна. – Дніпропетровськ. – 2000. - № 10 (51). – С. 47 – 52.
28. Лапшин, Е.С. Вероятностный критерий согласования процессов сегрегации и прсеивания / Е.С. Лапшин // Всеукр. Научн.-техн. журнал: Вибрация в технике и технологиях. – Винница. – 2002. - № 1 (22). – С. 36 – 38.
29. Хохлова, Ю.В. Математическая модель смесителя непрерывного действия с неоднородным потоком сыпучего материала / Ю.В.Хохлова, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007, т. 50, вып. 9. – С.118 – 120.
30. Тихонов, О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогащительной 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. Вибрационный грохот как многопродуктовый классификатор: кинетика извлечения фракций / В.А. Огурцов, Е.Р. Горохова, В.М. Макарова, П.А. Медведева // Строительство и реконструкция. – 2011. - №4(36). – С.47 – 50.
34. 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.
35. 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.

36. 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.
37. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с. с иллюстрациями.
38. ГОСТ 32703 - 2014 “Щебень и гравий из горных пород для строительных работ”
39. ГОСТ 8736 - 2014 “Песок для строительных работ”
40. 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.
41. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов / Учебник. В.С. Богданов, С.Б. Булгаков, Г.Д. Федоров // – Белгород, «Везелица». - 2007. - 446 с.
42. 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.
43. Вайсберг, Л.А., Рубисов, Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процесса и технологический расчет грохотов. - Спб.: Институт «Механобр». - 1994. - 47 с.
44. Вайсберг, Л.А. Теоретические основы грохочения. Учеб. пособие .– Спб.: – СПбГГИ (технический университет). – 2003. – 61 с.
45. Вайсберг, Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. - М.: Недра, 1986. - 144 с.
46. 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.

47. 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.

48. 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.

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

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

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. Мизонов, В.Е. Связь функциональных и критериальных характеристик процесса классификации / В.Е Мизонов //Интенсивная механическая технология сыпучих материалов. – Иваново, 1990. – С. 80–84.
56. Мизонов, В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков / В.Е Мизонов // Теоретические основы химической технологи. – 1984. – т.18. – №6. – С . 811– 815.
57. Мизонов, В.Е. Современные проблемы математического моделирования классификации порошкообразных материалов / В.Е Мизонов //Совершенствование техники и технологии измельчения материалов. –Белгород, 1989. – С. 150–161.
58. Огурцов, А.В. Ячеечная математическая модель распределения твёрдых частиц в псевдоожигенном слое / А.В.Огурцов, А.В.Митрофанов, В.Е. Мизонов, В.А.Огурцов // Изв. вузов «Химия и химическая технология».- 2007.- том.50 , вып.3. - С.100-103.
59. Огурцов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование распределения концентрации частиц во взвешенном слое / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов, Н.К. Анисимова // Химическая промышленность сегодня. - №4. – 2009. - С. 41 – 45.
60. 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.
61. 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.
62. 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.

63. Вайсберг, Л.А. Массво-балансовая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1988. - №5, С. 5 – 9.
64. Вайсберг, Л.А. К развитию массво-балансовой модели вибрационного грохочения / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1989. - №2, С. 3 – 5.
65. Вайсберг, Л.А. К технологическому расчету вибрационных грохотов / Л.А. Вайсберг, Д.Г. Рубисов // Обогащение руд. - 1991. - №5, С. 19 – 23.
66. 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.
67. Вавилов, А.В. Спиральные вибрационные грохоты / А.В. Вавилов, Н.Т. Сурашов Д.Е. Елемес, – Алматы: КазНТУ, 2010. –126 с.
68. 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.
69. Огурцов, А.В. Моделирование истирания гранул керамзита в кипящем слое / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ. – Вып.3 – 2005. – С. 94-96.
70. Митрофанов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование аппарата с двумерным псевдооживленным слоем / А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, А.В. Огурцов, К. Tannous // Вестник ИГЭУ. – Вып.3. – 2009. – С. 20-22.
71. Огурцов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование распределения твердых частиц в аппарате с двумерным псевдооживленным слоем / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов, К. Tannous // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – Вып. 11. – С.131-134.
72. Митрофанов, А.В. Моделирование теплопередачи между частицами и газом в псевдооживленном 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.

73. Митрофанов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в псевдооживленном слое / А.В. Митрофанов, Л.Н. Овчинников, А.В. Огурцов, В.Е. Мизонов. // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 5. – С.134-136.

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. Моделирование прогрева тонкого слоя материала перемещающимся источником теплоты / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, А.Б. Иванов, О.В. Тихонов // Строительные материалы. – 2007.- №3.- С. 28-29.

79. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, С.В. Хавер // Строительные материалы. – 2007.- №9.- С. 14-16.

80. Моделирование прогрева кирпичной садки произвольной внешней конфигурации / С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, А.Н. Хусаинов // Строительные материалы. – 2010.- №7.- С. 46-48.

81. Алоян, Р.М. Моделирование теплового состояния материала при протекании в нем экзотермической реакции / Р.М. Алоян, Н.В. Виноградова, М.Е. Лебедев // Строительные материалы. – 2007.- №9.- С. 74-75.
82. Алоян, Р.М. Моделирование термической обработки материала перемещающимся источником теплоты при протекании в нем экзотермической реакции / Р.М. Алоян, Н.В. Виноградова, М.Е. Лебедев // Строительные материалы. – 2007.- №10.- С.68-69.
83. Жуков, В.П. Расчет процесса периодического грохочения порошков / В.П. Жуков // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. - № 1. – С. 17 - 18.
84. Жуков, В.П. Математическое описание распределенного процесса классификации порошкообразных материалов / В.П. Жуков // В сб. Процессы в зернистых средах. – Иваново. - 1989. – С. 52 – 55.
85. Жуков, В.П. Пути повышения качества нерудных материалов / В.П. Жуков // Промышленность строительных материалов Москвы: Реф. Сб. – М.: Наука. – 1986. - № 6. – С. 17 – 20.
86. 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.
87. 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.
88. 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.
89. 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.

90. Смирнов, С.Ф. Влияние загрузки барабана на измельчение в шаровой мельнице / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, А.Г. Красильников, В.Е. Мизонов // Труды межд. науч. конф. «Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием». –Иваново, 2007. – Т.2. – С. 23.

91. Смирнов, С.Ф. Влияние протяженности зоны загрузки на измельчение в вибромельнице / С.Ф. Смирнов // Материалы XIV межд. науч. техн. конф. «Информационная среда Вуза». – Иваново, 2007. – С. 154 –156.

92. 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.

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

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

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

96. 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.

97. 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.

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

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

100. 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.

101. 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.

102. 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.

103. Красильников, А.Г. Модель измельчения в трубной мельнице замкнутого цикла со сложной структурой потока материала [Текст] / А.Г. Красильников, С.Ф. Смирнов, В.Е. Мизонов, В.П. Жуков, Cs. Mihalyko // Тез.

докл. XIV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения «Состояние и перспективы развития элетротехнологии». – Иваново. – 2007. – С. 177.

104. Смирнов, С.Ф. Обобщенная ячеечная модель совмещенного процесса измельчения-классификации в технологических системах измельчения / С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // «Строительные материалы». – 2008. – №.8. – С. 74 – 76.

105. 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.

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

107. 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.

108. 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.

109. 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

110. 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.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

114. 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.

115. 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.

116. 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.

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

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

119. 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.

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

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

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

123. Акулова, М.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит / М.В. Акулова, А.П. Алешина, Ал.В. Огурцов, Ан.В. Огурцов // Вестник МГСУ. -№2. – 2013. – С. 80-87.

124. 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.

125. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ №2013613784. Расчет нестационарного теплообмена в многослойных средах с помощью цепей Маркова / Лавринович С.С., Огурцов А.В., Алешина А.П., Гусева А.С.; правооблад. ИГЭУ; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 16.04.13.

126. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ №2013617979. Расчет температурных полей в монолитной железобетонной конструкции с помощью цепей Маркова / Гусева А.С., Лавринович С.С., Огурцов А.В., Алешина А.П.; правооблад. ИГЭУ; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 28.08.13.

127. Алешина, А.П. Об одном способе описания кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на вибрационных грохотах /А.П. Алешина // Вестник научно-промышленного общества. - Вып. 18. – Москва. - 2012. - С. 34 – 37.

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

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

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

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

132. Алешина, А.П. Повышение качества фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах с пространственной траекторией движения сит /

А.П. Алешина, Е.Р. Брик // Материалы VIII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2013». Иваново: ИГЭУ, 2013. С. 275 - 276.

133. Огурцов, В.А. Моделирование движения полидисперсной смеси частиц по просеивающей поверхности виброгрохота / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, М.А. Гриценко // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов». Иваново: Иван. ин-т. ГПС МЧС, ИГХТУ, 2014. С. 163-167.

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

135. Алешина, А.П. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих строительных материалов на вибрационных грохотах / А.П. Алешина, В.А. Огурцов // Тезисы докладов 65 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов высших учебных заведений. Ярославль: ЯГТУ, 2012. ч.2, С. 401.

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

137. Алешина, А.П. Повышение качества классификации сыпучих материалов на вибрационных грохотах / А.П. Алешина, В.А. Огурцов // Материалы VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2012». Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 248.

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

139. Алешина, А.П. Разработка метода расчета технологических параметров грохочения, обеспечивающих высокое качество фракционирования сыпучих строительных материалов / А.П. Алешина // Тезисы докладов 66 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов высших учебных заведений. Ярославль: ЯГТУ, 2013. ч.2, С. 339.

140. Алешина, А.П. Определение качества фракционирования сыпучих строительных материалов на виброгрохотах / А.П. Алешина // Сборник тезисов шестнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и молодых ученых «Строительство-формирование среды жизнедеятельности». Москва: МГТУ, 2013. С. 456.

141. Алешина, А.П. Моделирование кинетики фракционирования сыпучих сред с позиции кривой разделения грохота / А.П. Алешина, М.А. Гриценко // Материалы IX Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2014». Иваново: ИГЭУ, 2014. С. 322 – 323.

142. Алешина, А.П. Кинетика фракционирования на барабанных грохотах /А.П. Алешина, М.А. Гриценко // Материалы IX Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия 2014». Иваново: ИГЭУ, 2014. С. 324 – 325.

143. Алешина, А.П. Моделирование кинетики многоситового грохочения сыпучих строительных материалов /А.П. Алешина, Е.Р. Брик, М.А. Гриценко // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Поиск-2014». Иваново: ИВГПУ, 2014. С. 209 – 211.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

160. Dury, C.M. Competition of mixing and segregation in rotating cylinders [Tidsskrift] / C.M. Dury, G.H. Ristow // Physics of fluids. - 1999. - 6 : Vol. 11. - S. 1387-1394.

161. Arratia, P.E. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations / P.E. Arratia, Nhat-hang Duong, F.J.Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology, Vol. 164. – 2006. - P.50 - 57.

162. Kaneko, Y. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation [Journal] / Y. Kaneko, T. Shiojima, M. Horio // Powder Technology. - 2000. - 1 : Vol. 108. - P. 55 – 64.

163. Bertrand, F. DEM-based models for the mixing of granular materials [Tidsskrift] / F. Bertrand, L.-A. Leclaire, G. Levecque // Chemical Engineering Science. - 2005. – 8 - 9 : Vol. 60. - S. 2517-2531.

164. Carley-Machauly, K.W. The mixing of solids in tumbling mixers-i

[Tidsskrift] / K.W. Carley-Machauly, M.B. Donald // Chemical Engineering Science. - 1962. - Vol. 17. – S. 493-506.

165. Broadbent, C.J. A phenomenological study of batch mixer using a positron camera [Tidsskrift] / C.J. Broadbent, J. Bridgewater, D.J. Parker, S.T. Keningley, P. Knight // Powder Technology. - 1993. - Vol. 3.- S. 76 - 81.

166. Rose, H.E. A suggested equation relating to the mixing of powders and its application to the study of the performance of certain types of mashines [Tidsskrift] / H.E. Rose // Transactions of the Institution of the Chemical Engineers. - 1959. - 4 : Vol. 37. - S. 47 - 64.

167. Fan, L.T. Solids mixing [Tidsskrift] / L.T. Fan, Y. Chen, C.A. Watson // Industrial and Engineering Chemistry. - 1970. - 7 : Vol. 62. - S. 53 - 69.

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D$  – размерный коэффициент макродиффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$d$  – безразмерный коэффициент макродиффузии;

$V_0$  – размерный коэффициент сегрегации в начальный момент времени,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$v_0$  – безразмерный коэффициент сегрегации в начальный момент времени ;

$v_i^k$  - скорость сегрегации в зависимости от содержания мелкой фракции в ячейке в текущий момент времени;

$V_{f0}$  – размерная скорость просеивания проходových частиц через отверстия сита грохота в начальный момент времени,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$v_{f0}$  - вероятность проникновения проходových частиц через отверстия сита грохота в начальный момент времени;

$v_f^k$  - вероятность проникновения проходových частиц через отверстия сита грохота в текущий момент времени;

$\Delta t$  – продолжительность времени одного перехода,  $\text{с}$ ;

$k$  – номер временного перехода;

$t_k$  – текущий момент времени,  $\text{с}$ ;

$m$  – количество ячеек в слое;

$i$  – номер ячейки;

$\Delta x$  – высота ячейки;

$S^k$  - вектор-столбец распределения содержания частиц мелкой фракции по ячейкам слоя;

$P$  - матрица переходных вероятностей ячеечной модели;

$q^{k+1}$  – выход мелкой фракции в подрешетное пространство на каждом временном переходе;

$Q^{k+1}$  – полный выход мелкой фракции в подрешетное пространство;

$C_0$  - относительное содержание мелкой фракции в сырье;

$\varepsilon^{k+1}$  – степень извлечения мелких частиц из исходного сырья;

$p_u^k$  – вероятность мелких частиц перейти в течение одного временного перехода в верхнюю соседнюю ячейку;

$p_d^k$  – вероятность мелких частиц перейти в течение одного временного перехода в нижнюю соседнюю ячейку;

$p_s^k$  – вероятность мелких частиц остаться в ячейке в течение одного временного перехода;

$h_0$  - начальная высота слоя.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  
Общество с ограниченной ответственностью  
**ХРОМЦОВСКИЙ КАРЬЕР**

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

р/с № 40702810001060000171  
филиал «Вознесенский» АКБ «Инвестторгбанк», г.Иваново  
к/с 3010181080000000772, БИК 042406772,  
ИНН 3705066038, КПП 370501001,  
ОГРН 1133705000219, ОКВЭД 14.21, ОКПО 05001079



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Хромцовский карьер»  
Бобылев В.А.  
15 января 2015г.

АКТ

об использовании результатов диссертационных исследований Алешиной Анны Павловны по применению схемы предварительного обогащения песчано-гравийной смеси на участке «Жирославка» ООО «Хромцовский карьер»

Мы, нижеподписавшиеся, от ООО «Хромцовский карьер» начальник производственно-технического отдела Рыльский Ю.Г., начальник бюджетно-аналитического отдела Груздев М.Е., от ИВГПУ зав.кафедрой «Технология строительного производства» д-р техн. наук, профессор Огурцов В.А., аспирант кафедры ТСП ИВГПУ Алешина А.П., составили настоящий акт о том, что внедрение схемы предварительного обогащения песчано-гравийной смеси на участке «Жирославка» приведет к сокращению затрат по электроэнергии, потребляемой ДСЗ на переработку сырья на 6,1%, снизятся затраты на транспортирование ПГС, произойдет экономия ГСМ, заработной платы. Ожидаемый экономический эффект от предлагаемых мероприятий составит 1680000 рублей в год.

От ООО «Хромцовский карьер»  
начальник производственно-технического отдела  
начальник бюджетно-аналитического отдела

Рыльский Ю.Г.  
Груздев М.Е.

от ИВГПУ  
зав.кафедрой «Технология строительного производства»  
д-р техн. наук, профессор  
аспирант кафедры ТСП ИВГПУ

Огурцов В.А.  
Алешина А.П.



Общество с ограниченной ответственностью  
**“ШагСтрой”**

ИНН 3702617417, КПП 370201001, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 53, литер А  
 Расчетный счет 40 702 810 400 000 000 606, корр. счет 30 101 810 024 060 000 831,  
 БИК 042 406 831, в «Ивановском» филиале «РЕГНУМ БАНК» (ООО) г. Иваново  
 Тел.: 58-45-05

Исх. № 01 от 20.01.2015 г

**СПРАВКА**

о внедрении результатов диссертационной работы

Алешиной Анны Павловны

Настоящим подтверждаем, что в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между ООО «ШагСтрой», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» и ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет» разработаны и переданы компьютерные программы:

1. «Расчет нестационарного теплообмена в многослойных средах с помощью цепей Маркова» (номер государственной регистрации 2013613784, разработчики: Лавринович С.С., Огурцов А.В., Алешина А.П., Гусева А.С);

2. «Расчет температурных полей в монолитной железобетонной конструкции с помощью цепей Маркова» (номер государственной регистрации 2013617979, разработчики: Гусева А.С., Лавринович С.С., Огурцов А.В., Алешина А.П.

были использованы для расчета процессов в практике выполнения промышленных и исследовательских проектов.

Новая конструкция вибрационного грохота:

1. 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.

включена в банк технических решений для разработки проектов модернизации промышленных предприятий строительной отрасли.

Директор



Федоров С.Я

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 144326

## ВИБРАЦИОННЫЙ ГРОХОТ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014109175

Приоритет полезной модели 11 марта 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 15 июля 2014 г.

Срок действия патента истекает 11 марта 2024 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **144 326** (13) **U1**(51) МПК  
B07B 1/40 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2014109175/03, 11.03.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
11.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.03.2014

(45) Опубликовано: 20.08.2014 Бюл. № 23

Адрес для переписки:

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ИГЭУ,  
патентно-лицензионный отдел, Трухиной Ольге  
Геннадьевне

(72) Автор(ы):

Огурцов Валерий Альбертович (RU),  
Мизонов Вадим Евгеньевич (RU),  
Огурцов Антон Валерьевич (RU),  
Алешина Анна Павловна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И.  
Ленина" (ИГЭУ) (RU)(54) **ВИБРАЦИОННЫЙ ГРОХОТ**

(57) Формула полезной модели

Вибрационный грохот, включающий короб с просеивающей поверхностью, соединенный упругими элементами и кинематическими парами с подвижной рамой, установленной на фундаменте посредством амортизаторов, и вибропривод, закрепленный на раме, обеспечивающий возможность ее колебаний в вертикальном направлении, подключенный к источнику питания через преобразователь частоты, отличающийся тем, что короб шарнирно соединен с вертикально установленным в раме кривошипом, вал которого связан с электродвигателем через ременную передачу.

RU 144326 U1

RU 144326 U1