

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2015

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

Научный руководитель:

Огурцов Валерий Альбертович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Блиничев Валерьян Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств»

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

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет»

Защита состоится 6 июля 2015 г. в 10 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.355.01 ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», <http://ivgpu.com/>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

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



Заянчуковская Н.В.

Общая характеристика работы

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 виброожигенном слое.

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

Задачи исследования.

1. Для повышения эффективности и производительности виброгрохотов разработать научные подходы к математическому моделированию процессов фрак-

ционирования сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций в виброоживленном 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 проходных 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 виброоживленному 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 виброоживленном 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 виброоживленном 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, основан-

ный 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, тепломассообмен) 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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе на основе литературных источников проанализировано современное состояние проблемы фракционирования сыпучих материалов в технологических процессах различных отраслей промышленности. Наиболее подходящим математическим подходом, соответствующим физической картине процессов, происходящих в виброожигенном слое сыпучей среды, является вероятностное их описание, что видно из работ отечественных ученых Е.А. Непомнящего, О.Н. Тихонова, И. И.Блехмана, Л.А. Вайсберга, В.Ф. Першина, В.Е. Мизонова, их учеников и последователей и зарубежных ученых О. Моле-руса, А. Майнеля, Х. Шуберта, Ж. Феррары, У. Прети и многих других. Удобным инструментом для моделирования закономерностей миграции частиц исследуемой фракции в процессе их движения по виброожигенному слою является теория цепей Маркова. Эта теория использовалась многими отечественными и зарубежными учеными: В.Е. Мизоновым, С.В. Федосовым, В.П. Жуковым, З. Бернотатом, А. Бертье и другими.

В заключение главы приведены детализированные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке нелинейной математической модели процесса фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах.

Процесс грохочения складывается из трех составляющих: стохастическое (диффузионное) движение частиц мелкой фракции по высоте слоя, их миграция к поверхности сита и прохождение мелких частиц сквозь отверстия сита в мелкий продукт. Технологическая эффективность грохочения зависит от всех трех составляющих.

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 В.Е. Мизонова. Детальное описание приложения этого подхода в работах его учеников и по-

следователей к моделированию и расчету процессов в кипящем слое, тепломассопереноса с экспериментальной проверкой расчетных результатов подтвердило прогностические возможности данного метода.

В работах В.А. Огурцова предложено описание кинетики грохочения на основе теории цепей Маркова. Рассчитанная на ее основе кинетика грохочения хорошо соответствует экспериментальным данным до степени извлечения мелкой фракции 70...80%, но при больших степенях извлечения модель дает завышенные результаты. Это было вызвано тем, что модель не учитывает нелинейность сегрегационной миграции частиц в слое, а, главное, в ней отсутствует зависимость изменения высоты слоя по мере извлечения мелкой фракции. Ниже предлагается ячеечная модель процесса, свободная от этих допущений.

Расчетная схема процесса показана на рисунке 1а. На рисунке 1б 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 Δt – продолжительность одного перехода, а k – номер временного перехода. 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 1б 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. Из этих долей можно выделить симметричную (диффузионную) составляющую d и несимметричную составляющую v , обусловленную сегрегационным переносом. Из нижней ячейки частицы мелкой фракции могут уйти в под-

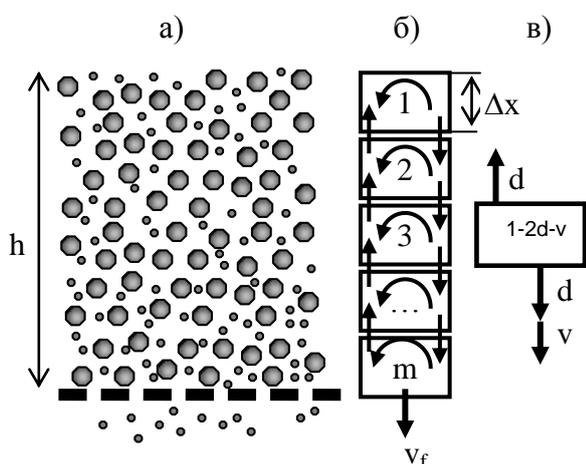


Рисунок 1. Расчетная схема процесса (а), его ячеечная модель (б) и доли переноса фракции из ячейки (в)

решетный продукт и навсегда покинуть процесс, в результате чего высота слоя мелкой фракции 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 S^k размером $m \cdot 1$. Эволюция этого вектора с течением времени (от перехода к переходу) описывается рекуррентным матричным равенством

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

где P – переходная матрица (матрица переходных вероятностей), которая для закрытого сита имеет вид:

$$\mathbf{P}^k = \begin{bmatrix} p_{s1}^k & p_{u2}^k & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{d1}^k & p_{s2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{d2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & p_{s(m-1)}^k & p_{um}^k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{d(m-1)}^k & p_{sm}^k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где p_u^k – вероятности перейти в течение Δt в верхнюю соседнюю ячейку, p_d^k – вероятности перейти в течение Δt в нижнюю соседнюю ячейку и p_s^k – вероятности в течение Δt остаться в данной ячейке.

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

$$p_{ui}^k = d = \text{const}, \quad (3) \quad p_{di}^k = d + v_0(1 - S_{i+1}^k), \quad (4) \quad p_{si}^k = 1 - p_{ui}^k - p_{di}^k, \quad (5)$$

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 (5) следует из условия нормировки.

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 β , то содержание S_i^k переносится в следующую ячейку $i+1$, содержание фракции в ячейке i приравнивается к нулю, так же как и вероятность перехода из этой ячейки вверх ($p_{ui}^k=0$), что запирает i верхних ячейки цепи, а оставшиеся внизу ячейки составляют новую высоту слоя.

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

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (6)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f^k), \quad (7)$$

где $:=$ - оператор присваивания.

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

$$Q^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}, \quad (8)$$

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

$$\varepsilon^{k+1} = \frac{Q^{k+1}}{C_0 m}, \quad (9)$$

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 виброожиданном 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 (рисунок 1а) или числом работающих ячеек $m-i$. Поэтому в первом приближении можно принять, что

$$v_f^k = v_{f0} \sqrt{\frac{m-i(k)}{m}}, \quad (10)$$

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

Равенства (1)-(10) 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 показано сравнение эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя при постоянной ($v_f = \text{const}$) и переменной (10) скорости извлечения при $d=0,05$; $v_0=0,5$; $v_{f0}=0,05$; $C_0=0,8$.

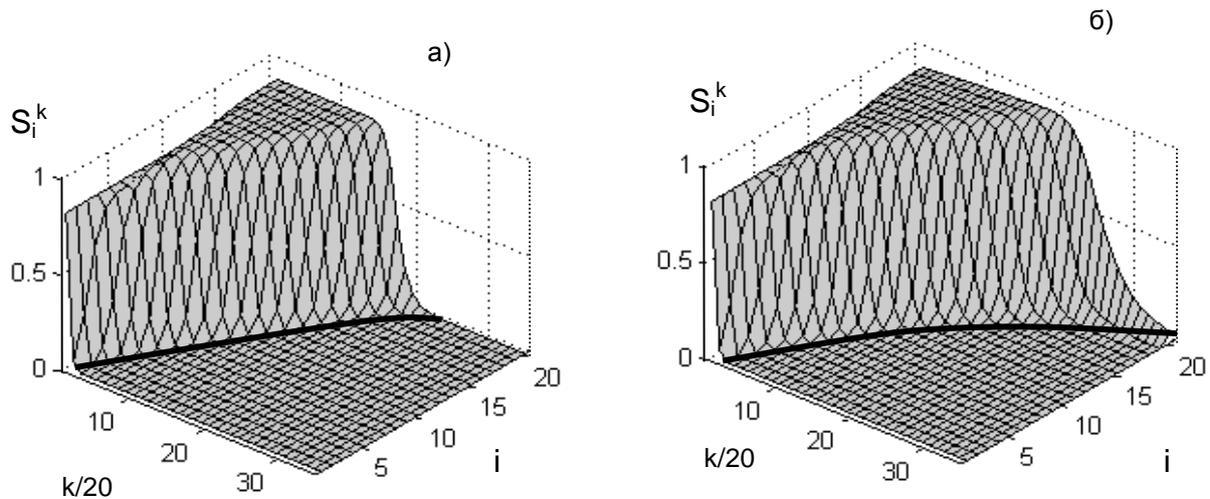


Рисунок 2. Эволюция распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя при постоянной (а) и переменной (б) скорости извлечения (жирная линия – изменение высоты слоя)

Очевидно, что модель с постоянной скоростью извлечения дает более быстрое убывание высоты слоя и, в конечном счете, более полное извлечение мелкой фракции. 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 3, где представлены графики кинетики извлечения, рассчитанные по обоим моделям. По модели (б) извлечение мелкой фракции значительно замедляется после

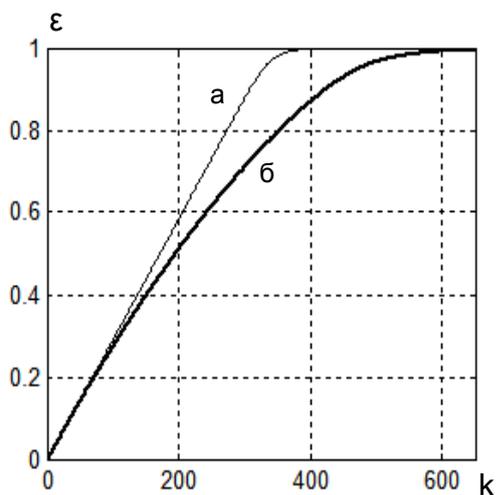


Рисунок 3. Кинетика извлечения мелкой фракции при постоянной (а) и переменной (б) скорости извлечения

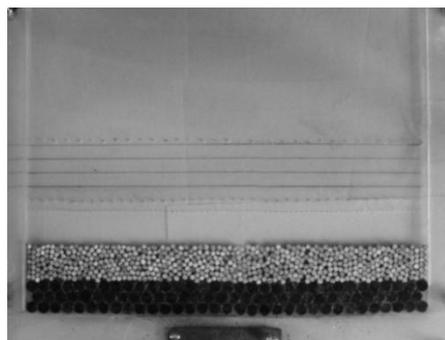
примерно половины ее извлечения, особенно при высоких степенях извлечения, больших 70%, что качественно соответствует многочисленным опытным данным, то есть обеспечивает более точное описание процесса. Последнее позволяет на базе данной модели разработать инженерный метод расчета процесса и повысить его прогностическую ценность.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования процессов миграции частиц в виброожиженном слое их идентификация ячеечной модели. Математическое описание процессов движения частиц по виброожиженному слою, которые происходят при

фракционировании и перемешивании частиц, строится на основе классического уравнения конвективной диффузии. Целью экспериментальных исследований является доказательство адекватности математической модели миграции частиц в виброожиженном слое закономерностям движения мелких частиц в среде крупных. Для упрощения исследования физической картины процессов фракционирования и перемешивания опыты проводились на двухкомпонентной смеси. Рабочим органом установки (рисунок 4) является плоский разъемный экран из прозрачных пластин, внутри которого помещаются металлические шайбы размерами 5 и 11 мм, которые могут перемещаться друг относительно друга в пространстве между пластинами.



а)



б)

Рисунок 4. Установка для плоской модели миграции частиц в виброожиженном слое: а - процесс грохочения, б – процесс перемешивания

Плоский экран совершает круговые колебания под действием кинематического вибропривода, который представляет собой эксцентриковый вал, соединенный с электродвигателем. Его схема показана на рисунке 5. Проводилась фотофиксация процесса, как перемешивания, так и фракционирования с различными интервалами времени.

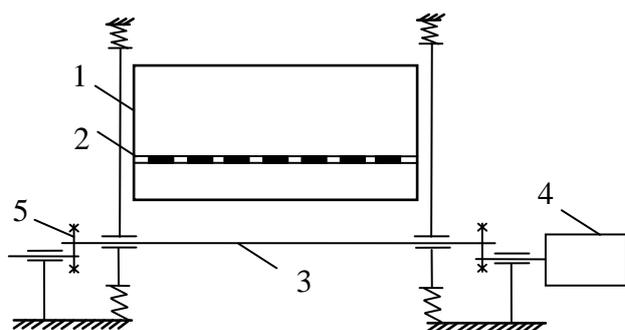


Рисунок 5. Схема установки для периодического грохочения и перемешивания бинарной смеси: 1 – прозрачный экран, 2 – сменное сито, 3 – эксцентриковый вал, 4 – электродвигатель с регулируемым числом оборотов, 5 – винты для изменения амплитуды колебаний экрана

Параметры вибровоздействия на слой, начальная высота слоя, начальное распределение мелких частиц, а так же их относительная начальная концентрация выбирались одинаковыми для обеих серий опытов процессов перемешивания и фракционирования, что позволило сопоставить стохастические параметры моделей этих процессов.

Двухпараметрическая идентификация модели по усредненным опытным данным для эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя позволила определить безразмерные стохастические коэффициенты модели для условий лабораторного вибровоздействия: $v_0 = 0,026$, $d = 0,005$.

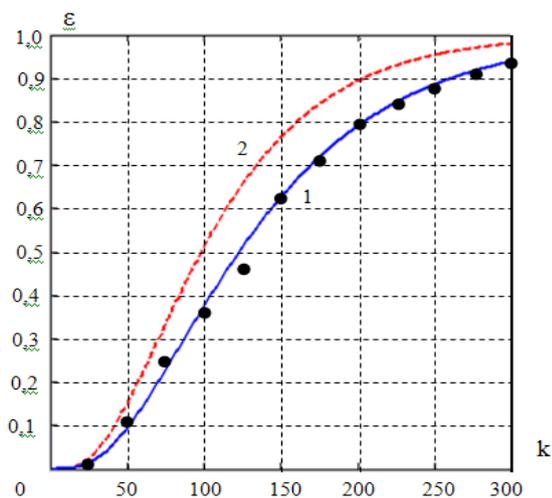


Рисунок 6. Кинетика грохочения проходových частиц: 1- кривая извлечения, рассчитанная по нелинейной модели и опытные данные; 2 – кривая извлечения, рассчитанная по линейной модели

На рисунке 6 представлены результаты кинетики серии опытов по грохочению бинарной смеси, каждый из которых проводился при одинаковых параметрах вибровоздействия рабочего органа на слой материала: частота колебаний – 15 Гц, амплитуде колебаний - 10 мм. Начальная концентрация мелких частиц в смеси составляла 50%. Число ячеек принималось $m=4$. 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.

Сравнение расчетной и экспериментальной кинетики грохочения позволили определить безразмерные стохастические параметры модели (коэффициент диффузии, скорость сегрегации, скорость проникновения частиц через отверстия сита). Они составили $v_0=0,026$, $d=0,005$, $v_{f0} = 0,21$. Результаты расчетов проверялись сравнением экспериментального и расчетного распределения частиц мелкой фракции по виброоживленному слою. На рисунке 7 представлены опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и относительное количество их извлечения в подситовое пространство. На рисунке 8 представлены результаты фотосъемки распределения мелких частиц по слою и в подситовом пространстве одного из серии опытов. Обработка экспериментальных данных с помощью модели показала, что начальные значения стохас-

тических коэффициентов диффузии и сегрегации для процессов перемешивания и фракционирования совпадают.

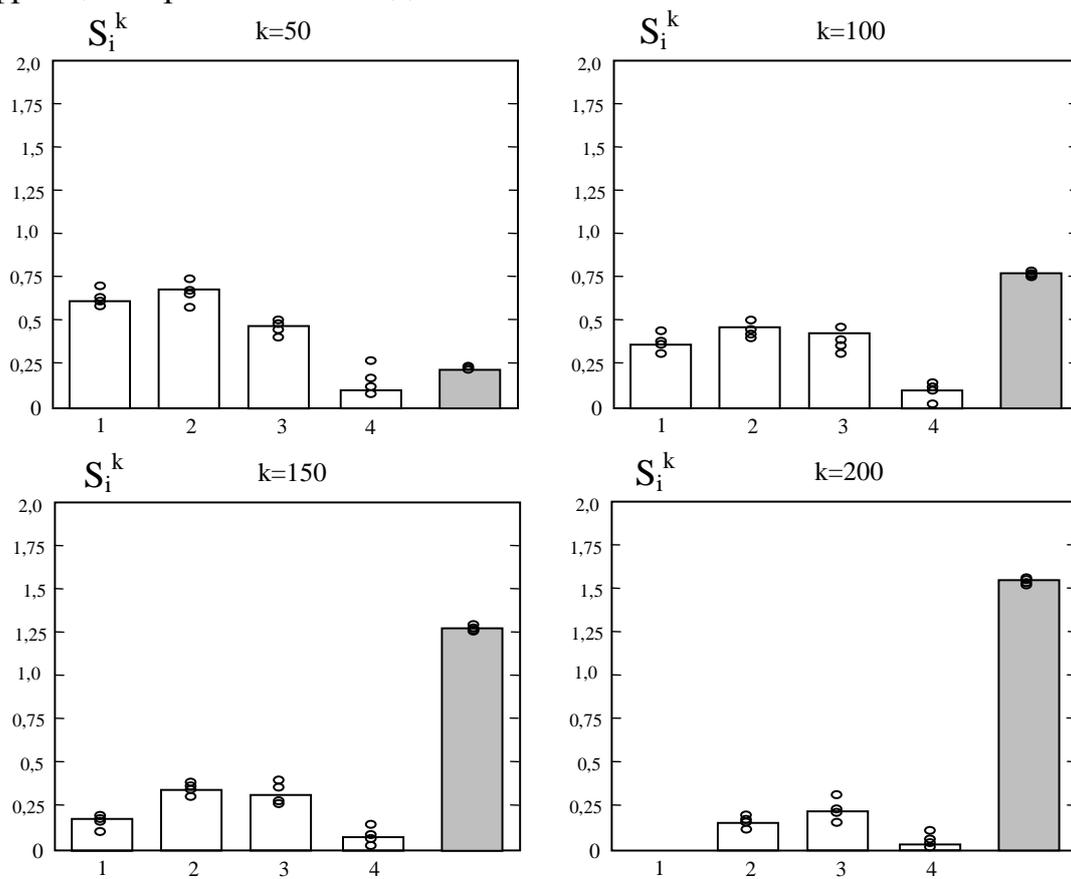


Рисунок 7. Опытные и расчетные данные эволюции распределения мелких частиц по высоте слоя и их извлечение в подситовое пространство

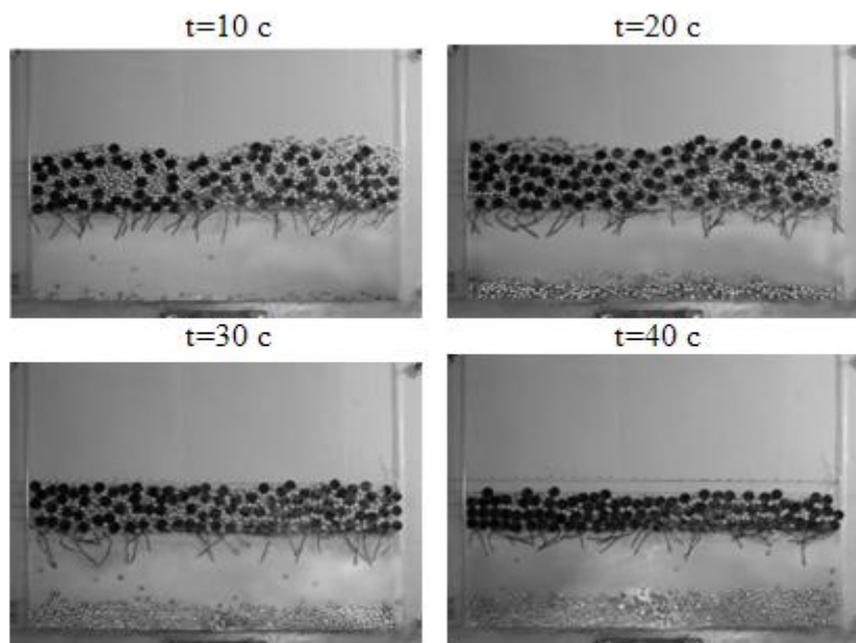


Рисунок 8. Результаты фотосъемки процесса фракционирования бинарной смеси частиц в различные моменты времени



Рисунок 9. Лабораторная установка для периодического грохочения реальных сыпучих материалов

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 9. В качестве исходного материала использовалась двухкомпонентная смесь, состоящая из зерен гороха и пшена. 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 рисунках 10 и 11 показаны зависимости извлечения мелких фракций от их начальной концентрации в исходном материале и от начальной высоты слоя.

ного в начальный момент времени на просеивающей поверхности лабораторной установки. На рисунках 10 и 11 показаны зависимости извлечения мелких фракций от их начальной концентрации в исходном материале и от начальной высоты слоя.

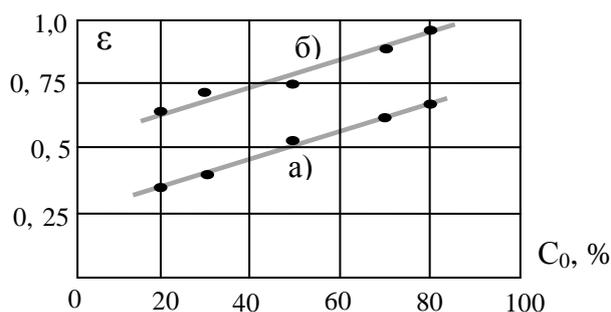


Рисунок 10. Зависимость извлечения мелких фракций от их начальной концентрации: (а) - время грохочения 5 секунд, (б) - время грохочения 10 секунд

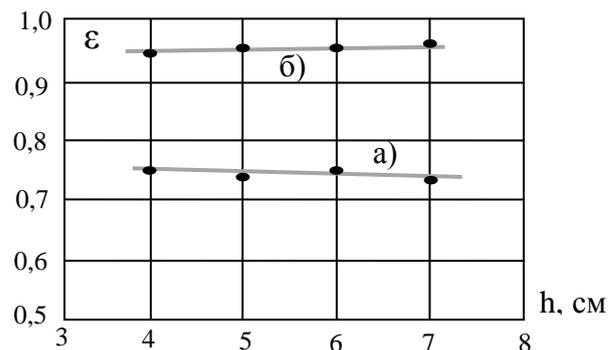


Рисунок 11. Зависимость извлечения мелких фракций от их начальной высоты слоя: (а) - время грохочения 5 секунд, (б) - время грохочения 10 секунд

В четвертой главе представлено внедрение результатов расчетно-экспериментальных исследований процесса фракционирования сыпучих материалов в промышленность. Результаты ситового анализа гравийно-песчаных материалов различных месторождений Ивановской области показали, что содержание частиц мелких фракций в исходном сырье колеблется от 42,5 до 90,9%. Для сокращения затрат на транспортирование песчано-гравийных смесей от карьера до дробильно-сортировочного завода ООО «Хромцовский карьер» нами предложено использовать технологическую схему предварительного обогащения, состоящую из установленных последовательно грохотов ГИТ-41и ГИЛ-41, для отбора некондиционных частиц вблизи добычного забоя на вновь разрабатываемом месторождении «Жирославка». Ожидаемый экономический эффект от предлагаемых мероприятий составит 1680000 рублей в год.

Из анализа патентной и технической литературы следует, что вибрационные грохоты, у которых просеивающие поверхности активно воздействуют на сыпучий слой, более эффективны, чем грохоты, у которых сита совершают колебания по стандартным траекториям. Поэтому нами предложена новая конструкция вибрационного грохота, у которого технический эффект 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 12 изображена, предложенная нами, конструкция вибрационного грохота.

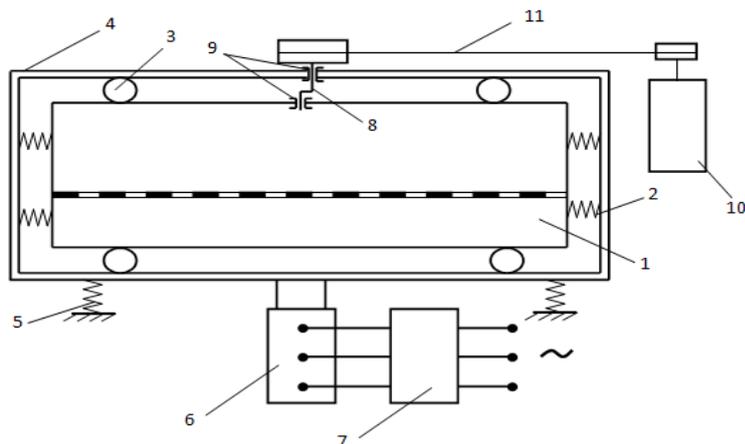


Рисунок 12. Новая конструкция вибрационного грохота: 1 - короб с просеивающей поверхностью; 2 - упругие элементы; 3 - кинематические соединения; 4 - подвижная рама; 5 - амортизатор; 6 - вибропривод; 7 - преобразователь частоты; 8 - вертикальный эксцентриковый вал; 9 - подшипники; 10 - электродвигатель; 11 - ременная передача.

Предлагаемое выполнение вибрационного грохота, позволяет получить пространственные траектории колебаний короба с просеивающей поверхностью, повышающие подвижность частиц в слое сыпучего материала, что приводит к увеличению скорости конвективного переноса мелких частиц к сите и к увеличению скорости их проникновения через его отверстия.

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 виброоживленном 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 со-

держанием песка (фракция 0-5 мм) 66, 4% в карьере месторождения «Жиротлавка», 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.

Публикации по теме диссертации

в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК

1. Акулова, М.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит / М.В. Акулова, **А.П. Алешина**, Ал.В. Огурцов, Ан.В. Огурцов // Вестник МГСУ. -№2. – 2013. – С. 80-87.
2. Огурцов, В.А. 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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.

в патенте на полезную модель и свидетельствах

6. 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.
7. Свид. о госу-дарств. 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.
8. Свид. о госу-дарств. 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.

в прочих изданиях

9. **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.
10. **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.
11. 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.
12. 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.
13. **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 электро-технологии». Иваново: ИГЭУ, 2013. т.2. С. 346-348.
14. **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.
15. 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.
16. 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.
17. **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.
18. **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.
19. **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.
20. **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.
21. **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.

22. **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.

23. **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.

24. **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.

25. **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.