

*На правах рукописи*



**Гриценко Михаил Алексеевич**

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

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Огурцов Валерий Альбертович**

Официальные оппоненты: **Богданов Василий Степанович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Механическое оборудование» ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

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

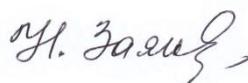
Ведущая организация: ФГБОУВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится 19 июня 2018 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д.20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpi.com](http://www.ivgpi.com)

Автореферат разослан 16 мая 2018 г.

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



Н.В. Заянчуковская

## Общая характеристика работы

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

**Степень разработанности темы.** Разработкой моделей грохочения и методик определения технологических параметров процесса занимались российские и зарубежные ученые: Л.А. Вайсберг, И.И. Блехман, В.А. Бауман, Е.А. Непомнящий, В.А. Перов, П.С. Ермолаев, И.В. Пономарев, О.Н. Тихонов, А.В. Кондратьев, В.С. Богданов, Р. Уорнер, Ф. Прокат, Э. Рамлер, О. Молерус, А. Майнелль, Х. Шуберт и многие другие. Наиболее перспективным подходом к исследованию закономерностей переработки сыпучих сред, в том числе грохочения, является теория цепей Маркова, которая эффективно описывает эволюцию дисперсных сред, где доминируют случайные свойства. Эта теория использовалась в работах В.Е. Мизонова, Р.М. Алояна, С.В. Федосова, В.П. Жукова, В.А. Огурцова, З. Бернотата, А. Бертье и других. В диссертационной работе развивается данный подход для моделирования процесса грохочения на аппаратах, у которых сито совершает сложные пространственные траектории колебаний.

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

### ***Задачи исследования***

1. Разработать новую конструкцию вибрационного грохота, обеспечивающую интенсивное воздействие сита на слой сыпучего материала за счет создания пространственных траекторий движения просеивающей поверхности с независимыми параметрами колебаний в плоскости сита и в направлении перпендикулярном этой плоскости.
2. Разработать ячеечную модель процесса грохочения, основанную на теории цепей Маркова, учитывающую пространственную траекторию движения просеивающей поверхности грохота.
3. Доказать эффективность процесса отсева на ситах, совершающих колебания по пространственным траекториям, в сравнении с процессом отсева на ситах, которые совершают колебания по типовым траекториям.
4. На основе динамической модели движения ансамбля частиц на вибрирующем сите разработать методику расчета скорости проникновения проходных частиц через просеивающую поверхность, учитывающую соотношение размера частиц к размеру отверстия сита, амплитуды и частоты горизонтальных и вертикальных колебаний грохота, частоту соударений частиц с просеивающей поверхностью.
5. Исследовать с помощью средств компьютерного моделирования зависимость вероятности проникновения частиц различной крупности через отверстия сита от параметров вибровоздействия грохота на сыпучую среду.
6. Исследовать влияние вибрационных режимов предложенной конструкции грохота на основные технологические показатели процесса фракционирования: эффективность отсева и производительность классифицирующего аппарата.
7. Доказать правомерность методики компьютерного определения скорости проникновения частиц через отверстия сита с помощью экспериментальных исследований процесса грохочения сыпучих материалов на установке периодического действия.
8. Разработать рекомендации по технологическим параметрам работы грохотов в промышленных условиях, обеспечивающих заданную эффективность процесса фракционирования.

### ***Научная новизна:***

1. Разработана ячеечная модель процесса грохочения для аппаратов, у которых просеивающая поверхность совершает колебания по сложным заранее заданным пространственным траекториям.
2. Предложена методика определения скорости проникновения частиц через отверстия сита для проходных частиц различной крупности, основанная на математическом описании движения ансамбля частиц над просеивающей поверхностью с помощью одномерной версии метода дискретных элементов. Учитываются параметры вертикальной составляющей пространственных колебаний сита грохота, коэффициенты восстановления скорости при ударе частиц друг о друга и о просеивающую поверхность.

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

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

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработана ячеечная модель процесса грохочения, отличающаяся от известных тем, что учитывает пространственные траектории колебаний сита грохота. Безразмерная скорость проникновения частиц через просеивающую поверхность в матрице переходных вероятностей ячеечной модели процесса грохочения определяется методами компьютерного моделирования. Разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских и проектных задач применялись на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область, ООО «Тейковская земельная компания»), где за счет замены просеивающей поверхности грохота уменьшена замельченность товарной фракции 5 – 10 мм. Используя методику определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» была предложена замена ирландского мобильной сортировочной дизельной установки Maximus 516 на передвижной сортировочный узел УМС-400 производства ЗАО «ДОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области, обеспечивающий необходимую производительность и качество отсева, для работы на «Душиловском» участке Новинкинского месторождения (Фурмановский район, Ивановская область). Ячеечная модель процесса грохочения сыпучего материала на вибрационном аппарате с пространственной траекторией колебаний сита включена в состав учебного курса для аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования».

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

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Ячеечная модель фракционирования сыпучего материала на грохоте, в котором сито совершает колебания по пространственным траекториям, в которой безразмерная скорость проникновения частиц через отверстия просеивающей поверхности определяется компьютерными методами.

2. Математическая модель движения ансамбля частиц над вибрирующей поверхностью грохота, основанную на одномерной версии метода дискретных

элементов, позволяющую описывать кинематические характеристики движение каждой частицы ансамбля с учетом соударений друг о друга и поверхностью сита грохота.

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

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

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

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

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

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

**Структура и объем работы.** Диссертация общим объемом 135 страницы, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, списка использованных источников (127 наименований).

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы, обозначена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, намечены цели и задачи исследования.

**В первой главе** приведен анализ современного состояния проблемы фракционирования сыпучих материалов на виброгрохотах, который показал, что конструкции вибрационных грохотов со сложной траекторией колебаний сита обеспечивают более интенсивный процесс фракционирования сыпучих материалов, чем аппараты, у которых сито совершает колебания по типовым траекториям. Анализ различных подходов к описанию закономерностей про-

цесса грохочения показал, что сторонники вероятностных моделей, использующие теорию Марковских процессов, и, в частности, ячеечные модели, наиболее полно описывают физическую картину миграции частиц в виброожигенном слое и процесс их проникновение через отверстия сита. Это позволяет использовать ячеечную модель для описания кинетики процесса грохочения на аппарате с пространственной траекторией колебаний сита.

**Во второй главе** приведен обзор конструкций вибрационных грохотов, у которых сито движется по сложным траекториям.

Предложена схема виброгрохота (рисунок 1), защищенная патентом на полезную модель, у которого сито совершает колебания по сложным заранее заданным пространственным траекториям.

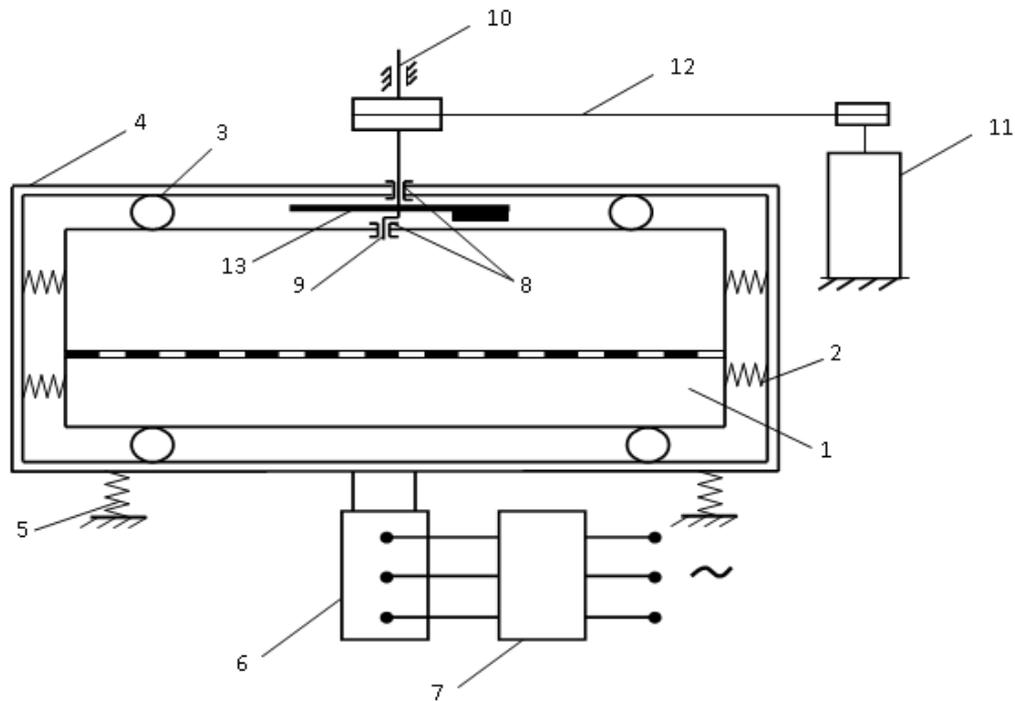


Рисунок 1. Схема вибрационного грохота с пространственной траекторией колебаний сита: 1 – корпус просеивающей поверхностью; 2 – упругие элементы; 3 – кинематические пары; 4 – подвижная рама, совершающая вертикальные колебания; 5 – амортизаторы; 6 – вибропривод вертикальных колебаний; 7 – преобразователь частоты; 8 – скользящие пары; 9 – кривошип, обеспечивающий горизонтальные круговые колебания корпуса с ситом в подвижной раме; 10 – вертикальный вал; 11 – электродвигатель; 12 – ременная передача; 13 – маховик с грузом, уравнивающий силы инерции корпуса

Независимые параметры колебаний сита в горизонтальном и вертикальном направлениях расширяют возможности вибровоздействия грохота на среду сыпучего материала, что повышает степень извлечения мелких частиц.

**В третьей главе** представлена математическая модель процесса грохочения, основанная на теории цепей Маркова, где ключевым моментом исследования является описание закономерностей процесса просеивания частиц через отверстия сита, как наименее изученного явления вибросепарации.

Рассмотрим движение проходных мелких частиц некоторой фракции по виброожигенному слою, который разбит на  $n-1$  ячеек толщиной  $\Delta u$  (рисунок

2, а). К ячейкам цепи слоя добавлена ячейка  $n$ , соответствующая подситовому пространству. Вероятности  $S_i$ , нахождения частицы в некоторый момент времени в  $i$ -ой ячейке, адекватны относительной концентрации частиц рассматриваемой фракции в этой ячейке. Набор вероятностей образует вектор-столбец состояния ячеек цепи:

$$S = [S_1 S_2 \dots S_m]^T, \quad (1)$$

где индекс  $T$  означает транспонирование вектора.

Через малый промежуток времени  $\Delta\tau$  осуществляются переходы рассматриваемых частиц из  $i$ -ой ячейки (рисунок 2, б) в соседние: вверх с вероятностью  $d$ , обусловленной диффузионным переносом; вниз с вероятностью  $d+v$ , обусловленную диффузионным и сегрегационным переносом. Вероятности перехода частиц из предпоследней ячейки цепи (рисунок 2в) следующие: вверх  $-d$ , вниз  $-v_f$  (вероятность выхода частиц в подситовое пространство).

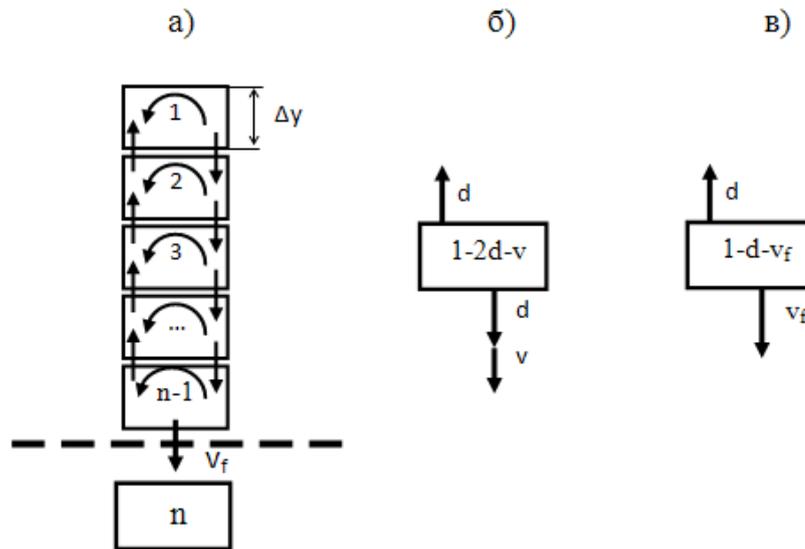


Рисунок 2. Схема ячеечной модели процесса (а), переходные вероятности из  $i$ -ой ячейки(б), переходные вероятности из предпоследней ячейки слоя сыпучего материала (в)

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

$$S^{k+1} = P S^k, \quad (2)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, определяемая как

$$P = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v+d & 1-v-2d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v+d & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-d-v_f & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Выход частиц в подрешетное пространство на каждом переходе может быть рассчитан по формуле

$$q(k) = S_{m-1}^k v_f. \quad (4)$$

Вероятность выхода частиц в подситовое пространство определяется как

$$v_f = \mathcal{P} p_f \Delta \tau, \quad (5)$$

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

Кинетика извлечения проходowych частиц рассчитывается как

$$E(k) = \sum_{k=1}^k q(k). \quad (6)$$

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

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

Расчетная схема процесса движения частиц над ситом показана на рисунке 3.

Число соударений частиц с ситом определяется вертикальной составляющей пространственных колебаний просеивающей поверхности грохота, которая меняется по закону  $y_0(t) = A \sin \omega t$ , где  $A$  и  $\omega$  – амплитуда и частота вертикальной составляющей колебаний. Над поверхностью с возможностью свободного движения в вертикальном направлении движутся  $m$  шарообразных частиц радиусом  $r$  с координатами центров  $y_j(t)$ .

Считается, что в промежутках

времени между столкновениями частицы движутся по закону свободного падения.

Кинематические уравнения расчета этого движения имеют вид:

$$v_j^{i+1} = v_j^i - g \Delta t, \quad (8)$$

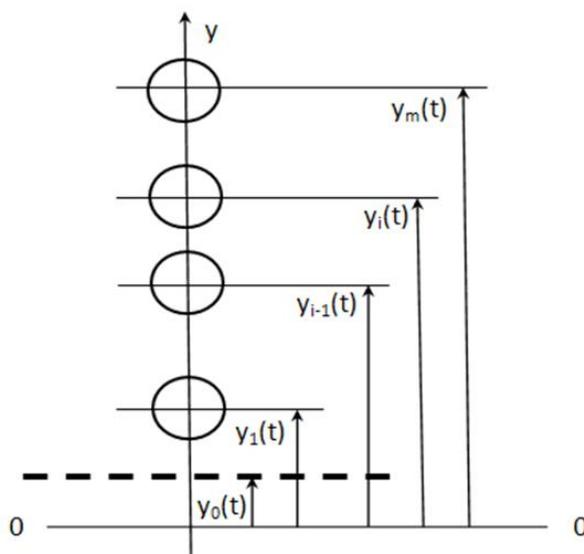


Рисунок 3. Расчетная схема процесса движения частиц над ситом

$$y_j^{i+1} = y_j^i + v_j^i \Delta t, \quad (9)$$

где  $v$  – скорость частицы,  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени,  $i$  – номер шага. На каждом временном шаге положения частиц проверяются на наличие или отсутствие удара. Соотношения удара рассчитываются различно для нижней частицы ( $j=1$ ) и остальных ( $j=2, \dots, m$ ) частиц.

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

$$y_1^{i+1} := y_0^{i+1} + r, \quad (10)$$

$$v_1^{i+1} := -(v_1^{i+1} - v_0^{i+1})k_1 + v_0^{i+1}, \quad (11)$$

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

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

$$y_j^{i+1} := y_{j-1}^{i+1} + 2r, \quad (12)$$

$$v_{j-1}^{i+1} := \frac{1-k}{2} v_{j-1}^{i+1} + \frac{1+k}{2} v_j^{i+1}, \quad (13)$$

$$v_j^{i+1} := \frac{1+k}{2} v_{j-1}^{i+1} + \frac{1-k}{2} v_j^{i+1}, \quad (14)$$

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

На рисунке 4 представлен закон движения нижней частицы ансамбля из 5-ти частиц над ситом, совершающем колебания с амплитудой 5 мм и частотой  $100 \text{ с}^{-1}$ .

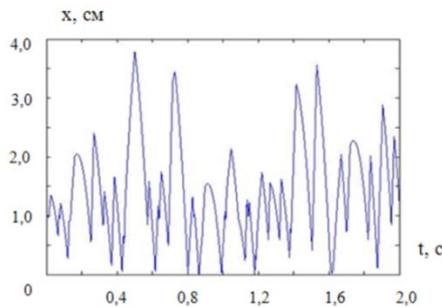


Рисунок 4. График закона движения нижней частицы ансамбля из 5-ти частиц над ситом

На рисунке 5 показано влияние частоты колебаний просеивающей поверхности на частоту контактов частицы с ситом  $\vartheta$  при различных амплитудах его колебаний.

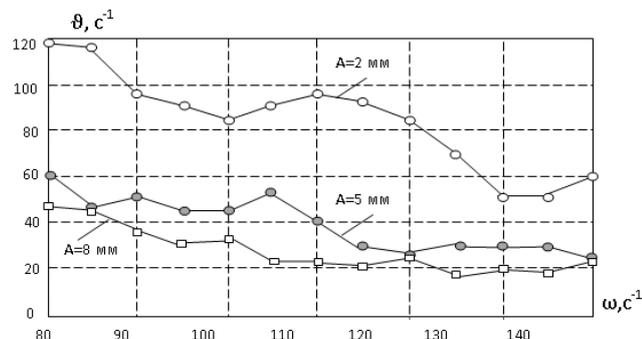


Рисунок 5. Влияние частоты колебаний просеивающей поверхности на частоту контактов частицы с ситом

Вероятность беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита при одном соударении, как правило, определится по формуле Годена – Андреева

$$p_f = \varphi \left(1 - \frac{\delta}{D}\right)^2, \quad (15)$$

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

$$\varphi = D^2 / (D+d)^2, \quad (16)$$

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

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

Рассмотрим пример такого моделирования, когда частица диаметром 3 мм, положение которой над ситом задавалось случайным образом, двигалась по закону свободного полета к ситам, которое совершало колебательное движение. Размер отверстия сита составлял 5 мм, диаметр проволоки – 1 мм. По рисунку 6, на котором представлено изменение вертикальной координаты падения частицы от времени, проверялось наличие или отсутствие соприкосновения частицы с проволокой сита.

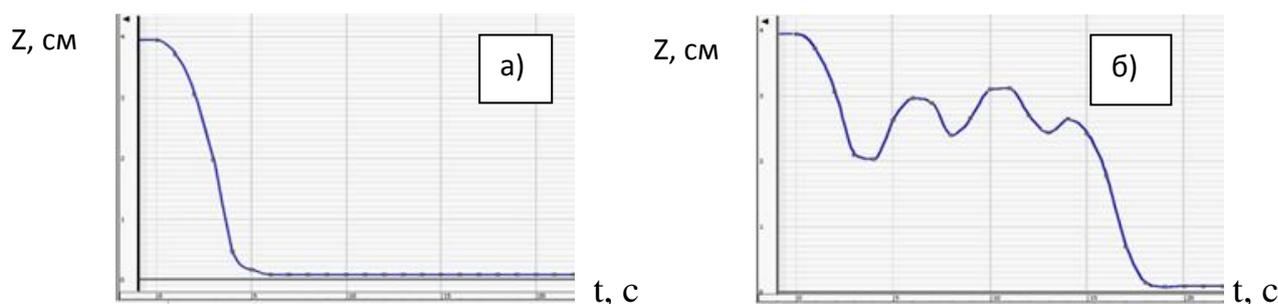


Рисунок 6. Изменение вертикальной координаты падения частицы от времени:  
 а – частица беспрепятственно проходит через сито;  
 б – частица задевает проволоку сита

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

Для сокращения времени компьютерных экспериментов в одном опыте над ситом располагалось 100 частиц, положение которых задавалось случайным образом (рисунок 7, а). Одновременно достигнув поверхности сита, некото-

рые частицы свободно проникали через просеивающую поверхность. Подсчитывалось их количество. Другие частицы задевали проволоку сита (рисунок 7, б). При фиксированных значениях размера частицы, частоты и амплитуды колебаний сита менялось начальное положение частиц. Опыты прекращались тогда, когда вероятность беспрепятственного проникновения частиц через сито становилась практически постоянной.

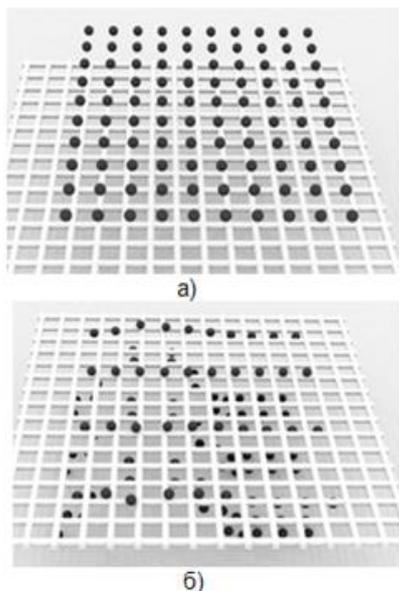


Рисунок 7. Проникновение частиц через отверстия сита

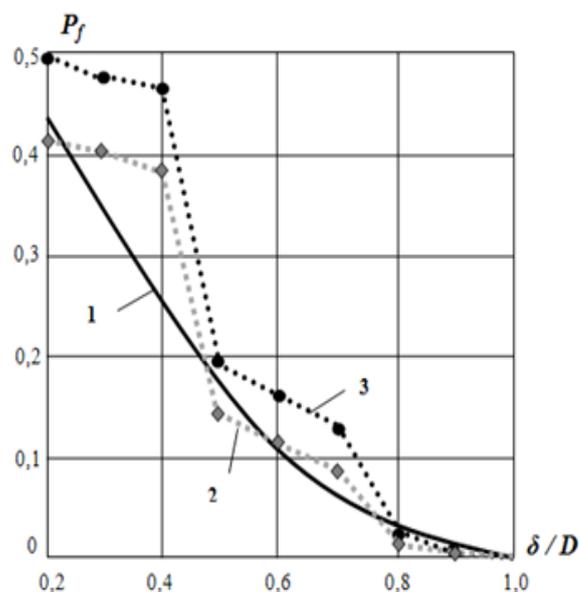


Рисунок 8. Зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности

На рисунке 8 представлена зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности. Кривая 1, рассчитанная по уравнению (15), соответствует неподвижному сити. Ломанная кривая 2 построена с помощью имитационной модели процесса проникновения частиц через сито, совершающего круговые колебания в вертикальной плоскости. Ломанная кривая 3 соответствует случаю, когда сито совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости. Амплитуда вертикальных и горизонтальных колебания – 2 мм, частота –  $70 \text{ с}^{-1}$ .

Из рисунка 8 следует, что вероятности проникновения частиц через отверстия сита при одном соударении, когда сито неподвижно и совершает колебания, могут существенно отличаться. Учет подвижности сита при определении скорости проникновения частиц через просеивающую поверхность повышает точность расчета кинетики грохочения.

Результаты компьютерных экспериментов показали, что вероятность прохождения частицы через отверстие сита при одном соударении определяется горизонтальной составляющей пространственных колебаний сита грохота. При подаче сыпучего материала на грохот высота слоя из-за вибровоздействия сита на материал увеличивается. Проходным частицам требуется большее время для достижения просеивающей поверхности. В данной рабо-

те предлагается при расчете производительности грохота учитывать важную характеристику слоя, которой является величина его средней по высоте порозности – доли свободного пространства между частицами в объеме, который занимает слой сыпучего материала на сите грохота. В одномерной модели движения частиц над вибрирующим ситом порозность есть доля свободного пространства между частицами в объеме, ограниченном параллелепипедом с квадратным основанием размером  $2r$  и может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon^i = 1 - \frac{m\pi r}{3(y_m^i - y_1^i + 2r)}. \quad (17)$$

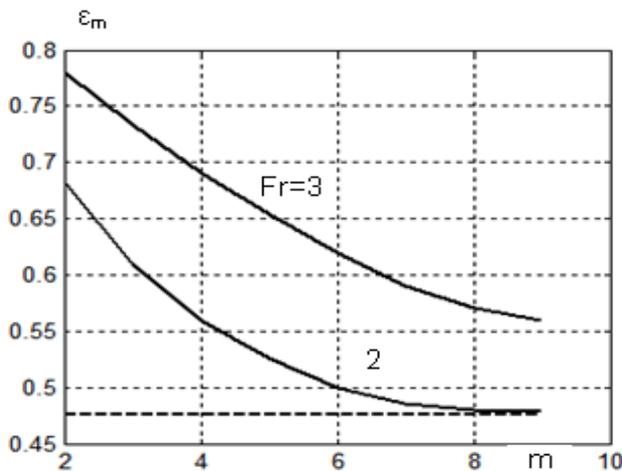


Рисунок 9. Влияние числа частиц в слое на среднюю порозность при различных значениях числа Фруда ( $k=0,7$ ;  $A=10$  мм; ---- - порозность при плотном контакте)

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

Мгновенная порозность меняется вслед за колебаниями верхней границы слоя, то есть его высоты, но ее среднее значение  $e_m$  за достаточно большой промежуток времени остается постоянным. Очевидно, что порозность зависит от числа частиц в слое и параметров колебаний грохота. Комплексной характеристикой интенсивности колебаний сита служит число Фруда  $Fr = A\omega^2/g$ , где  $g$  -

ускорение свободного падения. На рисунке 9 показано, как меняется порозность с увеличением числа частиц в слое при двух значениях числа Фруда.

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

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

**В четвертой главе** рассматривается расчетно-экспериментальное исследование процесса фракционирования сыпучего материала по вибрирующей просеивающей поверхности. Используется лабораторная установка, представляющая собой плоский экран из прозрачных пластин, внутри которого находятся плоские частицы: крупные диаметром 11 мм, мелкие – 4 мм.

Экран, соединенный эксцентриковым валом с электродвигателем, совершает круговые колебания. Экран разделен на две части проволочным ситом. Частицы могут перемещаться в надситовом пространстве друг относительно

друга. Мелкие частицы проникают в подситовое пространство через отверстия сита, которые могут иметь размер 5 или 10 мм.

На рисунке 10 показано положение мелких частиц в надситовом и подситовом пространстве в различные моменты времени.

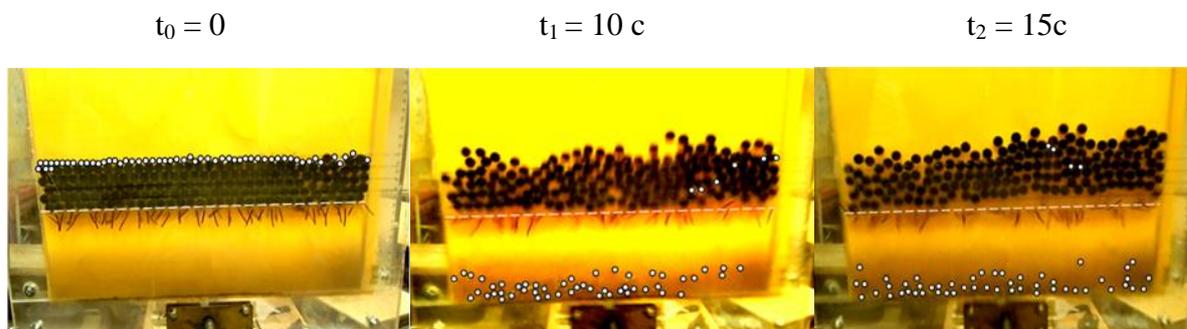


Рисунок 10. Положение мелких частиц в различные моменты времени

Эксперименты проводились при следующих условиях: амплитуда колебаний сита – 5 мм, частота –  $100,5 \text{ c}^{-1}$ , размер отверстий сита – 10 мм. По предлагаемой математической модели для данных условий грохочения в результате расчета определена вероятность проникновения частиц через отверстия сита, которая составила  $v_f = 0,21$ . Идентификация расчетных и средних опытных данных кинетики извлечения мелких фракций из исходной смеси позволила найти стохастические коэффициенты модели: безразмерный коэффициент макроdiffузии  $d=0,0013$  и безразмерную скорость сегрегации  $v=0,015$ . На рисунке 11 приведены опытные и расчетные кинетики грохочения двухкомпонентной смеси. Кривая 1 кинетики и точки соответствуют экспериментальным данным, полученным из серии опытов при грохочении двухкомпонентной смеси при данном режиме.

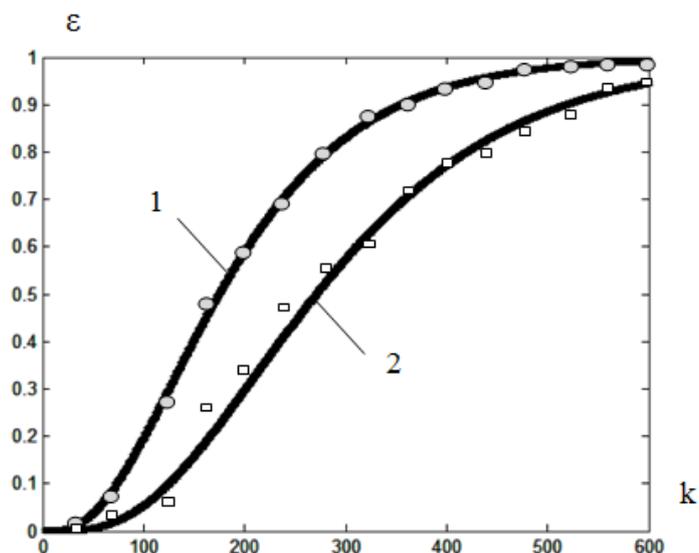


Рисунок 11. Кинетика грохочения двухкомпонентной смеси частиц

Кривая 2 получена расчетным путем и прогнозирует результаты другой серии опытов, которые проводились в тех же условиях, но размер отверстия сита составил 5 мм. Для этой серии опытов расчетная вероятность проникновения частиц через отверстия сита составила  $v_f = 0,011$ . Для построения кривой 2 использовались стохастические коэффициенты, полученные из первой серии опытов. Расхождение экспериментальных и опытных данных не превышало 10 %, что доказывает адекватность предлагаемой модели кинетики грохочения исследуемому процессу и прогностические возможности методики определения вероятности проникновения частиц через отверстия сита.

**Пятая глава** посвящена реализации результатов работы в промышленных условиях. Разработанные модели, программно-алгоритмическое обеспечение, решение на их основе конструкторский и проектных задач применялись на асфальтобетонном заводе ДС-168 (Тейковский район, Ивановская область), где за счет замены просеивающей поверхности грохота снижена засоренность частицами мелких фракций сыпучего материала, направляемого в смеситель для приготовления асфальтобетонной смеси. Используя методику определения технологических показателей процесса грохочения в группе компаний «Ивановское карьероуправление» был рекомендован передвижной сортировочный узел УМС-400 производства ЗАО «ДОБМАШ» г. Выкса Нижегородской области, заменивший ирландскую сортировочную установку Maximus 516, обеспечивающий необходимую производительность и качество отсева. Ячеечная модель процесса грохочения сыпучего материала на вибрационном аппарате с пространственной траекторией колебаний сита включена в состав учебного курса для аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования».

**В заключении** приведены итоги исследования и рекомендации:

1. Анализ современных работ, в которых изложены математические модели процесса грохочения, показал, что влияние траектории колебаний сита грохота на кинетику извлечения частиц мелких фракций из сыпучей среды, подаваемой на просеивающую поверхность не изучено. При определении вероятности проникновения мелких частиц через отверстия сита грохота используется модель движения одиночной частицы. Не учитывается силовое взаимодействие частиц при определении характеристик виброоживленного слоя сыпучего материала на сите грохота. Данные допущения, используемые в моделях при расчете степени извлечения мелких частиц из исходного материала и производительности грохота, приводят к их существенному завышению. Достоверные значения этих параметров получены из разработанной методики расчета кинетики грохочения для аппаратов со сложной пространственной траекторией колебаний сита.

2. Предложена методика определения скорости проникновения проходных частиц через просеивающую поверхность. Учтены закономерности движения и силового взаимодействия ансамбля частиц над ситом грохота, позволившие рассчитать частоту соударений частиц с просеивающей поверхностью. Опре-

делена вероятность проникновения частиц через отверстия сита при их однократном контакте, в зависимости от соотношения размера частиц к размеру отверстия сита, амплитуды и частоты колебаний грохота. Данная методика может использоваться для аппаратов с типовой траекторией колебаний сита.

3. Предложена новая конструкция вибрационного грохота со сложной пространственной траекторией колебаний сита. Расчет кинетики грохочения сыпучих материалов на новом аппарате по предложенной методике позволил спрогнозировать существование более эффективных режимов грохочения на ситах такого грохота, чем на ситах грохотов с типовыми траекториями колебаний. Скорость проникновения частиц через отверстия сита на новом аппарате может превышать скорость проникновения на типовом в 1,8 раза.

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

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

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

либо максимальную производительность грохота при заданном качестве фракционирования.

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

1. **Гриценко, М.А.** Исследование сегрегации частиц в виброожиженном слое при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье / **М.А. Гриценко**, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, В.А. Огурцов // Вестник МГСУ. - №1. – 2017. – С. 70 – 76.
2. 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.
3. Балагуров, И.А. К расчету характеристик виброожиженного слоя сыпучего материала/ И.А. Балагуров, **М.А. Гриценко**, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов// Вестник ИГЭУ. – Вып. 4 – 2015. – С. 55-58.
4. Огурцов, В.А. Определение вероятности проникновения частиц мелкодисперсного материала через отверстия ситового тканого полотна при вибросепарации / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, **М.А. Гриценко**, А.В. Огурцов// Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С. 262 – 265 (издание, индексируемое Scopus) .

**в патентах**

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

**в прочих изданиях**

6. **Гриценко, М.А.** Новые требования к фракционному составу щебня и гравия и их влияние на приготовление асфальтобетонной смеси / **М.А. Гриценко** // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Поиск-2016». Иваново: ИВГПУ, 2016. №1, С. 500 – 501.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Алешина, А.П. Особенности грохочения песчано-гравийных смесей с низким содержанием каменного материала/А.П. Алешина, Е.Р. Брик, **М.А. Гриценко** // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Поиск-2015». Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 292 – 293.
12. Алешина, А.П. Исследование процесса фракционирования песчано-гравийных смесей / А.П. Алешина, **М.А. Гриценко**, Е.Р. Брик // Материалы X Международной научно-

технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2015». Иваново: ИГЭУ, т. 4, 2015. С.232 - 234.

13. Алешина, А.П. Моделирование кинетики грохочения сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье /А.П. Алешина, **М.А. Гриценко**, А.М. Фатахетдинов, В.А. Огурцов// Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии. Иваново: ИГЭУ, 2015. т.2. С. 326-331.

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