

На правах рукописи



Фатахетдинов Артем Мясудович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА
ВИБРАЦИОННОГО СМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Огурцов Валерий Альбертович

Официальные оппоненты: **Мизонов Вадим Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Шарапов Рашид Ризаевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Механизация строительства» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»

Защита состоится 15 октября 2021 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета www.ivgpi.com

Автореферат разослан «__» сентября 2021г.

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

 Н.В. Заянчуковская

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Разнообразие видов сухих строительных смесей позволяет существенно ускорять процессы строительства. Чем масштабнее стройка, тем выгоднее становится их применение. Использование сухих смесей в отделочных работах позволяет снизить трудозатраты на строительной площадке. Одним из основных процессов технологической линии производства сухих строительных смесей является смешивание и распределение малых добавок и премиксов в основной массе продукта. Однородность материала есть основное требование качества современных строительных смесей. Эксплуатационные характеристики строительных смесей будут зависеть от равномерности распределения отдельных компонентов в ее объеме. Неоднородность содержания малых добавок, вызванная некачественным перемешиванием, может негативно сказаться на эксплуатационных свойствах смеси. На качество их производства огромное влияние оказывает эффективность работы смесителей, а также сам процесс перемешивания. В качестве смесительного оборудования зачастую используются смесители принудительного действия, имеющие сложное аппаратное оформление и требующие использования электроприводов большой мощности. Применение вибрационных смесителей периодического и непрерывного действия имеет существенное преимущество, так как используются источники вибрации малой мощности. Вибровоздействие на сыпучую среду приводит к эффекту виброоживления смеси, силы сухого трения между частицами ослабевают, и они начинают интенсивно перемешиваться. В условиях производства экспериментальное исследование кинетики перемешивания остается единственным вариантом расчета и проектирования смесителей. Однако даже незначительные изменения эксплуатационных характеристик и режимов работы смесителей требуют повторения всего объема экспериментальных исследований. Поэтому представляется актуальным решение этого противоречия с помощью современных математических моделей перемешивания, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на сыпучую среду и реальные факторы производства сухих строительных смесей.

Степень разработанности темы. Моделированием процесса смешивания сыпучих сред занимались отечественные и зарубежные исследователи: В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов, А.И. Зайцев, В.Ф. Першин, Ю.И. Макаров, В.Е. Мизонов, Д.О. Бытев, А.Б. Капранова, И. Сатомо, О. Варрен, Л. Фан, С. Ватсон, Ж. Маккарти, Ф. Берtrand и многие другие. Их исследования посвящены совершенствованию техники и технологии перемешивания сыпучих сред. Наиболее перспективным подходом к исследованию процессов переработки сыпучих сред, в том числе смешивания, является теория цепей Маркова, которая эффективно описывает эволюцию дисперсных сред. Эта теория использовалась в работах В.Е. Мизонова, С.В. Федосова, В.П. Жукова, Е.А. Баранцевой, З. Бернотата, А. Бертье и других. В диссертационной работе развивается данный подход для моделирования процесса смешивания в вибрационных смесителях.

Цель работы – разработка новых подходов к исследованию процесса смешивания на основе новой более достоверной расчетно- экспериментальной информации о кинетике процесса для выбора технологических параметров работы смесителя, обеспечивающих повышение качества смеси.

Объектом исследования в работе являлись формирование фракционного состава продуктов смешивания сыпучих материалов и поиск возможностей управления его формированием с помощью параметров колебания смесителя с целью повышения эффективности процесса.

Предмет исследования – процессы непрерывного и периодического вибрационного смешивания сыпучих смесей.

Научная гипотеза состоит в предположении равенства скоростей сегрегации и коэффициентов макроdiffузии частиц сыпучих материалов в процессах фракционирования и смешивания в виброоживленном слое, если операции проводятся с одними и теми же смесями при одинаковых вибрационных режимах.

Задачи исследования

1. На основе теории цепей Маркова разработать математические модели формирования качества смесей сыпучих сред в вибрационных смесителях периодического и непрерывного принципов действия, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на сыпучую среду.
2. Выполнить экспериментальные исследования процессов фракционирования и смешивания различных компонентов с помощью лабораторных установок периодического принципа действия для определения стохастических параметров моделей и верификации с опытными данными.
3. Провести проверку адекватности разработанных моделей по локальным и интегральным характеристикам процесса смешивания.
4. Определить параметры вибрационного воздействия на смешиваемые компоненты, обеспечивающие повышение качества смесей.
5. Реализовать расчетно-экспериментальные исследования процесса смешивания в промышленных условиях.

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели процессов смешивания в аппаратах периодического и непрерывного принципов действия, позволяющие оценивать влияние параметров колебаний смесителя на качество готовой продукции, основанные на теории цепей Маркова, эффективно описывающую эволюцию процессов переработки дисперсных сред и учитывающую многообразие факторов, определяющих стохастическую природу процесса смешивания.
2. Теоретически описано и экспериментально подтверждено равенство скоростей сегрегации и коэффициентов макроdiffузии процессов периодического смешивания и фракционирования сыпучих сред, проводимых с одной и той же смесью при одинаковых амплитудах и частотах вибрации установок, что позволило создать расчетно-экспериментальный метод определения стохастических параметров модели смешивания из тестовых опытов по виброклассификации сыпучих материалов.

3. Доказана адекватность ячеечной модели при периодическом смешивании изучаемому процессу по локальным и интегральным характеристикам процесса (эволюции состояния частиц ключевого компонента смеси по объему смесителя и степени неоднородности готового продукта).

4. Экспериментально доказано влияние амплитудо-частотных характеристик колебаний смесителей на качество продуктов смешивания.

Теоретическая и практическая значимость работы. Рассмотренная математическая модель позволяет рекомендовать режимные параметры вибрации смесителей с учетом свойств сыпучего материала, обеспечивающие наилучшее качество смешивания сухих строительных смесей. На основе представленной модели реализованы компьютерные методы расчета процесса получения сухих строительных смесей в вибрационных смесителях, выполненные в матричной среде пакета MATLAB. Разработанный метод описания движения частиц перемешиваемых компонентов может применяться как при модернизации, так и при проектировании вибрационного смесительного оборудования. Полученные результаты исследования процессов перемешивания включены в учебные курсы для бакалавров «Специальное оборудование для производства строительных материалов», магистров «Моделирование случайных процессов в строительстве» и аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования», «Механическое оборудование строительных предприятий».

Методология и методы исследования. Модель процесса смешивания сыпучих смесей основана на математическом аппарате теории цепей Маркова, описывающем поведение дисперсных сред со случайными свойствами, принципы которой использовались в работах В.Е. Мизонова, С.В. Федосова, Е.А. Баранцевой, З. Бернотата, А. Бертье и ряда других отечественных и зарубежных исследователей. Параметрическая идентификация модели выполнена на основе компьютерных и лабораторных исследований процессов перемешивания и фракционирования сыпучих смесей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель процесса смешивания сыпучих сред в смесителях периодического и непрерывного принципов действия, основанная на математическом аппарате теории цепей Маркова, учитывающая параметры колебаний смесителя.

2. Результаты компьютерных экспериментов с моделями процесса смешивания, которые позволили определить влияние скорости сегрегации и коэффициента макродиффузии на процесс миграции частиц по вибоожуженному слою при их перемешивании.

3. Методику определения скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии частиц ключевого компонента смеси для математических моделей процессов смешивания по результатам тестовых опытов периодического фракционирования той же смеси.

4. Доказательство адекватности модели процессу смешивания сыпучих материалов по эволюции состояния смеси в объеме смесителя и степени ее от-

клонения качества от равномерного распределения частиц ключевого компонента по высоте вибоожуженного слоя.

5. Апробацию и возможность внедрения результатов исследований на предприятиях, технологические линии которых включают операцию смешивания сыпучих сред.

Степень достоверности полученных результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием при моделировании процесса смешения апробированного аппарата теории цепей Маркова и удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных значений распределения ключевого компонента смеси по объему смесителя.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих отечественных и международных конференциях: «Надежность и долговечность машин и механизмов» VI Всероссийская научн.-практ. конф. Иваново: ИИГПС МЧС, 2015; «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2016» XIX практич. форум. Иваново: ИВГПУ. 2016; «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (Поиск-2017)». Межвузовская науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2017; «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск-2018)» Межвузовская науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2018; «Энергия 2019» XIV Всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ИГЭУ, 2019.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе, 5 работ в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК (из них 2 в изданиях, индексируемых Scopus).

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 126 страниц, состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, списка использованных источников (147 наименований).

Содержание работы

Во введении доказана актуальность темы, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, описываются цель и задачи исследования.

В первой главе на основе литературных источников проанализировано современное состояние проблемы смешивания сыпучих материалов, его моделирования и расчета. Показано, что смешивание конкретных сыпучих материалов должно проводиться при режиме вибрации, который обеспечивает максимальные показатели работы смесителя.

Во второй главе рассматриваются математические модели процессов смешения сыпучих материалов в аппаратах периодического и непрерывного принципа действия. Являясь сторонниками вероятностного подхода к описанию процессов переработки сыпучих сред, используем одномерную ячеечную модель теории цепей Маркова для расчета кинетики периодического смешивания. Миксер представляет собой массив из n ячеек идеального сме-

шения одинаковой высоты Δx . Схематично рабочий объем смесителя и возможные направления, и вероятности переходов из одной ячейки цепи в другую изображены на рисунке 1.

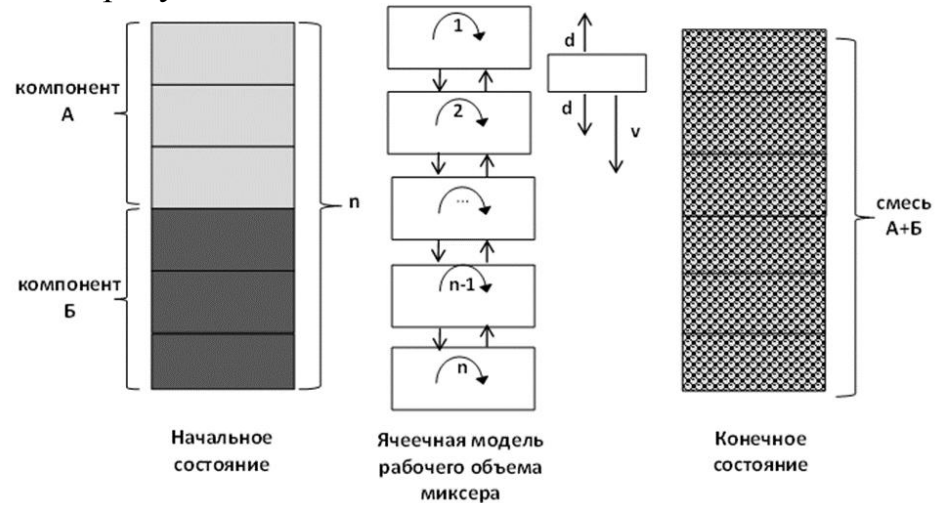


Рисунок 1. Схема ячеечной модели периодического смешивания

Состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени $t_k = (k-1) \Delta t$, где Δt - длительность одного перехода, k - номер перехода, т.е. дискретный аналог времени. В течение одного временного перехода Δt разрешены переходы только в соседние друг с другом ячейки цепи. Распределение частиц ключевого компонента смеси по ячейкам можно представить вектором-столбцом S :

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_{j-1} \\ S_j \\ S_{j+1} \\ \dots \\ S_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Тогда два последовательных состояния системы S^k и S^{k+1} связаны матричным равенством, описывающим кинетику процесса смешивания:

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

где P – матрица переходов размером $n \times n$, которая зависит от текущего вектора состояния и строится по следующим правилам. Переходы из верхних ячеек цепи в нижние возможны только при условии наличия свободного объема в нижних ячейках, что делает модель нелинейной. В общем случае, матрица P будет иметь вид:

$$P = \begin{pmatrix} 1-d-v(1-S_1^k) & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v(1-S_1^k) & 1-2d-v(1-S_2^k) & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v(1-S_2^k)+d & 1-2d-v(1-S_3^k) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d-v(1-S_{n-1}^k) & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v(1-S_{n-1}^k) & 1-2d-v(1-S_n^k) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где d – вероятность диффузионного перехода, v – вероятность сегрегации компонента. Вероятность перехода из ячейки с номером j в ячейку с номером $j+1$ равна $v(1-S_{j+1}^k)+d$ и учитывает тот факт, что способность ячейки принять компонент смеси ограничена свободным объемом этой ячейки. Принято, что максимальное количество смеси, вмещаемое ячейкой, равно 1. Таким образом, на каждом переходе матрица P осуществляет перераспределение ключевого компонента смеси.

Предполагая, что диффузионный перенос подчинен закону Фика, вероятности диффузионных переходов рассчитываются как $d=D \Delta t/\Delta x^2$, где D – коэффициент макродиффузии. Вероятности конвективных переходов определяются как $v=V \Delta t/\Delta x$, где V - скорость сегрегации ключевого компонента.

Для оценки текущего состояния качества смеси было использовано стандартное среднеквадратичное отклонение от идеального распределения компонентов смеси:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (s_{ij} - \bar{s}_i)^2} . \quad (4)$$

Определялось влияние параметров процесса смешивания на качество смеси и кинетику ее формирования. При отсутствии сегрегации с ростом диффузионного коэффициента происходит интенсификация процесса смешивания, в результате чего равномерность распределения ключевого компонента смеси достигается быстрее (рисунок 2).

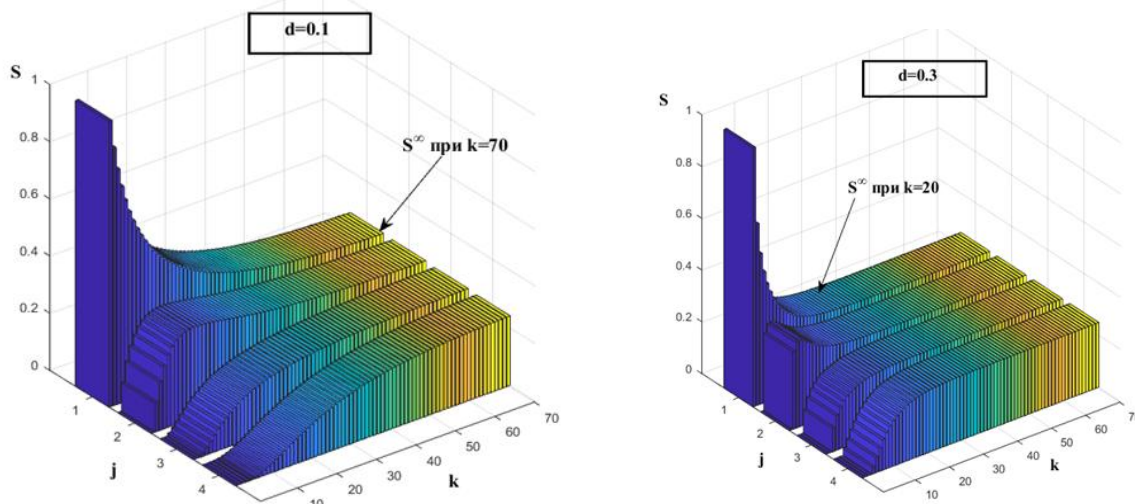


Рисунок 2. Эволюция состояния смеси при отсутствии сегрегации и различных значениях диффузионного коэффициента

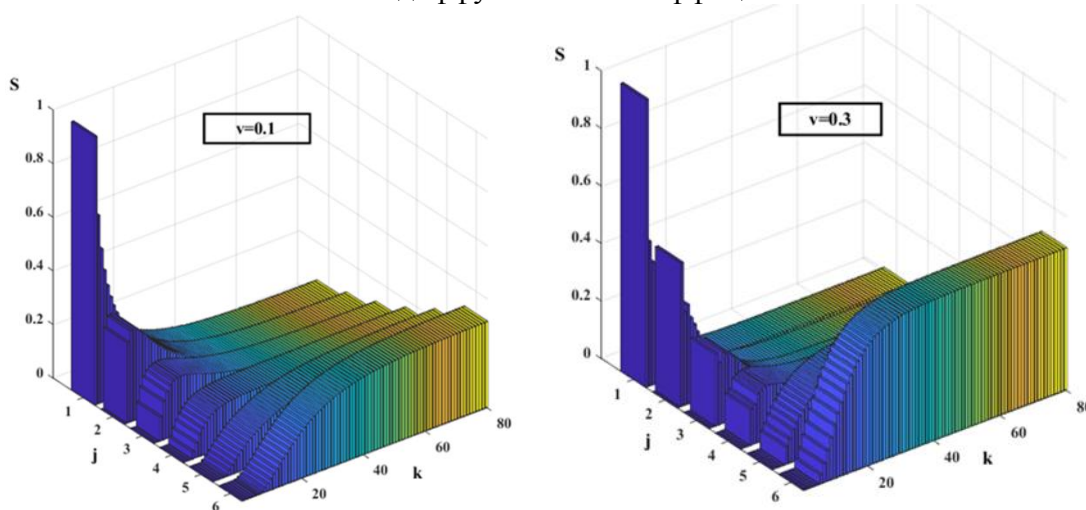


Рисунок 3. Эволюция состояния смеси при различных значениях вероятности сегрегации v и $d=0.2$

При наличии сегрегации асимптотическое распределение не является равномерным. Чем больше степень сегрегации, тем более неравномерным оказывается распределение в результате, со смещением в направлении действия сегрегации.

Оценивалось влияние параметров модели на качество формируемой смеси. Эволюцию неоднородности смеси удобно наблюдать, используя среднее квадратичное отклонение текущего состояния смеси от идеального состояния. На рисунке 4 показано влияние параметра v на качество формируемой бинарной смеси для цепи из шести ячеек, начальное положение ключевого компонента - в первой ячейке цепи.

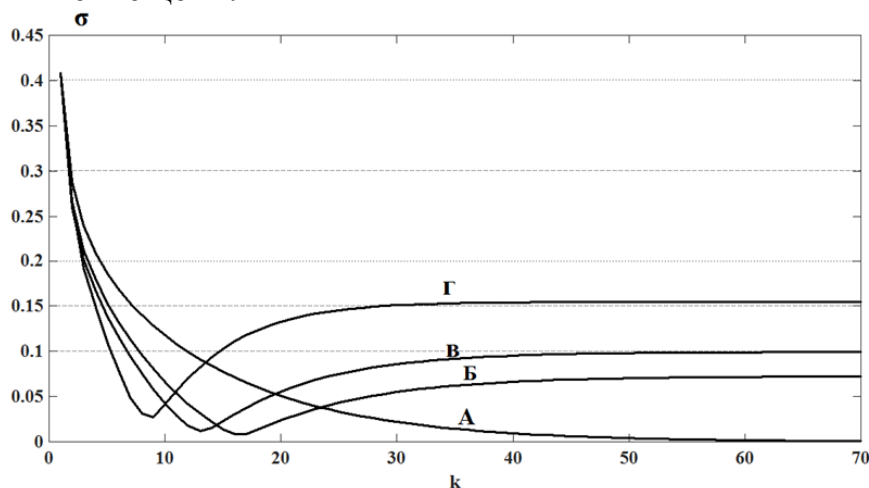


Рисунок 4. Эволюция неоднородности смеси: А – $v=0$; Б – $v=0.1$; В – $v=0.15$; Г – $v=0.3$ ($d=0.3$; $n=6$)

При отсутствии сегрегации ($v=0$), ключевой компонент равномерно распределен в основном, $\sigma \rightarrow 0$. При ненулевой сегрегации среднее квадратичное отклонение содержания ключевого компонента достигает минимума. С ростом v значение этого минимума смещается влево (т.е. по времени этот момент наступает раньше), но величина отклонения становится больше, что говорит об ухудшении качества смеси.

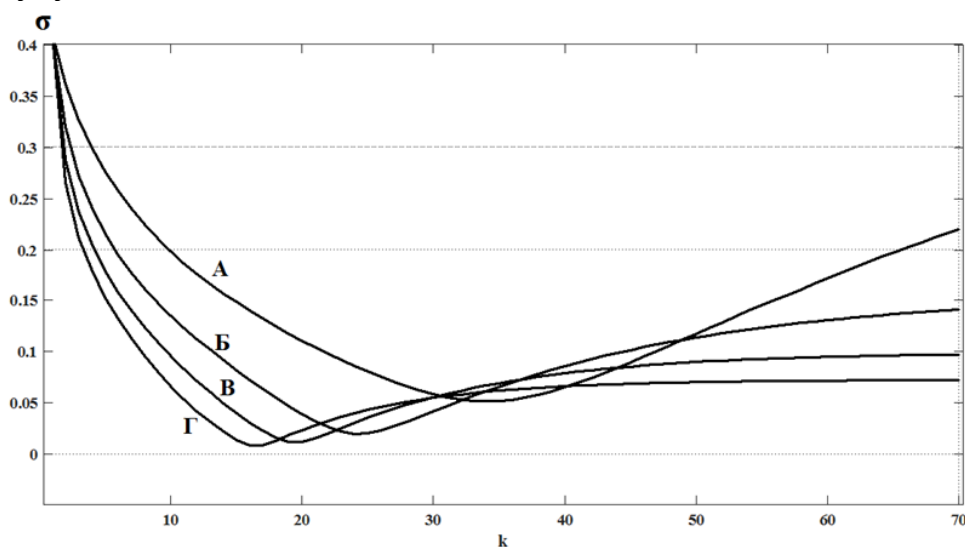


Рисунок 5. Влияние коэффициента диффузии на кинетику и качество получаемой смеси: А - $d=0$; Б - $d=0.1$; В - $d=0.2$; Г - $d=0.3$ ($v=0.1$; $n=6$)

При небольшой скорости сегрегации $v=0,1$ и отсутствии диффузии минимум неоднородности смеси достигается при 34 временных переходах. При увеличении d минимум неоднородности становится меньше и качественное перемешивание достигается быстрее (рисунок 5).

Таким образом, изменяя параметры v и d можно воздействовать на кинетику и качество формирования смеси.

Одномерная модель относится только к миграции частиц поперек виброожуженного слоя сыпучего материала. При непрерывном процессе она скорее качественно, чем количественно отражают закономерности движения частиц, проходящих в пространстве камеры смесителя. На рисунке 7 представлена двумерная ячеечная модель процесса смешения.

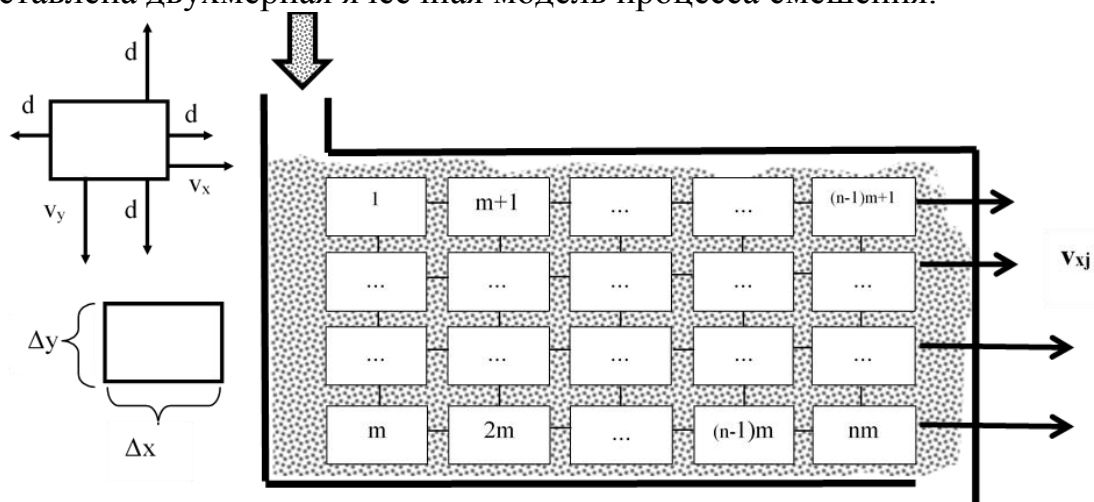


Рисунок 7. Двумерная ячеечная модель рабочего объема смесителя и направления выхода материала из ячейки

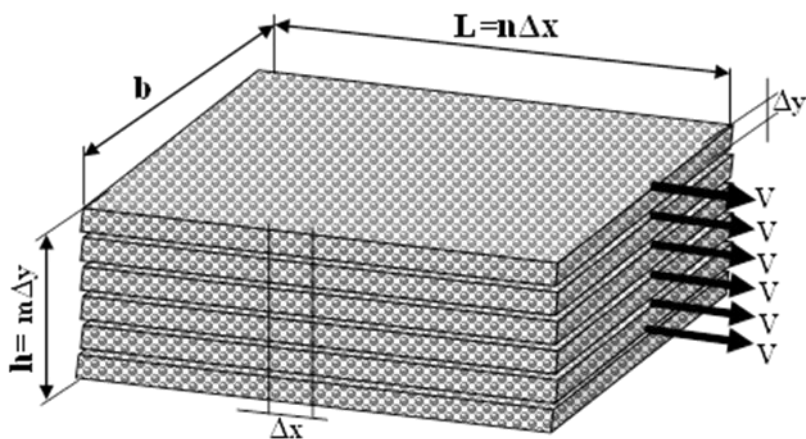


Рисунок 8. Структура потока материала в смесителе

Рабочий объем смесителя представлен двумерным массивом ячеек идеального смешения. Размерность массива ячеек равна $m \times n$. Количество столбцов n фиксировано, а число строк m может меняться в зависимости от уровня загрузки смесителя материалом.

Направления переходов из одной ячейки цепи в другую и соответствующие переходам вероятности изображены на рисунке 7.

Считается, что процесс транспортирования материала вдоль смесителя может происходить при равных скоростях движения соответствующих слоев.

Скорость транспортирования сыпучего материала вдоль смесителя находится из экспериментально зависимости разгрузочной характеристики сме-

сителя от его производительности $M=f(Q)$, которую в первом приближении может считаться линейной, M – масса материала, находящегося в смесителе, Q – массовый расход сыпучего материала, проходящего через смеситель.

Распределение содержания ключевого компонента по ячейкам в некоторый момент времени может быть представлено вектором-столбцом (5). Нумерация элементов вектора-столбца совпадает с нумерацией ячеек, показанной на рисунке 7. Первые m элементов вектора S_1, S_2, \dots, S_m соответствуют первому столбцу ячеек модели, последующие m элементов $S_{m+1}, S_{m+2}, \dots, S_{2m}$ соответствуют второму столбцу ячеек, и так далее, последние m элементов вектора $S_{(n-1)m+1}, S_{(n-1)m+2}, \dots, S_{nm}$ соответствуют последнему столбцу ячеек модели. Состояние процесса рассматривается в моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность, k – номер временного перехода (аналог текущего времени). В течение перехода Δt частицы из данной ячейки могут перейти только в соседние с ней ячейки, но не далее.

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \\ S_{m+1} \\ \dots \\ S_{m+m} \\ \dots \\ S_{(n-1)m+1} \\ \dots \\ S_{nm} \end{pmatrix} \cdot (5)$$

Эволюция состояния смеси описывается матричным равенством (2).

Верхний левый и нижний правый углы матрицы переходных вероятностей для случая $m=3$ показаны ниже:

$$P = \begin{pmatrix} p_s & d & 0 & d & 0 & 0 & \dots \\ d + v_y & p_s & d & 0 & d & 0 & \dots \\ 0 & d + v_y & p_s & 0 & 0 & d & \dots \\ v_{x1} & 0 & 0 & p_s & d & 0 & \dots \\ 0 & v_{x2} & 0 & d + v_y & p_s & d & \dots \\ 0 & 0 & v_{x3} & 0 & d + v_y & p_s & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix} \quad (6)$$

Вероятности диффузионных переходов определяются как $d_x=D_x \Delta t/\Delta x^2$, $d_y=D_y \Delta t/\Delta y^2$. D_x, D_y – коэффициенты макродиффузии в соответствующем направлении. Вероятности конвективных переходов определяются как $v_x=V_x \Delta t/\Delta x$, $v_y=V_y \Delta t/\Delta y$, где V_x – скорость движения материала в смесителе, V_y – скорость сегрегации ключевого компонента.

Рекуррентное матричное равенство (2) позволяет рассчитывать выход ключевого компонента из смесителя за один переход:

$$q(k) = \sum_{(n-1)m+1}^{nm} S_{nj}^k v_{xj} . \quad (7)$$

При расчетах с моделью ключевой компонент непрерывно подавался в левую верхнюю ячейку с производительностью единица массы за переход (см. рисунок 7). Процесс считался установившимся, если суммарный выход из ячеек последнего столбца за переход, рассчитанный по формуле (7), приближался к единице.

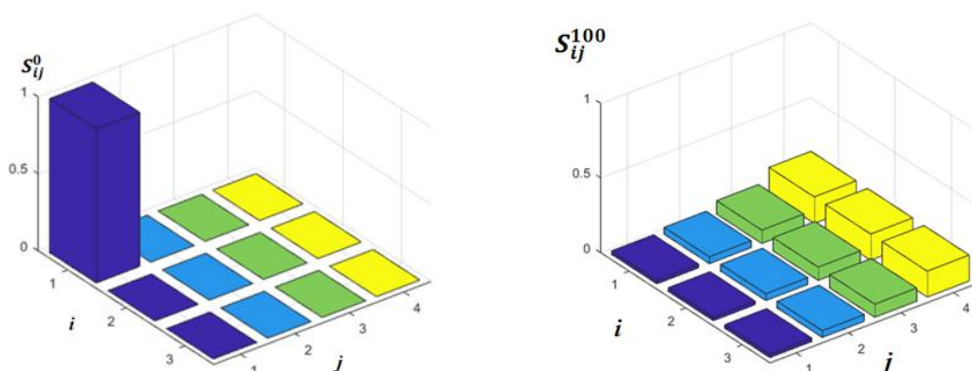


Рисунок 9. Пример эволюции начального состояния при $d=0.05$; число слоев $m=3$, число столбцов $n=4$, отсутствие сегрегации $v_y=0$, скорость потока $v_x=0.1$

На рисунке 10 приведена оценка качества смеси в установившемся режиме на выходе из смесителя в зависимости от величины безразмерного коэффициента диффузии d и безразмерной скорости сегрегации v .

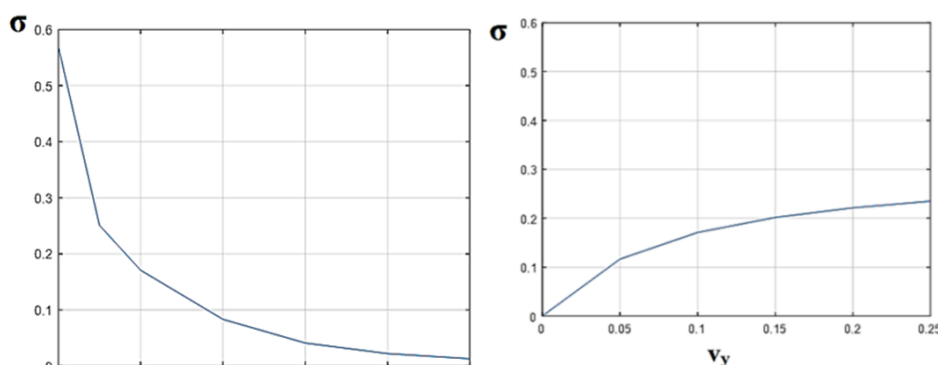
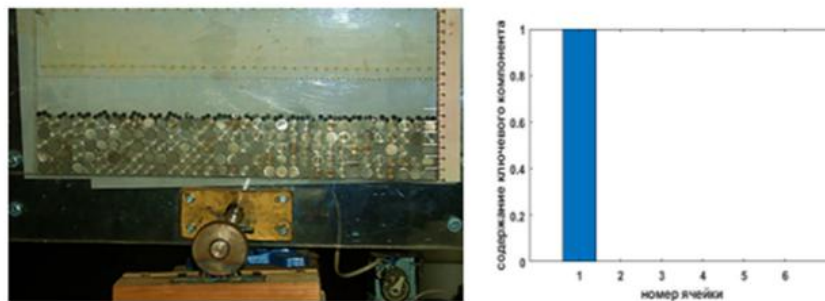


Рисунок 10. Влияние величины коэффициента диффузии и скорости сегрегации на качество смеси при установившемся режиме

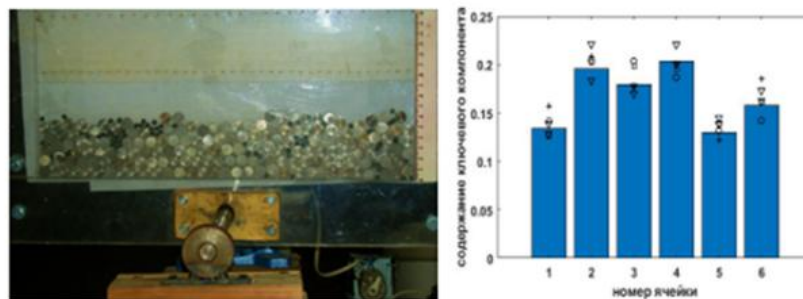
В третьей главе приведены результаты исследования кинетики процесса смешивания сыпучих материалов на лабораторных установках периодического действия. Одна из лабораторных установок представляла собой экран, состоящий из двух пластин, выполненных из органического стекла. Экран крепился к неподвижной раме с помощью пружин. Через экран проходил эксцентриковый вал, соединенный с электродвигателем. Между плоскими

экранами помещались в одной серии опытов металлические и в другой серии деревянные шайбы размерами 4 и 11 мм, которые могли перемещаться в пространстве между пластинами друг относительно друга.

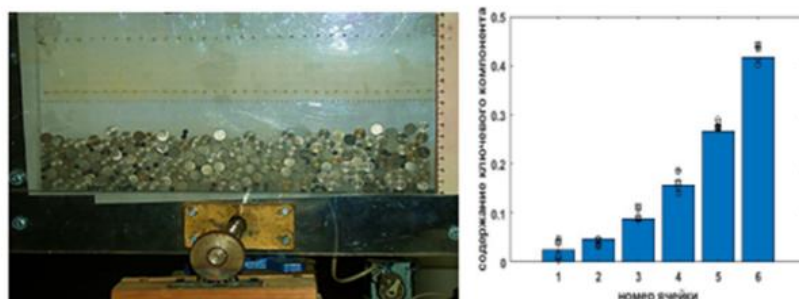
На рисунке 11 приведены результаты фотосъемки одного из вариантов серии опытов процесса смешивания бинарной смеси металлических шайб в определенные моменты времени и соответствующие экспериментальные распределения ключевого компонента (мелких частиц), полученные путем обработки изображений эксперимента и рассчитанные по модели. Интенсивность вибрационных воздействий определялась критерием Фруда, характеризующим отношение переносной силы инерции и силы тяжести частицы, движущейся в виброоживленном слое сыпучего материала. Данная серия опытов проводилась при $Fr = 3$. Высота одной ячейки слоя сыпучего материала соответствовала $\Delta y = 11$ мм. Число ячеек – 6.



а) Начальное состояние смеси, установка неподвижна $t=0$ с



б) Момент времени $t=10$ с

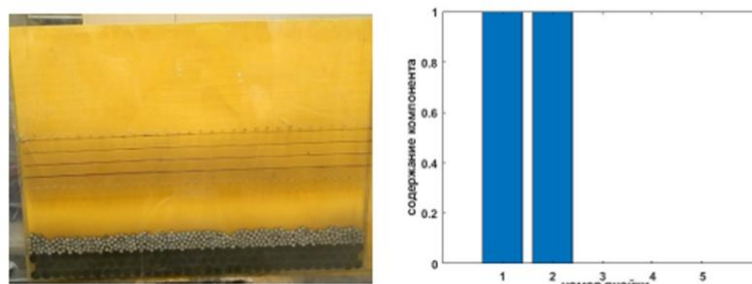


в) Момент времени $t=25$ с

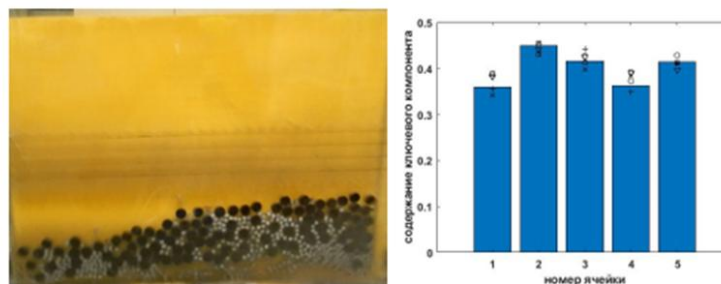
Рисунок 11. Фотофиксация процесса в различные моменты времени и соответствующее фотографиям распределение ключевого компонента по ячейкам цепи:
эксперимент – точки, расчет – диаграмма

Безразмерная скорость сегрегации и безразмерный коэффициент диффузии вычислялись из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений относительной концентрации мелких частиц, находящихся в ячейках слоя в различные моменты времени. Сравнение результатов расчетов распределения частиц ключевого компонента по ячейкам слоя и осреднённых опытных данных дали следующие результаты. Скорость сегрегации составила $V = 3,3$ мм/с, коэффициент диффузии – $D=36,3$ мм²/с.

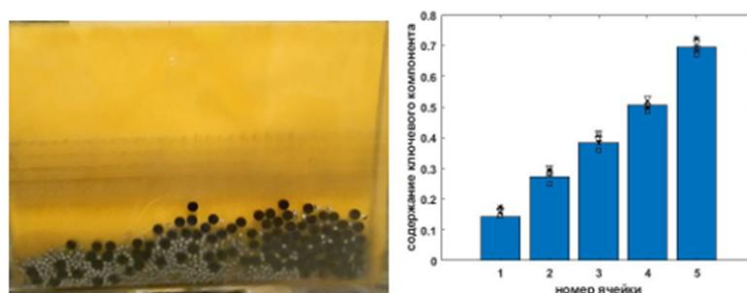
На рисунке 12 показаны фотографии одного из серии опытов по распределению частиц в виброожиженном слое бинарной смеси деревянных айб в разные моменты времени. Так же приведены расчетные и экспериментальные распределения частиц ключевого компонента по ячейкам цепи.



а) Начальное состояние смеси, установка неподвижна t=0 с



б) Момент времени t=10с



в) Момент времени t=50с

Рисунок 12. Фотофиксация процесса в различные моменты времени и соответствующее фотографиям распределение ключевого компонента по ячейкам цепи: эксперимент – точки, расчет – диаграмма

Для определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания смесей (коэффициентов макроdiffузии и скоростей сегрегации) ис-

пользовалась методикой тестовых экспериментов по фракционированию сыпучих материалов, разработанную Огурцовым В.А. и его учениками.

Параметры вибрации экрана: амплитуда $A = 2,8$ мм, частота $\omega = 90$ с⁻¹. Идентификация расчетных и опытных данных фракционирования этой смеси позволила получить следующие стохастические коэффициенты модели: безразмерная скорость сегрегации $v = 0,22$, безразмерный коэффициент диффузии $d = 0,06$. Эти значения стохастических коэффициентов использовались для расчета показателей процесса смешивания данной бинарной смеси.



Рисунок 13. Вид экспериментальной установки

Проводились опыты по периодическому фракционированию и смешиванию цементно-песчаной смеси при различных амплитудах и частотах колебаний короба установки. Установка показана на рисунке 13. Пропорции компонентов цемент : песок – 1:3. Такая смесь марки М200 при добавлении воды используется как монтажно-кладочный раствор, применяемый при возведении стен крупногабаритных объектов и устройстве стяжек с высокой нагрузочной способностью.

Расчетно-экспериментальные исследования смешивания частиц цемента и песка позволили выявить режимы колебаний смесителя, обеспечивающие степень неоднородности готового продукта менее 5 %.

В четвертой главе приведены результаты внедрения исследований в компании «ДАСО» ООО «РИМ» (город Родники, Ивановская область), имеющей собственное производство суперконцентратов, в которое входит линия смешивания сажи и полиэтилена. Нами были проведены расчетно-экспериментальные исследования, которые позволили рекомендовать установку вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000. Предложен режим вибрации установки: амплитуда колебаний – 2 мм, частота колебаний – 30 Гц.

В заключении приведены итоги исследования и рекомендации:

1. Анализ современных работ, посвященных процессу смешивания сыпучих материалов, показал, что в качестве смесительного оборудования зачастую используются смесители принудительного действия, имеющие сложное аппаратное оформление и требующие использования электроприводов большой мощности. Применение вибрационных смесителей периодического и непрерывного действия имеет существенное преимущество, так как используются источники вибрации малой мощности. Однако влияние вибровоздействия на сыпучую среду, приводящее к эффекту ее виброоживления, на качество перемешивания частиц в виброоживленном слое не изучено.
2. На основе теории цепей Маркова предложены математические модели смешивания сыпучих сред в вибрационных смесителях периодического и непрерывного принципов действия, учитывающих параметры вибровоздей-

ствия аппарата на сыпучую среду.

3. Предложен расчетно-экспериментальный метод определения стохастических параметров модели смешивания из тестовых лабораторных опытов по виброклассификации сыпучих материалов.

4. Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований показал, что в промышленных условиях при смешивании частиц цемента и песка вибровоздействие камеры смешения на сыпучую среду, соответствует величине критерия Фруда $8,0 \leq Fr \leq 10,8$ при амплитуде колебаний $2 \pm 0,2$ мм и частоте колебаний 30 ± 5 Гц, которое обеспечит степень неоднородности готового продукта процесса смешивания менее 5 %.

5. Разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских задач применялись в компании «DAsco» ООО «РИМ». Была рекомендована установка вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000, что позволит при смешивании частиц сажи и полиэтилена и улучшить качество смеси и уменьшив коэффициент неоднородности с 7,6 % до 4,5 %, при этом сократив время смешивания до 110 секунд вместо 2,5 минут. При этом расход электроэнергии может быть сокращен в 2,2 раза, а производительность смесителя увеличена на 10 %. Годовая ожидаемая прибыль при запланированной годовой загрузке смесителя составит 225863 рубля.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований заключаются в определении оптимальных технологических режимов вибрационных смесителей для предприятий, производящих сухие строительные смеси, обеспечивающих максимальное качество готовой продукции и максимальную производительность смесителей.

Основные положения диссертации опубликованы: в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК

1. Огурцов, В.А. Моделирование процессов получения сухих строительных смесей в лопастном аппарате непрерывного действия / В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, А.П. Алешина, **А.М. Фатахетдинов** // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №2 (10), Йошкар-Ола. 2019. С. 30-36.
2. Огурцов, В.А. Имитационная модель движения ансамбля частиц по ситовому тканому полотну при вибросепарации / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, **А.М. Фатахетдинов** // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 3. С. 279 – 281. (издание, индексируемое Scopus).
3. Огурцов, В.А. Двухмерная модель фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов на ситовых тканях / В.А. Огурцов, Е.И. Купнов, А.П. Алешина, А.В. Огурцов, **А.М. Фатахетдинов** // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 133 – 137. (издание, индексируемое Scopus).
4. Огурцов, В.А. Расчет распределения частиц по времени пребывания на поверхности вибрационного грохота / В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.П. Алешина, **А.М. Фатахетдинов** // Вестник ИГЭУ. - Иваново. – 2016, №6. С. 71-74.
5. Огурцов, В.А. Ячеечная модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей / В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, Е.Р. Брик, **А.М. Фатахетдинов**, А.В. Огурцов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №1 (17), Йошкар-Ола. 2021. С. 62 – 69.

в прочих изданиях

6. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, **А.М. Фатахетдинов** // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов VI Всероссийской научн.-практ. конф. Иваново: ИИГПС МЧС, 2015. С. 10-12.
7. Огурцов, В.А. Моделирование процесса транспортирования сыпучей среды на ситовых тканых полотнах виброгрохота / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, **А.М. Фатахетдинов** // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2016: сб. материалов XIX практич. форума. Иваново: ИВГПУ. Ч.1. 2016. С. 379 – 382.
8. **Фатахетдинов, А.М.** Транспортирование ансамбля частиц по сити вибрационного грохота / **А.М. Фатахетдинов**, А.Н. Логинова // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (Поиск-2017): сб. материалов межвузовской. науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. Ч.2. 2017. С. 501-502.
9. Гриценко, М.А. Описание движения частицы по поверхности грохота, совершающего горизонтальные колебания / М.А. Гриценко, **А.М. Фатахетдинов**, А.В. Огурцов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск-2018): сб. материалов межвузовской. науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2018. С. 299-300.
10. Варенцова, Э.С. Влияние характеристик виброоживленного слоя на технологические параметры процесса грохочения / Э.С. Варенцова, **А.М. Фатахетдинов** // Энергия 2019: материалы XIV Всероссийской (международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 4. С.138