

*На правах рукописи*



**Сизиков Валентин Станиславович**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ ПЕСКА ДВУМЯ  
ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ ОРГАНАМИ  
ОТТИРОЧНО-ОЧИСТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Специальность 05.05.04  
«Дорожные, строительные  
и подъемно-транспортные машины»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ  
**Евтюков Сергей Аркадьевич**

Официальные оппоненты: **Шестопалов Александр Андреевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ,  
пенсионер;

**Кондратьев Александр Владимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», кафедра «Строительные и дорожные машины и оборудование», заведующий;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

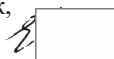
Защита состоится «22» сентября 2020 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний (ауд. 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте: <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/sizikov-valentin-stanislavovich>.

Автореферат разослан: «03» августа 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.223.02,  
кандидат технических наук,  
доцент



Олещенко Елена Михайловна

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Проблема повышения качества и снижения себестоимости строительных бетонных и отделочных работ является важной задачей. К основным методам снижения себестоимости строительства и улучшения качественных характеристик асфальто- и цементбетонов и растворов относится приготовление их с применением обогащенных крупных (щебень) и мелких (песок) заполнителей бетонов. Обогащение заполнителей удалением из их массы загрязняющих илистых, глинистых и прочих примесей, в том числе адгезионно связанных с поверхностью зерен заполнителей, существенно активизирует процесс взаимодействия вяжущих и компонентов смесей, что обеспечивает значительное снижение потребления дорогостоящих вяжущих (битума, цемента, извести и пр.).

В практике для обогащения заполнителей бетонов от загрязняющих примесей применяется специальная группа оттирко-очистительного оборудования класса машин для «мокрого» и «сухого» методов обогащения песка и щебня. В настоящее время применение «мокрых» способов обогащения сыпучих сред в промышленности снижается по причине их экономической нецелесообразности и нанесения значительного ущерба окружающей среде, связанными с дефицитом пресной воды в мире и длительным зимним периодом в ряде стран, в том числе в РФ.

Для очистки заполнителей бетонов «сухим» методом в основном применяется оборудование для удаления из массы щебня и песка легкоотделяемых пылевидных фракций путем грохочения и пневмо- и вибропневматическими способами. Для удаления трудноотделяемых пылевидных частиц «сухим» методом из песков преимущественно применяются оттирко-очистительные установки с вращающимися дисковыми рабочими органами, погруженными в обрабатываемый слой сыпучей среды. Однако поскольку обрабатываемый слой сыпучего материала находится в рыхлом ненапряженном состоянии, интенсивность такого воздействия дисками на слой невысокая и как следствие производительность и энергоэффективность процесса очистки заполнителей также невысока.

Для интенсификации процесса оттирки и механоактивации поверхности зерен мелких заполнителей бетонов иногда применяют вибромельницы с мелющими телами, обеспечивающими повышение напряжений в слое материала в зоне их контакта, но вместе с тем приводящими к непродуктивному переизмельчению зерен материала и повышению энергоемкости процесса их оттирки. Поэтому применение такого оборудования ограничено.

Сказанное выше позволяет сделать вывод об актуальности задачи поиска эффективных способов и оборудования для обогащения песка методом интенсификации процесса очистки поверхности зернистых материалов.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям, направленным на совершенствование процессов и машин для вибрационной

обработки сыпучих сред с целью улучшения или придания их зернам новых качественных свойств на основе использования методов механоактивации, виброперемешивания, виброуплотнения, виброперемещения и других методов воздействия на обрабатываемую среду посвящены работы видных отечественных и зарубежных ученых: Е.Г. Аввакумова, В.А. Баумана, И.И. Блехмана, Л.Ф. Биленко, И.И. Быховского, Л.А. Вайсберга, В.В. Верстова, И.Ф. Гончаревича, С.А. Евтюкова, Р.Л. Зенкова, А.Д. Лесина, А.В. Кондратьева, В.И. Молчанова, Я.Г. Пановко, В.Н. Потураева, А.О. Спиваковского, П.А. Ребиндера, К.В. Фролова, А.А. Шестопалова, Ю.Я. Штаермана, С.Ф. Яцуна, Р.А. Cundall, P. Czubak, G. Ferrara, W. Kroll, P.B. Sliede, O.D. Struck и др.

Однако проблема интенсификации процесса обогащения песков методами оттирки и механоактивации их поверхности без разрушения целостности зерен обрабатываемого материала не получила достаточного развития в исследованиях приведенных авторов. Актуальная задача повышения эффективности оттирко-очистительного оборудования для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности строительных песков до сих пор остается нерешенной.

Для решения задачи интенсификации обогащения песка очисткой его поверхности без разрушения целостности зерен предложен способ и установка непрерывного действия, выполненная в виде двухмассового виброконвейера с двумя транспортирующими органами (ТО), колеблющимися антифазно в поперечном и синфазно в продольном направлениях (патент РФ № 2675554).

Применение данного способа обеспечивает в период движения ТО в контакте со слоем его виброобъемную деформацию, существенно повышая напряжения в слое, интенсифицируя трение между частицами песка и процесс самооттирки их поверхности при таком силовом воздействии ТО на слой, а при потере контакта слоя с ТО обеспечивает перекомпоновку зерен в слое в период его разрыхления.

Известные методики и модели, применяемые для расчета параметров перемещения элементов многомассовых механических систем, не могут быть использованы в явном виде для описания особенностей процесса инновационного способа воздействия двух ТО на заключенный между ними обрабатываемый слой материала в процессе его вибротранспортирования. Создание методики расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами для разработки эффективных оттирко-очистительных установок определило направление исследований настоящей работы.

#### **Цель и задачи исследования.**

**Целью работы** является разработка методики расчета параметров перемещения слоя песка при его виброобъемной обработке двумя вибротранспортирующими органами оттирко-очистительной установки.

#### **Задачи исследования.**

1. Разработать математическую модель перемещения элементов трехмассовой механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО»

при их взаимодействии с учетом упруго-вязко-инерционных свойств слоя и упругих связей элементов ТО двухмассового виброконвейера.

2. Разработать алгоритм и программу для расчета на ЭВМ и анализа параметров перемещения слоя материала двумя ТО и скорости его вибротранспортирования.

3. Провести экспериментальные исследования процесса перемещения обрабатываемого слоя песка двумя колеблющимися вибротранспортирующими органами оттирочно-очистительной установки с решением следующих частных задач:

- разработать экспериментальную установку и методику проведения экспериментальных исследований;
- выполнить идентификацию параметров модели механической системы конструкции экспериментальной установки и параметров механо-реологической модели слоя материала реальному песку при перемещении слоя ТО на всех этапах их взаимодействия при различных режимах вибротранспортирования.

4. Разработать методику расчета параметров перемещения слоя песка двумя ТО и транспортной производительности оттирочно-очистительной установки как совокупность решений перечисленных выше частных задач, связанных общей целью.

5. Оценить технико-экономическую эффективность от внедрения результатов исследования.

**Объект исследования** – оттирочно-очистительные установки для обогащения очисткой поверхности зерен строительных песков.

**Предмет исследования** – методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях вибротранспортирующими органами оттирочно-очистительной установки для обогащения песка.

#### **Научная новизна исследования.**

1. Разработана математическая модель для описания всех возможных движений элементов модели трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» и параметров взаимодействия ТО со слоем материала при его деформировании в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

2. Разработан алгоритм и программа для расчета и анализа на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими ТО.

3. Получены результаты экспериментальных исследований по определению параметров вибротранспортирования слоя мелкого и крупного песка при его виброобъемном деформировании двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО и скорости вибротранспортирования слоя песка.

4. Разработана методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету

и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки.

**Теоретическая значимость исследований.** Заключается в создании математической модели взаимодействия элементов трехмассовой вибрационной механической системы «верхний ТО – слой сыпучей среды – нижний ТО» для описания динамики перемещения слоя песка ТО оттирочно-очистительной установки, совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях.

**Практическая значимость исследований.** Заключается в создании рекомендаций по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров установки и методики расчета параметров перемещения слоя песка в режиме его виброобъемного деформирования двумя ТО, совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, для обеспечения заданной транспортной производительности и скорости транспортирования слоя песка.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Теоретические исследования выполнялись на основе применения совокупности теоретических и экспериментальных методов математического моделирования вибрационных механических систем, реологических свойств обрабатываемых сыпучих сред и процессов их виброперемещения, а также экспериментально-статистических методов планирования и обработки результатов экспериментов.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель для описания всех возможных движений элементов модели трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» и параметров взаимодействия ТО со слоем материала при его деформировании в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

2. Алгоритм и программа для расчета и анализа на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими ТО.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению параметров вибротранспортирования слоя мелкого и крупного песка при его виброобъемном деформировании двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО и скорости вибротранспортирования слоя песка.

4. Методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины», п. 2 – «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения».

**Степень достоверности результатов** обеспечивается применением фундаментальных положений теории колебаний и механики сыпучих сред и положений теории вибрационных процессов на базе феноменологической реологии, применением методов математического моделирования и современных вычислительных методов, а также сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационного исследования докладывались на 72-й, 73-й и 74-й научных конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2016, 2017, 2018 гг.); 69-й межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2016 г.); 71-й и 72-й всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2018, 2019 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах на 7,88 п. л., в числе которых 9 статей в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 6 статей в сборниках тезисов и докладов научных конференций и других изданиях, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация изложена на 152 страницах печатного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 127 источников, и четырех приложений на 44 страницах. В работе представлено 88 формул, 9 таблиц и 60 рисунков.

*Во введении* обоснована актуальность задачи поиска новых методов обогащения мелких заполнителей бетонов, в частности задачи создания высокоэффективного оборудования для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности частиц строительного песка и разработки методов его расчета.

*В первой главе* приведен анализ существующих способов и оборудования для обогащения очисткой поверхности песка от загрязняющих примесей, проанализированы процессы взаимодействия рабочих органов с обрабатываемым материалом. Выявлены существенные недостатки применяемого оборудования. Определено направление совершенствования оттирочно-очистительного оборудования непрерывного действия интенсификацией процесса очистки поверхности в режиме виброобъемного деформирования слоя песка, обеспечивающего создание высоких напряжений и сил трения между частицами в слое, способствующих самооттирке поверхности зерен при их контакте друг с другом. Обоснованы цели и задачи исследований.

*Во второй главе* представлена расчетная схема оттирочно-очистительной установки и сил воздействия двух колеблющихся в антифазе

в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО на слой сыпучего материала, выбрана и обоснована механо-реологическая модель слоя и выполнено математическое описание динамики перемещения элементов трехмассовой вибрационной механической системы «верхний ТО – слой сыпучей среды – нижний ТО» с учетом всех возможных видов движения слоя и ТО. Разработаны алгоритм и программа для ЭВМ для анализа и расчета кинематических и силовых параметров перемещения слоя обрабатываемого материала двумя ТО и средней скорости его вибротранспортирования.

*В третьей главе* приведены результаты экспериментальных исследований динамики перемещения слоя песка ТО. Представлена методика проведения эксперимента и обработки его результатов. Получена регрессионная зависимость скорости транспортирования слоя песка от параметров колебаний ТО. На основе данных эксперимента выполнена идентификация параметров механо-реологической модели слоя материала реальному песку при взаимодействии слоя с ТО для периодов его движения в контакте и без контакта с ТО, использование которых совместно с созданным алгоритмом и программой для ЭВМ позволило разработать рекомендации по расчету и выбору конструктивных и режимных параметров установок для обогащения очисткой поверхности зерен строительных песков.

*В четвертой главе* представлена методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки, а также результаты внедрения методики и рекомендаций для выполнения расчетов и выбора параметров установки и оценка технико-экономической эффективности от внедрения результатов исследования.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Математическая модель для описания всех возможных движений элементов модели трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» и параметров взаимодействия ТО со слоем материала при его деформировании в двух взаимно перпендикулярных направлениях.**

Для решения задачи повышения эффективности процесса обогащения поверхности песков методами их оттирки и механоактивации предложен инновационный способ и устройство, выполненное в виде двухмассового виброконвейера, обеспечивающего виброобъемное деформирование слоя материала в процессе его транспортирования двумя ТО, совершающими

антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях (патент РФ № 2675554).

В предложенном способе при сближении ТО друг к другу в поперечном направлении происходит сжатие слоя, находящегося в контакте с ТО (рис. 1, а), сопровождаемое повышением напряжений и сил трения между поверхностями частиц, интенсифицирующих их самооттирку в деформируемом слое. При движении ТО друг от друга слой теряет контакт с ТО и совершает свободное движение (полет) относительно ТО (рис. 1, б), при котором происходит разрыхление слоя и перекомпоновка зерен в нем. Одновременно с процессом обработки слоя осуществляется его транспортирование: при сближении ТО происходит их совместное движение по горизонтали вместе со слоем (вправо, рис. 1, а), за счет которого слой переносится в направлении транспортирования; при удалении ТО друг от друга происходит их движение без контакта со слоем (рис. 1, б), при котором ТО, двигаясь влево, возвращаются к своему первоначальному положению, а слой продолжает полет, двигаясь вправо. Чередование этих двух видов движения слоя в каждом периоде колебаний ТО обеспечивает его непрерывное транспортирование в горизонтальном направлении.

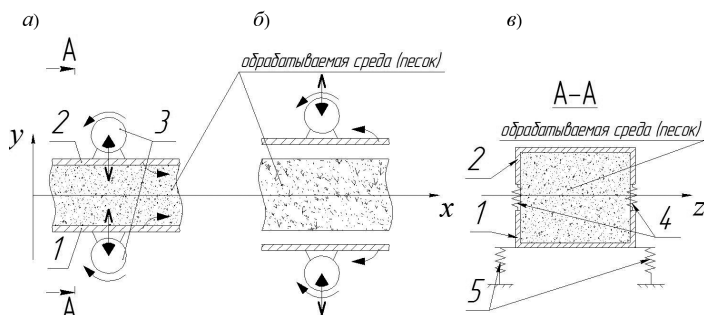


Рис. 1. Схема воздействия ТО на слой материала: а – этап сжатия слоя (слой в контакте с ТО); б – этап свободного движения слоя (слой без контакта с ТО); в – поперечный разрез ТО и слоя: 1 – нижний ТО, 2 – верхний ТО, 3 – вибраторы, 4 – упругие элементы взаимодействия, 5 – опорные пружины

Анализ динамики перемещения слоя материала двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО осуществляется на основе разработанной математической модели с определением параметров перемещения слоя и его силового нагружения ТО на всех этапах движения слоя. Модель динамики перемещения слоя и ТО представляет собой трехмассовую вибрационную механическую систему «верхний ТО – слой сыпучей среды – нижний ТО», состоящую из двухмассовой модели элементов

конструкции установки (верхнего и нижнего ТО, соединенных упругими элементами, и опорных пружин, поддерживающих нижний ТО) и механо-реологической упруго-вязко-инерционной модели слоя сыпучей среды.

Процесс перемещения слоя ТО состоит из четырех основных этапов (рис. 2): этап, когда слой материала находится в контакте с двумя ТО (1 этап); этапы, когда слой материала находится в контакте только с верхним (2 этап) или только с нижним (3 этап) ТО; этап, когда слой материала совершает полет (свободное движение) без контакта с ТО (этап 4). Кроме того, при перемещении слоя материала в контакте с одним или каждым ТО может происходить движение скольжением слоя относительно поверхностей ТО. Схема всех возможных видов движения слоя относительно ТО и переходов между ними показана на рис. 2, где переходы показаны стрелками. Виды движения слоя материала и ТО на рис. 2 обозначены следующим образом:

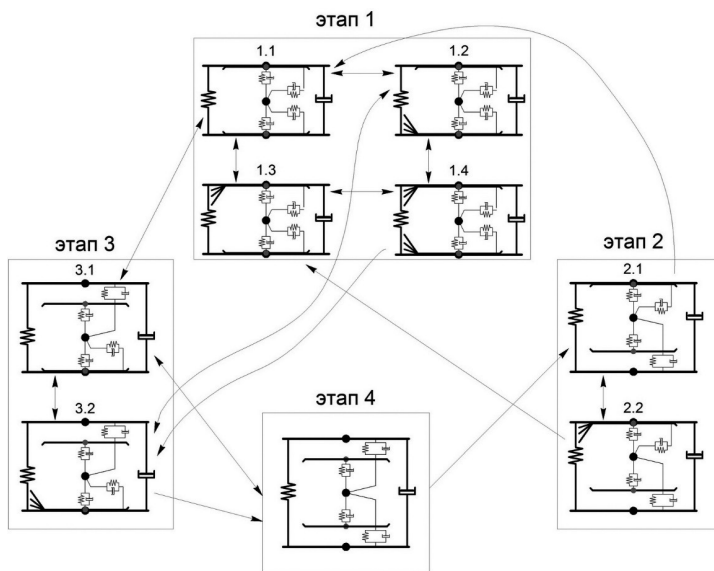
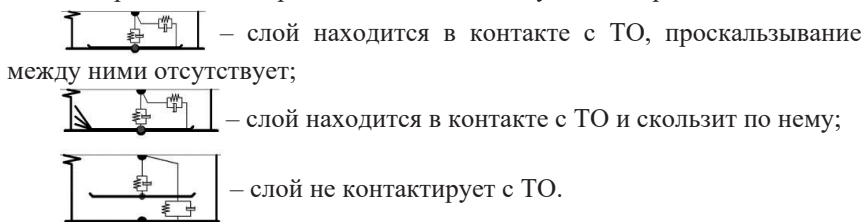


Рис. 2. Схема всех возможных видов движения слоя материала и переходов между ними при взаимодействии слоя с ТО

Моделирование такого процесса перемещения слоя ТО на всех отмеченных этапах осуществляется на основе расчетной схемы этапа совместного (в контакте) движения слоя с двумя ТО (рис. 3) и расчетной схемы этапа полета слоя (рис. 4).

На рис. 3 и 4 представлены расчетные схемы для анализа движения ТО и слоя соответственно на этапе совместного (в контакте) движения слоя с двумя ТО и этапа полета слоя. Другие возможные этапы перемещения слоя, в частности при движении его в контакте только с одним ТО, представлены на рис. 2.

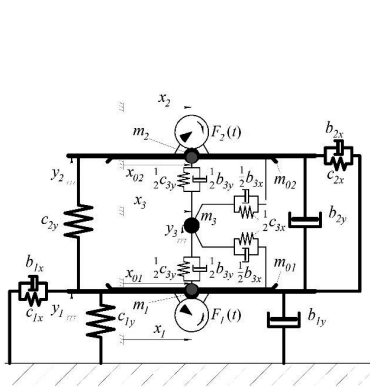


Рис. 3. Расчетная схема движения ТО и слоя на этапе совместного движения (в контакте)

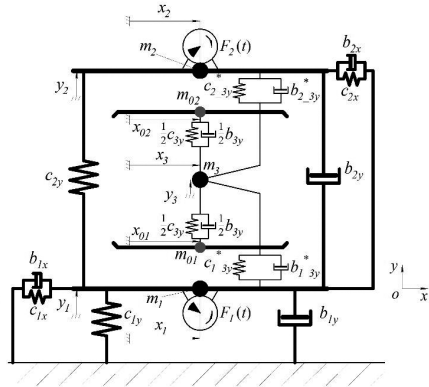


Рис. 4. Расчетная схема движения ТО и слоя на этапе свободного движения (полета)

На схемах (рис. 3 и 4)  $хоу$  – неподвижная (связанная с основанием) система координат,  $m_1$  и  $m_2$  – массы нижнего и верхнего ТО;  $m_3$  – масса слоя материала, сосредоточенная в ц. м.;  $m_{01} = 0$  и  $m_{02} = 0$  – безынерционные массы нижней и верхней контактных поверхностей слоя;  $c_{1x}, b_{1x}, c_{1y}, b_{1y}$  – коэффициенты упругих и вязких сопротивлений опорных пружин установки (поз. 5 на рис. 1, в) в направлениях осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $c_{2x}, b_{2x}, c_{2y}, b_{2y}$  – коэффициенты упругих и вязких сопротивлений элементов взаимодействия двух ТО (поз. 4 на рис. 1, в) в направлениях осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $c_{3x}, b_{3x}, c_{3y}, b_{3y}$  – коэффициенты упругих и вязких сопротивлений, моделирующих свойства слоя материала в направлениях осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $c_{1-3y}^*$  и  $b_{1-3y}^*$  – коэффициенты упругих и вязких сопротивлений деформации соответственно нижней и верхней прослоек воздушной среды между материалом и ТО в направлении оси  $y$ ;  $F_1(t), F_2(t)$  – вынуждающие силы, передаваемые ТО установки от центробежных вибровозбудителей;  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  – смещения ТО  $m_1$  и  $m_2$  в неподвижной системе координат от положений

своего статического равновесия вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $y_3$  – смещение ц. м. слоя материала  $m_3$  в неподвижной системе координат от положения статического равновесия вдоль оси  $y$ ;  $x_3$  – смещение  $m_3$  в неподвижной системе координат от положения в момент начала движения ( $t_0 = 0$ ) вдоль оси  $x$ ;  $x_{01}$  и  $x_{02}$  – смещения нижней и верхней безынерционных контактных поверхностей слоя  $m_{01}$  и  $m_{02}$  в неподвижной системе координат от своих положений в момент начала движения ( $t_0 = 0$ ) вдоль оси  $x$ .

Для отображения степени заполнения пространства материалом пространства между ТО применен параметр « $e$ », представляющий собой разницу высот слоя материала и пространства между ТО в статике (рис. 5).

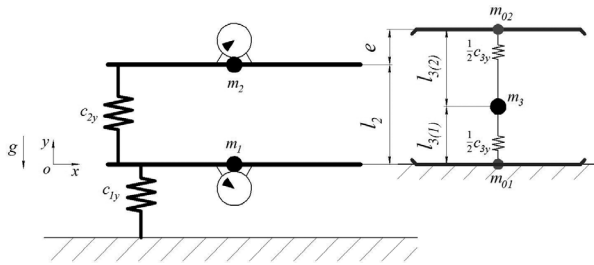


Рис. 5. Схема определения параметра « $e$ », характеризующего степень заполнения материалом пространства между ТО

$$e = l_2 - (l_{3(1)} + l_{3(2)}),$$

где  $l_2$  – расстояние между ТО в статике;  $l_{3(1)}$  и  $l_{3(2)}$  – расстояния от ц. м. слоя до его нижней и верхней границы соответственно в статике.

Согласно принятой модели динамики перемещения слоя материала ТО получены уравнения перемещения элементов модели на всех этапах их движения.

Уравнения движения слоя материала и ТО на этапе их совместного движения (этап 1 на рис. 2) в соответствии с расчетной схемой (рис. 3) запишутся в виде:

$$m_1 \ddot{y}_1' + c_{1y} y_1' + b_{1y} \dot{y}_1' - c_{2y} (y_2' - y_1') - b_{2y} (\dot{y}_2' - \dot{y}_1') - \frac{1}{2} c_{3y} (y_3' - y_1') - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_3' - \dot{y}_1') = P \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2' + c_{2y} (y_2' - y_1') + b_{2y} (\dot{y}_2' - \dot{y}_1') + \frac{1}{2} c_{3y} (y_2' - y_3') + \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2' - \dot{y}_3') = -P \sin(\omega t), \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{y}'_3 + \frac{1}{2} c_{3y} (y'_3 - y'_1) + \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}'_3 - \dot{y}'_1) - \frac{1}{2} c_{3y} (y'_2 - y'_3) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}'_2 - \dot{y}'_3) = 0; \quad (3)$$

$$m_1 \ddot{x}'_1 + c_{1x} x'_1 + b_{1x} \dot{x}'_1 - c_{2x} (x'_2 - x'_1) - b_{2x} (\dot{x}'_2 - \dot{x}'_1) - \frac{1}{2} c_{3x} (x'_3 - x'_{01}) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}'_3 - \dot{x}'_{01}) = P \cos(\omega t); \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{x}'_2 + c_{2x} (x'_2 - x'_1) + b_{2x} (\dot{x}'_2 - \dot{x}'_1) - \frac{1}{2} c_{3x} (x'_3 - x'_{02}) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}'_3 - \dot{x}'_{02}) = P \cos(\omega t); \quad (5)$$

$$m_3 \ddot{x}'_3 + \frac{1}{2} c_{3x} (x'_3 - x'_{01}) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}'_3 - \dot{x}'_{01}) + \frac{1}{2} c_{3x} (x'_3 - x'_{02}) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}'_3 - \dot{x}'_{02}) = 0; \quad (6)$$

$$x'_{01} = \begin{cases} x'_1, & \text{если предыдущим действовал 3-й этап движения} \\ x'_1 + x_{31}(t_{\text{н.конт.1}}), & \text{если предыдущим действовал 2-й этап движения} \end{cases}; \quad (7)$$

$$x'_{02} = x'_2 - x_{21}(t_{\text{н.конт.}}), \quad (8)$$

где  $x_{21}(t_{\text{н.конт.}}) = x_2(t_{\text{н.конт.}}) - x_1(t_{\text{н.конт.}})$  вычисляется в момент окончания предшествующего этапа 4, являющимся моментом  $t_{\text{н.конт.1}}$  начала контакта слоя с нижним ТО или моментом  $t_{\text{н.конт.2}}$  начала контакта слоя с верхним ТО;  $x_{31}(t_{\text{н.конт.1}}) = x_3(t_{\text{н.конт.1}}) - x_1(t_{\text{н.конт.1}})$  вычисляется в момент  $t_{\text{н.конт.1}}$  окончания предшествовавшего этапа 2;  $P = M_{\text{деб}} \cdot \omega^2$  – амплитудные значения вынуждающих сил каждого вибровозбудителя, передаваемые ТО установки и вызывающие их противофазные колебания в поперечном направлении и синфазные – в продольном,  $M_{\text{деб}}$  – статический момент дебалансов вибровозбудителей,  $\omega$  – угловая частота вращения дебалансов,  $t$  – время. В уравнениях верхний индекс (*I, II, III, IV*) обозначает номер этапа движения инерционных элементов модели. Уравнения движения слоя по оси  $x$  (4)–(8) соответствуют движению слоя без проскальзывания относительно ТО (вид движения 1.1, рис. 2).

При проскальзывании слоя относительно нижнего ТО (вид движения 1.2, рис. 2), которое наступит в момент  $t_{\text{н.ск.1}}$  при выполнении условия  $|F_{\text{сдв1}}| = F_{\text{тр1}}$  ( $F_{\text{сдв1}} = -\frac{1}{2} c_{3x} (x'_3 - x'_{01}) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}'_3 - \dot{x}'_{01})$  – сдвигающая сила,  $F_{\text{тр1}} = \mu_{\text{ст}} N_{1y}$  – сила статического трения,  $\mu_{\text{ст}}$  – коэффициент трения покоя между слоем и поверхностью ТО,  $N_{1y} = -\frac{1}{2} c_{3y} (y'_3 - y'_1 + \Delta'_{3(1)}) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}'_3 - \dot{y}'_1)$  – сила

нормальной реакции слоя на нижний ТО;  $\Delta_{3(1)}^I$  – статическое растяжение нижней пружины модели слоя на этапе 1), уравнения (1) и (2) примут вид:

$$m_1 \ddot{x}_1^I + c_{1x} \dot{x}_1^I + b_{1x} \dot{x}_1^I - c_{2x} (x_2^I - x_1^I) - b_{2x} (\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I) \mu N_{1y} = P \cos(\omega t), \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{01}^I) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I) \mu N_{1y} = 0, \quad (10)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения между слоем материала и горизонтальной поверхностью ТО.

При проскальзывании слоя относительно верхнего ТО (вид движения 1.3 на рис. 2), которое наступит в момент  $t_{\text{н.ск.2}}$  при выполнении условия

$$|F_{\text{сלב2}}| = F_{\text{тр2}} (F_{\text{сלב2}} = -\frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{02}^I) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) - \text{сдвигающая сила}, F_{\text{тр2}} = \mu_{\text{ст}} N_{2y} - \text{сила статического трения}, N_{2y} = -\frac{1}{2} c_{3y} (y_2^I - y_3^I + \Delta_{3(2)}^I) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_3^I)) - \text{сила}$$

нормальной реакции слоя на верхний ТО;  $\Delta_{3(2)}^I$  – статическое растяжение верхней пружины модели слоя на этапе 1), уравнения движения (5) и (8) примут вид:

$$m_2 \ddot{x}_2^I + c_{2x} (x_2^I - x_1^I) + b_{2x} (\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = P \cos(\omega t), \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{02}^I) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = 0. \quad (12)$$

На участке проскальзывания слоя относительно верхнего и нижнего ТО (вид движения 1.4 на рис. 2), который наступит в момент  $t_{\text{н.ск.1}}$  или  $t_{\text{н.ск.2}}$  при выполнении одного из вышеприведенных условий, движение элементов модели по оси  $x$  описывается уравнениями (6), (9)–(12).

Моменты перехода от движения слоя со скольжением относительно ТО к его движению без скольжения определяются по уравнениям, полученным приравниванием нулю относительной скорости перемещения  $m_{01}$  и  $m_{02}$ :

$$\dot{x}_{01}^I(t) - \dot{x}_1^I(t) = 0, \quad (13)$$

$$\dot{x}_{02}^I(t) - \dot{x}_2^I(t) = 0. \quad (14)$$

Момент  $t_{\text{к.конт.2}}$  перехода от этапа совместного движения слоя к этапу его движения без контакта с верхним ТО (этап 3 на рис. 2) определяется решением уравнения, полученного приравниванием нулю силы нормальной реакции слоя на верхний ТО:

$$N_{2y}(t_{\text{к.конт.2}}) = -\frac{1}{2} c_{3y} (y_2^I - y_3^I + \Delta_{3(2)}^I) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_3^I) = 0. \quad (15)$$

На этапе полета слоя (этап 4 на рис. 2) уравнения движения элементов модели в соответствии с расчетной схемой (рис. 4) будут иметь вид:

$$m_1 \ddot{y}_1^{IV} + c_{1y} y_1^{IV} + b_{1y} \dot{y}_1^{IV} - c_{2y} (y_2^{IV} - y_1^{IV}) - b_{2y} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) - c_{1_{-3y}^*} (y_3^{IV} - y_1^{IV}) - b_{3y}^* (\dot{y}_3^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) = P \sin(\omega t), \quad (16)$$

$$m_2 \ddot{y}_2^{IV} + c_{2y} (y_2^{IV} - y_1^{IV}) + b_{2y} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) + c_{2_{-3y}^*} (y_2^{IV} - y_3^{IV}) + b_{2_{-3y}^*} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_3^{IV}) = -P \sin(\omega t), \quad (17)$$

$$m_3 \ddot{y}_3^{IV} + c_{1_{-3y}^*} (y_3^{IV} - y_1^{IV}) + b_{1_{-3y}^*} (\dot{y}_3^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) - c_{2_{-3y}^*} (y_2^{IV} - y_3^{IV}) - b_{2_{-3y}^*} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_3^{IV}) = 0; \quad (18)$$

$$m_1 \ddot{x}_1^{IV} + c_{1x} x_1^{IV} + b_{1x} \dot{x}_1^{IV} + c_{2x} (x_1^{IV} - x_2^{IV}) + b_{2x} (\dot{x}_1^{IV} - \dot{x}_2^{IV}) = P \cos(\omega t), \quad (19)$$

$$m_2 \ddot{x}_2^{IV} - c_{2x} (x_1^{IV} - x_2^{IV}) - b_{2x} (\dot{x}_1^{IV} - \dot{x}_2^{IV}) = P \cos(\omega t), \quad (20)$$

$$m_2 \ddot{x}_3^{IV} = 0; \quad (21);$$

$$x_{01}^{IV} = x_3^{IV}; \quad (22);$$

$$x_{02}^{IV} = x_3^{IV}. \quad (23)$$

Моменты времени  $t_{\text{н.конт.1}}$  и  $t_{\text{н.конт.2}}$  начала контакта слоя с нижним или верхним ТО и перехода к этапу 3 или 2 его движения определяются приравнением нулю перемещения слоя относительно нижнего и верхнего ТО по вертикали:

$$y_3^{IV}(t_{\text{н.конт.1}}) - y_1^{IV}(t_{\text{н.конт.1}}) = -\Delta_{3(1)}^{IV*} - f_{3(1)}^{III}, \quad (24)$$

$$y_3^{IV}(t_{\text{н.конт.2}}) - y_2^{IV}(t_{\text{н.конт.2}}) = \Delta_{3(2)}^{III*} + f_{3(2)}^I + \delta_2^{IV-III} - \delta_3^{IV-III}, \quad (25)$$

где  $f_{3(1)}^{III}$ ,  $f_{3(2)}^I$  – расстояния между положениями статического равновесия по оси  $y$  масс  $m_1$ ,  $m_3$  и масс  $m_2$ ,  $m_3$ ;  $\delta_2^{IV-III}$  и  $\delta_3^{IV-III}$  – расстояния между положениями статического равновесия по оси  $y$  на этапах 3 и 4 масс  $m_2$  и  $m_3$ .

Уравнения движения слоя материала и ТО при перемещении слоя в контакте только с одним из ТО на этапах 2 и 3 (рис. 2), в том числе включающие движения слоя с проскальзыванием относительно ТО, имеют вид, подобный уравнениям (1)–(12), и составлены аналогичным образом с учетом условий для моментов переходов, указанных в уравнениях (13)–(15) и (24)–(25). Эти уравнения в развернутом виде представлены в разделе 2.2 текста диссертации и здесь не приводятся.

Средняя скорость вибротранспортирования материала  $V_{тр}$  за один период его установившегося движения  $\Delta$  рассчитывается как среднее значение скоростей модели слоя на всех этапах его движения по уравнению

$$V_{тр} = \frac{1}{\Delta} \left[ \int_{\omega_{к.конт.1}}^{\omega_{н.конт.i}} \dot{x}_3^{IV} d\omega + \int_{\omega_{н.конт.i}}^{\omega_{к.конт.j}} \dot{x}_3^K d\omega + \int_{\omega_{н.конт.j}}^{\omega_{к.конт.2}} \dot{x}_3^I d\omega + \int_{\omega_{к.конт.2}}^{\omega_{к.конт.1}} \dot{x}_3^{III} d\omega \right], \quad (26)$$

где  $i = 1, j = 2, K = III$  в случае, если слой материала по окончании действия этапа полета первым соприкоснется с нижним ТО (будет действовать этап 3);  $i = 2, j = 1, K = II$  в случае, если слой материала по окончании действия этапа полета первым соприкоснется с верхним ТО (будет действовать этап 2).

Разработанная математическая модель динамики взаимодействия и перемещения слоя и ТО позволяет выполнять исследования влияния режимов колебаний ТО на создаваемые напряжения в слое обрабатываемого материала от действия сил реакции, возникающих между слоем и каждым ТО, а также исследование параметров перемещения слоя (продолжительности этапа движения слоя в контакте с ТО и этапа полета слоя), включая скорость его вибротранспортирования.

## 2. Алгоритм и программа для расчета и анализа на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими ТО.

На основе разработанной математической модели был создан алгоритм для решения уравнений движения на каждом этапе движения слоя методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с учетом условий переходов от решений одних уравнений к другим, а также программа для ЭВМ «Виброоттирка 1». Данная программа позволяет по заданным исходным данным (параметрам, характеризующим конструктивные элементы установки для обогащения песка  $m_1, m_2, c_{1x}, b_{1x}, c_{1y}, b_{1y}, c_{2x}, b_{2x}, c_{2y}, b_{2y}$ , упруго-вязкоинерционным характеристикам слоя песка  $m_3, c_{3x}, b_{3x}, c_{3y}, b_{3y}, c_{1-3y}, b_{1-3y}, c_{2-3y}, b_{2-3y}$ , параметрам режимов колебаний ТО  $\omega$  и  $M_{двб}$  и параметру « $e$ », учитывающему степень заполнения материалом пространства между ТО) рассчитывать основные параметры процесса взаимодействия слоя с ТО: силы нормальной реакции слоя на ТО  $N_{1y}$  и  $N_{2y}$ , продолжительности этапов движения слоя в контакте и без контакта с ТО, скорость вибротранспортирования слоя  $V_{тр}$  и другие кинематические и силовые параметры процесса.

## 3. Результаты экспериментальных исследований по определению параметров вибротранспортирования слоя мелкого и крупного песка при его виброобъемном деформировании двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО и скорости вибротранспортирования слоя песка.

Экспериментальные исследования закономерностей процесса перемещения слоя строительного песка ТО, колеблющимися антифазно в поперечном и синфазно в продольном направлениях, выполнялись на экспериментальной установке, показанной на рис. 6, по разработанной методике проведения экспериментов.

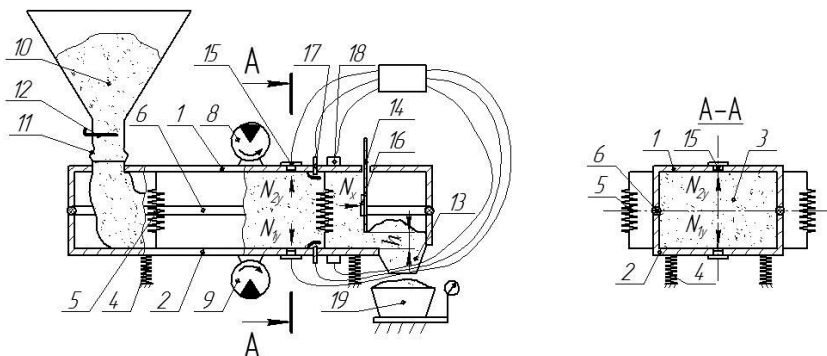


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – транспортирующие органы; 3 – рабочая камера; 4 – опорные пружины; 5 – пружины взаимодействия; 6 – эластичная вставка; 7 – рабочая камера; 8, 9 – дебалансные вибровозбудители; 10 – загрузочный бункер; 11 – эластичная вставка; 12 – заслонка бункера; 13 – выпускной патрубок; 14 – заслонка с зазором  $h$ ; 15 – датчик контактного давления слоя на ТО; 16 – датчик контактного давления на заслонке; 17 – датчик давления воздуха; 18 – датчик ускорений; 19 – мерная емкость

Экспериментальная установка представляет собой два горизонтально расположенных ТО 1 и ТО 2, соединенных между собой пружинами взаимодействия 5 и приводимых в колебательное движение дебалансными вибровозбудителями 8 и 9. ТО 1 и ТО 2 образуют рабочую камеру 3 прямоугольного сечения (разрез А-А, рис. 6) для обработки материала в процессе его вибро-транспортирования. Регулирование транспортной производительности установки осуществляется изменением зазора  $h$  под заслонкой 14. Для измерения параметров взаимодействия ТО со слоем песка, таких как параметры колебаний ТО, силы нормальной реакции слоя на ТО на этапе совместного движения слоя с ТО и пульсации давления воздуха в прослойке между слоем и ТО на этапе полета слоя, на верхнем и нижнем ТО установлены датчики ускорений 18, датчики контактного давления слоя 15 и датчики давления воздуха 17.

**Идентификация расчетных параметров модели реальным параметрам конструкции экспериментальной установки.**

Опыты по определению численных значений параметров конструктивных элементов экспериментальной установки (масс ТО  $m_1$  и  $m_2$ , коэффициентов упругих и вязких характеристик опорных пружин  $c_{1x}$ ,  $b_{1x}$ ,  $c_{1y}$ ,  $b_{1y}$  и пружин взаимодействия  $c_{2x}$ ,  $b_{2x}$ ,  $c_{2y}$ ,  $b_{2y}$  и моментов дебалансов вибровозбудителей  $M_{дес}$ ) производились в режиме ее работы на холостом ходу (без материала). Сравнение осциллограмм законов движения ТО, полученных в результате проведения опытов и расчетом по программе «Виброот-тирка 1» с применением проектных значений характеристик установки,

указывает на их относительно близкое совпадение (рис. 7), оцениваемое среднеквадратическим отклонением (до 15 %), и подтверждает адекватность принятой модели механической системы установки, работающей на холостом ходу.

**Идентификация параметров перемещения модели слоя по оси у реального слою крупного и мелкого песка.**

Перед проведением идентификации параметров перемещения модели слоя материала выполнялись предварительные опыты для определения диапазонов значений устойчивых режимов колебаний ТО экспериментальной установки под нагрузкой: статический момент дебалансов вибровозбудителей  $0,32 \leq M_{\text{дсб}} \leq 0,388$  кг·м и частота их вращения  $800 \leq n \leq 1300$  об/мин; зазор открытия заслонки, регулирующей транспортную производительность установки  $10 \leq h \leq 20$  мм, эквивалентный диаметр частиц песка  $0,32 \leq d_{\text{экв}} \leq 0,49$  мм. Полученная область значений параметров использовалась при проведении дальнейших опытов по исследованию взаимодействия ТО со слоем песка.

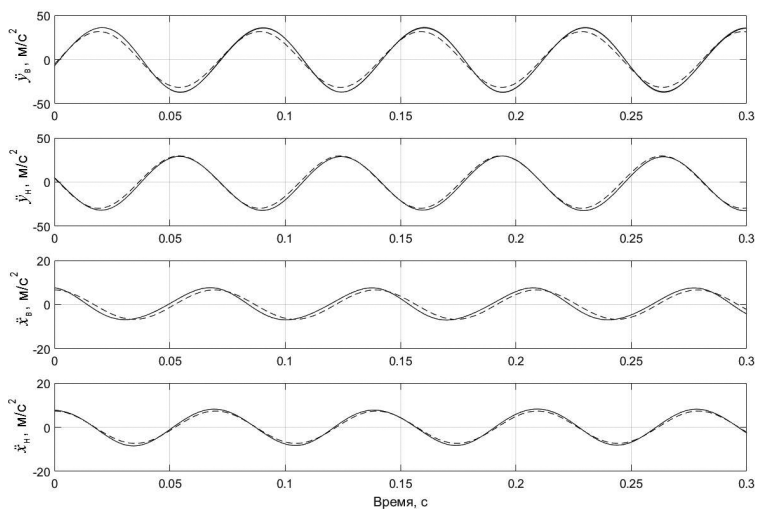


Рис. 7. Пример осциллограммы параметров колебаний ТО без нагрузки ( $n = 860$  кол/мин,  $M_{\text{дсб}} = 0,2$  кг·м):  $\ddot{y}_н$  и  $\ddot{y}_в$  – вертикальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО;  $\ddot{x}_н$ ,  $\ddot{x}_в$  – горизонтальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО

На первом этапе идентификации параметров модели слоя материала были определены численные значения коэффициентов модели слоя, отображающих сопротивление ее деформированию ТО в направлении оси у (рис. 3 и 4). Эксперименты проводились на двух видах песков (крупном

с  $d_{\text{экр}} = 0,49$  мм и мелком с  $d_{\text{экр}} = 0,32$  мм) при различных режимах колебаний ТО и зазоре  $h$  открытия заслонки с получением осциллограмм параметров перемещения слоя с целью определения упругих и вязких коэффициентов модели слоя. Значения коэффициентов модели подбирались итерационным методом по разработанной программе «Виброоттирка 1» с достижением совпадения (с погрешностью до 20 %) расчетных и экспериментальных моментов начала и окончания контактов модели слоя с ТО и величин сил нормальной реакции слоя на ТО. В результате для каждого вида песка (крупного и мелкого) были подобраны средние значения коэффициентов сопротивлений модели слоя  $c_{3y}$ ,  $b_{3y}$  и коэффициентов сопротивлений прослоек воздушной среды между слоем и ТО, получившимися различными для нижней ( $c_{1-3y}^*$ ,  $b_{1-3y}^*$ ) и верхней ( $c_{2-3y}^*$ ,  $b_{2-3y}^*$ ) прослоек (табл. 1).

Таблица 1

Средние расчетные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению слоя песка по оси  $y$

Крупность частиц песка $d_{\text{экр}}$ , мм	Диапазон частот колебаний ТО, кол/мин	Коэффициенты на этапе совместного движения		Коэффициенты на этапе полета			
		$c_{3y}$ , $10^7$ Н/м	$b_{3y}$ , $10^5$ Н·с/м	$c_{1-3y}^*$ , $10^7$ Н/м	$c_{2-3y}^*$ , $10^7$ Н/м	$b_{1-3y}^*$ , $10^3$ Н·с/м	$b_{2-3y}^*$ , $10^3$ Н·с/м
0,32	900–1100	1,6	1,6	0,25	0,385	0,7	1,5
	1100–1300			4,2	4		
0,49	900–1300	3,5	2,2	0,5	0,6	0,5	0,75

При определении упругих и вязких коэффициентов сопротивлений модели одновременно в каждом опыте подбирались значения параметра « $e$ » (точки на рис. 8–11), характеризующего степень заполнения пространства между ТО материалом. Зависимость параметра « $e$ » от вынуждающей силы вибровозбудителей  $F = M_{\text{деб}} \omega^2$  для различных по крупности песков ( $d_{\text{экр}} = 0,32$  мм и  $0,49$  мм) и различных положений заслонки, регулирующей транспортную производительность установки ( $h = 10$  мм и  $20$  мм), приведены на графиках (рис. 8–11). Полученные данные (точки) аппроксимированы по методу наименьших квадратов следующими зависимостями (показаны сплошными линиями на рис. 8–11):

– при  $d_{\text{экр}} = 0,32$  мм и  $h = 10$  мм:

$$e(F) = -18,66 + 0,01017F - 9 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \quad (\text{мм}); \quad (27)$$

– при  $d_{\text{экр}} = 0,32$  мм и  $h = 20$  мм:

$$e(F) = -10,51 + 0,00678F - 6 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \quad (\text{мм}); \quad (28)$$

– при  $d_{\text{экв}} = 0,49$  мм и  $h = 10$  мм:

$$e(F) = -7,58 + 0,00294F \text{ (мм)}; \quad (29)$$

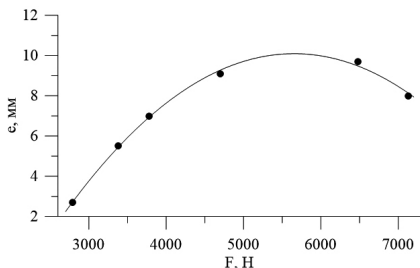


Рис. 8. Зависимость параметра « $e$ » от амплитудного значения вынуждающей силы  $F$  при  $d_{\text{экв}} = 0,32$  мм,  $h = 10$  мм ( $R^2 = 0,997$ )

– при  $d_{\text{экв}} = 0,49$  мм и  $h = 20$  мм:

$$e(F) = -6,62 + 0,00271F \text{ (мм)}. \quad (30)$$

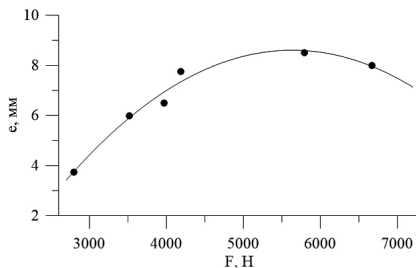


Рис. 9. Зависимость параметра « $e$ » от амплитудного значения вынуждающей силы  $F$  при  $d_{\text{экв}} = 0,32$  мм,  $h = 20$  мм ( $R^2 = 0,976$ )

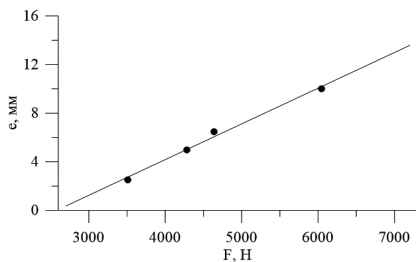


Рис. 10. Зависимость параметра « $e$ » от амплитудного значения вынуждающей силы  $F$  при  $d_{\text{экв}} = 0,49$  мм,  $h = 10$  мм ( $R^2 = 0,990$ )

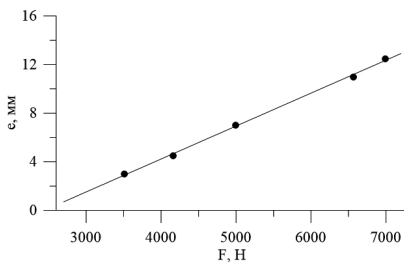


Рис. 11. Зависимость параметра « $e$ » от амплитудного значения вынуждающей силы  $F$  при  $d_{\text{экв}} = 0,49$  мм,  $h = 20$  мм ( $R^2 = 0,999$ )

Значения коэффициентов детерминации  $R^2$  для построенных зависимостей  $e(F)$  указаны в подписях к каждому графику.

На рис. 12 и 13 показаны примеры осциллограмм экспериментальных (пунктирные линии) и расчетных (сплошные линии) ускорений колебаний ТО по оси  $y$  и сил нормальной реакции между слоем и ТО, а также расчетные моменты (точки) начала  $t_{\text{н.конт.}}$  и окончания  $t_{\text{к.конт.}}$  контактов слоя песка с ТО и максимальные величины расчетных ( $N_{\text{н}}^{\text{т}}$  и  $N_{\text{в}}^{\text{т}}$ ) и теоретических ( $N_{\text{н}}^{\text{э}}$  и  $N_{\text{в}}^{\text{э}}$ ) сил нормальной реакции, действующих со стороны слоя песка на поверхности нижнего и верхнего ТО.

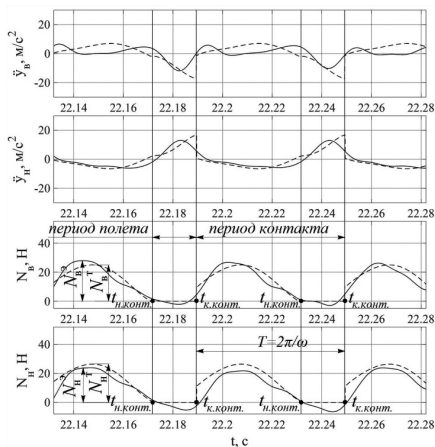


Рис. 12. Пример экспериментальных и расчетных осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО при  $d_{экр} = 0,49$  мм,  $n = 1000$  об/мин,  $M_{деб} = 0,388$  кг·м,  $h = 10$  мм:  $\ddot{y}_n$  и  $\ddot{y}_v$  – вертикальные ускорения нижнего и верхнего ТО;  $N_n$ ,  $N_v$  – силы нормальной реакции слоя на нижний и верхний ТО

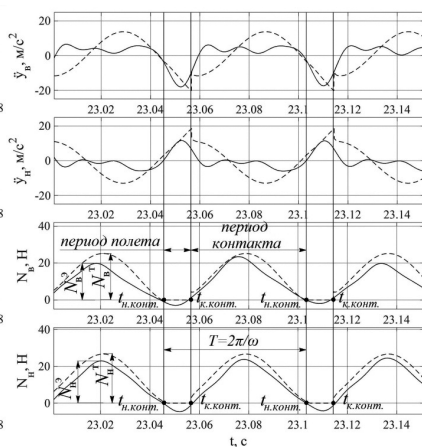


Рис. 13. Пример экспериментальных и расчетных осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО при  $d_{экр} = 0,32$  мм,  $n = 1038$  об/мин,  $M_{деб} = 0,32$  кг·м,  $h = 10$  мм:  $\ddot{y}_n$  и  $\ddot{y}_v$  – вертикальные ускорения нижнего и верхнего ТО;  $N_n$ ,  $N_v$  – силы нормальной реакции слоя на нижний и верхний ТО

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных моментов начала и окончания контактов слоя с ТО и сил нормальной реакции слоя на ТО (с погрешностью до 20 %) подтверждает достоверность найденных значений параметров модели слоя материала, отображающих его деформационные характеристики в направлении оси  $y$ , и адекватность предложенной модели для установления параметров перемещения слоя реального песка ТО.

***Идентификация параметров перемещения модели слоя по оси  $x$  реальному слою крупного и мелкого песка.***

На втором этапе идентификации параметров модели слоя материала были определены численные значения коэффициентов сопротивления модели слоя при ее деформировании ТО в направлении оси  $x$  (рис. 3). Идентификация проводилась путем сравнения экспериментально измеренных значений скорости транспортирования слоя песка в принятом в соответствии с методикой экспериментов диапазоне изменения параметров колебаний ТО и зазора  $h$  открытия заслонки для двух видов песков и расчетных значений скорости транспортирования при подборе методом итерации с использованием программы «Виброоттика 1» коэффициентов  $c_{3x}$ ,  $b_{3x}$  (рис. 3) сопротивлений движению модели слоя

по оси  $x$ , обеспечивающих удовлетворительное совпадение (с погрешностью до 20 %) значений средней скорости вибротранспортирования материала. Найденные значения упомянутых коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Средние расчетные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению слоя песка по оси  $x$**

Крупность частиц песка $d_{\text{экр}}$ , мм	$c_{3x}$ , $10^6$ Н/М	$b_{3x}$ , $10^4$ Н·с/м	№ опыта по табл. 3	Экспериментальные значения $V_{\text{тр}}$ , м/с	Расчетные значения $V_{\text{тр}}$ , м/с	Погрешность расчета, %
0,32	2,59	0,98	1	0,073	0,072	1,4
			3	0,038	0,044	15,8
			5	0,107	0,086	19,6
			7	0,029	0,029	0
0,49	3,15	1,32	2	0,021	0,025	19,0
			4	0,064	0,053	17,2
			6	0,045	0,052	15,6
			8	0,043	0,036	16,3

Выполненные исследования по идентификации параметров модели взаимодействия ТО со слоем материала позволяют сделать вывод о ее адекватности для описания динамики перемещения реального слоя песка и достоверности найденных значений упруго-вязких коэффициентов сопротивлений перемещению модели по осям  $y$  и  $x$  и параметра « $e$ » для песков различной крупности, различного зазора  $h$  открытия заслонки и при различных параметрах колебаний ТО.

Кроме указанного для упрощения инженерного расчета транспортной производительности установки (раздел 4) была экспериментально определена регрессионная зависимость скорости транспортирования слоя  $V_{\text{тр}}$  от четырех факторов со следующими интервалами варьирования: крупность частиц песка  $0,32 < d_{\text{экр}} < 0,49$  мм, момент дебалансов вибровозбудителей  $0,32 < M_{\text{деб}} < 0,388$  кг·м, частота вращения дебалансов  $1000 < n < 1300$  об/мин, зазор открытия заслонки для регулирования транспортной производительности установки  $10 < h < 20$  мм. Определение скорости транспортирования слоя осуществлялось по производительности установки  $Q = m/t$  путем измерения продолжительности  $t$  (в сек) наполнения мерной емкости пересчетом по формуле  $V_{\text{тр}} = Q/(S \cdot \gamma)$ , где  $S$  – площадь

поперечного сечения потока материала в рабочей камере (поз. 3, рис. 6),  $m^2$ ;  $\gamma$  – объемная масса материала,  $кг/м^3$ .

Условия проведения опытов и результаты измерений в выполненных экспериментах приведены в табл. 3.

Обработка результатов выполненных экспериментов показала, что опыты однородны (по критерию Стьюдента), дисперсии однородны (по критерию Фишера), полученные модели по критерию Фишера адекватны. Полученное уравнение регрессии для средней скорости транспортирования (приведено после исключения незначимых коэффициентов):

$$V_{тр} = 10^{-2}(5,25+0,92x_1+1,92x_2 + 0,35x_3 + 1,08x_4 + 0,91x_1x_2 + 0,27x_1x_3). \quad (31)$$

Таблица 3

**Результаты эксперимента по исследованию скорости транспортирования**

№ опыта	$x_1 = d_{звк}$	$x_2 = h$	$x_3 = M_{деб}$	$x_4 = n$	Среднее арифметическое значение $y = V_{тр}$
	мм	мм	кг·м	об/мин	м/с
1	0,49	20	0,32	1000	0,073
2	0,32	10	0,32	1000	0,038
3	0,49	10	0,32	1300	0,107
4	0,32	20	0,32	1300	0,029
5	0,49	20	0,39	1300	0,021
6	0,32	10	0,39	1300	0,064
7	0,49	10	0,39	1000	0,045
8	0,32	20	0,39	1000	0,043

**4. Методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки.**

Рекомендации разработаны для практического применения результатов исследований при проектировании оттирочно-очистительных установок на основе разработанной методики расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибрирующими ТО с применением созданного алгоритма и программы для ЭВМ «Виброоттирка 1». Рекомендации позволяют на стадии проектирования промышленных оттирочно-очистительных установок для обогащения поверхности песков определять параметры их конструктивных элементов (массы ТО, жесткости упругих элементов установки, размеры слоя и ТО) и режимы их работы (параметры вибрации ТО, длительности

движения слоя песка в контакте и без контакта с ТО и положение заслонки для регулирования скорости транспортирования песка), а также технологические параметры (производительность установки, силы реакции взаимодействия слоя и ТО, характеризующие сжимающие напряжения в слое, время процесса обработки песка и скорость его транспортирования).

Внедрение разработанных рекомендаций по проектированию промышленных оттирко-очистительных установок для обогащения поверхности песков осуществлено в ЗАО НИПКБ «Стройтехника». Также данные рекомендации были применены при создании в ЗАО НИПКБ «Стройтехника» экспериментальной установки для оттирки и механоактивации песков и проведении экспериментальных работ по подбору рациональных режимов ее работы для получения экспериментальной партии обогащенных песков, при испытаниях показавших высокую эффективность их применения в промышленном производстве сухих строительных смесей ЗАО «Метробетон».

Ожидаемый экономический эффект от внедрения промышленной установки для обогащения оттиркой поверхности песков производительностью 10 т/ч достигается за счет снижения капитальных затрат и снижения себестоимости производства обогащенного строительного песка и составляет 1,079 млн руб. со сроком окупаемости 1,2 года.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Предложен инновационный способ и установка непрерывного действия для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов (песка), основным рабочим органом которой является двухмассовый виброконвейер с двумя транспортирующими органами (ТО), совершающими синфазные колебания в продольном и антифазные колебания в поперечном направлениях, обеспечивающими в период их сближения и начала контакта со слоем объемное деформирование слоя, что повышает напряжения в слое, интенсифицируя трение между частицами и процесс оттирки частиц, а при потере контакта ТО со слоем обеспечивает перекомпоновку зерен в слое в период его разрыхления (патент РФ №2675554).

2. Разработана модель, описывающая процесс перемещения элементов трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО», в которой механо-реологические свойства и сопротивления слоя при его деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях отображены феноменологической упруго-вязко-инерционной одномассовой моделью, на основе которой составлена расчетная схема для определения параметров перемещения ТО и слоя при их взаимодействии с учетом механо-реологических свойств слоя и сопротивлений его перемещению относительно ТО и упруго-вязких сопротивлений элементов конструкции двухмассового виброконвейера с упругими связями его опор и элементов взаимодействия двух ТО.

3. Выполнено математическое описание всех возможных движений элементов модели трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО», отображающей взаимодействие ТО со слоем материала при его деформировании в двух взаимно перпендикулярных направлениях, на основе которого разработаны алгоритм и программа для расчета на ЭВМ и анализа параметров перемещения слоя материала двумя ТО и скорости его вибротранспортирования.

4. На основе выполненных экспериментальных исследований параметров вибротранспортирования слоя песка двумя ТО, колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях, составлены уравнения регрессии скорости транспортирования слоя песков различной крупности, выполнена идентификация параметров механореологической модели слоя материала реальному слою песка при его деформации ТО и определены численные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению модели слоя в горизонтальном и вертикальном направлениях для двух видов песков и функциональная зависимость параметра « $e$ », характеризующего степень заполнения материалом пространства между двумя ТО, от параметров колебаний ТО, положений заслонки, регулирующей производительность установки, и крупности песка.

5. Подтверждена адекватность предложенной математической модели трехмассовой механической системы реальному процессу взаимодействия элементов конструкции двухмассового виброконвейера и слоя обрабатываемого песка при его транспортировании с обеспечением объемной деформации слоя. Это позволило применить разработанную модель, алгоритм и программу «Виброоттирка 1» при создании методики расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами оттирко-очистительной установки.

6. Разработана методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирко-очистительной установки. Данная методика и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирко-очистительной установки внедрены в ЗАО НИПКБ «Стройтехника» при создании экспериментальной установки и для проектирования промышленных установок для обогащения очисткой поверхности зерен песка. Применение экспериментальной установки для обогащения очисткой поверхности песков и приготовление на их основе опытной партии сухих строительных смесей в ЗАО «Метробетон» показало высокую эффективность использования этих обогащенных песков в технологии производства сухих строительных смесей, что подтверждает высокую эффективность инновационной оттирко-очистительной установки для обогащения очисткой поверхности строительных песков.

7. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка методом оттирки и механоактивации производительностью до 10 т/ч достигается за счет снижения капитальных вложений и снижения себестоимости производства продукции и составляет 1,079 млн руб. со сроком окупаемости 1,2 года.

Эффективность разработанной установки для виброобогащения очисткой поверхности зерен песка подтверждает практическую значимость выполненных исследований и обуславливает перспективы дальнейшего применения данной установки в строительстве, а также других (литейной, стекольной, химической и пр.) отраслях промышленности.

## IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и приравненные к ним*

1. Сизиков, С.А. Расчет производительности установок для сушки и обеспыливания отсеков производства щебня в аэровиброкипящем слое / С.А. Сизиков, Г.М. Вяткин, В.С. Сизиков, А.Д. Шуляков // Обогащение руд. – 2013. – № 5. – С. 25–29.

2. Евтюков, С.А. Динамика взаимодействия рабочих элементов вибро-ударного грохота со слоем перемещаемого материала / С. А. Евтюков, Сизиков В. С. // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 4(51). – С. 133–139.

3. Сизиков, В.С. Виброобогащение мелких заполнителей бетонов методами оттирки и механоактивации / В. С. Сизиков // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 6 (53). – С. 205–210.

4. Сизиков, В.С. Упруго-вязкая модель взаимодействия слоя сыпучей среды с двумя противофазно вибрирующими стенками виброконвейера / В. С. Сизиков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 225–231.

5. Сизиков, В.С. Математическое моделирование виброперемещения сыпучей среды противофазно вибрирующими стенками транспортирующего органа (часть 2) / В.С. Сизиков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 5 (50). – С. 213–218.

6. Сизиков, В.С. Математическое моделирование виброперемещения сыпучей среды противофазно вибрирующими стенками транспортирующего органа (часть 1) / В.С. Сизиков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1 (60). – С. 214–220.

7. Репин, С.В. Совершенствование оборудования для производства бетонов и растворов в зимних условиях / С.В. Репин, В.С. Сизиков, С.А. Сизиков, А.П. Скрипилов // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 1. – С. 15–20.

8. Евтюков, С.А. Определение параметров экспериментальной установки механоактиватора/ Евтюков С.А., Сизиков В.С., Сизиков С.А. // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – №. 1(66). – С. 134–140.

9. Сизиков, В.С. Рациональные режимы обогащения мелких заполнителей бетонов методом виброобъемного воздействия / В.С. Сизиков, С.А. Евтюков // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 156–162.

### *Прочие публикации*

1. Evtukov, S.A. Моделирование процесса перемещения сыпучей среды по сити виброударного грохота / S.A. Evtukov, V.S. Sizikov, J. Rajczyk // Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo. – 2016. – P. 86–94.

2. Сизиков, В.С. Математическое моделирование виброперемещения слоя сыпучей среды, расположенной между противофазно вибрирующими стенками / В.С. Сизиков // Материалы 69-й Международной научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых. Актуальные проблемы современного строительства. – СПб: СПбГАСУ, 2016. – С. 139–144.

3. Сизиков, В.С. Виброорган с двумя антифазно колеблющимися стенками. Свид. о гос. регистр. прог. для ЭВМ № 2016618506 / В. С. Сизиков // Зарег. 06.06.2016 г.

4. Сизиков, В.С. Определение параметров виброперемещения слоя сыпучей среды двумя противофазно колеблющимися транспортирующими рабочими органами / В. С. Сизиков // Материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Архитектура – строительство – транспорт. В 3 ч. Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы. – СПб: СПбГАСУ, 2016. – С. 72–77.

5. Сизиков, В.С. Обогащение зернистых материалов методами оттирки и механоактивации способами виброобъемного деформирования / В.С. Сизиков // Материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Архитектура – строительство – транспорт. В 3 ч. Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы. – СПб: СПбГАСУ, 2017. – С. 64–67.

6. Сизиков, В.С. Анализ параметров динамики взаимодействия механо-активатора со слоем материала при его вибротранспортировании / В. С. Сизиков // Материалы 71-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Актуальные проблемы современного строительства. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 100–107.

7. Сизиков В.С., К вопросу идентификации параметров модели виброобъемного деформирования слоя сыпучей среды противофазно колеблющимися органами оттирочной машины / В.С. Сизиков // Материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета. Архитектура – строительство – транспорт. В 3 ч. Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы. Экономика и правовое регулирование в архитектуре и строительстве. СПбГАСУ. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 25–29.

8. Способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления : пат. 2675554 Российская Федерация : МПК В 01 F 3/18, В 01 F 11/00, В 02 С 19/18 / Сизиков В.С., Сизиков С.А. ; заявитель и патентообладатель Сизиков В.С. – 2016140584/05 ; заявл. 14.10.2016 ; опубл. 19.12.2018.

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 26.06.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,57. Тираж 120 экз. Заказ 66.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Отпечатано на МФУ.

198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

