

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

СИЗИКОВ ВАЛЕНТИН СТАНИСЛАВОВИЧ

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

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Евтюков С.А.

Санкт-Петербург – 2020

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ОЧИСТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНОВ (ПЕСКОВ)...	
1.1. Обзор оборудования для обогащения мелких заполнителей бетонов и анализ эффективности его применения.....	13
1.2. Выбор и обоснование рациональной конструкции установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка	28
1.3. Анализ работ в области вибротранспортирования сыпучих сред.....	32
Выводы.....	47
1.4. Цели и основные задачи исследований.....	49
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ ДВУМЯ ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ ОРГАНАМИ ОТТИРОЧНО-ОЧИСТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	51
2.1. Выбор модели и расчетная схема динамики перемещения слоя сыпучей среды вибротранспортирующими органами	51
2.1.1. Принцип работы оттирко-очистительной установки и схема сил взаимодействия между слоем и вибротранспортирующими органами.....	51
2.1.2. Выбор модели для анализа динамики перемещения слоя материала двумя вибротранспортирующими органами	57
2.1.3. Расчётная схема динамики перемещения слоя сыпучей среды вибротранспортирующими органами и схема возможных движений слоя.....	58
2.2. Математическое моделирование динамики перемещения слоя материала вибротранспортирующими органами	63
Выводы.....	84
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПЕСКА ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ ОРГАНАМИ.....	86
3.1. Цели и задачи экспериментальных исследований.	87

3.2. Методика проведения экспериментальных исследований.....	90
3.2.1. Выбор и обоснование параметров исследуемого процесса и уточнение объемов исследования.....	90
3.2.2. Описание конструкции экспериментальной установки.....	93
3.2.3. Измерительные приборы и оборудование.....	98
3.2.4. Порядок проведения экспериментов и обработки результатов опытов..	105
3.3. Проведение и результаты экспериментальных исследований.....	111
3.3.1. Идентификация параметров модели слоя песка при его поперечной деформации вибротранспортирующими органами.....	111
3.3.2. Определение скорости транспортирования слоя песка и идентификация параметров модели слоя при его продольной деформации вибротранспортирующими органами.....	120
Выводы.....	126
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	130
4.1. Результаты внедрения рекомендаций по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки.....	130
4.2. Оценка экономической эффективности применения инновационной оттирочно-очистительной установки для обогащения методом оттирки природных песков	133
Выводы.....	134
Заключение.....	136
Список литературы.....	139
Приложение А. Методика расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами оттирочно-очистительной установки.....	153
Приложение Б. Рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки.....	167

Приложение В. Документация по внедрению результатов диссертационных исследований.....	174
Приложение Г. Техничко-экономическое обоснование использования установки для обогащения очисткой поверхности зерен мелких заполнителей бетонов (песков).....	187

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленных технологий производств, направленных на добычу материально-сырьевых ресурсов для производства строительных конструкций и изделий, неразрывно связано с поиском путей повышения качества продукции. Данное развитие невозможно без использования высококачественного сырья с заданными свойствами. В стройиндустрии основная продукция и сооружения изготавливаются из различных смесей, компоненты которых как правило получают путем измельчения таких природных материалов, как гранит, базальт, доломит и других, а также добычей различных песков, включая кварцевый, карьерным способом.

Часто конечными продуктами переработки этих материалов в карьерах являются фракционированный и обогащенный щебень и песок для производства строительных бетонов и растворов, а также обогащенный кварцевый песок для выплавки стекла и приготовления формовочных смесей литейного производства и др. Определяющими свойствами компонентов смесей являются плотность, прочность, крупность, фракционный состав, чистота поверхности и форма зёрен, а также другие физико-механические и физико-химические свойства зёрен материала. В частности, нормирование этих свойств при производстве различных материалов и изделий предусматривается ГОСТами и другими регламентирующими техническими документами РФ.

Для достижения заданных свойств компонентов смесей производят их обогащение, т.е. улучшение свойств этих материалов и увеличение концентрации полезного компонента в полученном обогащённом продукте при переработке исходного сырья специальными методами. В частности, это позволяет обеспечить существенную экономию дорогостоящих вяжущих материалов при производстве смесей и высокое качество смесей, например таких, как цементно- и асфальтобетонных, строительных растворов, смесей для производства композиционных материалов, сухих строительных смесей и др.

В последнее время стал применяться новый специальный вид обогащения заполнителей бетонов методом оттирки и механоактивации их поверхности, позволяющий существенно повысить физико-механическую активность поверхности заполнителей и соответственно повысить качество приготавливаемых на их основе бетонных и растворных смесей.

Оттирка и механоактивация – это эффективные способы повышения реакционной способности поверхности твёрдых частиц к диффузионным процессам при приготовлении строительных смесей [64]. Процессы оттирки и механоактивации поверхности минеральных сыпучих материалов осуществляются различными способами механического нарушения сплошности поверхности твёрдого тела. При этом важным фактором является очистка поверхности зерен материала от загрязняющих примесей и окислов наряду с увеличением свободной активной поверхности образующего материал вещества.

В современный период коллективы многих научных институтов за рубежом и в нашей стране (Института физической химии и электрохимии РАН, Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Института проблем машиноведения РАН, СоюзДорНИИ, ЗАО «Механобр инжиниринг», ФГУП «ВНИПИИстромсырье», Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Института геологии и минералогии СО РАН и др.) нацелены на решение проблемы поиска эффективных способов и технических средств для механоактивации минеральных зернистых материалов. Столь широкий интерес к данной проблеме и появление большого числа новых установок свидетельствует, что до сих пор не найдена удовлетворительная конструкция аппарата для механоактивации поверхности зерен материала, поскольку «... при кажущейся простоте выбор правильного аппаратурного решения и оптимизация режимов активации представляют сложную инженерную задачу» [69].

Одним из эффективных способов обогащения сыпучих сред методом оттирки поверхности зерен материала от загрязняющих мелкодисперсных примесей и окислов и ее механоактивации является способ, предложенный автором [101], заключающийся в том, что механическая очистка поверхности частиц

обеспечивается путем объемной деформации слоя материала внешними вибрационными силами, сопровождаемой увеличением напряжений в слое и сил трения в зоне контактов поверхностей частиц, что повышает эффективность самооттирки поверхности зерен материала. Данный способ реализуется в установке непрерывного действия, основным рабочим органом которой является двухмассовый виброконвейер, воздействующий на обрабатываемый слой материала двумя транспортирующими органами (ТО), расположенными горизонтально или пологонаклонно вверх либо вниз и совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях.

Настоящая работа направлена на создание эффективной установки для обогащения поверхности мелких заполнителей бетонов (песков), представляющей собой двухмассовый виброконвейер, реализующий указанный инновационный способ оттирки и механоактивации частиц от загрязняющих примесей путем динамического объемного деформирования слоя материала вибрационными ТО в процессе его транспортирования.

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.V. 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 оттирочно-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 оттирочно-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 оттирочно-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 128 источников, и четырех приложений на 44 страницах. В работе представлено 88 формул, 9 таблиц и 60 рисунков.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ОЧИСТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНОВ (ПЕСКОВ)

1.1. Обзор оборудования для обогащения мелких заполнителей бетонов и анализ эффективности его применения

Развитие строительного производства неразрывно связано с повышением требований к качеству строительных материалов, используемых при возведении объектов промышленного, гражданского, дорожного и других видов строительства. Поскольку основными материалами, применяемыми в строительстве, являются бетоны и растворы, то одним из основных способов улучшения их качественных характеристик является обогащение крупных (щебня) и мелких (песка) заполнителей, основанное на удалении из их массы загрязняющих илистых, глинистых и прочих примесей, в том числе содержащихся на поверхности их зерен, что существенно активизирует процесс взаимодействия всех компонентов смесей, включая вяжущие (битум, цемент, известь и пр.). Это предопределяет актуальную задачу создания эффективного оборудования для обогащения песка путем активации его поверхности.

Повышение активации процесса взаимодействия зерен мелкого заполнителя (песка) со связующим и другими компонентами смеси достигается удалением с поверхности зерен адгезионно связанных с ней загрязняющих мелкодисперсных частиц различного рода (илистых, глинистых и др.) и оксидных пленок, а также разрушением кристаллической решетки твердого тела и химических связей в молекулах путем нарушения сплошности поверхности зерен обогащаемого материала в процессе механоактивации. При этом всякое измельчение зерен, например методами их дробления или истирания, приводит к образованию новой (свежей) поверхности и является эффективным способом механоактивации [67]. Однако процесс измельчения зерен материала неизбежно вызывает повышение энергоемкости и изменение фракционного состава обрабатываемого материала, нежелательное для ряда технологий.

Обогащение песков методом оттирки поверхности их зерен от мелкодисперсных примесей и оксидных пленок осуществляют «сухими» и «мокрыми» способами [86].

Большая часть горно-обогатительных комбинатов используют «мокрую» технологию, которая позволяет получать обогащенные минеральные зернистые материалы как крупные, так и мелкие (пески). В технологии «мокрого» обогащения зерен песков, в том числе высокоглинистых труднопромывистых песков, широко применяется следующее оборудование: промывочные виброгрохоты с брызгалами, ковшовые классификаторы-обезвоживатели, спиральные классификаторы (рис. 1.1), промывочные машины струйного типа, гидроциклоны, барабанные и центробежные скрубберы, вибромойки типа СМД-88 и др. [16, 49, 104]. Данное оборудование в основном используется для удаления из объема материала содержащейся в нем глины и мелких примесей.

Для более высокой степени очистки поверхности песков в водной среде применяют специальные оттирочные машины, например МО-5, МО-20 фирмы ОАО «Машзавод Труд» [17, 46, 56], фирмы «SPXFlow» [124] и другие подобного принципа действия оттирочные машины (см. рис. 1.2).



Рис. 1.1. Спиральный классификатор для песка.

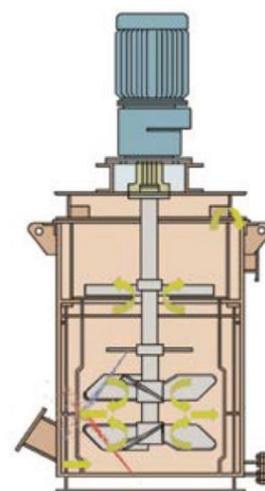


Рис. 1.2. Оттирочная машина для мокрого обогащения кварцевого песка.

Оттирочные машины данного типа используются для очистки поверхностей минералов от пленок, дезинтеграции конгломератов сцементированных частиц и

разрушения слоистых выветренных минералов. Принцип действия упомянутых оттирочных машин основан на подаче потока воды и обрабатываемого материала в бак и активном перемешивании в нем этих сред вращающимися на вертикальном валу одним или двумя импеллерами, вызывающими высокую скорость относительного движения частиц и водной среды. В результате трения частиц друг о друга, а также о лопасти и стенки емкости их поверхность очищается и полируется, а сцементированные сростки материала дезинтегрируются.

Главным недостатком «мокрых» способов обогащения оттиркой песков является значительное потребление пресной воды, а также необходимость проведения дорогостоящих мероприятий по сушке песков для предотвращения их смерзания в зимнее время [80, 81]. Еще один существенный недостаток «мокрых» способов – невозможность применения влажных песков для производства ССС и других порошковых материалов без проведения энергоемкой операции их высушивания [78]. Указанное значительно ограничивает применение «мокрых» способов в промышленной технологии обогащения мелких заполнителей, и на современном этапе явно прослеживается тенденция перехода на более эффективные «сухие» способы обогащения [70]. В частности, на Раменском ГОКе, расположенном в Московской обл., внедрение «сухой» технологии обогащения взамен «мокрой» привело к резкому снижению энергозатрат (на 50 %) во всех операциях технологии обогащения и удешевило природоохранные мероприятия [55].

«Сухой» способ обогащения очисткой песков от загрязняющих веществ осуществляют пневматическим, электрическим, механическим, а также комбинированным методами. Такие методы обработки материалов используются в пневмокласификаторах, где осуществляется разделение зерен песка и частиц загрязняющих примесей воздушным потоком [16, 49, 53, 78], в том числе при дополнительном воздействии на материал вибрацией в классификаторах виброкипящего слоя [53], в электрических классификаторах и сепараторах, использующих силу электрического поля для выноса из потока очищаемого материала загрязняющих пылевидных частиц [16, 34, 71, 103], в механических

классификаторах, применяемых для отсева материала по крупности [16, 45, 47, 98, 120, 125] и отделения от песков зерен малой прочности [49], а также в различных аппаратах для классификации и обеспыливания, использующих комбинацию нескольких видов физических воздействий [49, 68, 71, 73, 102, 103, 116]. Перечисленное оборудование позволяет эффективно удалять из объема обогащаемого материала в основном мелкодисперсные примеси (т.е. производить обогащение классификацией, включая обеспыливание песка) и при этом удалять с поверхности зерен только легкоотделяемые загрязнения вследствие низкой интенсивности силового воздействия на зерна обогащаемого материала. Данное оборудование редко применяется для операции оттирки песков ввиду низкой эффективности оттирки примесей от их поверхности.

Более высокая эффективность удаления загрязнений с поверхности зерен мелких заполнителей бетонов достигается в машинах специализированного назначения, относящимся к группе оттирочно-очистительного оборудования, в которых операция обогащения зерен материала оттиркой является основной наряду с совмещением ее с другими технологическими процессами. К оборудованию данной группы относятся очиститель для песчаных материалов конструкции Союздорнии и ПКБ Главстроймеханизации [49], сушильно-очистительный барабан СоюзДорНИИ [49], вибропневмоочистительные грохоты [49, 68] и грохоты специального типа [45, 47, 98, 120, 125], а также аппараты с перемешивающими устройствами, основанные на механическом разрыхлении слоя сыпучей среды перемешиванием рабочими органами различного типа (лопастными, шнековыми, скребковыми и пр.) при одновременной продувке слоя воздухом с выносом мелких частиц [22, 35, 84, 109, 123 и др.].

Одними из современных машин такого типа являются горизонтальная и вертикальная оттирочные машины, выпускаемые фирмой ООО «Сибтехлит» [35, 109], которые специально предназначены для процессов «сухой» оттирки кварцевых песков, используемых в строительных, формовочных и стекольных смесях, путем отделения загрязняющей пленки и наростов от поверхности песчинок с последующим удалением ее через систему пылеулавливания.

Конструкция вертикальной оттирочной машины (рис. 1.3, *а*) подобна упомянутой выше конструкции оттирочной машины для мокрого» обогащения кварцевого песка [124], за исключением того, что в оттирочную камеру вместо потока воды подается поток воздуха и вместо импеллера используется вращающийся на вертикальном валу оттирочный диск. Загрузка материала осуществляется в верхнюю часть оттирочной машины через загрузочное окно после предварительного разрушения крупных агломератов сцементированного с глиной песка в специальном устройстве. Попадая на вращающийся оттирочный диск, песчинки под действием центробежных сил устремляются к внутренней стенке оттирочной камеры, соударяются с ней и попадают в падающий слой, где осуществляется трение песчинок друг о друга, а также о стенку оттирочной камеры. Далее материал попадает на установленные в камере наклонные пластины, образующие между собой три зоны пересыпки, через которые продувается воздушный поток, унося с собой в пылеулавливающую систему пылевидную фракцию песка и загрязняющие пленки и наросты. Подобные по конструкции специальные машины, использующие в качестве активных рабочих органов вращающиеся на валу диски для дезинтеграции агломератов обрабатываемой сыпучей среды (песка, молотой глины и др.) и оттирки и механоактивации их зерен с одновременной продувкой потока воздуха через слой, выпускаются также фирмами Spxflow (рис. 1.3, *б*) [75, 123] и ООО «Баскей» [22, 75] и др.

Также широкое применение находят оттирочные установки горизонтального типа, конструкция которых подобна конструкции машины для оттирки загрязняющих пленок от зерен песка, выпускаемой фирмой ООО «Сибтехлит» (рис. 1.3, *в*) [35]. Загрузка материала в установку производится через верхнее окно установки, внутри которой вращаются навстречу друг другу два вала с истирающими дисками. При перемешивании материала дисками (лопастями валов) осуществляется удаление пленки связующего в кипящем слое, образуемого продувкой воздуха через слой обрабатываемого материала. Отработанный воздух после кипящего слоя выводится из установки, унося с собой в пылеулавливающую систему пылевидную фракцию песка и пленки связующего.

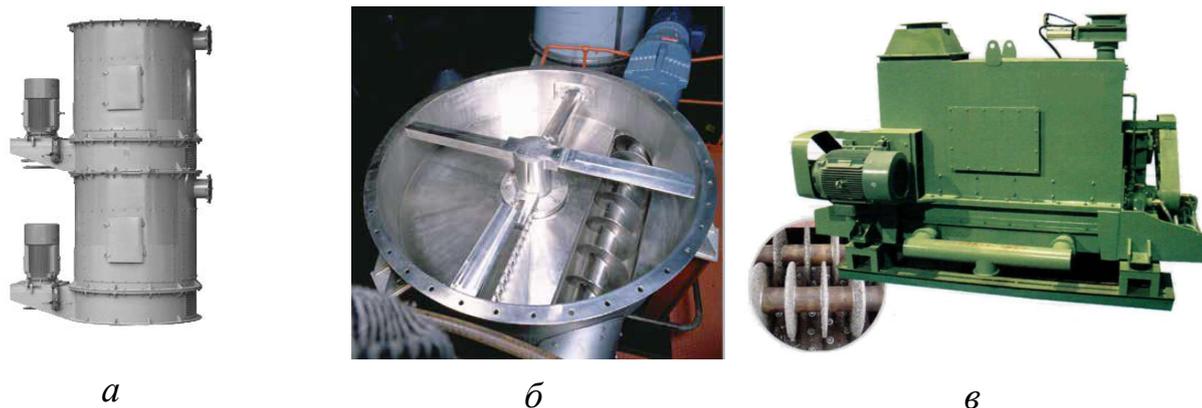


Рис. 1.3. Специальное оттирочно-очистительное оборудование для «сухого» обогащения зернистых материалов: *а* – вертикальная оттирочная машина конструкции ООО «Сибтехлит»; *б* – установка для сушки и измельчения «Spin flash» фирмы Spxflow; *в* – горизонтальная оттирочная машина конструкции ООО «Сибтехлит».

Положительным в специальных установках, производимых фирмами ООО «Сибтехлит», Spxflow, ООО «Баскей» и др., является то, что оттирка и активация поверхности кварцевых песков от загрязняющих примесей осуществляется в щадящем режиме обработки песка практически без измельчения его частиц. Существенным недостатком данного оборудования является низкая интенсивность процесса оттирки и механоактивации зерен песка, поскольку при обработке вращающимися дисками слой песка находится в разрыхленном состоянии.

Для повышения качества очистки зерен заполнителей бетонов также применяют различное измельчительно-очистительное оборудование, такое как: аэробильные мельницы [84]; дезинтеграторы (мельницы корзинчатого типа) [67, 84]; сушильно-помольные установки (типа «Тандем», ФРГ); сушильно-измельчительные установки (в частности, производства США); центробежно-ударные очистители [78]; центробежно-ударные дробилки и роторно-вихревые мельницы (типа «Флаттор», ООО «Новые технологии – инжиниринг») и другие установки, основанные на использовании роторно-дисковых дробилок ударного действия и воздушного потока для очистки материала от пылеватых примесей.

Основные недостатки ударных очистителей — избыточное измельчение зерен полезного материала и связанные с этим значительные энергетические затраты.

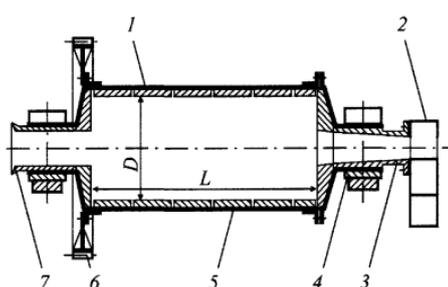
Для очистки поверхности зерен материалов нашли также применение аппараты истирающего действия, такие как валковые, роликовые, планетарные, шаровые, вибрационные, катково-чашевые и катково-тарельчатые мельницы [67, 69, 84]. В указанном оборудовании для удаления из помольной камеры оттертых пылевидных частиц часто используется воздушный поток.

Приведенный обзор аппаратов свидетельствует, что в промышленном производстве для очистки мелких заполнителей бетонов от загрязняющих примесей в основном используется оборудование классификационного назначения. Для более качественной очистки мелких заполнителей часто применяется измельчительное оборудование истирающего, ударного и ударно-истирающего действия. Отметим, что оттирка от загрязняющих примесей и механоактивация поверхности зерен может быть достигнута без существенного измельчения, но измельчения без активации быть не может, то есть любое измельчение минерального материала есть его активация [67, 69].

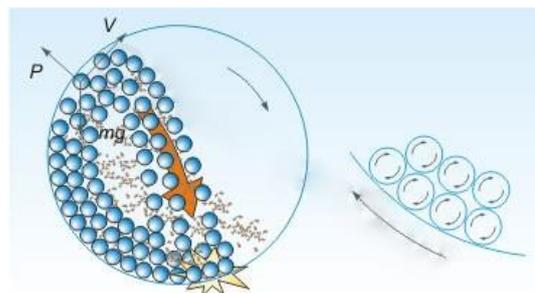
Стремление к универсализации оборудования, т.е. к возможности одновременно осуществлять избирательное измельчение и очистку зерен оттиркой, ударным или ударно-истирающим способами не всегда позволяет эффективно реализовать каждый процесс в отдельности. В связи с этим в последнее время при производстве бетонов, растворов и ССС стало применяться оборудование специального назначения для оттирки и механоактивации мелких заполнителей бетонов, порошковых и вяжущих материалов.

На сегодняшний день коллективы многих научных институтов нашей страны (Института физической химии и электрохимии РАН, Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Института проблем машиноведения РАН, ЗАО «Механобр инжиниринг», Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, Института геологии и минералогии СО РАН и др.) нацелены на решение проблемы поиска эффективных способов и технических средств для механоактивации минеральных зернистых материалов. Почти все предлагаемые для этого аппараты

относятся к измельчительному типу: дезинтеграторы-активаторы; электромассклассификаторы-активаторы; различные мельницы-активаторы (струйные, шаровые барабанные (рис. 1.4), вибрационные (рис. 1.5 [32, 64], 1.6 [66], 1.7 [59], 1.8, 1.9 [126, 128]), валковые, катково-чашевые, катково-тарельчатые, планетарные, центробежно-ударные [72, 84, 107] и др. [67, 69]). Столь широкое разнообразие установок свидетельствует, что до сих пор не найдена удовлетворительная конструкция аппарата для механоактивации поверхности зерен материала, обеспечивающая высокую энергонапряженность процесса и «... при кажущейся простоте выбор правильного аппаратного решения и оптимизация режимов активации измельчением представляют сложную инженерную задачу» [69].



а



б

Рис. 1.4. Шаровая барабанная мельница: а – конструктивная схема (1 – барабан; 2 – улитковый питатель; 3 – загрузочная втулка; 4 – подшипник; 5 – футеровка барабана; 6 – венцовая шестерня; 7 – разгрузочная горловина); б – траектория движения шаров в барабане.

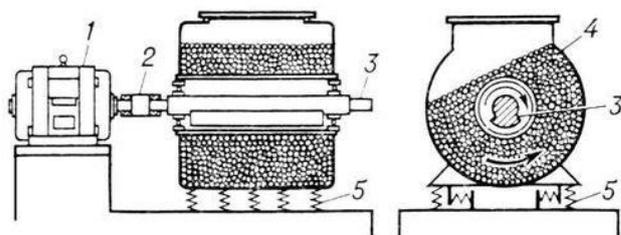


Рис. 1.5. Вибрационная мельница: 1 — электродвигатель; 2 — эластичная муфта; 3 — вал с дебалансом; 4 — барабан; 5 — пружины.



Рис. 1.6. Мельница шаровая вибрационная МВ-0,005.

*a**б*

Рис. 1.7. Виброцентробежная мельница «Активатор - С5000»: *a* – общий вид; *б* – помольный барабан с шарами.

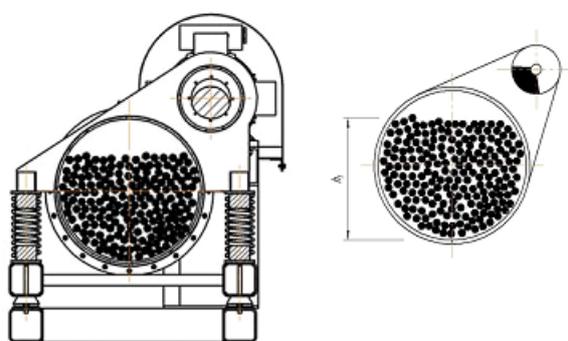


Рис. 1.8. Вибрационная мельница со смещенным виброактиватором МВ-400-ЭКС, заполненная мелющими шарами (рабочий вал с дебалансами показан справа).

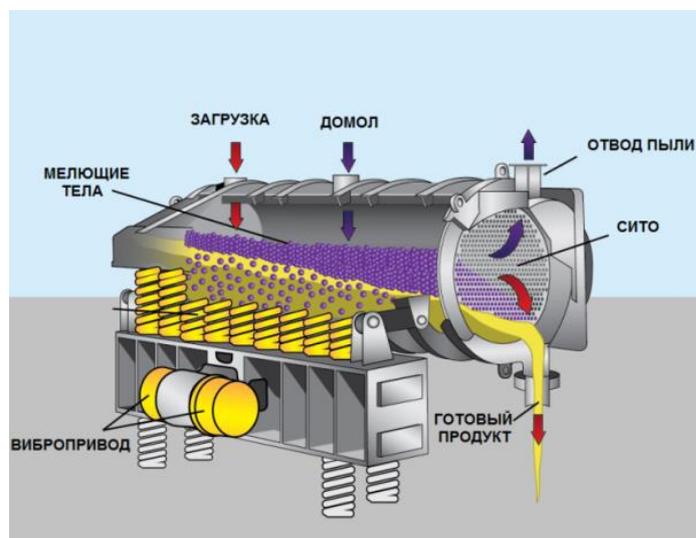


Рис. 1.9. Вибрационная барабанная мельница Vibra-drum (производство США).

Анализ конструкций механоактиваторов показывает, что интенсификация и повышение эффективности процесса механоактивации при разрушении поверхности зерен материала происходят в основном за счет увеличения уровня создаваемых на ней напряжений. Это достигается повышением силового воздействия на зерна материала путем использования аппаратов ударного, истирающего и ударно-истирающего типов. При этом в аппаратах истирающего типа наряду с воздействием мелющих тел и различных измельчающих рабочих органов весьма эффективно одновременно подвергать обрабатываемую среду вибрации, существенно интенсифицирующей истирание зерен и снижающей энергоемкость процесса механоактивации. Увеличение эффективности процесса

механоактивации достигается повышением количества механической энергии, передаваемой единице поверхности зерна, необходимого для разрушения ее сплошности, в единицу времени [64, 69].

Также отметим, что упомянутые выше вибрационные аппараты эффективно применяются для обработки зерен не только природных сыпучих материалов, но и искусственных зерен, например из композиционных материалов (бисер) и металлов. Например, в машиностроении одной из важных технологических операций является операция обработки поверхностей деталей (галтовка, снятие окалин с поверхности, подготовка к окраске, шлифовка и пр.) в ванне с вибрирующей средой пород твердых частиц, таких как кварц, корунд, гранат и пр. (см. рис. 1.8, 1.9).

Из сказанного выше следует, что для осуществления процессов механического обогащения зернистых сред методами оттирки и механоактивации поверхности их зерен, а также для обработки (очистки) поверхностей искусственных и металлических деталей (галтовка и пр.) наиболее эффективным является оборудование, основанное на вибрационном способе воздействия на зерна обрабатываемой среды.

На основе использования эффективных вибрационных методов обработки поверхностей твердых минеральных зерен, таких как гранит, крупный природный и дробленый песок и других твердых зерен в последнее время созданы новые конструкции щековых дробилок, например виброщековые дробилки (рис. 1.10, [3]), ВЩД с наклонной камерой дробления и нежестким креплением вибровозбудителей (рис. 1.11, [82]), ВЩД с вращательными (маятниковыми) колебаниями щек [106], а также конструкции конусных дробилок и мельниц, таких как: конусные инерционные дробилки КИД [21], современные высокочастотные конусные дробилки ВКДС и мельницы ВУМС (рис. 1.12, [25]), ударно-вибрационные конусные дробилки ВКД-300 (рис. 1.13, [54]).

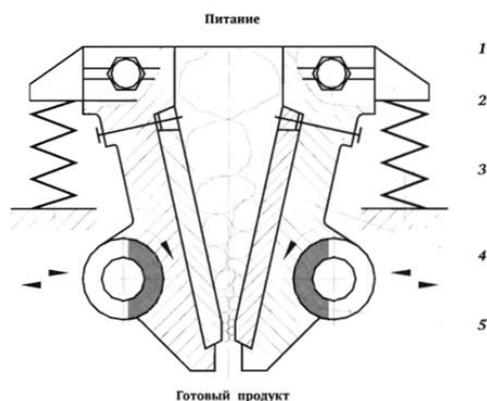


Рис. 1.10. Конструктивная схема виброщековой дробилки конструкции

Механобр:

1 – корпус, 2 - торсион, 3 - амортизатор, 4 – подвижная щека, 5 – приводной дебалансный вибратор (стрелками показаны направления вращения вибровозбудителей и качаний щек)

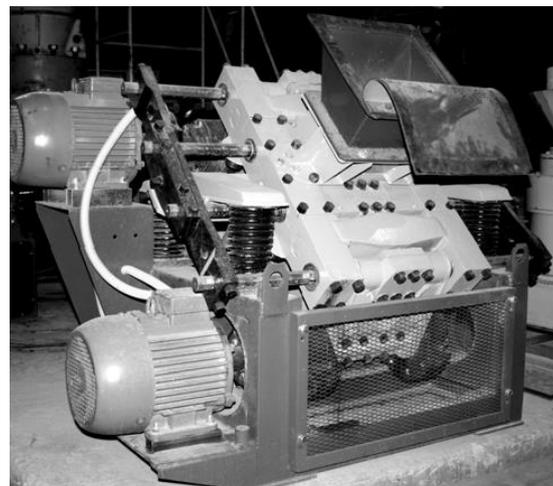


Рис. 1.11. Общий вид ВЩД 80x300 с наклонной камерой дробления и нежестким креплением вибровозбудителей



Рис. 1.12. Общий вид высокочастотной конусной вибродробилки ВКДС-700

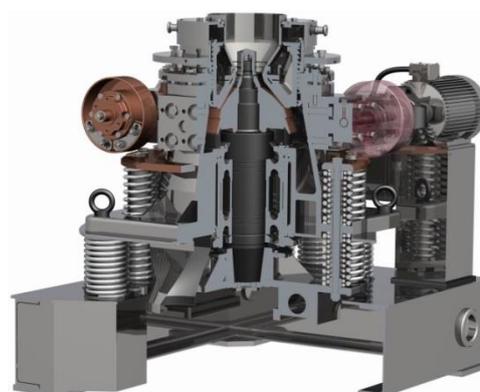


Рис. 1.13. Общий вид ударно-вибрационной конусной дробилки ВКД-300

Отметим, что сфера применения приведенных выше вибрационных щековых и конусных дробилок и мельниц ограничивается исключительно измельчением каменных материалов и соответственно они могут эффективно применяться для механоактивации заполнителей бетонов (щебня и песка) исключительно с измельчением их зерен. Основным недостатком вибро- и виброударных дробилок

и мельниц является избыточное измельчение зерен полезного материала и связанные с этим значительные энергетические затраты, в которых нет необходимости, когда требуется обогащение (очистка) исключительно поверхности зерен без необходимости измельчать материал.

При обогащении очисткой поверхности зерен заполнителей бетонов только от загрязняющих примесей достаточно осуществлять очистку поверхности зерен в «щадящем» режиме оттирки их поверхности, при котором создаваемые в материале напряжения действуют исключительно в поверхностной зоне его зерен [16, 117], т.е. минимизировать измельчение зерен методом истирания их поверхности и исключить измельчение зерен раскалыванием или раздавливанием.

Исходя из сказанного, для обогащения поверхности зерен заполнителей бетонов от загрязняющих примесей методом очистки поверхности зерен в щадящем режиме исключительно за счет истирающего воздействия на поверхность зерен для разрушения сплошности только нанотолщины поверхности зерен из всех видов перечисленного измельчительного оборудования наилучшей конструкцией обладают следующее: мельницы типа ВУМС [25] и другие им подобные по конструкции мельницы, а также шаровые вибрационные мельницы, рассмотренные выше (рис. 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10).

Однако при применении для оттирки мельниц, подобных по конструкции ВУМС (в т.ч. конусных и щековых вибродробилок), возникает необходимость значительного изменения их режимов работы, не допускающих измельчение зерен материала. Однако изменение режимов работы данного оборудования может быть экономически нецелесообразно, поскольку изменение режимов работы установок неизбежно связано со значительным изменением их конструкции, включая изменение инерционных характеристик рабочих органов и масс других элементов конструкции. В случае применения вибрационных мельниц с мелющими шарами чтобы не допускать переизмельчения обрабатываемого материала при оттирке и механоактивации без дробления зерен также необходимо применять «щадящий» вибрационный режим воздействия шаров на зерна обрабатываемого материала и уменьшать время нахождения материала между мелющими шарами, чтобы не

допускать измельчения материала. Отметим, что согласно приведенным данным (табл. 1.1) время, необходимое для помола в шаровой вибромельнице, например конструкции фирмы «Консит-А» (рис. 1.6), исходной пробы кварцевого песка массой 1,6 кг со средним максимальным размером частицы 0,25-0,5 мм до тонины помола $-0,05$ мм составляет не менее 40 мин [66].

Таблица 1.1. Фрагмент таблицы результатов испытаний по измельчению сыпучих минеральных материалов в шаровой вибромельнице МВ-0,005 [66].

Материалы		Аппарат		Гранулометрический состав измельченного (исходного) материала, %									Производительность
Наименование	Исх. размер, мм	Наименование	Размер сеток сит, мм	+2,5	-2,5 +1,25	- 1,25 +0,5	-0,5 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,125	-0,125 +0,063	-0,063 +0,050	-0,05	
Кварцевый песок	См. табл.	Исх.	-		0,3	5,8	65,9		22,1	>	5,6	0,3	*1,6кг за 40мин
		МВ-0,005			0,6		4,6	4,0	>	31,7	59,1		
Полевой шпат	См. табл.	Исх.	-			0,4	11,7		13,2	34,9	18,1	21,7	*1,1кг за 30мин
		МВ-0,005					0,4	1,3	15,3	22,8	60,2		
Карбид кремния (зеленый)	См. табл.	Исх.	-			85,0	15,0						*1,2кг за 30мин
		МВ-0,005			20,6	0,3	79,1						
Стекло	<10	МВ-0,005	1,3								15,4	84,6	*1,2кг за 90мин
Туф	<4	МВ-0,005	-									100	*1л за 30мин
Мел	См. табл.	Исх.	-								60,8	39,2	*1л за 60мин
		МВ-0,005									1,1	98,9**	**фракция «-0,040»

Аналогичное длительное время процесса измельчения (до 40 мин) при помоле кварцевого песка с приведенными выше характеристиками присуще и всем другим известным конструкциям вибромельниц с мелющими телами.

Кроме того, существенным недостатком шаровых вибромельниц является то, что зерна, попадающие в зону контакта шаров со стенками аппарата или друг с другом, вследствие малости площади пятна такого контакта испытывают чрезмерные напряжения, приводящие к их раздробливанию, что является полезным для процессов измельчения материала методом помола, но весьма нежелательно

для процессов, связанных с простой очисткой поверхности зерен без их измельчения. С учетом сказанного наилучшим образом процесс оттирки и механоактивации разрушением сплошности только нанотолщины поверхности зерен может осуществляться в барабанных [69] и вибрационных мельницах без мелющих тел в «щадящем» режиме способом самоизмельчения зерен, которое происходит в слое при его перемещении, вызывающем деформацию слоя с появлением в нем напряжений от действия сил инерции и гравитационных сил. Естественно, что без применения шаров в вибромельницах увеличивается время обработки поверхности материала (и снижается производительность), но при этом положительным является то, что процесс измельчения материала в основном осуществляется методом истирания, т.е. практически без раздробливания его зерен.

Это противоречие, влияющее на эффективность процесса очистки поверхности зерен материала, возможно исключить, если повысить уровень напряжений в слое обрабатываемого материала путем виброобъемного сжатия слоя, т.е. осуществлять процесс виброобъемного деформирования слоя, подобно тому, как это осуществляется в технологии виброуплотнения бетона с пригрузом (в том числе вибрирующим) и, например, в установках для производства мелкоштучных изделий (тротуарной плитки, бордюрного камня и др.) методом объемного вибропрессования [24, 108].

На основании анализа приведенных выше конструкций и принципов работы оборудования, применяемого для обогащения заполнителей бетонов сухими методами очистки их поверхности (оттирка, механоактивация, избирательное дробление, включая обогащение истиранием и измельчением), следует заключить, что на сегодняшний день специальные машины, предназначенные для осуществления оттирки поверхности частиц от загрязняющих примесей в режиме, при котором исключено или минимизировано измельчение частиц заполнителей, например оттирочные машины конструкции ООО «Сибтехлит» [35, 109], малоэффективны и имеют низкую производительность ввиду того, что обработка песка осуществляется в рыхлом, а не плотном слое материала. Интенсификация процессов оттирки и механоактивации песка достигается в основном при

применении вибрационных шаровых мельниц, в которых эти процессы эффективно осуществляется только при значительном измельчении обрабатываемых твердых зерен материала. Применение вибромельниц без мелющих тел для процессов оттирки и механоактивации поверхности заполнителей (песков) за счет истирания частиц друг о друга в вибрирующей среде при отсутствии сил объемного сжатия слоя приводит к чрезмерной длительности протекания процесса, его низкой эффективности и повышенной энергоемкости.

В заключение можно сделать вывод о том, что задача создания эффективных специальных машин для обогащения методом очистки поверхности заполнителей бетонов от загрязняющих примесей остается до сих пор полностью нерешенной и весьма актуальной. При этом поскольку данные процессы переработки материалов наиболее эффективно осуществляются в машинах, основанных на вибрационном принципе действия, а также с учетом бóльшей эффективности машин непрерывного действия по сравнению с машинами периодического действия, при создании новых специальных установок для обогащения поверхности зерен материалов методами оттирки и механоактивации следует отдавать предпочтение вибрационным машинам непрерывного действия.

В процессе создания такого оборудования важно отдельно подходить к решению двух задач: задачи, связанной с нахождением рациональных параметров воздействия на материал рабочих органов и необходимого времени проведения процесса переработки для достижения качественных характеристик получаемого продукта, и задачи определения транспортной производительности таких машин, обеспечивающей заданное время выполнения технологической обработки материала. Последняя задача основана на нахождении скорости транспортирования материала в процессе его переработки. Решение обеих этих задач заключается в установлении закономерностей взаимодействия вибрационных рабочих органов с обрабатываемой сыпучей средой. Проблеме установления таких закономерностей и посвящена настоящая работа.

1.2. Выбор и обоснование рациональной конструкции установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка

Основываясь на указанных в работах [24, 25, 51, 52, 82, 114, 115 и др.] принципах активизации воздействия на зернистые среды, с использованием метода виброобъемного деформирования слоя обрабатываемой среды, в частности, для процессов измельчения, виброуплотнения, вибротранспортирования и др., автором данной работы был предложен новый способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления [101]. В данном способе переработку зернистых материалов осуществляют в транспортно-технологической установке непрерывного действия, основным рабочим органом которой является виброконвейер, представляющий собой горизонтальную или пологонаклонную трубу прямоугольного сечения, составленную из соединенных между собой посредством упругих элементов двух половин и установленных на стенках каждой из половин трубы вибраторов, которые вызывают плоско-параллельные колебания стенок друг относительно друга, воздействующих на расположенный внутри трубы слой материала. Упомянутые две половины трубы виброконвейера выполняют роль его транспортирующих органов (ТО).

Переработка зернистых материалов данным способом осуществляется путем периодического объемного сжатия слоя зернистого материала ТО, совершающими друг относительно друга плоско-параллельные антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, вызывая в период относительного сближения ТО сжимающие напряжения в слое материала при его уплотнении величиной, достаточной для осуществления процессов перемешивания, и/или истирания поверхности зерен материала, и/или разрушения их раздавливанием, а в период относительного удаления ТО друг от друга вызывая разуплотнение слоя материала и перемешивание его зерен, чтобы достичь перекомпоновки зерен материала внутри слоя по отношению к состоянию упаковки зерен в слое в конце предшествующего периода сближения ТО.

В процессе сжатия слоя в вертикальном направлении двумя колеблющимися ТО от действия вынуждающей гармонической силы по оси y , создаваемой дебалансными вибровозбудителями (см. рис. 1.14, *a*), одновременно с ростом напряжений в слое происходит непрерывное перемещение частиц, сопровождающееся увеличением сил давления их друг на друга в точках контактов и сил трения. С дальнейшим ростом напряжений в слое на поверхностях зерен появляются сдвиговые деформации и увеличиваются силы, действующие на поверхность каждого зерна. При этом сначала разрушается поверхность зерен в зонах точечных контактов друг с другом, затем процесс распространяется на большую часть поверхности зерен и в конечном счете при увеличении силового сжатия слоя может произойти раздавливание тела зерна. Возможные пределы перемещений зерен материала внутри слоя, в котором сохраняются контакты между зернами, идеализированных в виде шаров, показаны на рис. 1.15.

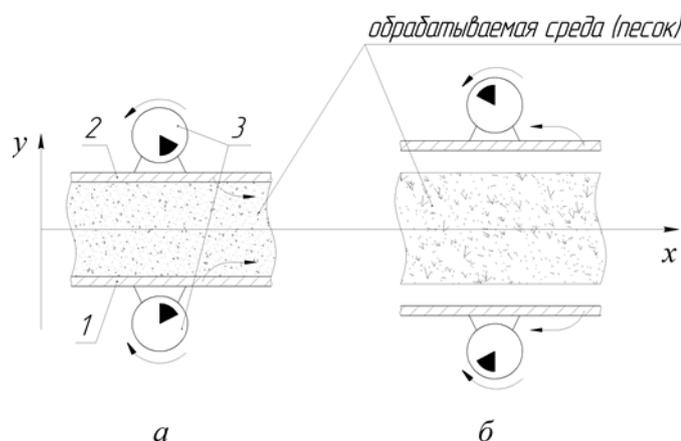


Рис. 1.14. Этапы воздействия ТО на слой материала: *a* – этап сжатия слоя; *б* – этап разжатия слоя. 1 – нижний ТО, 2 – верхний ТО, 3 – дебалансные вибровозбудители.

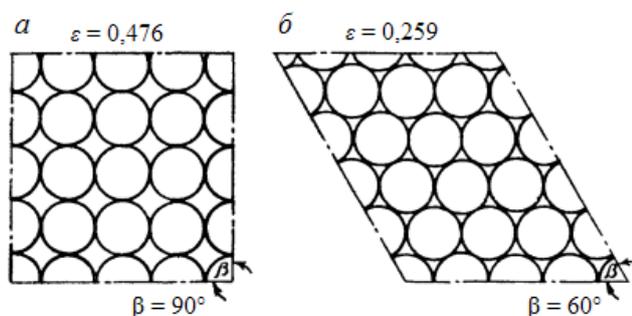


Рис. 1.15. Схемы предельных состояний расположения шарообразных зерен в слое: *a* — при кубической упаковке зерен ($\varepsilon = 0,476$ — наибольшая порозность слоя); *б* — при октаэдрической упаковке зерен ($\varepsilon = 0,259$ — наименьшая порозность слоя).

Для оценки величины объемного сжатия слоя песка приведем пример деформирования слоя высотой 100 мм от величины $\varepsilon=0,434$, соответствующей слою песка в свободно насыпанном состоянии с насыпной плотностью 1500 кг/м^3 при истинной плотности частиц 2650 кг/м^3 , до величины $\varepsilon=0,259$. В этом случае величина деформации слоя составляет 24 мм. Отметим, что приведенная в примере величина деформации является предельной и соответствует состоянию слоя, при котором дальнейшее его сжатие может привести к полному разрушению частиц.

С момента начала отхода рабочих поверхностей виброорганов друг от друга (см. рис. 1.14, б) начинается снижение сжимающих усилий в слое материала, ведущее к активизации перемещения зерен друг относительно друга и их перемешиванию внутри слоя с изменением точек контактов. Этот процесс усиливается при образовании зазора между поверхностями виброорганов и слоем материала. В каждом периоде колебаний виброорганов точки контактов зерен друг с другом изменяются, что способствует подготовке каждой поверхности зерна к последующему циклу силового воздействия на нее, существенно повышая эффективность очистки поверхности зерен оттиркой и механоактивацией истиранием.

Преимущество предложенного способа заключается в том, что при виброобъемном деформировании слоя минерального материала с высокой частотой его циклического нагружения существенно интенсифицируется процесс силового воздействия на поверхность зерен. Такое воздействие наряду с повышением амплитуды колебаний ТО вызывает эффективное разрушение и отделение сцементированных с поверхностью зерен материала загрязняющих примесей и оксидных пленок. При увеличении степени силового воздействия достигается механоактивация поверхности зерен за счет разрушения её сплошности.

Другое важное достоинство виброобъемного деформирования — возможность регулирования качественных параметров процесса обработки материала путем изменения параметров силового воздействия, таких как амплитуды колебаний ТО или сдвига фаз колебаний ТО друг относительно друга

[91, 95]. Это позволяет применять аппарат единой конструкции для проведения процессов обогащения заполнителей бетонов методами избирательного измельчения содержащихся в них материалов низкой прочности, оттирки поверхности зерен заполнителей от загрязняющих примесей и оксидных пленок и механоактивации зерен без существенного их переизмельчения. Также положительным фактором является то, что процессы обогащения очисткой поверхности заполнителей бетонов или избирательного измельчения разрушением конгломератов цементированных частиц при силовом воздействии на слой вибрирующими ТО, обеспечивающими его виброобъемное деформирование, могут осуществляться одновременно с процессом транспортирования в установках непрерывного действия. Технологический процесс очистки поверхности заполнителей, совмещенный с транспортированием слоя материала, заключенным между двумя ТО, осуществляется следующим образом.

При плоско-параллельных колебаниях ТО с их одновременным перемещением в вертикальном и в горизонтальном направлениях с момента соприкосновения поверхностей ТО со слоем и его сжатия происходит перемещение слоя в горизонтальном направлении путем переноса ТО зажатого между ними слоя материала до момента, когда при относительном удалении ТО происходит разжатие слоя с потерей контакта его с поверхностями ТО. Отметим, что перед потерей контакта слоя с ТО в связи с уменьшением силы нормального давления слоя на ТО может происходить перемещение слоя скольжением относительно поверхностей ТО до момента, когда эта сила исчезает и происходит потеря контакта слоя с поверхностью ТО (отрыв), после чего перемещение слоя осуществляется по инерции в направлении транспортирования. В этот период, когда слой находится в свободном перемещении (без контакта с ТО), ТО двигаются в противоположном по горизонтали направлении относительно слоя, возвращаясь к тому положению, в котором они находились в начале предшествующего периода относительного сближения. Это движение происходит до момента соприкосновения со слоем материала, после чего вновь начинается период сжатия слоя.

Чередование таких видов движения слоя в каждом периоде обеспечивает непрерывное транспортирование его в горизонтальном направлении. По существу, описанный процесс транспортирования определяется совокупностью трех видов движения: переноса слоя стенками при их совместном движении, микроброска слоя и его возможным скольжением относительно поверхностей стенок. Применение виброобъемного способа воздействия на материал обеспечивает интенсификацию процесса очистки поверхности его зерен не только за счет вибрационного воздействия ТО на слой материала, принуждая к интенсивному движению зерен в слое, но и путем создания повышенных напряжений в нем при периодическом разжатии и сжатии слоя транспортирующими органами.

Создание транспортно-технологических установок непрерывного действия, основанных на виброобъемном способе воздействия ТО на материал, относится к перспективным направлениям совершенствования оборудования для обогащения методом очистки поверхности зерен заполнителей бетонов. С учетом изложенного, в настоящей работе в качестве объекта исследований принята оттирочно-очистительная установка для обогащения оттировкой поверхности зерен строительных песков инновационным способом виброобъемной обработки слоя двумя вибротранспортирующими органами.

1.3. Анализ работ в области вибротранспортирования сыпучих сред

Учитывая приведенное в разделе 1.1 и 1.2 обоснование актуальности проблемы поиска новых технических решений конструкций оттирочно-очистительного оборудования и перспективность направления дальнейшего совершенствования оборудования непрерывного действия для очистки поверхности зерен заполнителей бетонов на основе применения инновационного способа [101] виброобъемной обработки слоя материала, заключенного между двумя вибротранспортирующими органами, выполнен краткий обзор и анализ работ в области виброперемещения сыпучих сред и методов моделирования данного процесса.

В строительстве и горной промышленности широко используются вибрационные транспортирующие машины для транспортирования сыпучих грузов с производительностью от 1 до 100 и более тонн в час. К таким устройствам относятся горизонтальные и наклонные вибрационные питатели и конвейеры, вертикальные и крутонаклонные вибрационные подъемники с желобчатым транспортирующим органом (ТО) (рис. 1.18, 1.19) и с винтовым желобом ТО (рис. 1.17).

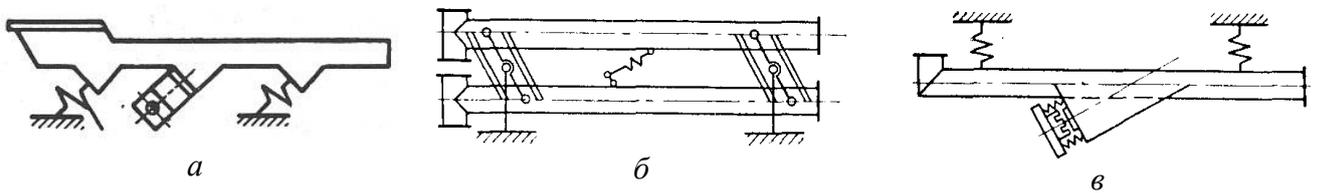


Рис. 1.16. Схема виброконвейеров с различными типами приводов: *а* – с дебалансным, *б* – с эксцентриковым, *в* – с электромагнитным.

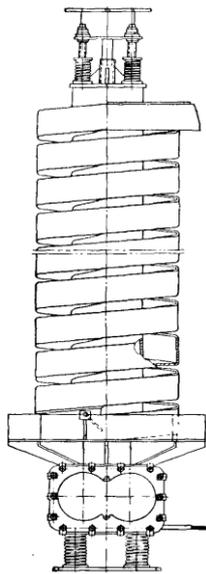


Рис. 1.17. Одномассовый виброподъемник с винтовым желобом конструкции ВНИИСтройдормаша.



Рис. 1.18. Наклонный виброподъемник фирмы General Kinematics (США).

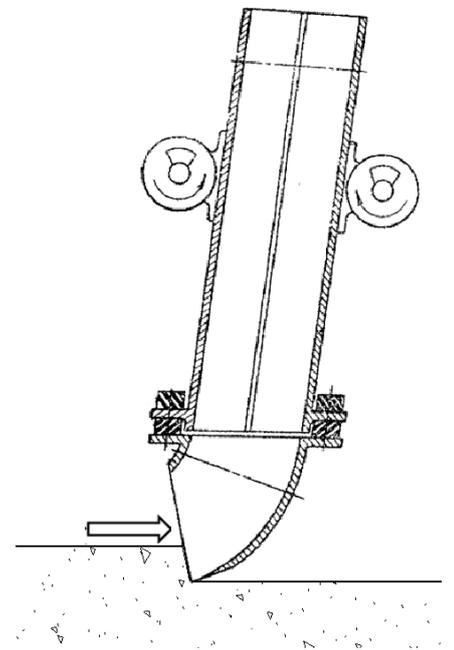


Рис. 1.19. Вертикальный двухмассовый виброподъемник землеройного струга.

По типу привода такие устройства подразделяются на машины с дебалансным (рис. 1.16, *а*), эксцентриковым (рис. 1.16, *б*), электромагнитным (рис. 1.16, *в*), пневматическим и гидравлическим приводами. Конструкция ТО выполняется в виде лотка прямоугольной (рис. 1.18), круглой (рис. 1.16, *б*), овальной и другой формы поперечного сечения.

Конструкция наиболее распространенных в практике горизонтальных виброконвейеров в зависимости от числа колеблющихся масс выполняется по одномассовой (рис. 1.16, *а*, 1.17, 1.18), двухмассовой (рис. 1.16, *б*) или многомассовой схеме. При этом в зависимости от настройки режима колебаний упругой системы виброконвейеры работают в дорезонансным, резонансном или зарезонансным режимах [11, 100].

Общепринятым показателем режима работы виброконвейеров является динамический параметр режима работы вибротранспортирующего органа, характеризующий ускорение вибрации ТО по отношению к ускорению свободного падения g [11, 15, 18, 100]:

$$\Gamma = \frac{A\omega^2 \sin(\alpha + \beta)}{g \cos \alpha},$$

где A – амплитуда колебаний ТО, ω – частота колебаний ТО, α – угол наклона ТО к горизонту, β – угол вибрации. Значениям параметра Γ , большим 1, соответствует режим перемещения отдельной частицы материала с отрывом от поверхности ТО, меньшим 1 – безотрывный режим. Данный показатель позволяет качественно судить о характере движения сыпучего материала при его транспортировании вибрирующим ТО. Также параметр Γ используют для оценки виброн нагруженности машины при проектировании прочностных характеристик вибромашин. В строительной и горной промышленности как правило ограничивают режим работы вибротранспортирующих и других вибрационных машин, не допуская величины параметра Γ более 3-5 единиц при частоте колебаний, не превышающей 50 Гц [11, 20, 21, 100, 105].

Вибрационное транспортирование сыпучих сред является сложным процессом ввиду нелинейности механической системы «слой материала –

вибрационный ТО» и наличия в ней многообразия физических явлений, вызванных взаимодействием материала с грузонесущей поверхностью, например таких как уменьшение относительного сопротивления перемещению сыпучей среды, разделение частиц в слое перемещаемого материала по физическим свойствам (удельному весу, крупности, коэффициентам трения, форме и др.), разрыхление или уплотнение материала. Из-за сложности математического описания данной системы возникло большое количество математических моделей для отображения ее отдельных специфических свойств.

Один из фундаментальных подходов к описанию процессов вибротранспортирования сыпучих сред рассмотрен в работах д.т.н. Блехмана И. И. [14, 15], где слой материала рассматривается в виде материальной точки (частицы), совершающей движение по вибрирующей шероховатой плоскости. Расчетная схема взаимодействия отдельной частицы с поверхностью ТО представлена на рис. 1.20, на которой показаны действующие на частицу сила тяжести P , сила сухого трения F , сила инерции J и сила нормальной реакции N . Модель позволяет исследовать вибрационное движение частицы как в безотрывных режимах ($\Gamma < 1$), так и в режимах с подбрасыванием ($\Gamma > 1$) с определением основных параметров ее перемещения, включая скорость вибротранспортирования и моменты переходов между отдельными видами движений. При этом для решения уравнений, описывающих движение груза на всех характерных этапах его перемещения, как правило применяют метод поэтапного интегрирования [14, 89, 100 и др.].

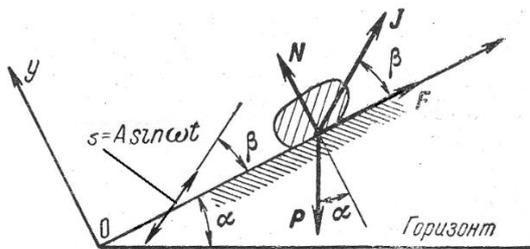


Рис. 1.20. Модель слоя материала в виде материальной точки.

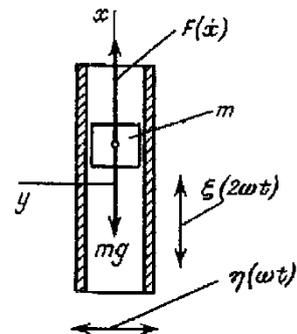


Рис. 1.21. Устройство для вибрационного транспортирования груза вертикально вверх.

Предложенная модель груза в виде материальной частицы с сосредоточенной массой позволяет моделировать разнообразные процессы, связанные с перемещением груза, в частности такие сложные процессы, как моделирование перемещения груза [14] в режиме работы виброподъемника, при котором стенки его ТО совершают продольные колебания с частотой, в два раза превосходящей частоту их поперечных колебаний (рис. 1.20). При этом подъем груза с движением без отрыва от стенок обеспечивается только за счет действия на груз переменных сил инерции и сил трения при специально подобранной фазировке колебаний ТО. Груз моделируется материальной частицей без деформационных свойств (рис. 1.20). В результате выполненных исследований определены области устойчивых режимов направленного движения груза вверх и получены расчетные зависимости для определения скорости виброподъема груза в зависимости от параметров колебаний ТО. Однако в данной работе не приведен анализ сил реакции сыпучего груза на стенки ТО с учетом его поперечного деформирования и не рассмотрен вопрос, как деформационные характеристики материала влияют на изменение закона колебаний ТО.

Разработанная теория виброперемещения материальной частицы (рис. 1.20 и рис. 1.21) широко используется для расчета различных рабочих процессов вибрационных грохотов, сепараторов, конвейеров и питателей, а также вибрационных процессов погружения свай, разделения компонент сыпучих смесей, уплотнения грунта, бункеризации насыпных грузов, ориентированной подачи изделий и др. [14, 15].

Однако как отмечено рядом исследователей [18, 23, 33 и др.], данная модель позволяет с хорошей точностью определять скорость вибротранспортирования отдельных тел достаточно крупных размеров, а также слоя материала, состоящего из достаточно крупных частиц толщиной не более 20-30 кратного среднего размера частиц. При этом с увеличением высоты слоя транспортируемого сыпучего груза на его движение в большей степени оказывают влияние сила сопротивления среды, особенности взаимодействия соседних монослоев груза, диссипация энергии в слое и другие факторы [100].

Для учета влияния вышеперечисленных особенностей процесса на параметры вибротранспортирования сыпучих материалов появились более сложные модели слоя сыпучей среды, отображающие различные внутрислоевые процессы, вызванные взаимодействием отдельных частиц в слое, и деформационные свойства слоя, к которым относятся такие качественные характеристики, как упругость, вязкость, пластичность и инерционность. При этом степень сложности модели определяется количеством параметров вибротранспортирования, которые требуется определить в рассматриваемой задаче, а также требуемой точностью их расчета.

Одним из предложенных подходов к моделированию процессов перемещения сыпучей среды транспортирующими органами, достаточно полно учитывающим свойства сыпучего груза, является метод, при котором слой материала представляется в виде сплошной среды с распределенными параметрами. Такой способ применен в работе [76], где слой сыпучей среды большой высоты представлен в виде упруго-наследственной модели (рис. 1.22), учитывающей упруговязкопластическое поведение слоя под воздействием вибрационных сил и эффект ужесточения слоя при его деформации.

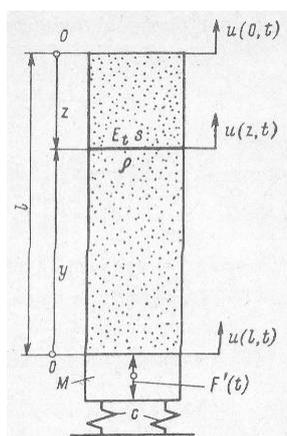


Рис. 1.22. Расчетная схема системы «столб сыпучей среды – ТО – вибровозбудитель».

В модели описание напряженно-деформированного состояния слоя основано на применении к нему закона Гука, в котором коэффициент линейной пропорциональности между напряжениями и деформациями представлен в виде интегрооператорного соотношения с ядром релаксации с параметрами,

отображающими реологические свойства слоя с учетом истории его нагружения и последствия. Данная модель позволяет оценивать изменение параметров колебаний ТО от действия на него значительной массы слоя, составляющей 50-300% массы ТО. Это позволяет адекватно отобразить передаваемые на ТО динамические нагрузки от слоя и скорректировать погрешности при определении скорости транспортирования слоя сыпучей среды большой высоты, вызванные изменением закона движения ТО и запаздыванием момента отрыва груза от ТО по сравнению с моментом отрыва материальной частицы.

Применение упруго-наследственной модели сыпучего груза (рис. 1.22) позволило решить сложную задачу оптимизации процессов вибрационного выпуска горной массы из бункерных устройств вибрационными питателями и определения оптимальных режимов транспортирования грузов при заданных технологических параметрах процесса и обеспечения прочностных характеристик конструкций вибротранспортирующих машин [76, 111, 112, 113].

К моделям сыпучей среды с распределенными параметрами также относится модель [65], которая отображает течение различных слоев сыпучей среды при ее взаимодействии с вибрационными ТО с учетом силы аэродинамического сопротивления среды, в которой перемещается слой материала, изменения объемной концентрации слоя (т. е. его разрыхление и уплотнение), изменения объема слоя при приложении деформаций и диссипативных свойств слоя (рис. 1.23). Модель позволяет отображать многофазные и многокомпонентные среды, состоящие из нескольких материалов с различными свойствами. Математическое описание модели включает уравнения сплошной среды: закон сохранения массы, импульса и реологическое уравнение, связывающее напряжения в слое сыпучей среды со скоростью ее деформации и объемной концентрацией твердых частиц в окружающей среде. Модель применена для описания процессов уплотнения, перемешивания и разделения сыпучих сред под действием вибрации, в том числе в виброкипящем слое.

Модель материала в виде сплошной среды (рис. 1.23), рассмотренная в работе [65], применена при создании и определении рациональных режимов работы

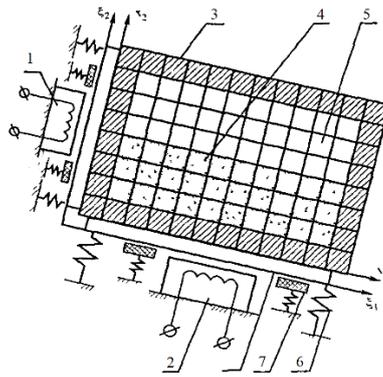


Рис. 1.23. Расчетная схема вибромашины для переработки сыпучих сред с электромагнитным приводом: 1,2 – электромагниты, 3 – рабочий орган, 4 – сыпучий материал, 5 – крупная частица расчетной области, 6 – упругий элемент, 7 – ограничитель.

оборудования для вибрационного формования строительных изделий и брикетирования отходов, виброразгрузки сыпучих материалов из бункерных устройств, а также вибрационных установок для перемешивания и грануляции зернистых сред.

Для описания процессов взаимодействия слоя материала с рабочими органами вибрационных машин, в т. ч. процесса вибротранспортирования слоя, существует широкий класс феноменологических моделей, которые представляют собой систему твердых тел, соединенных упругими, вязкими и пластическими элементами [15]. Такие модели обладают достаточной простотой и удобством использования, поскольку позволяют описывать движение сыпучей среды системой обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, при этом степень сложности модели зависит от количества ее элементов и определяется требуемой точностью отображения реальных физических процессов в слое материала.

Одной из моделей этого типа, получивших широкое распространение при описании вибротранспортирования различных по своим свойствам сыпучих грузов, является предложенная д.т.н. Гончаревичем И. Ф. двухмассовая упруго-вязко-пластичная модель слоя, отображающая деформации груза в двух направлениях при его транспортировании [23, 27, 100]. Модель (рис. 1.24) состоит из сосредоточенных масс m и m_0 , связанных между собой вдоль каждого из

направлений упругими и вязкими элементами c_x, k_x'' и c_y, k_y'' для отображения сопротивлений деформации сыпучей среды, и вязких элементов k_x' и k_y' , соединяющих массу m с поверхностью ТО и учитывающих аэродинамические сопротивления перемещению слоя. Модель также учитывает пластические свойства сыпучей среды при ее деформировании посредством клиновидного элемента f_y (рис. 1.24) и действие силы сухого трения между слоем и горизонтальной поверхностью ТО с помощью коэффициента трения μ_x .

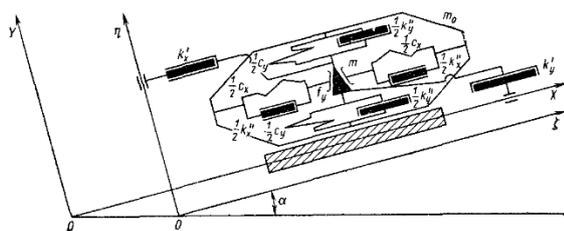


Рис. 1.24. Двухмассовая инерционная модель слоя сыпучей среды.

При этом, как отмечает Гончаревич И. Ф., при моделировании процесса транспортирования сыпучих материалов относительно небольшой высоты допустимо не учитывать пластические свойства сыпучей среды и соответственно исключить из модели элемент f_y и принимать массу m_0 нулевой, что значительно упрощает модель при обеспечении достаточно высокой адекватности перемещения сыпучих грузов [27, 33, 100].

Моделирование процесса транспортирования сыпучей среды на каждом из отдельных этапов ее движения (движение в контакте с ТО, свободное движение без контакта с ТО, скольжение по поверхности ТО) осуществляется путем учета или исключения из модели элементов, отображающих характерные действующему этапу сопротивления [100]. Математическое описание процесса транспортирования представляет собой системы дифференциальных уравнений, составленных для каждого этапа движения, и системы трансцендентных уравнений для определения моментов перехода от одного этапа движения или деформации к другому.

Приведенная модель слоя транспортируемого материала позволяет моделировать реальные силы и продолжительности взаимодействия, возникающие при соударении слоя с грузонесущим ТО, отображая при этом инерционные и

деформативные характеристики сыпучей среды, и достоверно воспроизводить процессы вибротранспортирования реальных сыпучих материалов ТО различной конфигурации [33].

Предложенная Гончаревичем И. Ф. модель позволяет описывать также многие другие сложные технологические процессы, такие как вибробункеризация, вибропогрузка, грохочение, вибрационное дозирование, виброобъемная обработка изделий, виброуплотнение и др. [23, 26, 27, 30, 31, 33, 100]. В частности, в работе [29] приведено описание моделирования вибрационного транспортирования сыпучего груза в вертикальном виброподъемнике с применением инерционной упруго-вязко-пластичной модели слоя сыпучего груза. Модель (рис. 1.25) воспроизводит вибротранспортирование слоя в режимах с отрывом материала от стенок и с проскальзыванием слоя относительно их поверхности и учитывает аэродинамические сопротивления движению слоя по каналу грузонесущего органа, сопротивления от статического давления вышележащих слоев груза и внутрислойные деформации перемещаемого материала. Примененный в задаче подход позволяет анализировать динамику виброперемещения слоя и определять скорость вибротранспортирования слоя, нагрузки на слой от стенок ТО, моменты

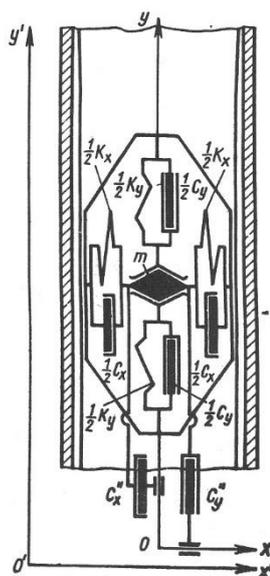


Рис. 1.25. Упруго-вязко-пластичная модель слоя материала для исследования виброподъема.

переходов между различными видами движений (начала и окончания контактов слоя со стенками и его проскальзывания относительно поверхности стенок) и затраты энергии на транспортирование сыпучего материала.

Задача подобная рассмотренному выше [29] процессу вибрационного перемещения груза в вертикальном виброподъемнике также рассмотрена в работе [114], в которой исследовался процесс транспортирования сыпучего груза в вертикальном виброподъемнике землеройного струга (рис. 1.19, [114]) со стенками, совершающими колебания в продольном и поперечном направлениях с одинаковой частотой. При решении данной задачи сыпучий груз представлен в виде сплошной среды [48], совершающей равномерное движение вверх по неподвижной трубе с шероховатыми стенками под действием давления подпора грунта, срезаемого стругом. В данной задаче давление подпора срезаемого грунта, входящего в канал трубы с упомянутыми вибрирующими стенками, смоделировано поршнем, движущимся вверх по трубе и толкающим груз. При этом определялась максимальная высота, на которую может подняться по трубе срезаемый грунт, который испытывает сопротивления трения о стенки сосуда, вызванного на них давлением грунта. Данная задача решается подобно задаче гидростатического давления столба жидкости (в рассматриваемом случае сплошной среды) на стенки сосуда (в рассматриваемом случае стенки трубы) (рис. 1.26). Такое упрощение модели не позволило автору установить зависимость параметров вертикального виброперемещения груза от параметров колебаний стенок трубы и как следствие рассчитать скорость транспортирования материала теоретическим методом. Определение указанных параметров было выполнено исключительно экспериментальным методом. Из приведенного следуют несомненное преимущество моделирования процесса транспортирования сыпучих сред предложенной д.т.н. Гончаревичем И. Ф. упруго-вязко-пластичной моделью слоя материала для исследования процесса виброподъема.

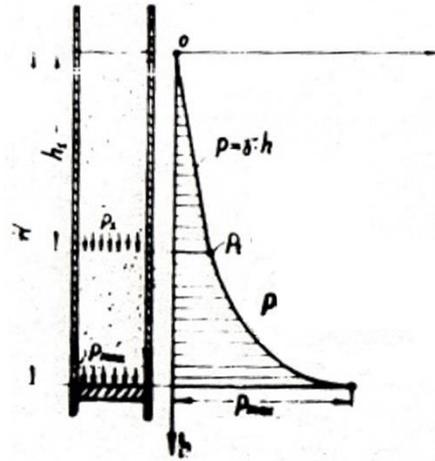


Рис. 1.26. Схема к расчету сопротивления движению материала вверх по каналу с жесткими стенками и график изменения давления по его высоте.

Другим примером применения модели д.т.н. Гончаревича И. Ф. может служить выполненное исследование процесса вибрационного дробления горной породы под действием сжимающих нагрузок от дробящих щек [100]. В такой модели (рис. 1.27) слой в направлении действия дробящей нагрузки представлен в виде трехмассового упруго-вязко-пластичного тела, включающего центральное ядро массой $(1-2\xi)m_x$, две массы ξm_x для отображения участвующей в колебаниях вместе с дробящими щеками части горной породы, и элементы упругих, вязких и пластичных сопротивлений k_x , k_x' , c_x и K_{nx} . Модель слоя также включает в себя группу расположенных в вертикальном направлении реологических элементов, которые моделируют процесс продвижения породы вдоль рабочей полости дробилки в режиме с отрывом от дробящих щек с учетом подпора материала, загружаемого из бункера. Модель воспроизводит упругопластические

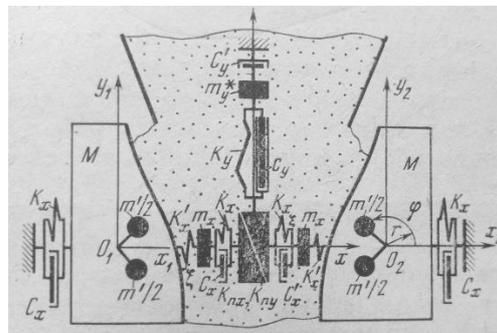


Рис. 1.27. Схема вибрационной щековой дробилки под нагрузкой с трехмассовой феноменологической моделью горной породы.

деформации, гистерезисное рассеяние энергии при циклическом нагружении и хрупкое разрушение реальной горной породы, а также позволяет отображать внутренние напряжения в горной породе и реакцию со стороны породы на дробящие щеки.

В последнее время распространение получает метод дискретных элементов (МДЭ) для моделирования поведения сыпучих сред при осуществлении различных технологических процессов (дробление, транспортирование, уплотнение и др.) [118]. При использовании этого подхода слой частиц сыпучей среды отображается моделью в виде массива из твердых элементов (шаров, дисков или элементов другой формы) с недеформируемыми границами, в котором каждый элемент отображает одну частицу, причем взаимодействие элементов между собой возникает только при их непосредственном контакте друг с другом и учитывается действием нормальных и касательных сил, возникающих на границах контактов элементов. Моделирование поведения среды осуществляется путем определения на каждом шаге расчета перемещений отдельных элементов и контактных сил взаимодействия, при этом для математического описания перемещения элементов используются уравнения второго закона Ньютона, а для описания взаимодействия элементов – уравнения связи между силами и перемещениями, отображающие упругие, вязкие и пластические сопротивления деформированию, а также любые другие физические законы взаимодействия.

Описанный метод моделирования поведения сыпучих сред при механических воздействиях не имеет недостатков континуальных моделей, проявляющихся при нарушении сплошности вещества или в результате дискретности его внутренней структуры. Его преимуществами является универсальность и практически неограниченные возможности диагностики моделируемых явлений и их визуализации, что позволяет заменять значительную часть трудоемких технологических исследований вычислительными экспериментами и оптимизировать параметры исследуемого процесса. Наряду с этим к недостаткам данного метода следует отнести необходимость проведения большого количества натуральных экспериментов по идентификации реологических коэффициентов в

зависимости от свойств среды и параметров ее нагружения, специальной подготовки высококвалифицированных специалистов по применению данного метода для решения практических задач, а также больших затрат времени и вычислительных мощностей для выполнения расчетов. На данный момент с использованием этого метода моделирования созданы лишь единичные образцы техники преимущественно в горной промышленности [119, 122], и в связи с малым опытом практического применения он еще не получил широкого распространения. Несмотря на то, что применение МДЭ позволило решить ряд отдельных сложных практических задач [12, 57], данный перспективный метод еще находится в стадии оценки эффективности его применения для практической деятельности исследователей и конструкторов при создании машин для вновь разрабатываемых процессов и технологий [4].

Приведенный обзор моделей и методов моделирования динамики перемещения сыпучих сред является кратким и не исчерпывает всех существующих подходов к описанию особенностей процессов перемещения и деформации среды с учетом многообразия возможных видов взаимодействия рабочих органов со средой. При этом важным является то, что применение методов моделирования, позволяющих математически описывать вибрационные процессы перемещения сыпучей среды, обеспечило успешное решение многих практических задач по совершенствованию вибрационных технологических процессов и созданию вибрационных машин. Большой вклад в создание вибрационной техники для различных технологических процессов внесли отечественные ученые: в области процессов вибротранспортирования – Блехман И. И., Гончаревич И. И., Лавендел Э. Э., Лапшин В. Л., Повидайло В. А., Потураев В. Н., Спиваковский А. О., Фролов К. В., Червоненко А. Г. и др., в области уплотнения различных сред – Баркан Д. Д., Брауде Ф. Г., Иванченко С.Н., Исагулов А. З., Лялинов А. Н., Носов С. В., Поплавский В. И., Цытович Н. А., Шестопалов А. А., и др., в области вибропогружения – Верстов В. В., Осмаков С. А., Савинов О. А., Цейтлин М. Г., Шехтер О. Я. и др., в области грохочения – Вайсберг Л. А., Гончаревич И. Ф., Земсков В. Г., Кондратьев А. В., Лавров Б. П., Левенсон Л. Б., Олевский В. А. и др.,

в области измельчения – Биленко С. Ф., Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П., Лесин А. Д., Нагаев Р. Ф. и др., в области разделения сыпучих смесей – Гончаревич И. Ф., Земсков В. Д., Лавров Б. П., Плисс Д. А. и др.

Анализируя изложенное, можно заключить, что если не затрагивать модели, использующие подходы статистической механики, молекулярной динамики, кинетической теории, редко используемые в практике для описания процесса взаимодействия слоя сыпучей среды с рабочими органами при ее деформировании в процессе вибротранспортирования, то практически все упомянутые исследователи при описании динамического воздействия на среду используют феноменологические многокомпонентные модели для описания реологических свойств обрабатываемой среды. Структура многокомпонентной феноменологической модели выбирается в зависимости от особенности исследуемого процесса при стремлении к ее упрощению. Также подобная модель (рис. 1.27) достаточно полно описывает сопротивления и закономерности объемного деформирования слоя обрабатываемого материала при воздействии на него рабочих органов виброщекковой дробилки [100]. При этом поскольку в разрабатываемой оттирочно-очистительной установке песок в процессе виброобъемной обработки двумя ТО находится в сухом состоянии и обрабатывается в слое небольшой высоты (до 200 мм), то при отображении его деформационных свойств упомянутой моделью можно исключить из нее пластичные элементы [23, 27]. В этом случае применение одномассовой упруго-вязко-инерционной феноменологической модели слоя сыпучей среды позволяет достаточно адекватно описывать процессы вибротранспортирования сыпучей среды при ее виброобъемном деформировании двумя ТО принятой конструкции виброконвейера оттирочно-очистительной установки, описанной в разделе 1.2. При этом учитывая то, что данная модель была специально создана [100] и многократно успешно апробирована многими исследователями [5, 33, 62, 97, 98] при изучении конкретно процесса транспортирования сыпучих сред виброконвейерами, а также то, что методы идентификации расчетных и опытных характеристик перемещения слоя сыпучей среды и деформации слоя от

воздействия на него одномассовых вибротранспортирующих органов достаточно полно отработаны, упомянутая модель слоя сыпучей среды принята для изучения особенностей процесса перемещения песка в предложенном в разделе 1.2 двухмассовом виброконвейере установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка.

ВЫВОДЫ

Краткий обзор и анализ оборудования, применяемого для обогащения мелких заполнителя бетонов (песка) путем очистки поверхности их зерен от различных загрязняющих примесей, а также механоактивации поверхности заполнителей с целью улучшения их адгезионных свойств и снижения потребления дорогостоящих вяжущих в строительных смесях показал:

1. В настоящее время «сухие» способы обогащения песка постепенно вытесняют «мокрые» способы, являющиеся менее рентабельными и экологически нецелесообразными по сравнению с «сухой» технологией обогащения песков. При этом число различных типов специального оттирочно-очистительного оборудования, предназначенного для обработки отличающихся по свойствам песков «сухими» методами оттирки и механоактивации, невелико и эффективность его незначительна. Основным недостатком существующих оттирочно-очистительных машин является значительная продолжительность процесса оттирки поверхности частиц вследствие обработки их в относительно рыхлом ненапряженном слое сыпучей среды, где истирание частиц трением друг о друга осуществляется неинтенсивно при неплотном прижатии частиц друг к другу.

Несмотря на то, что обогащение очисткой поверхности заполнителей бетонов от загрязняющих примесей «сухим» способом является достаточно востребованной технологией, задача создания эффективного оттирочно-очистительного оборудования с высокой интенсивностью очистки поверхности частиц песка остается до сих пор полностью нерешенной и весьма актуальной.

2. Совершенствование специальных машин для эффективного обогащения методом очистки поверхности заполнителей бетонов от загрязняющих примесей следует осуществлять в направлении поиска новых принципов действия оттирочно-очистительных машин, обеспечивающих интенсификацию процесса очистки частиц вибрационным методом самоистирания поверхности зерен за счет активизации их движения в объеме максимально напряженного (нерыхлого) слоя для повышения силы трения поверхности зерен в процессе их перемещения друг относительно друга.

3. Для интенсификации существующей технологии обогащения очисткой поверхности мелких заполнителей бетонов от загрязняющих примесей требуется разработка установки для оттирки и механоактивации поверхности песка, позволяющей нивелировать недостатки применяемых очистительных машин, применив инновационный способ виброобъемного деформирования слоя обрабатываемого материала в виброконвейере с двумя транспортирующими органами (ТО), совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, обеспечивающими на этапе сжатия слоя обрабатываемого материала достижение высокого уровня напряжений в слое, повышающих самоистирание поверхности частиц, а на этапе разжатия ТО при потере их контакта со слоем обеспечивающими его свободное перемещение с перемешиванием частиц в свободном (рыхлом) слое.

4. Разработку методики расчета рациональных параметров оттирочно-очистительной установки для обогащения оттиркой поверхности зерен строительных песков необходимо осуществлять на основе моделирования процессов взаимодействия вибрационных ТО со слоем обрабатываемого песка для установления закономерностей их перемещения на этапе виброобъемного сжатия слоя и на этапе его разжатия при потере контакта с ТО и скорости транспортирования с целью обеспечения заданного времени проведения процесса оттирки песков.

5. Для моделирования процессов взаимодействия вибрационных ТО со слоем обрабатываемого песка на этапах их перемещения в контакте и без контакта друг с

другом, а также динамики вибротранспортирования слоя в данном режиме перемещения целесообразно применить феноменологическую упруго-вязко-инерционную одномассовую модель для отображения сопротивлений объемной деформации слоя сыпучей среды в период ее нагружения ТО и поперечных сопротивлений перемещению ТО и слоя в период их движения без контакта.

1.4. Цели и основные задачи исследований

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

При этом ставятся следующие 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.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ ДВУМЯ ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ ОРГАНАМИ ОТТИРОЧНО-ОЧИСТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Выбор модели и расчетная схема динамики перемещения слоя сыпучей среды вибротранспортирующими органами

2.1.1. Принцип работы оттирочно-очистительной установки и схема сил взаимодействия между слоем и вибротранспортирующими органами

Оттирочно-очистительная установка для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов по существу является транспортно-технологической установкой, основной рабочий орган которой служит для оттирки частиц и представляет собой 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.

Принципиальная схема конструкции упомянутой транспортно-технологической установки для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов представлена на рис. 2.1. Процесс транспортирования в такой установке осуществляется следующим образом: материал загружают в загрузочный бункер 1, откуда он самотеком поступает в рабочую камеру, образованную двумя ТО 2а и 2б, соединенные упругими элементами 6. Далее слой материала транспортируется вдоль стенок ТО и выгружается из установки через выходной патрубок 7. Колебания ТО установки сообщают дебалансные вибровозбудители 4, синхронно вращающиеся в

разноименных направлениях. Под действием вибровозбудителей оба ТО совершают колебательные движения по траекториям, близким к эллиптическим (противофазные колебания в поперечном направлении желоба и синфазные — в продольном). Такой режим обеспечивается подбором частоты колебаний и жесткости упругих элементов взаимодействия ТО.

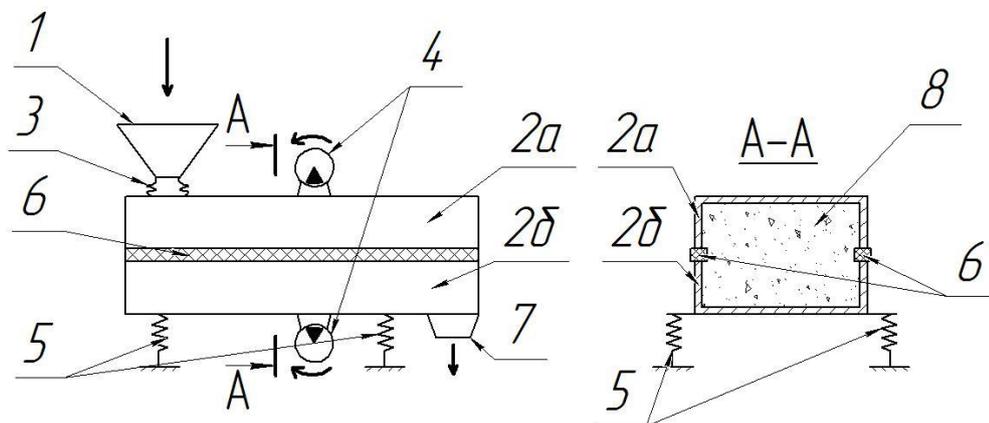


Рис. 2.1. Принципиальная схема транспортно-технологической установки для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов: 1 — загрузочный бункер; 2а, 2б — верхний и нижний вибрационные ТО; 3 — эластичный соединительный элемент; 4 — дебалансные вибровозбудители; 5 — опорные пружины; 6 — упругие элементы взаимодействия; 7 — выходной патрубок; 8 — слой материала.

Вибротранспортирование сыпучего материала в установке осуществляется в режиме с непрерывным отрывом слоя материала от поверхностей ТО: в период совместного движения слоя в контакте с ТО производится его периодическое объемное деформирование (сжатие) обеими ТО, а в период потери контакта слоя с ТО — микробросок сжатого слоя материала в продольном направлении стенок ТО (свободный бесконтактный полет).

В качестве транспортируемого материала примем сухой строительный песок, который в дальнейшем будем рассматривать как изотропную сплошную среду. В процессе вибротранспортирования в режиме с непрерывным подбрасыванием слой сыпучей среды может находиться как в плотном состоянии (все частицы контактируют друг с другом), так и в разрыхленном (контакты между частицами отсутствуют). Отметим, что основное влияние на процесс вибротранспортирования

сыпучих материалов оказывают инерционные свойства среды (в частности, ее плотность, зависящая от плотности частиц материала и порозности слоя) и деформационные свойства слоя [14, 33].

Рассмотрим этап совместного движения слоя изотропной сыпучей среды с ТО, в течение которого происходит деформирование слоя.

Выделим в средней по длине части рабочей камеры, ограниченной пространством между ТО установки, элементарный объем слоя единичной площади $S = L_{\text{сл}} \cdot B_{\text{сл}} = 1$ ($L_{\text{сл}} = B_{\text{сл}} = 1$) с высотой $H_{\text{сл}} < B_{\text{сл}}$ (рис. 2.2, а, б) в форме вытянутого вдоль оси x (в продольном направлении) параллелепипеда. При этом,

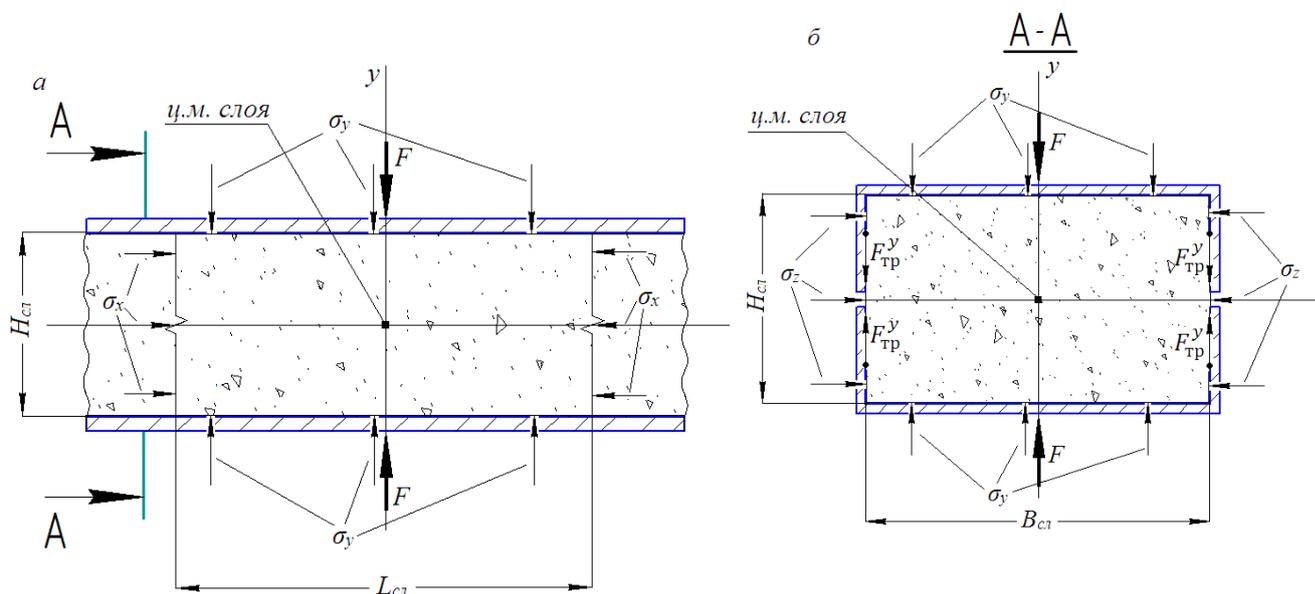


Рис. 2.2. Схема усилий, действующих на слой сыпучей среды при объемной деформации со стороны ТО: а — в плоскости $xу$; б — в плоскости $уз$.

поскольку продольный размер $L_{\text{сл}}$ элементарного объема слоя существенно меньше полной длины слоя в рабочей камере между ТО установки и значительно превосходит $B_{\text{сл}}$ и $H_{\text{сл}}$, а по ширине слой ограничен боковыми стенками, то горизонтальные деформации выделенного элементарного объема слоя (расширение в направлении осей x и z) невозможны. Таким образом, при действии на каждый ТО вертикальной силы F изменение объема слоя возможно только в направлении оси y , при этом $\sigma_y = P$, где P — давление со стороны рабочего органа на единичную площадь слоя, $P = F/S$.

В процессе сжатия на поверхностях выделенного элементарного объема слоя возникают нормальные напряжения σ_y , σ_x и σ_z (см. рис. 2.2 *а, б*), препятствующие расширению слоя в направлении осей x , y и z . Поскольку деформация (перемещение) слоя происходит только в вертикальном направлении, на границах контакта слоя с вертикальными поверхностями стенок ТО возникают силы трения. На рис. 2.2, *б* показаны силы сухого трения $F_{\text{тр}}^y$, действующие в направлении оси y .

В период относительного удаления ТО происходит разгрузка (разжатие) деформированного объема слоя материала. При этом характер и расчетная схема сил, действующих между слоем и ТО, аналогичны показанным на рис. 2.2 *а, б*, но силы F и $F_{\text{тр}}^y$ направлены в противоположную сторону.

Из работ [10, 62, 79] известно, что если ширина $B_{\text{сл}}$ слоя меньше его высоты $H_{\text{сл}}$, то влияние сил сопротивления, возникающих между боковыми стенками виброоргана и слоем материала, на динамику виброперемещения слоя незначительно, и их действием можно пренебречь. Поэтому действие боковых сил трения $F_{\text{тр}}^y$ в дальнейшем не учитывается.

Деформации слоя от действия силы F как при уплотнении, так и при разрыхлении вызывают перекомпоновку частиц и изменение объема слоя, ограниченного стенками ТО. Если принять, что частицы песка несжимаемы, то изменение объема слоя характеризуется исключительно его порозностью. При изучении процесса вибротранспортирования сыпучей среды будем рассматривать предельно возможное разрыхленное состояние слоя песка, при котором величина порозности не превышает 0,5-0,6, что соответствует предельному состоянию слоя, когда он, подобно кипящему слою, еще обладает свойствами сплошной среды [7, 77].

В период совместного движения слоя сыпучей среды с ТО при сжатии слоя изменение его объема (упаковки частиц и порозности) происходит с перекомпоновкой частиц с линейным размером, соответствующим

эквивалентному диаметру слоя, в пределах от кубической до октаэдрической упаковок. Порозность слоя ϕ изменяется от 0,259 до 0,476 [60].

При деформации (сжатии) в слое песка возникают сопротивления сжимающей силе, появление которых связано с вытеснением воздуха из слоя (вязким течением воздуха в порах между зернами материала [14]), а также со взаимным перемещением и трением частиц внутри слоя [33, 110].

Учитывая, что структура слоя образована частицами песка, размер которых много меньше размеров объема деформируемого тела, заключенного в пространстве между стенками ТО аппарата, трение, возникающее между частицами в объеме данного слоя, можно рассматривать как вязкое внутреннее трение, а силы сопротивления деформации такой среды допустимо отображать линейной упруго-вязкой моделью [74, 79]. Подобная модель справедлива для состояния, при котором частицы слоя находятся в плотном контакте друг с другом. Как отмечено в разделе в 1.3, она успешно используется для описания деформационных свойств сыпучей среды при решении ряда практических задач по уплотнению материалов, устройству фундаментов для строительных сооружений и машин с учетом динамических нагрузок и сейсмических воздействий [10, 58, 110, 115] а также задач, связанных с моделированием процессов взаимодействия сыпучей среды с вибротранспортирующими ТО [5, 33].

При движении транспортирующих органов в противоположные стороны происходит разгрузка (разжатие) деформированного объема слоя материала, что в конечном счете может привести к потере контакта ТО с верхней и нижней поверхностями слоя, в результате чего произойдет разрыхление материала с потерей контактов частиц между собой. При таком перемещении слой материала, рассматриваемый как сплошное тело, совершает свободное движение (полет) относительно верхней и нижней поверхностей ТО.

На этапе полета слоя материала (рис. 2.3, *а, б*), как и на этапе его совместного движения с ТО, расширение рассматриваемого элементарного объема слоя в направлении оси z ограничено боковыми стенками ТО аппарата, а в направлении оси x — окружающей сплошной сыпучей средой слоя. При этом на поверхностях

выделенного элементарного объема слоя возникают нормальные напряжения σ'_x и σ'_z , препятствующие расширению слоя в направлении осей x и z . Будем считать, что на этапе полета слой как сплошное тело в виде вытянутого в продольном направлении параллелепипеда совершает плоскопараллельное движение в направлении оси x относительно нижней и верхней горизонтальных поверхностей ТО и, соответственно, характер движения всего слоя и рассматриваемого элементарного объема одинаков.

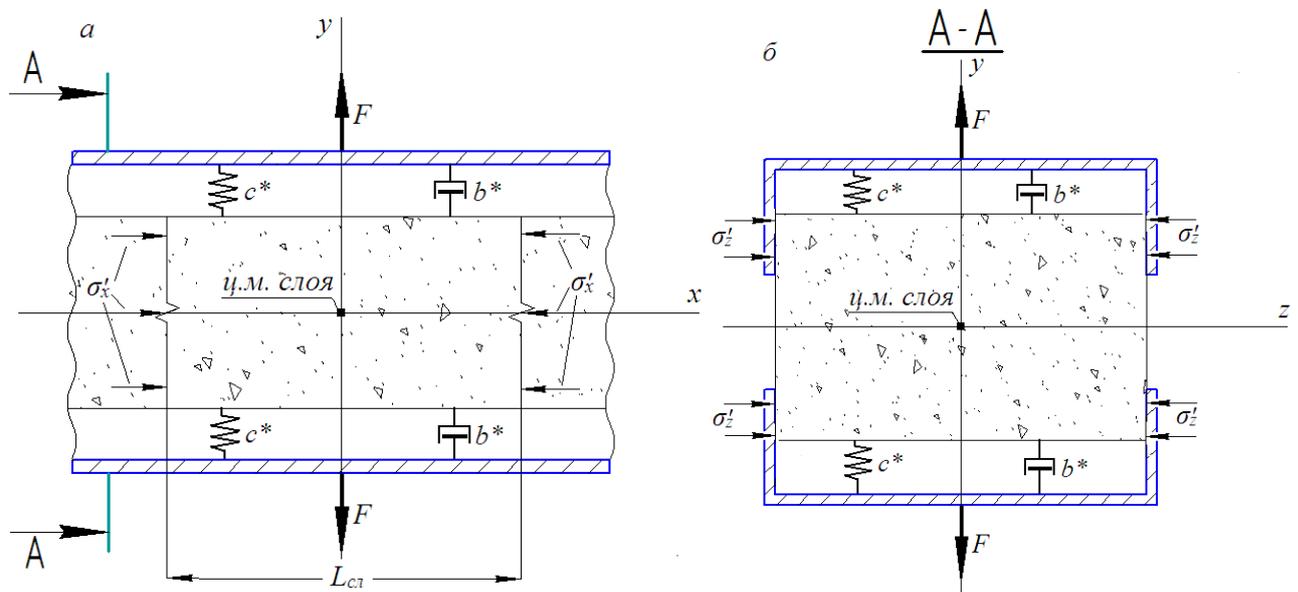


Рис. 2.3. Схема усилий, действующих на слой материала на этапе полета (без контакта с ТО): *a* — в плоскости xy ; *b* — в плоскости yz

На этапе полета на слой действуют силы лобового и упругого сопротивления прослойки воздушной среды, через которую он взаимодействует с горизонтальными поверхностями ТО. Как показано в работе [94], сила лобового сопротивления воздуха, действующего на движущийся в нем слой, ничтожна (в 300 и более раз меньше) по сравнению с инерционными и другими силами, влияющими на процесс виброперемещения слоя, поэтому ее значением допустимо пренебречь и не включать ее в расчетную схему (рис. 2.3). Воздействие силы упругого сопротивления, вызванное относительным движением слоя и обеих ТО и, следовательно, изменением давления в прослойке воздушной среды между ними, в общем случае моделируется упруго-вязкой силой упомянутого сопротивления [5, 33, 79]. При этом в направлении оси y это сила сопротивления пропорциональна

величине вертикальной деформации соответствующей воздушной среды, заключенной между верхней и нижней поверхностями слоя и поверхностями верхнего и нижнего рабочего органа, с коэффициентом упругого сопротивления c^* и скорости ее деформации с коэффициентом вязкого сопротивления b^* . На рис. 2.3 *a, б* эти сопротивления изображены в виде пружины c^* и демпфера b^* . При перемещении слоя относительно ТО в направлении оси x также действует сила сопротивления перемещению слоя в упомянутых прослойках воздушной среды, возникающая на верхней и нижней поверхностях слоя. Такая сила сопротивления воздуха, действующая вдоль внешних границ поверхности слоя, по существу является силой трения между воздушной средой и данными поверхностями слоя. Эта сила так же ничтожна, как и упомянутая выше сила лобового сопротивления воздуха, действующего на движущийся в нем слой, и поэтому ее значением допустимо пренебречь и не включать ее в расчетную схему.

2.1.2. Выбор модели для анализа динамики перемещения слоя материала двумя вибротранспортирующими органами

Задачу перемещения слоя материала двухмассовым виброконвейером, обеспечивающим объемное деформирование слоя материала в процессе его вибротранспортирования двумя ТО, совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, будем решать с учетом рассмотрения процессов взаимодействия ТО со слоем обрабатываемого песка для установления закономерностей их перемещения на этапе виброобъемного сжатия слоя и на этапе его разжатия при потере контакта с ТО и определения скорости транспортирования слоя. Для отображения процесса взаимодействия ТО со слоем обрабатываемого песка при силовом воздействии на него ТО представим его в виде модели трехмассовой нелинейной механической системы элементов «верхний ТО – слой песка – нижний ТО». Такая модель позволяет осуществить математическое описание процессов всевозможных перемещений ее элементов в процессе вибротранспортирования слоя песка на всех

основных этапах его перемещения (на этапе полета слоя и на этапе его совместного движения с ТО), как это описано в предыдущем разделе 2.1.1. При этом основываясь на изложенном в разделах 1.3 и 2.1.1, слой песка с учетом его механо-реологических свойств и сопротивлений при его деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях на этапе совместного движения слоя с ТО в процессе его вибротранспортирования отобразим феноменологической упруго-вязко-инерционной одномассовой моделью. Сопротивления на этапе полета слоя при отсутствии контактов между слоем и обеими ТО, вызванные изменением давления в прослойке воздушной среды между слоем и ТО при их относительном движении по оси y (см. рис. 2.3), моделируем упруго-вязкой силой. Сопротивлениями между слоем и ТО при относительном перемещении слоя в направлении оси x на этапе его полета пренебрегаем согласно обоснованиям, изложенным в разделе 2.1.1. Сопротивления деформации в двух перпендикулярных направлениях опорных пружин, поддерживающих нижний ТО, и упругих элементов взаимодействия двухмассового виброконвейера, соединяющих оба ТО, отображаем упруго-вязкой моделью Кельвина-Фойгта.

Приведенные модели, отображающие динамические процессы взаимодействия ТО со слоем песка, обрабатываемым методом виброобъемного деформирования при его вибротранспортировании двухмассовым виброконвейером, положены в основу установления закономерностей процесса перемещения слоя песка двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО оттирко-очистительной установки.

2.1.3. Расчётная схема динамики перемещения слоя сыпучей среды вибротранспортирующими органами и схема возможных движений слоя

Для анализа динамики перемещения слоя обрабатываемого материала ТО транспортно-технологической установки для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов с учетом условий, допущений и принятых моделей в разделах 1.3, 2.1.1 и 2.1.2, приведем расчетные

схемы этапа совместного движения слоя с ТО (рис. 2.4) и этапа полета слоя (рис. 2.5) [90]. При этом учитывая, что сыпучая среда и воздушная среда однородны, на первом этапе приближения моделирования упомянутого процесса примем значения соответствующих им коэффициентов сопротивлений при деформировании верхним и нижним транспортирующими органами одинаковыми.

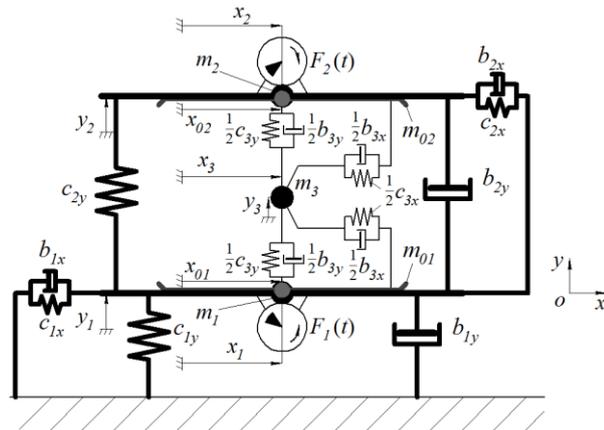


Рис. 2.4. Расчётная схема перемещения слоя материала ТО на этапе совместного (в контакте) движения.

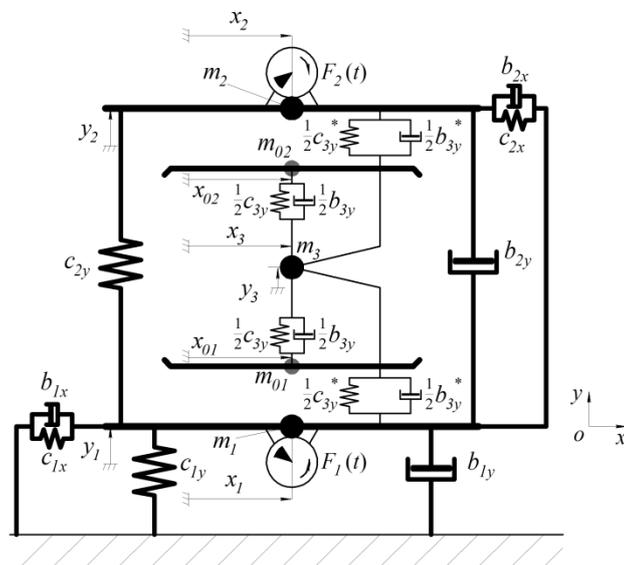


Рис. 2.5. Расчётная схема перемещения слоя материала ТО на этапе полёта (без контакта).

На рис. 2.4 и 2.5 введены следующие обозначения: m_1 , m_2 — массы нижнего и верхнего ТО установки соответственно; m_3 — масса слоя материала; $m_{01} = 0$, $m_{02} = 0$ — безынерционные массы нижней и верхней контактных поверхностей слоя соответственно; c_{1x} , b_{1x} , c_{1y} , b_{1y} — коэффициенты упругих и вязких сопротивлений упругих опор (пружин) установки (поз. 5 на рис. 2.1) в направлениях осей ox и oy

соответственно; $c_{2x}, b_{2x}, c_{2y}, b_{2y}$ — коэффициенты упругих и вязких сопротивлений упругих элементов взаимодействия (поз. б на рис. 2.1) в направлениях осей ox и oy соответственно; $c_{3x}, b_{3x}, c_{3y}, b_{3y}$ — коэффициенты, моделирующие упругие и вязкие свойства слоя материала в направлениях осей ox и oy соответственно; c_{3y}^*, b_{3y}^* — коэффициенты упругих и вязких сопротивлений в направлении оси oy , возникающих в прослойке воздушной среды между материалом и ТО при ее деформации; $F_1(t), F_2(t)$ — вынуждающие силы, передающиеся ТО установки от вибровозбудителей.

Вынуждающие силы $F_1(t)$ и $F_2(t)$ передаются транспортирующим органам транспортно-технологической установки от дебалансных вибраторов, синхронно вращающихся в разноименных направлениях, вызывающих противофазное возбуждение колебаний в поперечном направлении стенок ТО и синфазное – в продольном. Данные силы могут быть записаны в проекциях на оси ox и oy следующим образом:

$$F_{1x}(t) = P \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

$$F_{2x}(t) = P \cos(\omega t), \quad (2.2)$$

$$F_{1y}(t) = P \sin(\omega t), \quad (2.3)$$

$$F_{2y}(t) = -P \sin(\omega t), \quad (2.4)$$

где $P = M_{\text{деб}} \cdot \omega^2$ – амплитудное значение вынуждающей центробежной силы одного вибровозбудителя, ω – угловая частота вращения дебалансов, t – время.

Отметим, что все динамические характеристики (массы, коэффициенты вязких и упругих сопротивлений, вынуждающие силы) на указанных схемах приведены для слоя материала единичной длины и ширины, то есть $L_{\text{сл}} = B_{\text{сл}} = 1$ (см. рис. 2.2 а, б).

Безынерционные контактные поверхности слоя m_{01} и m_{02} введены для моделирования процесса проскальзывания слоя материала относительно ТО.

В данной задаче все тела ($m_1, m_2, m_3, m_{01}, m_{02}$) рассматриваются с сосредоточенными массами, то есть как материальные точки.

С учетом принятых допущений можно выделить четыре основных этапа перемещения слоя материала ТО установки:

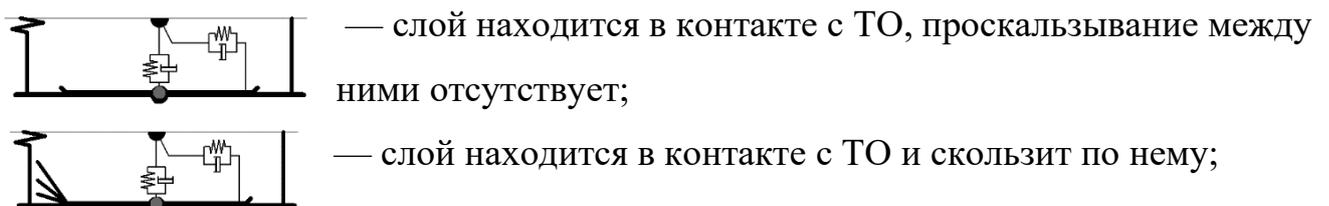
- *1 этап* — слой материала находится в контакте с обоими ТО m_1 и m_2 , которые деформируют его в направлении оси ou . При этом смещение m_3 относительно ТО m_1 и m_2 по оси ox может происходить как за счет упруго-вязких свойств слоя, так и за счет проскальзывания контактной поверхности m_{01} относительно m_1 и/или поверхности m_{02} относительно m_2 ;

- *2 этап* — слой материала находится в контакте только с верхним ТО m_2 , который деформирует его в направлении оси ou , а между слоем и нижним ТО m_1 имеется прослойка воздушной среды. При этом смещение m_3 относительно верхнего ТО m_2 по оси ox может происходить как за счет упруго-вязких свойств слоя, так и за счет проскальзывания контактной поверхности m_{02} относительно m_2 ;

- *3 этап* — слой материала находится в контакте только с нижним ТО m_1 , который деформирует его в направлении оси ou , а между слоем и верхним ТО m_2 имеется прослойка воздушной среды. При этом смещение m_3 относительно нижнего ТО m_1 по оси ox может происходить как за счет упруго-вязких свойств слоя, так и за счет проскальзывания контактной поверхности m_{01} относительно m_1 ;

- *4 этап* — слой материала совершает полет относительно ТО m_1 и m_2 без контакта с ними: между материалом и каждым ТО имеется прослойка воздушной среды.

На основе приведенного описания составлена схема, иллюстрирующая все возможные варианты переходов от одних видов движения к другим (рис. 2.6, переходы отмечены стрелками) [93]. Виды движения слоя материала относительно ТО обозначены следующим образом:



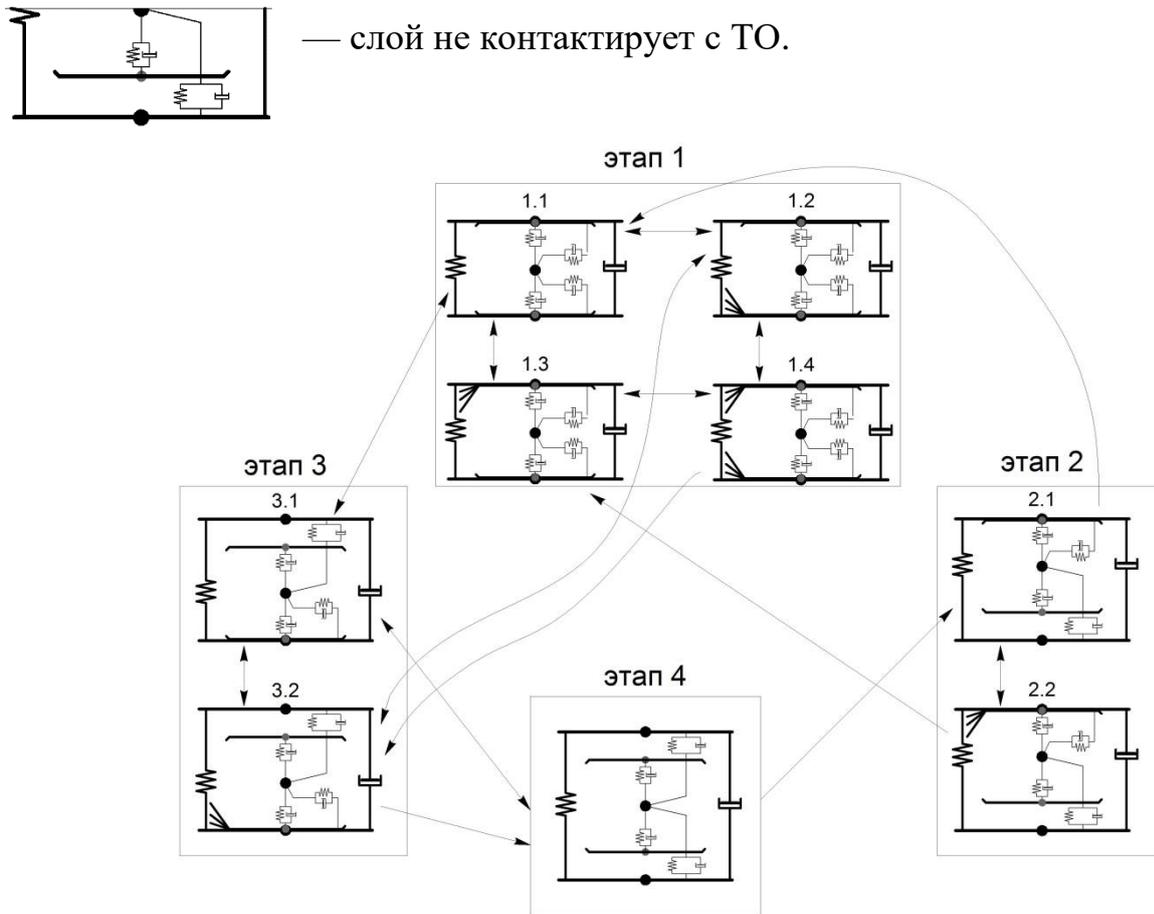


Рис. 2.6. Схема всех возможных видов движения слоя материала и переходов между ними при взаимодействии слоя с ТО

Приведенная механо-реологическая модель перемещения слоя сыпучей среды двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО транспортно-технологической установки для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности мелких заполнителей бетонов является основой для математического описания процесса вибротранспортирования слоя материала и проведения анализа всех возможных режимов и параметров его виброперемещения.

2.2. Математическое моделирование динамики перемещения слоя материала вибротранспортирующими органами

Моделирование процесса перемещения слоя материала ТО осуществляется с помощью метода поэтапного интегрирования [14]. Он заключается в том, что для каждого из характерных этапов движения, описанных в п. 2.1.2, составляют уравнения движения и далее, задаваясь конкретными начальными условиями, находят движение элементов рассматриваемой системы на первом этапе, момент (условия) окончания этого этапа и характер движения на следующем этапе. Затем вычисляют начальные условия для второго этапа, находят движение на этом этапе, момент его окончания и характер движения на следующем, третьем этапе. Описанную последовательность вычислений повторяют до тех пор, пока не придут к установившемуся движению системы.

1 этап. Расчётная схема для данного этапа представлена на рис. 2.4. На ней введены обозначения: y_1, x_1, y_2, x_2 – смещения ТО m_1, m_2 в инерциальной системе отсчёта (неподвижное основание), отсчитываемые от положений статического равновесия каждой из масс вдоль осей oy и ox соответственно; y_3 – смещение m_3 вдоль оси oy от своего положения статического равновесия в инерциальной системе отсчёта (неподвижное основание); x_3 – смещение m_3 в инерциальной системе отсчёта (неподвижное основание) от своего положения в момент начала движения ($t_0 = 0$) вдоль оси ox ; x_{01}, x_{02} – смещения нижней и верхней безынерционных контактных поверхностей слоя m_{01}, m_{02} соответственно в инерциальной системе отсчёта (неподвижное основание) от своих положений в момент начала движения ($t_0 = 0$) вдоль оси ox .

Далее для того, чтобы различать между собой переменные, обозначающие одну и ту же характерную величину на разных этапах движения, будем использовать верхний индекс, например, y_1^I означает смещение по оси oy массы m_1 на первом (I) этапе движения. При этом для большей наглядности расчетных схем для каждого этапа движения указанные индексы на схемах не показываются, а номер этапа движения приводится в подрисуночной надписи (рис. 2.7, 2.8, 2.9).

Пусть $l_1^I, l_2^I, l_{3(1)}^I, l_{3(2)}^I$ – длины вертикальных пружин моделируемой системы на данном этапе при статическом равновесии, $l_1^0, l_2^0, l_{3(1)}^0, l_{3(2)}^0$ – длины этих пружин в недеформированном (ненагруженном) состоянии, при этом длина пружины l_2^I связана с $l_{3(1)}^I$ и $l_{3(2)}^I$ соотношением (см. рис. 2.7):

$$l_2^I - e = l_{3(1)}^I + l_{3(2)}^I.$$

Здесь e – величина зазора, характеризующая разницу расстояний в статике (при действии силы тяжести mg) между высотой модели слоя материала и расстоянием между горизонтальными поверхностями ТО (высоты рабочей камеры). Условимся считать зазор e положительным, если высота модели слоя материала в статике больше высоты рабочей камеры, и отрицательным в противном случае.

Введем величины статического растяжения пружин моделируемой системы относительно своих недеформированных состояний: $\Delta_i^I = l_i^I - l_i^0$ ($i = 1, 2, 3(1), 3(2)$). Тогда статические уравнения равновесия для расчетной схемы системы (рис. 2.4) при действии на ее элементы силы тяжести запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_{1y} \Delta_1^I + (m_1 + m_2 + m_3)g &= 0, \\ c_{2y} \Delta_2^I + \frac{1}{2} c_{3y} \Delta_{3(2)}^I + m_2 g &= 0, \\ \frac{1}{2} c_{3y} \Delta_{3(1)}^I - \frac{1}{2} c_{3y} \Delta_{3(2)}^I + m_3 g &= 0, \\ \Delta_{3(1)}^I + \Delta_{3(2)}^I - \Delta_2^I &= -\frac{m_3 g}{\frac{1}{2} c_{3y}} + m_2 g / c_{2y} - e, \end{aligned}$$

где g – ускорение свободного падения, откуда

$$\Delta_1^I = -\frac{(m_1 + m_2 + m_3)g}{c_{1y}}, \quad (2.5)$$

$$\Delta_2^I = -\frac{4c_{2y}m_2g - c_{2y}c_{3y}e + c_{3y}m_2g}{c_{2y}(4c_{2y} + c_{3y})}, \quad (2.6)$$

$$\Delta_{3(1)}^I = -\frac{2(c_{2y}c_{3y}e + 4c_{2y}m_3g + c_{3y}m_3g)}{c_{3y}(4c_{2y} + c_{3y})}, \quad (2.7)$$

$$\Delta_{3(2)}^I = -\frac{2c_{2y}e}{4c_{2y} + c_{3y}}. \quad (2.8)$$

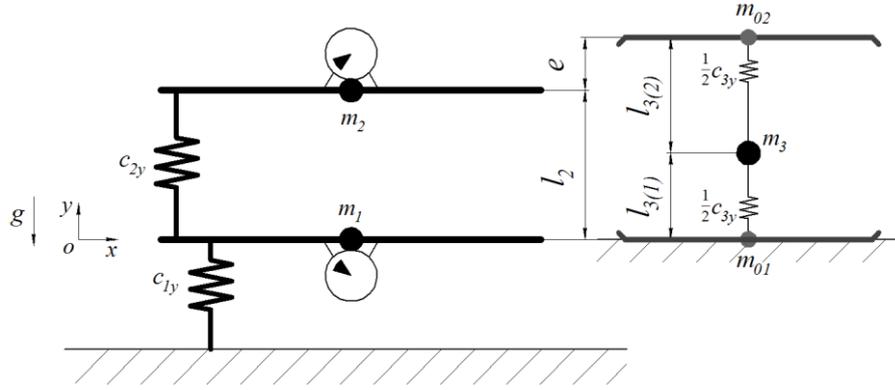


Рис. 2.7. Система на этапе 1 в положении статического равновесия.

При движении модели слоя в контакте с ТО возможны режимы, когда модель слоя скользит по горизонтальной поверхности верхнего или нижнего ТО вперед или назад (виды движения 1.2, 1.3 и 1.4 на рис. 2.6), либо при отсутствии проскальзывания смещается только за счет упруго-вязких деформаций слоя (вид движения 1.1 на рис. 2.6).

Дифференциальные уравнения движения ТО и модели слоя сыпучей среды на участке упруго-вязкой деформации слоя (вид движения 1.1 на рис. 2.6) в проекциях на оси x и y запишем в виде

$$m_1 \ddot{y}_1^I + c_{1y} y_1^I + b_{1y} \dot{y}_1^I - c_{2y} (y_2^I - y_1^I) - b_{2y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_1^I) - \frac{1}{2} c_{3y} (y_3^I - y_1^I) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_3^I - \dot{y}_1^I) = P \sin(\omega t), \quad (2.9)$$

$$m_2 \ddot{y}_2^I + c_{2y} (y_2^I - y_1^I) + b_{2y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_1^I) + \frac{1}{2} c_{3y} (y_2^I - y_3^I) + \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_3^I) = -P \sin(\omega t), \quad (2.10)$$

$$m_3 \ddot{y}_3^I + \frac{1}{2} c_{3y} (y_3^I - y_1^I) + \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_3^I - \dot{y}_1^I) - \frac{1}{2} c_{3y} (y_2^I - y_3^I) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^I - \dot{y}_3^I) = 0; \quad (2.11)$$

$$m_1 \ddot{x}_1^I + c_{1x} x_1^I + b_{1x} \dot{x}_1^I - c_{2x} (x_2^I - x_1^I) - b_{2x} (\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{01}^I) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) = P \cos(\omega t), \quad (2.12)$$

$$m_2 \ddot{x}_2^I + c_{2x} (x_2^I - x_1^I) + b_{2x} (\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{02}^I) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) = P \cos(\omega t) \quad (2.13)$$

$$m_3 \ddot{x}_3^I + \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{01}^I) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) + \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^I - x_{02}^I) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) = 0. \quad (2.14)$$

Безынерционные поверхности m_{01} и m_{02} покоятся относительно ТО m_1 и m_2 , и их горизонтальные координаты x_{01}^I и x_{02}^I , используемые в уравнениях (2.12)-(2.14), определяются через координаты нижнего и верхнего ТО x_1^I и x_2^I и могут быть найдены по следующим формулам, в которых начало отсчета выбрано разным в зависимости от действовавшего до этого времени этапа движения системы:

$$x_{01}^I = \begin{cases} x_1^I, & \text{если предыдущим действовал 3-й этап движения} \\ x_1^I + x_{31}(t_{н.конт.1}), & \text{если предыдущим действовал 2-й этап движения} \end{cases}, \quad (2.15)$$

$$x_{02}^I = x_2^I - x_{21}(t_{н.конт.}), \quad (2.16)$$

где $x_{21}(t_{н.конт.}) = x_2(t_{н.конт.}) - x_1(t_{н.конт.})$ вычисляется в момент $t_{н.конт.1}$ или $t_{н.конт.2}$ окончания предшествующего этапа полета слоя (4-й этап) в зависимости от того, с каким ТО произошло первое соприкосновение слоя (с нижним или с верхним ТО); $x_{31}(t_{н.конт.1}) = x_3(t_{н.конт.1}) - x_1(t_{н.конт.1})$ вычисляется в момент $t_{н.конт.1}$ окончания предшествовавшего 2-го этапа, когда модель соприкоснулась с нижним ТО.

Кроме того, в уравнениях движения (2.12)-(2.14) и везде далее принято, что координата x_3 центра масс модели слоя отсчитывается от положения по оси ox массы m_1 или m_2 в момент $t_{н.конт.1}$ или $t_{н.конт.2}$ окончания предшествующего этапа полета слоя (4-й этап) в зависимости от того, с каким ТО он соприкоснулся первым (с нижним или с верхним).

При упруго-вязкой деформации слоя силы, стремящиеся сдвинуть его относительно нижнего и верхнего ТО по оси x , определяются выражениями

$$F_{cd\theta 1} = -\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^I - x_{01}^I) - \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I), \quad (2.17)$$

$$F_{cd\theta 2} = -\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^I - x_{02}^I) - \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I). \quad (2.18)$$

Слой начнет скользить по горизонтальной поверхности нижнего или верхнего ТО, когда одна из сдвигающих сил $F_{cd\theta 1}$ и $F_{cd\theta 2}$ превзойдет по абсолютной величине силу статического трения соответственно $\mu_{cm}N_{1y}$ и $\mu_{cm}N_{2y}$ (где μ_{cm} – коэффициент трения покоя между слоем материала и горизонтальной поверхностью ТО, N_{1y} и N_{2y} – сила нормальной реакции модели слоя материала на горизонтальную поверхность нижнего и верхнего ТО). Определяющие начало проскальзывания слоя моменты моменты $t_{н.ск.1}$ и $t_{н.ск.2}$ находятся решением следующих трансцендентных уравнений:

$$|F_{cd\theta 1}(t_{н.ск.1})| = \mu_{cm}N_{1y}(t_{н.ск.1}), \quad (2.19)$$

$$|F_{cd\theta 2}(t_{н.ск.2})| = \mu_{cm}N_{2y}(t_{н.ск.2}). \quad (2.20)$$

С момента $t_{н.ск.1}$ будет действовать участок с проскальзыванием слоя относительно нижнего ТО (вид движения 1.2 на рис. 2.6), на котором перемещение элементов моделируемой системы по оси ox описывается следующими уравнениями (уравнения (2.13), (2.14) и (2.16) для элементов m_2 , m_3 и m_{02} при этом не изменятся):

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1^I + c_{1x}x_1^I + b_{1x}\dot{x}_1^I - c_{2x}(x_2^I - x_1^I) - b_{2x}(\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I)\mu N_{1y} = \\ = P\cos(\omega t), \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^I - x_{01}^I) + \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I)\mu N_{1y} = 0, \quad (2.22)$$

где μ – коэффициент трения скольжения между слоем материала и горизонтальной поверхностью ТО. При составлении уравнений учтено, что направление действия силы сухого трения зависит от относительной скорости движения модели слоя (безынерционной поверхности m_{01}), поэтому

$$\text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I) = \begin{cases} +1 & \text{при } \dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I > 0 \\ -1 & \text{при } \dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I < 0. \end{cases}$$

При скольжении слоя по рабочему органу возможно его движение вперед ($\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I > 0$) или назад ($\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I < 0$). Моменты перехода от движения слоя в прямом направлении к остановке $t_{к.ск.1+}$ и от его движения в обратном направлении к остановке $t_{к.ск.1-}$ определяются решением трансцендентного уравнения, полученного приравнением нулю относительной скорости перемещения безынерционного элемента модели слоя m_{01} :

$$\dot{x}_{01}^I(t) - \dot{x}_1^I(t) = 0. \quad (2.23)$$

С момента $t_{н.ск.2}$ на участке с проскальзыванием слоя материала относительно верхнего ТО (вид движения 1.3 на рис. 2.6) перемещение элементов моделируемой системы по оси ox будет описываться следующими уравнениями (уравнения (2.12), (2.14) и (2.15) для элементов m_1 , m_3 и m_{01} останутся неизменными):

$$m_2 \ddot{x}_2^I + c_{2x}(x_2^I - x_1^I) + b_{2x}(\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = P \cos(\omega t), \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{2} c_{3x}(x_3^I - x_{02}^I) + \frac{1}{2} b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = 0, \quad (2.25)$$

Здесь так же, как и в уравнениях (2.21)-(2.22) для предыдущего участка движения учтено возможное изменение направления действия силы сухого трения.

По аналогии с описанием предыдущего вида движения моменты перехода от движения слоя в прямом направлении к остановке $t_{к.ск.2+}$ и от его движения в обратном направлении к остановке $t_{к.ск.2-}$ определяются решением трансцендентного уравнения, полученного приравнением нулю относительной скорости перемещения элемента m_{02} :

$$\dot{x}_{02}^I(t) - \dot{x}_2^I(t) = 0. \quad (2.26)$$

Наконец, в том случае, когда на любом из участков движения слоя с его проскальзыванием относительно только нижнего или только верхнего ТО наступит скольжение слоя относительно обоих ТО (вид движения 1.4 на рис. 2.6), начало которого определяется условиями (2.19) или (2.20), движение элементов моделируемой системы по оси ox будет описываться уравнениями

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

$$= P \cos(\omega t), \quad (2.27)$$

$$m_2 \ddot{x}_2^I + c_{2x}(x_2^I - x_1^I) + b_{2x}(\dot{x}_2^I - \dot{x}_1^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = P \cos(\omega t), \quad (2.28)$$

$$m_3 \ddot{x}_3^I + \frac{1}{2} c_{3x}(x_3^I - x_{01}^I) + \frac{1}{2} b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) + \frac{1}{2} c_{3x}(x_3^I - x_{02}^I) + \frac{1}{2} b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) = 0,$$

$$(2.29) \frac{1}{2} c_{3x}(x_3^I - x_{01}^I) + \frac{1}{2} b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{01}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^I - \dot{x}_1^I) \mu N_{1y} = 0, \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{2} c_{3x}(x_3^I - x_{02}^I) + \frac{1}{2} b_{3x}(\dot{x}_3^I - \dot{x}_{02}^I) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I) \mu N_{2y} = 0. \quad (2.31)$$

Моменты $t_{к.ск.1}$ и $t_{к.ск.2}$ переходов от скольжения слоя к его упруго-вязкой деформации определяются по условию остановки слоя по отношению к одному из ТО и находятся решением уравнений (2.23) и (2.26).

Силы нормальной реакции модели слоя на нижний и верхний ТО на рассматриваемом этапе их совместного движения (в контакте) определяются значением восстанавливающих сил упругих связей, пропорциональных относительной деформации модели слоя с коэффициентом $\frac{1}{2} c_{3y}$ и сил сопротивления, пропорциональных его относительной скорости деформации с коэффициентом $\frac{1}{2} b_{3y}$:

$$N_{1y} = -\frac{1}{2} c_{3y}(y_3^I - y_1^I + \Delta_{3(1)}^I) - \frac{1}{2} b_{3y}(\dot{y}_3^I - \dot{y}_1^I), \quad (2.32)$$

$$N_{2y} = -\frac{1}{2} c_{3y}(y_2^I - y_3^I + \Delta_{3(2)}^I) - \frac{1}{2} b_{3y}(\dot{y}_2^I - \dot{y}_3^I). \quad (2.33)$$

Слой будет оставаться в контакте с верхним ТО до момента $t_{к.конт.2}$, пока сила нормальной реакции не обратится в нуль:

$$N_{2y}(t_{к.конт.2}) = 0.$$

С этого момента времени движение элементов моделируемой системы описывается уравнениями 3-го этапа.

3 этап. Расчетная схема для данного этапа движения представлена на рис. 2.8. Данная схема отличается от расчетной схемы для 1-го этапа движения тем, что

$$\Delta_2^{III} = -\frac{c_{3y}^* c_{3y} (\Delta_{3(1)}^I + \Delta_{3(2)}^I - \Delta_2^I) - c_{3y}^* c_{3y} f_{32}^I + 2c_{3y}^* (m_2 + m_3)g + 2c_{3y} m_2 g}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}, \quad (2.35)$$

$$\Delta_{3(1)}^{III} = -\frac{2(c_{3y}^* c_{2y} (\Delta_2^I - \Delta_{3(1)}^I - \Delta_{3(2)}^I) + c_{3y}^* c_{2y} f_{32}^I + 2c_{3y}^* (m_2 + m_3)g + 2c_{2y} m_3 g)}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}, \quad (2.36)$$

$$\Delta_{3(2)}^{III*} = -\frac{2(c_{3y}^* c_{2y} (\Delta_{3(1)}^I + \Delta_{3(2)}^I - \Delta_2^I) + c_{2y} c_{3y} f_{32}^I - 2c_{2y} m_3 g + c_{3y} m_2 g)}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}. \quad (2.37)$$

Также как и на 1-м этапе, здесь возможны несколько видов движения модели слоя материала относительно ТО: движение, когда слой проскальзывает относительно нижнего ТО и движение, при котором слой смещается без проскальзывания только за счет упруго-вязких деформаций (виды движения соответственно 3.2 и 3.1 на рис. 2.6).

Движение элементов моделируемой динамической системы по осям ox и oy на участке упруго-вязкого деформирования модели слоя нижним ТО (вид движения 3.1 на рис. 2.6) описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1^{III} + c_{1y} y_1^{III} + b_{1y} \dot{y}_1^{III} - c_{2y} (y_2^{III} - y_1^{III}) - b_{2y} (\dot{y}_2^{III} - \dot{y}_1^{III}) - \\ - \frac{1}{2} c_{3y} (y_3^{III} - y_1^{III}) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_3^{III} - \dot{y}_1^{III}) = P \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2^{III} + c_{2y} (y_2^{III} - y_1^{III}) + b_{2y} (\dot{y}_2^{III} - \dot{y}_1^{III}) + \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_2^{III} - y_3^{III}) + \\ + \frac{1}{2} b_{3y}^* (\dot{y}_2^{III} - \dot{y}_3^{III}) = -P \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3^{III} + \frac{1}{2} c_{3y} (y_3^{III} - y_1^{III}) + \frac{1}{2} c_{3y} (\dot{y}_3^{III} - \dot{y}_1^{III}) - \\ - \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_2^{III} - y_3^{III}) - \frac{1}{2} b_{3y}^* (\dot{y}_2^{III} - \dot{y}_3^{III}) = 0; \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$m_1 \ddot{x}_1^{III} + c_{1x} x_1^{III} + b_{1x} \dot{x}_1^{III} - c_{2x} (x_2^{III} - x_1^{III}) - b_{2x} (\dot{x}_2^{III} - \dot{x}_1^{III}) - \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^{III} - x_{01}^{III}) -$$

$$-\frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^{III} - \dot{x}_{01}^{III}) = P \cos(\omega t), \quad (2.41)$$

$$m_2 \ddot{x}_2^{III} + c_{2x}(x_2^{III} - x_1^{III}) + b_{2x}(\dot{x}_2^{III} - \dot{x}_1^{III}) = P \cos(\omega t), \quad (2.42)$$

$$m_3 \ddot{x}_3^{III} + \frac{1}{2}c_{3x}(x_3^{III} - x_{01}^{III}) + \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^{III} - \dot{x}_{01}^{III}) = 0. \quad (2.43)$$

При этом нижняя безынерционная поверхность m_{01} неподвижна относительно ТО m_1 , а верхняя безынерционная поверхность m_{02} повторяет движение центра масс слоя m_3 , поэтому их горизонтальные координаты x_{01}^{III} и x_{02}^{III} определяются через координаты нижнего ТО x_1^{III} и ц. м. модели слоя материала x_3^{III} и могут быть найдены по следующим формулам, в которых начало отсчета принято разным в зависимости от того, с каким из двух ТО (с верхним либо нижним) слой соприкоснулся раньше на действовавшем до этого этапе его полета:

$$x_{01}^{III} = \begin{cases} x_1^{III}, & \text{если ранее действовал 3-й этап (1-е касание нижнего РО)} \\ x_1^{III} + x_{31}(t_{н.конт.1}), & \text{если ранее действовал 2-й этап (1-е касание верхнего РО)} \end{cases}, \quad (2.44)$$

$$x_{02}^{III} = x_3^{III}, \quad (2.45)$$

где $x_{31}(t_{н.конт.1}) = x_3(t_{н.конт.1}) - x_1(t_{н.конт.1})$ вычисляется в момент $t_{н.конт.1}$ окончания действовавшего ранее 2-го этапа, когда модель соприкоснулась с нижним ТО.

Так же как и на 1-м этапе движения, участок упруго-вязкой деформации слоя сменится участком с его проскальзыванием относительно нижнего ТО в момент времени $t_{н.ск.1}$, когда сдвигающая слой сила $F_{сдв1}$ превзойдет по абсолютной величине силу статического трения $\mu_{cm}N_{ly}$. Этот момент времени определяется из уравнения (2.19), в котором сдвигающая сила определяется выражением

$$F_{сдв1} = -\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^{III} - x_{01}^{III}) - \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^{III} - \dot{x}_{01}^{III}). \quad (2.46)$$

С момента $t_{н.ск.1}$ будет действовать участок с проскальзыванием слоя относительно нижнего ТО (вид движения 3.2 на рис. 2.6), на котором перемещение элементов моделируемой системы по оси ox будет описываться следующими

уравнениями (уравнения (2.42), (2.43) и (2.45) для элементов m_2 , m_3 и m_{02} при этом не изменятся):

$$m_1 \ddot{x}_1^{III} + c_{1x} \dot{x}_1^{III} + b_{1x} x_1^{III} - c_{2x} (x_2^{III} - x_1^{III}) - b_{2x} (\dot{x}_2^{III} - \dot{x}_1^{III}) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^{III} - \dot{x}_1^{III}) \mu N_{1y} = P \cos(\omega t), \quad (2.47)$$

$$\frac{1}{2} c_{3x} (x_3^{III} - x_{01}^{III}) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^{III} - \dot{x}_{01}^{III}) - \text{sign}(\dot{x}_{01}^{III} - \dot{x}_1^{III}) \mu N_{1y} = 0, \quad (2.48)$$

При скольжении слоя по рабочему органу возможно его движение вперед ($\dot{x}_{01}^{III} - \dot{x}_1^{III} > 0$) или назад ($\dot{x}_{01}^{III} - \dot{x}_1^{III} < 0$). Моменты перехода от движения слоя в прямом направлении к остановке $t_{к.ск.1+}$ и от его движения в обратном направлении к остановке $t_{к.ск.1-}$ определяются решением трансцендентного уравнения, полученного приравниванием нулю относительной скорости перемещения безынерционного элемента модели слоя m_{01} :

$$\dot{x}_{01}^{III}(t) - \dot{x}_1^{III}(t) = 0. \quad (2.49)$$

Уравнения движения ТО и модели слоя материала (2.38)-(2.45) на участке упруго-вязкой деформации слоя (или (2.38)-(2.40), (2.42), (2.43), (2.45), (2.47) и (2.48) на участке проскальзывания слоя относительно нижнего ТО) решаются со следующими начальными условиями, полученными на предыдущем этапе движения (1-й этап):

$$t_0 = t_{к.конт.2},$$

$$y_1^{III}(t_0) = y_1^I(t_0), y_2^{III}(t_0) = y_2^I(t_0) - \delta_2^{III-I}, y_3^{III}(t_0) = y_3^I(t_0) - \delta_3^{III-I},$$

$$\dot{y}_1^{III}(t_0) = \dot{y}_1^I(t_0), \dot{y}_2^{III}(t_0) = \dot{y}_2^I(t_0), \dot{y}_3^{III}(t_0) = \dot{y}_3^I(t_0);$$

$$x_1^{III}(t_0) = x_1^I(t_0), x_2^{III}(t_0) = x_2^I(t_0), x_3^{III}(t_0) = x_3^I(t_0), x_{01}^{III}(t_0) = x_{01}^I(t_0), x_{02}^{III}(t_0) = x_3^I(t_0),$$

$$\dot{x}_1^{III}(t_0) = \dot{x}_1^I(t_0), \dot{x}_2^{III}(t_0) = \dot{x}_2^I(t_0), \dot{x}_3^{III}(t_0) = \dot{x}_3^I(t_0), \dot{x}_{01}^{III}(t_0) = \dot{x}_{01}^I(t_0), \dot{x}_{02}^{III}(t_0) = \dot{x}_3^I(t_0).$$

где δ_i^{III-I} ($i = 2, 3$) – расстояния по оси ou между положениями статического равновесия i -й массы на 3-м и на 1-м этапах, определяемые выражениями

$$\delta_2^{III-I} = \Delta_2^{III} - \Delta_2^I,$$

$$\delta_3^{III-I} = \Delta_{3(1)}^{III} - \Delta_{3(1)}^I.$$

Сила нормальной реакции модели слоя на нижний ТО на этапе их совместного движения зависит от относительной деформации и относительной скорости деформации модели слоя и определяется по формуле

$$N_{1y} = -\frac{1}{2}c_{3y}(y_3^{III} - y_1^{III} + \Delta_{3(1)}^{III}) - \frac{1}{2}b_{3y}(\dot{y}_3^{III} - \dot{y}_1^{III}). \quad (2.50)$$

Моменты переходов от данного этапа движения модели слоя к другим этапам определяются следующими условиями.

Слой будет оставаться в контакте с нижним ТО до момента $t_{к.конт.1}$, пока сила нормальной реакции не обратится в нуль:

$$N_{1y}(t_{к.конт.1}) = 0.$$

С этого момент времени модель слоя материала теряет контакт с обеими ТО и совершает полет, в период которого движение элементов моделируемой системы описывается уравнениями 4-го этапа.

Момент времени $t_{н.конт.2}$, когда слой материала коснется горизонтальной поверхности верхнего ТО, определяется приравниванием нулю относительного перемещения слоя:

$$y_3^{III}(t_{н.конт.2}) - y_2^{III}(t_{н.конт.2}) = \Delta_{3(2)}^{III*} + f_{3(2)}^I. \quad (2.51)$$

С этого момента снова начинает действовать 1-й этап движения моделируемой системы со следующими начальными условиями:

$$t_0 = t_{н.конт.2},$$

$$y_1^I(t_0) = y_1^{III}(t_0), y_2^I(t_0) = y_2^{III}(t_0) + \delta_2^{III-I}, y_3^I(t_0) = y_3^{III}(t_0) + \delta_3^{III-I},$$

$$\dot{y}_1^I(t_0) = \dot{y}_1^{III}(t_0), \dot{y}_2^I(t_0) = \dot{y}_2^{III}(t_0), \dot{y}_3^I(t_0) = \dot{y}_3^{III}(t_0),$$

$$x_1^I(t_0) = x_1^{III}(t_0), x_2^I(t_0) = x_2^{III}(t_0), x_3^I(t_0) = x_3^{III}(t_0), x_{01}^I(t_0) = x_{01}^{III}(t_0), x_{02}^I(t_0) = x_{02}^{III}(t_0),$$

$$\dot{x}_1^I(t_0) = \dot{x}_1^{III}(t_0), \dot{x}_2^I(t_0) = \dot{x}_2^{III}(t_0), \dot{x}_3^I(t_0) = \dot{x}_3^{III}(t_0), \dot{x}_{01}^I(t_0) = \dot{x}_{01}^{III}(t_0), \dot{x}_{02}^I(t_0) = \dot{x}_{02}^{III}(t_0).$$

4 этап. Расчетная схема для данного этапа движения приведена на рис. 2.5.

По аналогии с предшествующими этапами движения величины растяжения пружин моделируемой системы относительно своих недеформированных состояний

$\Delta_i^{IV} = l_i^{IV} - l_i^0$ ($i = 1, 2, 3(1)^*, 3(2)^*$) определяются из следующих статических уравнений равновесия для расчетной схемы системы (рис. 2.5) при действии на ее элементы силы тяжести:

$$c_{1y} \Delta_1^{IV} + (m_1 + m_2 + m_3)g = 0,$$

$$c_{2y} \Delta_2^{IV} + \frac{1}{2} c_{3y}^* \Delta_{3(2)^*}^{IV} + m_2 g = 0,$$

$$\frac{1}{2} c_{3y}^* \Delta_{3(1)^*}^{IV} - \frac{1}{2} c_{3y}^* \Delta_{3(2)^*}^{IV} + m_3 g = 0,$$

$$-\Delta_2^{IV} + \Delta_{3(1)^*}^{IV} + \Delta_{3(2)^*}^{IV} = -\Delta_2^{III} + \Delta_{3(1)}^{III} + \Delta_{3(2)}^{III} - f_{3(1)}^{III},$$

где $f_{3(1)}^{III} = y_3^{III}(t_{к.конт.1}) - y_1^{III}(t_{к.конт.1}) + \Delta_{3(1)}^{III}$, откуда

$$\Delta_1^{IV} = -\frac{(m_1 + m_2 + m_3)g}{c_{1y}}, \quad (2.52)$$

$$\Delta_2^{IV} = -\frac{c_{3y}^* (\Delta_{3(1)}^{III} + \Delta_{3(2)}^{III} - \Delta_2^{III} - f_{3(1)}^{III}) + 2c_{3y}^* (2m_2 + m_3)g}{c_{3y}^{*2} + 4c_{3y}^* c_{2y}}, \quad (2.53)$$

$$\Delta_{3(1)^*}^{IV} = -\frac{2c_{3y}^* c_{2y} (-\Delta_{3(1)}^{III} - \Delta_{3(2)}^{III} + \Delta_2^{III} + f_{3(1)}^{III}) + 2c_{3y}^* (m_2 + m_3)g + 2c_{2y} m_3 g}{c_{3y}^{*2} + 4c_{3y}^* c_{2y}}, \quad (2.54)$$

$$\Delta_{3(2)^*}^{IV} = -\frac{2c_{3y}^* c_{2y} (-\Delta_{3(1)}^{III} - \Delta_{3(2)}^{III} + \Delta_2^{III} + f_{3(1)}^{III}) + 2c_{3y}^* m_2 g - 2c_{2y} m_3 g}{c_{3y}^{*2} + 4c_{3y}^* c_{2y}}. \quad (2.55)$$

Движение ТО и модели слоя материала в период действия рассматриваемого этапа описывается следующими уравнениями движения:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1^{IV} + c_{1y} y_1^{IV} + b_{1y} \dot{y}_1^{IV} - c_{2y} (y_2^{IV} - y_1^{IV}) - b_{2y} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) - \\ - \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_3^{IV} - y_1^{IV}) - \frac{1}{2} b_{3y}^* (\dot{y}_3^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) = P \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$m_2 \ddot{y}_2^{IV} + c_{2y} (y_2^{IV} - y_1^{IV}) + b_{2y} (\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) + \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_2^{IV} - y_3^{IV}) +$$

$$+\frac{1}{2}b_{3y}^*(\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_3^{IV}) = -P\sin(\omega t), \quad (2.57)$$

$$m_3\ddot{y}_3^{IV} + \frac{1}{2}c_{3y}^*(y_3^{IV} - y_1^{IV}) + \frac{1}{2}b_{3y}^*(\dot{y}_3^{IV} - \dot{y}_1^{IV}) - \\ - \frac{1}{2}c_{3y}^*(y_2^{IV} - y_3^{IV}) - \frac{1}{2}b_{3y}^*(\dot{y}_2^{IV} - \dot{y}_3^{IV}) = 0; \quad (2.58)$$

$$m_1\ddot{x}_1^{IV} + c_{1x}x_1^{IV} + b_{1x}\dot{x}_1^{IV} + c_{2x}(x_1^{IV} - x_2^{IV}) + b_{2x}(\dot{x}_1^{IV} - \dot{x}_2^{IV}) = P\cos(\omega t), \quad (2.59)$$

$$m_2\ddot{x}_2^{IV} - c_{2x}(x_1^{IV} - x_2^{IV}) - b_{2x}(\dot{x}_1^{IV} - \dot{x}_2^{IV}) = P\cos(\omega t), \quad (2.60)$$

$$m_2\ddot{x}_3^{IV} = 0. \quad (2.61)$$

При таком перемещении элементов модели ее безынерционные элементы m_{01} и m_{02} повторяют движение центра масс слоя m_3 , поэтому их горизонтальные координаты x_{01}^{IV} и x_{02}^{IV} в точности равняются координате ц.м. слоя x_3^{IV} :

$$x_{01}^{IV} = x_3^{IV},$$

$$x_{02}^{IV} = x_3^{IV}.$$

Уравнения (2.37)-(2.42) решаются с начальными условиями, полученными с предшествующего 3-го этапа движения элементов моделируемой системы:

$$t_0 = t_{к.конт.1},$$

$$y_1^{IV}(t_0) = y_1^{III}(t_0), y_2^{IV}(t_0) = y_2^{III}(t_0) - \delta_2^{IV-III}, y_3^{IV}(t_0) = y_3^{III}(t_0) - \delta_3^{IV-III},$$

$$\dot{y}_1^{IV}(t_0) = \dot{y}_1^{III}(t_0), \dot{y}_2^{IV}(t_0) = \dot{y}_2^{III}(t_0), \dot{y}_3^{IV}(t_0) = \dot{y}_3^{III}(t_0);$$

$$x_1^{IV}(t_0) = x_1^{III}(t_0), x_2^{IV}(t_0) = x_2^{III}(t_0), x_3^{IV}(t_0) = x_3^{III}(t_0), x_{01}^{IV}(t_0) = x_3^{III}(t_0), x_{02}^{IV}(t_0) = x_{02}^{III}(t_0),$$

$$\dot{x}_1^{IV}(t_0) = \dot{x}_1^{III}(t_0), \dot{x}_2^{IV}(t_0) = \dot{x}_2^{III}(t_0), \dot{x}_3^{IV}(t_0) = \dot{x}_3^{III}(t_0), \dot{x}_{01}^{IV}(t_0) = \dot{x}_3^{III}(t_0), \dot{x}_{02}^{IV}(t_0) = \dot{x}_{02}^{III}(t_0),$$

где δ_i^{IV-III} ($i = 2, 3$) – расстояния по оси ou между положениями статического равновесия i -й массы на 4-м и на 3-м этапах, которые определяются из выражений

$$\delta_2^{IV-III} = \Delta_2^{IV} - \Delta_2^{III},$$

$$\delta_3^{IV-III} = \Delta_{3(1)}^{IV} - \Delta_{3(1)}^{III} + f_{3(1)}^{III}.$$

Моменты времени $t_{н.конт.1}$ и $t_{н.конт.2}$, когда слой материала коснется горизонтальной поверхности нижнего или верхнего ТО и начнет действовать 3-й или 2-й этапы их движения находятся из уравнений, полученных приравнением нулю относительного перемещения слоя:

$$y_3^{IV}(t_{н.конт.1}) - y_1^{IV}(t_{н.конт.1}) = -\Delta_{3(1)}^{IV*} - f_{3(1)}^{III}, \quad (2.62)$$

$$y_3^{IV}(t_{н.конт.2}) - y_2^{IV}(t_{н.конт.2}) = \Delta_{3(2)}^{III*} + f_{3(2)}^I + \delta_2^{IV-III} - \delta_3^{IV-III}. \quad (2.63)$$

С момента $t_{н.конт.1}$ снова начинает действовать 3-й этап движения моделируемой системы начальными условиями следующего вида:

$$t_0 = t_{н.конт.1},$$

$$y_1^{III}(t_0) = y_1^{IV}(t_0), y_2^{III}(t_0) = y_2^{IV}(t_0) + \delta_2^{IV-III}, y_3^{III}(t_0) = y_3^{IV}(t_0) + \delta_3^{IV-III},$$

$$\dot{y}_1^{III}(t_0) = \dot{y}_1^I(t_0), \dot{y}_2^{III}(t_0) = \dot{y}_2^{IV}(t_0), \dot{y}_3^{III}(t_0) = \dot{y}_3^{IV}(t_0);$$

$$x_1^{III}(t_0) = x_1^{IV}(t_0), x_2^{III}(t_0) = x_2^{IV}(t_0), x_3^{III}(t_0) = x_3^{IV}(t_0), x_{01}^{III}(t_0) = x_1^{IV}(t_0), x_{02}^{III}(t_0) = x_3^{IV}(t_0),$$

$$\dot{x}_1^{III}(t_0) = \dot{x}_1^{IV}(t_0), \dot{x}_2^{III}(t_0) = \dot{x}_2^{IV}(t_0), \dot{x}_3^{III}(t_0) = \dot{x}_3^{IV}(t_0), \dot{x}_{01}^{III}(t_0) = \dot{x}_{01}^{IV}(t_0), \dot{x}_{02}^{III}(t_0) = \dot{x}_{02}^{IV}(t_0).$$

В том случае, когда слой материала на этапе полета первым соприкоснется с горизонтальной поверхностью верхнего ТО, начнет действовать 2-й этап движения элементов моделируемой системы.

2 этап. Расчетная схема модели слоя материала и ТО на данном этапе (рис. 2.9) очень похожа на расчетную схему 3-го этапа, и описание перемещения элементов моделируемой системы здесь отличается лишь тем, что слой находится в контакте с верхним ТО, а не с нижним.

Растяжения пружин относительно своих недеформированных состояний $\Delta_i^H = l_i^H - l_i^0$ ($i = 1, 2, 3(1)^*, 3(2)$) определим из статических уравнений равновесия для расчетной схемы системы (рис. 2.9) при действии на ее элементы силы тяжести

$$c_{1y} \Delta_1^H + (m_1 + m_2 + m_3)g = 0,$$

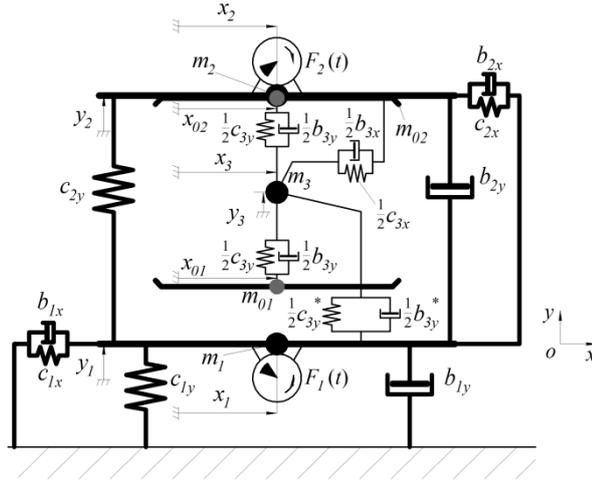


Рис. 2.9. Расчётная схема перемещения слоя материала ТО на этапе 2 совместного (в контакте) движения с верхним ТО.

$$c_{2y} \Delta_2^{\text{II}} + \frac{1}{2} c_{3y} \Delta_{3(2)}^{\text{II}} + m_2 g = 0,$$

$$\frac{1}{2} c_{3y}^* \Delta_{3(1)}^{\text{II}} - \frac{1}{2} c_{3y} \Delta_{3(2)}^{\text{II}} + m_3 g = 0,$$

$$-\Delta_2^{\text{II}} + \Delta_{3(1)}^{\text{II}*} + \Delta_{3(2)}^{\text{II}} = -\Delta_2^{\text{I}} + \Delta_{3(1)}^{\text{I}} + \Delta_{3(2)}^{\text{I}} - f_{31}^{\text{III}},$$

откуда

$$\Delta_1^{\text{II}} = -\frac{(m_1 + m_2 + m_3)g}{c_{1y}}, \quad (2.64)$$

$$\Delta_2^{\text{II}} = -\frac{c_{3y}^* c_{3y} (\Delta_{3(1)}^{\text{I}} + \Delta_{3(2)}^{\text{I}} - \Delta_2^{\text{I}} - f_{3(1)}^{\text{III}}) + 2c_{3y}^* m_2 g + 2c_{3y} (m_2 + m_3)g}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}, \quad (2.65)$$

$$\Delta_{3(1)}^{\text{II}*} = -\frac{2c_{3y} c_{2y} (-\Delta_{3(1)}^{\text{I}} - \Delta_{3(2)}^{\text{I}} + \Delta_2^{\text{I}} + f_{3(1)}^{\text{III}}) + 2c_{3y}^* (m_2 + m_3)g + 4c_{2y} m_3 g}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}, \quad (2.66)$$

$$\Delta_{3(2)}^{\text{II}} = -\frac{2c_{3y}^* c_{2y} (-\Delta_{3(1)}^{\text{I}} - \Delta_{3(2)}^{\text{I}} + \Delta_2^{\text{I}} + f_{3(1)}^{\text{III}}) + 4c_{3y}^* m_2 g - 4c_{2y} m_3 g}{2c_{3y}^* c_{2y} + c_{3y}^* c_{3y} + 2c_{2y} c_{3y}}. \quad (2.67)$$

Также как и на 3-м этапе, здесь возможно два вида движения модели слоя материала относительно ТО: движение, когда слой проскальзывает относительно верхнего ТО и движение, при котором слой смещается без проскальзывания только

за счет упруго-вязких деформаций (соответственно виды движения 2.2 и 2.1 на рис. 2.6).

Движение элементов моделируемой динамической системы по осям ox и oy на участке упруго-вязкого деформирования модели слоя верхним ТО (вид движения 2.1 на рис. 2.6) описывается следующими уравнениями:

$$m_1 \ddot{y}_1^{II} + c_{1y} y_1^{II} + b_{1y} \dot{y}_1^{II} - c_{2y} (y_2^{II} - y_1^{II}) - b_{2y} (\dot{y}_2^{II} - \dot{y}_1^{II}) - \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_3^{II} - y_1^{II}) - \frac{1}{2} b_{3y}^* (\dot{y}_3^{II} - \dot{y}_1^{II}) = P \sin(\omega t), \quad (2.68)$$

$$m_2 \ddot{y}_2^{II} + c_{2y} (y_2^{II} - y_1^{II}) + b_{2y} (\dot{y}_2^{II} - \dot{y}_1^{II}) + \frac{1}{2} c_{3y} (y_2^{II} - y_3^{II}) + \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^{II} - \dot{y}_3^{II}) = -P \sin(\omega t), \quad (2.69)$$

$$m_3 \ddot{y}_3^{II} + \frac{1}{2} c_{3y}^* (y_3^{II} - y_1^{II}) + \frac{1}{2} b_{3y}^* (\dot{y}_3^{II} - \dot{y}_1^{II}) - \frac{1}{2} c_{3y} (y_2^{II} - y_3^{II}) - \frac{1}{2} b_{3y} (\dot{y}_2^{II} - \dot{y}_3^{II}) = 0; \quad (2.70)$$

$$m_1 \ddot{x}_1^{II} + c_{1x} x_1^{II} + b_{1x} \dot{x}_1^{II} - c_{2x} (x_2^{II} - x_1^{II}) - b_{2x} (\dot{x}_2^{II} - \dot{x}_1^{II}) = P \cos(\omega t), \quad (2.71)$$

$$m_2 \ddot{x}_2^{II} + c_{2x} (x_2^{II} - x_1^{II}) + b_{2x} (\dot{x}_2^{II} - \dot{x}_1^{II}) - \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^{II} - x_{02}^{II}) - \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^{II} - \dot{x}_{02}^{II}) = P \cos(\omega t), \quad (2.72)$$

$$m_3 \ddot{x}_3^{II} + \frac{1}{2} c_{3x} (x_3^{II} - x_{02}^{II}) + \frac{1}{2} b_{3x} (\dot{x}_3^{II} - \dot{x}_{02}^{II}) = 0. \quad (2.73)$$

При этом верхняя безынерционная поверхность m_{02} неподвижна относительно ТО m_2 , а нижняя безынерционная поверхность m_{01} повторяет движение центра масс слоя m_3 , поэтому их горизонтальные координаты x_{01}^{II} и x_{02}^{II} определяются через координаты верхнего ТО x_2^{II} и ц. м. модели слоя материала x_3^{II} и могут быть найдены по следующим формулам:

$$x_{01}^{II} = x_3^{II}, \quad (2.74)$$

$$x_{02}^{II} = x_2^{II} - x_{21}(t_{н.конт.}), \quad (2.75)$$

где $x_{21}(t_{н.конт.1}) = x_2(t_{н.конт.1}) - x_1(t_{н.конт.1})$ вычисляется в момент $t_{н.конт.1}$ окончания действовавшего перед этим этапом полета слоя (4-й этап).

Так же как и на 1-м этапе движения, участок упруго-вязкой деформации слоя сменится участком с его проскальзыванием относительно нижнего ТО в момент времени $t_{н.ск.2}$, когда сдвигающая слой сила $F_{сдв2}$ превзойдет по абсолютной величине силу статического трения $\mu_{см}N_{2y}$. Этот момент времени определяется из уравнения (2.20), в котором сдвигающая сила определяется выражением

$$F_{сдв2} = -\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^{II} - x_{02}^{II}) - \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^{II} - \dot{x}_{02}^{II}). \quad (2.76)$$

С момента $t_{н.ск.2}$ будет действовать участок с проскальзыванием слоя относительно нижнего ТО (вид движения 2.2 на рис. 2.6), на котором перемещение элементов моделируемой системы по оси ox будет описываться следующими уравнениями (уравнения (2.71), (2.73) и (2.74) для элементов m_1 , m_3 и m_{01} при этом не изменятся):

$$m_2\ddot{x}_2^{II} + c_{2x}(x_2^{II} - x_1^{II}) + b_{2x}(\dot{x}_2^{II} - \dot{x}_1^{II}) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^I - \dot{x}_2^I)\mu N_{2y} = P\cos(\omega t), \quad (2.77)$$

$$\frac{1}{2}c_{3x}(x_3^{II} - x_{02}^{II}) + \frac{1}{2}b_{3x}(\dot{x}_3^{II} - \dot{x}_{02}^{II}) - \text{sign}(\dot{x}_{02}^{II} - \dot{x}_2^{II})\mu N_{2y} = 0, \quad (2.78)$$

При скольжении слоя по рабочему органу возможно его движение вперед ($\dot{x}_{02}^{II} - \dot{x}_2^{II} > 0$) или назад ($\dot{x}_{02}^{II} - \dot{x}_2^{II} < 0$). Моменты перехода от движения слоя в прямом направлении к остановке $t_{к.ск.2+}$ и от его движения в обратном направлении к остановке $t_{к.ск.2-}$ определяются решением трансцендентного уравнения, полученного приравниванием нулю относительной скорости перемещения безынерционного элемента модели слоя m_{02} :

$$\dot{x}_{02}^{II}(t) - \dot{x}_2^{II}(t) = 0. \quad (2.79)$$

Уравнения движения ТО и модели слоя материала (2.68)-(2.75) на участке упруго-вязкой деформации слоя (или (2.68)-(2.71), (2.73),(2.74) ,(2.77),(2.78) на участке проскальзывания слоя относительно верхнего ТО) решаются со следующими начальными условиями, полученными на предшествующем этапе движения (4-й этап):

$$t_0 = t_{\kappa.\text{конт.1}},$$

$$y_1^{\text{II}}(t_0) = y_1^{\text{IV}}(t_0), y_2^{\text{II}}(t_0) = y_2^{\text{IV}}(t_0) - \delta_2^{\text{II-IV}}, y_3^{\text{II}}(t_0) = y_3^{\text{IV}}(t_0) - \delta_3^{\text{II-IV}},$$

$$\dot{y}_1^{\text{II}}(t_0) = \dot{y}_1^{\text{IV}}(t_0), \dot{y}_2^{\text{II}}(t_0) = \dot{y}_2^{\text{IV}}(t_0), \dot{y}_3^{\text{II}}(t_0) = \dot{y}_3^{\text{IV}}(t_0);$$

$$x_1^{\text{II}}(t_0) = x_1^{\text{IV}}(t_0), x_2^{\text{II}}(t_0) = x_2^{\text{IV}}(t_0), x_3^{\text{II}}(t_0) = x_3^{\text{IV}}(t_0), x_{01}^{\text{II}}(t_0) = x_{01}^{\text{IV}}(t_0), x_{02}^{\text{II}}(t_0) = x_{02}^{\text{IV}}(t_0),$$

$$\dot{x}_1^{\text{II}}(t_0) = \dot{x}_1^{\text{IV}}(t_0), \dot{x}_2^{\text{II}}(t_0) = \dot{x}_2^{\text{IV}}(t_0), \dot{x}_3^{\text{II}}(t_0) = \dot{x}_3^{\text{IV}}(t_0), \dot{x}_{01}^{\text{II}}(t_0) = \dot{x}_{01}^{\text{IV}}(t_0), \dot{x}_{02}^{\text{II}}(t_0) = \dot{x}_{02}^{\text{IV}}(t_0).$$

где $\delta_i^{\text{II-IV}}$ ($i = 2, 3$) – расстояния по оси ou между положением статического равновесия i -й массы на 2-м и на 4-м этапах, определяемые выражениями

$$\delta_2^{\text{II-IV}} = \Delta_2^{\text{II}} - \Delta_2^{\text{IV}},$$

$$\delta_3^{\text{II-IV}} = \Delta_{3(1)}^{\text{II}*} - \Delta_{3(1)}^{\text{IV}*}.$$

Сила нормальной реакции модели слоя на верхний ТО на этапе их совместного движения зависит от относительной деформации и относительной скорости деформации модели слоя и определяется по формуле

$$N_{2y} = -\frac{1}{2}c_{3y}(y_2^{\text{II}} - y_3^{\text{II}} + \Delta_{3(2)}^{\text{II}}) - \frac{1}{2}b_{3y}(\dot{y}_2^{\text{II}} - \dot{y}_3^{\text{II}}). \quad (2.80)$$

Момент времени $t_{\text{н.конт.1}}$, когда слой материала коснется горизонтальной поверхности нижнего ТО, определяется приравнением нулю относительного перемещения слоя:

$$y_3^{\text{II}}(t_{\text{н.конт.1}}) - y_1^{\text{II}}(t_{\text{н.конт.1}}) = -\Delta_{3(1)}^{\text{IV}*} - f_{3(1)}^{\text{III}} - \delta_3^{\text{II-IV}}. \quad (2.81)$$

С этого момента снова начинает действовать 1-й этап движения моделируемой системы со следующими начальными условиями:

$$t_0 = t_{\text{н.конт.1}},$$

$$y_1^{\text{I}}(t_0) = y_1^{\text{II}}(t_0), y_2^{\text{I}}(t_0) = y_2^{\text{II}}(t_0) - \delta_2^{\text{I-II}}, y_3^{\text{I}}(t_0) = y_3^{\text{II}}(t_0) - \delta_3^{\text{I-II}},$$

$$\dot{y}_1^{\text{I}}(t_0) = \dot{y}_1^{\text{II}}(t_0), \dot{y}_2^{\text{I}}(t_0) = \dot{y}_2^{\text{II}}(t_0), \dot{y}_3^{\text{I}}(t_0) = \dot{y}_3^{\text{II}}(t_0);$$

$$x_1^{\text{I}}(t_0) = x_1^{\text{II}}(t_0), x_2^{\text{I}}(t_0) = x_2^{\text{II}}(t_0), x_3^{\text{I}}(t_0) = x_3^{\text{II}}(t_0), x_{01}^{\text{I}}(t_0) = x_{01}^{\text{II}}(t_0), x_{02}^{\text{I}}(t_0) = x_{02}^{\text{II}}(t_0),$$

$$\dot{x}_1^{\text{I}}(t_0) = \dot{x}_1^{\text{II}}(t_0), \dot{x}_2^{\text{I}}(t_0) = \dot{x}_2^{\text{II}}(t_0), \dot{x}_3^{\text{I}}(t_0) = \dot{x}_3^{\text{II}}(t_0), \dot{x}_{01}^{\text{I}}(t_0) = \dot{x}_{01}^{\text{II}}(t_0), \dot{x}_{02}^{\text{I}}(t_0) = \dot{x}_{02}^{\text{II}}(t_0).$$

где δ_i^{II-IV} ($i = 2, 3$) – расстояния по оси ou между положением статического равновесия i -й массы на 2-м и на 4-м этапах, определяемые выражениями

$$\delta_2^{I-II} = \Delta_2^I - \Delta_2^{II},$$

$$\delta_3^{I-II} = \Delta_{3(1)}^I - \Delta_{3(1)^*}^{II} - \Delta_{3(1)}^{III}.$$

Приведённое в настоящем разделе математическое описание динамики перемещения слоя материала ТО с учётом всех их видов перемещений является математической моделью, позволяющей провести анализ всех режимов вибротранспортирования [89, 90]. Полученные здесь уравнения позволяют рассчитать скорость транспортирования слоя материала, заключенного между двумя вибротранспортирующими ТО при различных режимах колебаний и соответственно определить транспортную производительность установки для обогащения поверхности мелких заполнителей бетонов.

Средняя скорость транспортирования слоя материала ТО в установившемся режиме движения $V_{тр}$ определяется скоростями движения ц. м. модели слоя вдоль ТО на отдельных этапах ее перемещения, характером, продолжительностью и порядком чередования этих этапов движения [100]. Проинтегрировав скорости движения ц. м. модели слоя в соответствующих пределах за один период его установившегося перемещения и сложив их, получим среднюю скорость:

$$V_{тр} = \frac{1}{\Delta} \left[\int_{\omega t_{к.конт.1}}^{\omega t_{н.конт.i}} \dot{x}_3^{IV} d\omega t + \int_{\omega t_{н.конт.i}}^{\omega t_{н.конт.j}} \dot{x}_3^K d\omega t + \int_{\omega t_{н.конт.j}}^{\omega t_{к.конт.2}} \dot{x}_3^I d\omega t + \int_{\omega t_{к.конт.2}}^{\omega t_{к.конт.1}} \dot{x}_3^{III} d\omega t \right], \quad (2.82)$$

где

Δ – общая продолжительность всех этапов перемещения слоя за один период его установившегося движения в угловых единицах;

$i=1, j=2, K=III$ в случае, когда слой материала по окончании действия этапа полета первым соприкасается с нижним ТО (действует 3-й этап);

$i=2, j=1, K=II$ в случае, когда слой материала по окончании действия этапа полета первым соприкасается с верхним ТО (действует 2-й этап).

В уравнении (2.82) также учтены характерные этапы с проскальзыванием модели слоя относительно ТО, которые могут возникать на этапах их движения в контакте друг с другом (1-й, 2-й и 3-й этапы).

На основе приведенной математической модели динамики перемещения слоя материала двумя вибротранспортирующими органами разработан алгоритм и программа «Виброоттирка» для расчета основных параметров перемещения слоя [87] с использованием пакета прикладных программ Matlab для решения уравнений движения методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [85, 89]. Алгоритм и программа для анализа и расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя материала двумя ТО двухмассового виброконвейера разработаны с учетом всех возможных видов перемещения модели слоя относительно ТО и позволяют определять перемещение, скорость и ускорение ТО и слоя сыпучей среды, силы нормальной реакции в зоне взаимодействия слоя и ТО, а также сдвигающие силы, перемещающие слой материала в направлении его транспортирования.

Данная программа применена при выборе режимов работы и конструктивных параметров экспериментальной оттирочно-очистительной установки. Также программа является основой для идентификации механореологических параметров модели слоя сыпучей среды реальному слою обрабатываемого песка (разделы 3.3.1 и 3.3.2). Кроме того, данная программа может быть эффективно использована для решения различных задач прикладных исследований на стадии многовариантных предпроектных решений по выбору конструкции и параметров работы двухмассовых виброконвейеров с ТО, совершающими друг относительно друга плоско-параллельные колебания при любых направлениях движения по замкнутым траекториям каждого ТО с относительным сдвигом фаз в диапазоне от 0 до 2π как в продольном, так и в поперечном направлениях [95], включая режим работы ТО с их антифазными колебаниями в поперечном и синфазными колебаниями в продольном направлениях.

ВЫВОДЫ

1. На основе выполненного анализа работ в области вибротранспортирования и уплотнения сыпучих сред для моделирования процесса перемещения слоя песка двумя транспортирующими органами виброконвейера отгирочно-очистительной установки принимаем механо-реологическую упруго-вязко-инерционную модель слоя песка с учетом условий, ограничений и допущений, базирующихся на теории механики грунтов, механики сыпучих сред и механики деформируемого твердого тела.

2. Разработаны расчетные схемы процесса перемещения слоя материала ТО с учетом принятой упруго-вязко-инерционной модели слоя и установлены все возможные виды движения модели слоя материала относительно двух ТО (включая этапы движения модели слоя в контакте с каждым ТО (верхним либо нижним) и этапы с проскальзыванием модели слоя относительно каждого ТО) с определением всех возможных вариантов переходов от одних видов движения к другим.

3. Разработана модель трехмассовой нелинейной механической системы элементов «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» с упругими и вязкими связями, отображающая процесс взаимодействия ТО со слоем обрабатываемого песка при силовом воздействии на него ТО и ее математическое описание в виде уравнений движения двух ТО и слоя для каждого характерного этапа движения слоя, уравнений для определения моментов перехода от одних этапов движения к другим, а также начальных условий для таких переходов. Уравнения упомянутой математической модели содержат параметр e , учитывающий степень заполнения материалом пространства между ТО и представляющий собой разность высоты слоя материала и высоты пространства между ТО в статике.

4. На основе предложенной математической модели разработана программа, позволяющая исследовать кинематические и силовые параметры перемещения слоя материала ТО с учетом всех возможных видов его перемещения при различных режимах вибрационного воздействия ТО на слой и рассчитывать среднюю скорость вибротранспортирования слоя сыпучего материала.

5. Результаты выполненного математического моделирования, а также разработанные алгоритм и программа для анализа и расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя материала двумя ТО являются основой для идентификации параметров механо-реологической модели слоя материала реальным сыпучим средам при их перемещении, после определения которых программа может быть использована для решения прикладных предпроектных задач по выбору конструкции и основных параметров работы двухмассовых виброконвейеров с ТО, совершающими друг относительно друга плоско-параллельные колебания при любых направлениях движения по замкнутым траекториям каждого ТО с относительным сдвигом фаз в диапазоне от 0 до 2π как в продольном, так и в поперечном направлениях, включая режим работы ТО с их антифазными колебаниями в поперечном и синфазными колебаниями в продольном направлениях.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПЕСКА ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ ОРГАНАМИ

3.1. Цели и задачи экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований является исследование закономерностей процесса перемещения обрабатываемого слоя песка в режиме его виброобъемного деформирования двумя колеблющимися транспортирующими органами (ТО), совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, а также определение численных параметров (упруго-вязких коэффициентов) теоретической модели перемещения слоя ТО и скорости транспортирования сыпучей среды.

Исходя из изложенного в задачи экспериментальных исследований входит:

- определение основных характеристик перемещения слоя песка ТО (моментов начала и окончания контакта слоя песка с ТО и силы воздействия ТО на слой) при различных параметрах процесса обработки песка, таких как режимы колебаний ТО, крупность частиц песка и степень заполнения им пространства между вибрирующими ТО;
- идентификация параметров модели механической системы конструкции экспериментальной установки при ее работе на холостом ходу;
- идентификация параметров механо-реологической модели слоя материала реальному песку при перемещении слоя ТО на всех этапах их движения в контакте друг с другом при различных параметрах процесса обработки крупного и мелкого песка;
- идентификация параметров модели слоя песка, взаимодействующей с ТО на этапах ее движения без контакта одновременно с двумя ТО или с одним из них при различных параметрах процесса обработки песка;
- установление регрессионной зависимости влияния на скорость вибротранспортирования слоя материала частоты колебаний ТО, момента

дебалансов вибропривода, крупности частиц песка и зазора под заслонкой, регулирующего степень заполнения материалом пространства между ТО;

– оценка адекватности предложенной инерционной упруго-вязкой модели слоя материала для расчета по программе для ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя ТО и скорости его транспортирования.

Для решения поставленных задач предусматривается проведение исследований в лабораторных условиях на специальном экспериментальном оборудовании, позволяющем моделировать процесс перемещения обрабатываемой сыпучей среды двумя вибротранспортирующими органами.

3.2. Методика проведения экспериментальных исследований

3.2.1. Выбор и обоснование параметров исследуемого процесса и уточнение объемов исследования

При проведении экспериментальных исследований ограничимся рассмотрением процесса, параметры которого удовлетворяют наиболее общим и практически важным задачам создания оборудования для обогащения мелких заполнителей бетонов и растворов методом обработки поверхности их зерен.

Примем для исследования материал, используемый в качестве мелких заполнителей бетонов со средним диаметром частиц менее 3-5 мм. Таким материалом является строительный песок, соответствующий ГОСТ 8736-93.

Для изучения влияния фракционного состава материала на процесс его вибротранспортирования двумя колеблющимися ТО будем использовать различные по фракционному составу песчаные смеси.

При выборе пределов изменения высоты слоя примем следующие ограничения. Как показывают эксперименты по изучению динамики и скорости виброперемещения сыпучих сред (в том числе песка) вибротранспортирующим органом со сплошным днищем, при увеличении высоты слоя более 100-150 мм в нем начинает сказываться эффект послойного движения материала, т.е.

неоднородности свойств транспортируемой среды. Кроме того, низкое значение высоты слоя является более предпочтительным для процессов оттирки поверхности частиц материала, так как с уменьшением высоты слоя сжимающие напряжения в нем увеличиваются, что как следствие приводит к снижению энергоемкости процесса механической обработки поверхности частиц. На основе сказанного в данной работе ограничимся исследованием процесса при величине высоты слоя до 100 мм.

Из работ [9, 62, 98] известно, что если ширина слоя сыпучей среды меньше высоты слоя, то влияние сил сопротивления, возникающих между боковыми стенками виброоргана и слоем материала, на динамику виброперемещения слоя незначительно, и их действием допустимо пренебречь при ширине слоя, превышающей его высоту более чем в 2 раза. С учетом сказанного примем ширину желоба вибротранспортирующего органа равную 220 мм, а расстояние по вертикали между двумя органами 100 мм (см. рис. 3.1).

Пределы изменения параметров колебаний вибротранспортирующих органов примем исходя из условий обеспечения устойчивого режима виброперемещения слоя сыпучей среды с отрывом от органа и вибропрочности конструкции машины. В этом случае динамический параметр режима работы вибротранспортирующего органа рекомендуется назначать [11, 100, 105]: $1,2 \leq \Gamma \leq 3,8$. На основе этого принимаем для исследования следующие значения параметров вибрации ТО установки на холостом ходу (без материала): амплитуда колебаний $1 \leq A \leq 5$ мм, частота колебаний $12,0 \leq \lambda \leq 22$ Гц.

Задачей экспериментального исследования является определение объективных закономерностей, которые являются выражением зависимости первичных (задаваемых) и вторичных (зависимых) факторов друг от друга.

К задаваемым факторам, характеризующим процесс перемещения обрабатываемого слоя песка ТО, следует отнести статический момент дебалансов вибровозбудителей $M_{деб}$ и частоту их вращения n , зазор h , устанавливаемый заслонкой аппарата (рис. 3.1, раздел 3.2.2) и эквивалентный диаметр частиц песка $d_{эКВ}$.

Искомыми зависимыми факторами являются основные параметры, характеризующие динамику перемещения слоя ТО, такие как моменты начала и окончания контакта слоя с ТО (характеризующие продолжительность этапа полета слоя), величины сил нормальной реакции слоя на ТО, а также скорость транспортирования слоя.

Для установления влияния каждого из первичных факторов на вторичные выберем рациональный диапазон назначаемых в экспериментах режимов работы установки. При этом минимальное количество параллельных опытов в экспериментах m примем равным трем, что соответствует величине доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, рекомендуемой при исследовании технологических процессов в машиностроении [1].

Для определения устойчивых режимов работы экспериментальной установки и получения дополнительной информации об исследуемом процессе вибротранспортирования слоя песка были проведены предварительные опыты, в каждом из которых последовательно варьировалось значение одного из параметров в выбранных интервалах:

1. Статический момент дебалансов вибровозбудителей $M_{\text{деб}} = 0,2 - 0,4$ кг·м (указано значение для одного вибровозбудителя).
2. Зазор $h = 5 - 40$ мм.
3. Частота вращения дебалансов вибровозбудителей $n = 800 - 1300$ об/мин;
4. Эквивалентный диаметр частиц песка $d_{\text{экв}} = 0,32 - 0,49$ мм.

При этом контроль параметров вибрации ТО осуществлялся с помощью ручного вибрографа (см. табл. 3.1).

В результате проведения предварительных опытов было установлено, что устойчивые режимы колебания ТО экспериментальной установки и вибротранспортирования слоя материала достигаются при следующих параметрах процесса: $0,32 \leq M_{\text{деб}} \leq 0,388$ кг·м, $800 \leq n \leq 1300$ об/мин, $0,32 \leq d_{\text{экв}} \leq 0,49$ мм, $10 \leq h \leq 20$ мм. При других значениях исследуемых параметров наблюдались

неустановившиеся режимы колебаний ТО и неустойчивые режимы транспортирования материала.

3.2.2. Описание конструкции экспериментальной установки

Экспериментальные исследования по изучению закономерностей процесса перемещения обрабатываемой сыпучей среды двумя колеблющимися вибротранспортирующими органами и скорости ее транспортирования проводились на специально спроектированной экспериментальной установке (рис. 3.2).

Экспериментальная установка представляет собой виброконвейер (рис. 3.1), состоящий из двух горизонтально расположенных плоских ТО желобчатого сечения 1 и 2 длиной 1,5 м, в пространстве между которыми находится рабочая камера 3 прямоугольного сечения (0,22x0,1 м) для обработки материала. Виброконвейер опирается на неподвижное основание посредством упругих цилиндрических пружин 4. Рабочие органы соединены между собой упругими элементами взаимодействия, включающими пружины 5 и эластичную вставку 6, которая ограничивает пространство рабочей камеры 7.

Вибропривод выполнен в виде двух дебалансных вибровозбудителей 8 и 9, корпус которых жестко связан с каждым ТО. Инерционные элементы (дебалансы), синхронно вращаясь в различных направлениях в одной плоскости, обеспечивают плоско-параллельные синхронные колебания ТО по замкнутым траекториям в противофазе в поперечном направлении рабочей камеры и в фазе в продольном ее направлении. Для изменения статического момента дебалансов они выполнены раздвижными, что позволяет изменять эксцентриситет каждого дебаланса. Регулирование частоты вращения дебалансов вибровозбудителей осуществляется частотным преобразователем.

Подача обрабатываемого материала в рабочую камеру установки осуществляется через загрузочный бункер 10 емкостью 0,2 м³, установленный над верхним ТО 1 и соединенный с ним эластичной вставкой 11. Темп подачи

материала из бункера 10 регулируется заслонкой 12. Выгрузка материала из установки осуществляется через выпускной патрубок 13, смонтированный на нижнем рабочем органе 2. С целью регулирования транспортной производительности установки и степени заполнения материалом пространства рабочей камеры 3 на верхнем рабочем органе 1 установлена заслонка 14 с зазором h (мм). Для измерения производительности установки под выпускным патрубком установлена мерная емкость 19, взвешиваемая на весах после каждого опыта.

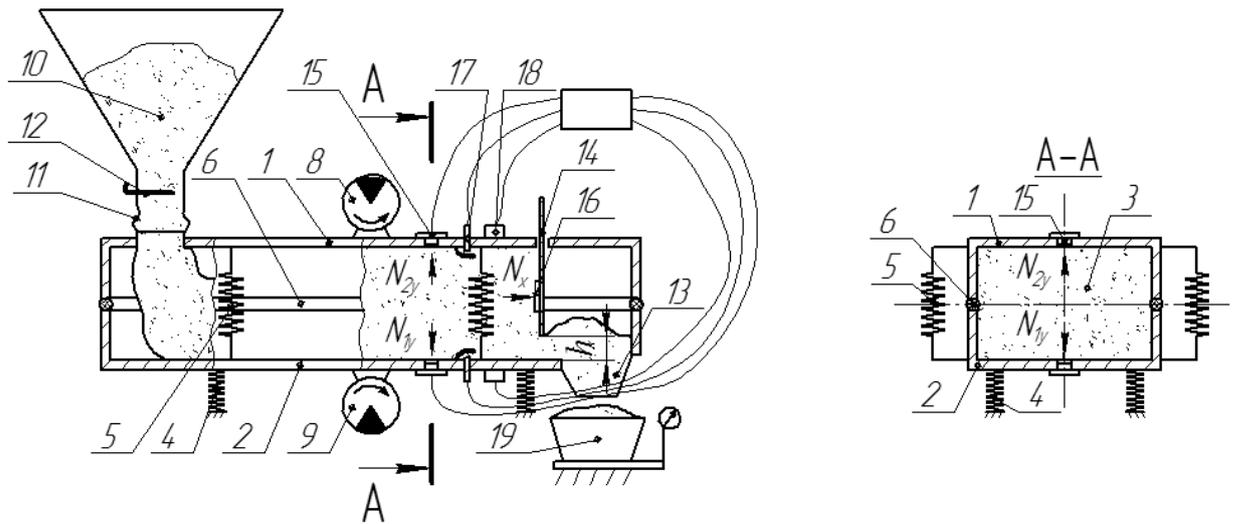


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки



Рис. 3.2. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 3.3. Общий вид рабочей камеры экспериментальной установки с песком

Основные технические характеристики экспериментальной установки

Длина желоба рабочего органа, мм.....	1450
Ширина желоба рабочего органа, мм.....	220
Расстояние между двумя органами по вертикали, мм.....	100
Частота вращения дебалансов вибровозбудителей n , об/мин, до.....	3000
Статический момент дебалансов (один вибровозбудитель) $M_{\text{деб}}$, кг·м.....	0,2 – 0,4
Установленная мощность вибровозбудителей, кВт.....	$2 \times 2,7$
Жесткость пружин взаимодействия в горизонтальном направлении c_{2x} , Н/м.....	$1,6 \cdot 10^6$
Жесткость пружин взаимодействия в вертикальном направлении c_{2y} , Н/м.....	$9,0 \cdot 10^5$
Коэффициент вязких сопротивлений пружин взаимодействия в горизонтальном направлении b_{2x} , Н·с/м	3100
Коэффициент вязких сопротивлений пружин взаимодействия в вертикальном направлении b_{2y} , Н·с/м	3100
Жесткость опорных пружин в горизонтальном направлении c_{1x} , Н/м.....	$5,89 \cdot 10^4$
Жесткость опорных пружин в вертикальном направлении c_{1y} , Н/м.....	$6,53 \cdot 10^4$

Коэффициент вязких сопротивлений опорных пружин в горизонтальном направлении b_{1x} , Н·с/м	3100
Коэффициент вязких сопротивлений опорных пружин в вертикальном направлении b_{1y} , Н·с/м	3100
Общая масса верхнего рабочего органа m_2 , кг.....	224
Общая масса нижнего рабочего органа m_1 , кг.....	247

3.2.3. Измерительные приборы и оборудование

Для установки частоты вращения дебалансов вибровозбудителей применялся частотный преобразователь Mitsubishi FR-E 500, при этом частота вращения дебалансов обоих вибровозбудителей назначалась одинаковой.

Для контроля параметров вибрации ТО (амплитудно-фазо-частотных характеристик) применялись датчики ускорений ДУ-5С индуктивного типа (поз. 18 на рис. 3.1) в комплекте с виброизмерительной аппаратурой ВИБ-6ТН. На корпусе каждого рабочего органа жестко крепилось два датчика для контроля вертикальной и горизонтальной компоненты вибрации в продольной плоскости рабочего органа (рис. 3.4). Установка датчиков осуществлялась с помощью угломера с нониусом, которым контролировался заданный угол направления измерительных осей датчиков.



Рис. 3.4. Размещение датчиков ускорений на ТО

Для оперативного контроля размаха колебаний ТО применялся ручной виброграф ВР-1, для контроля частоты колебаний ТО – стробоскопический тахометр СТ-5.

Для измерения параметров перемещения слоя материала рабочими поверхностями ТО на этапе их совместного движения (величины вертикальной силы нормальной реакции слоя материала на поверхность ТО N_{1y} и N_{2y} и моментов начала и окончания контакта слоя с каждым из них) на них заподлицо был установлен датчик контактного давления (поз. 15 на рис. 3.1). Аналогично для измерения силы нормальной реакции N_x перемещаемого в продольном направлении (по горизонтали) слоя материала на заслонку был установлен такой же датчик контактного давления (поз. 16 на рис. 3.1).

Датчик контактного давления (рис. 3.5) состоит из закрепленного на основании 1 датчика усилия пьезорезистивного типа 2 (Honeywell FSG15N1A), на который опирается воспринимающий контактное давление жесткий элемент 3, установленный с зазором в корпусе 4 через уплотнение 5.

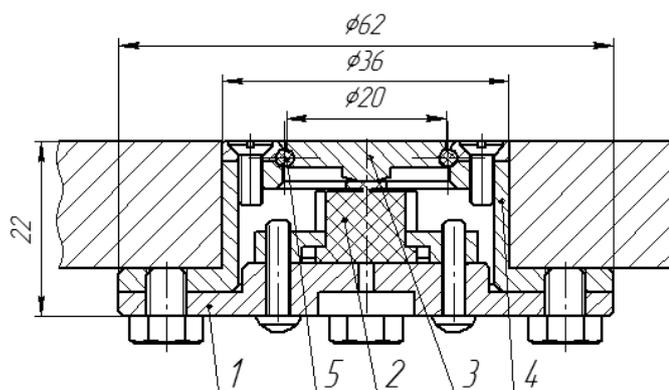


Рис. 3.5. Конструкция датчика контактного давления.

Для замера пульсации давления воздуха между поверхностями ТО и слоем песка на этапе его полета применялись датчики давления воздуха пьезорезистивного типа (Freescale semiconductor MPXV7007GC6U, поз. 17 на рис. 3.1). Для установки датчика в корпусе рабочего органа было высверлено отверстие диаметром 10,2 мм и нарезана резьба, в которую был вкручен штуцер (рис. 3.6).

Штуцер составлен из двух частей: стержня с резьбой (поз. 1) с каналом для прохождения воздуха и штуцера типа «елочка» (поз. 2), соединенных между собой гайкой (поз. 3). Штуцер соединялся с датчиком давления при помощи шланга (поз. 4) длиной 900 мм с внутренним диаметром 9 мм и наружным диаметром 11 мм.

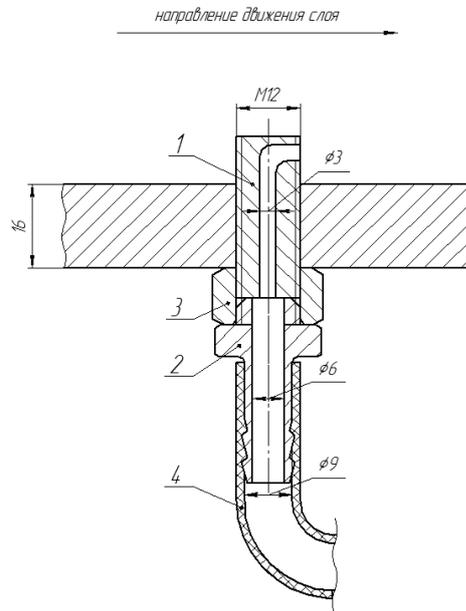


Рис. 3.6. Схема монтажа датчика давления

Показания датчиков в процессе проведения опытов регистрировались на ПК. Первичный сигнал с датчиков в виде напряжения (рис. 7) после фильтрации и преобразования на АЦП L-Card E14-440 в цифровую форму поступал на ПК, где осуществлялась его регистрация (частота регистрации 1 кГц) и запись в программе PowerGraph. Фрагменты записей осциллограмм контролируемых параметров в одном из опытов приведены на рис. 3.13.

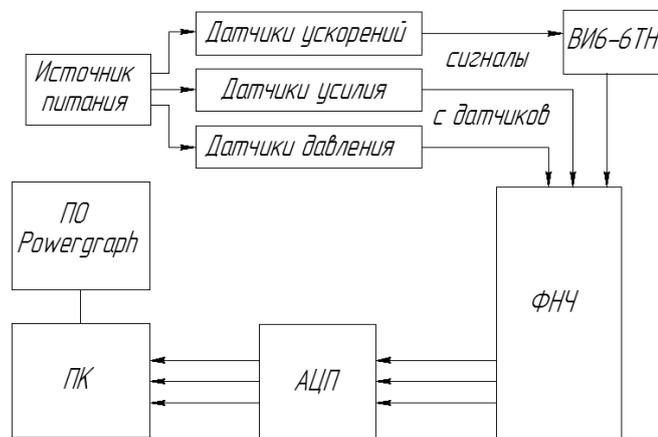


Рис. 3.7. Система преобразования и регистрации измерительных сигналов.

Определение скорости вибротранспортирования слоя песка ТО установки осуществлялось по измеряемым в каждом опыте значениям массовой производительности установки по формуле:

$$V_{\text{тр}} = \frac{Q}{S \cdot \gamma}, \text{ м/с}$$

(Q – производительность установки, кг/с; S – площадь поперечного сечения потока материала в рабочей камере (поз. 3 на рис. 3.1), м^2 ; $V_{\text{тр}}$ – скорость транспортирования слоя материала через площадь S , м/с; γ – объемная масса материала, кг/м^3). При этом измерение производительности установки в каждом опыте осуществлялось по формуле $Q=m/t$ путем измерения продолжительности t (в сек) наполнения массой пробы материала m (в кг) емкости вместимостью $0,125 \text{ м}^3$ (поз. 19 на рис. 3.1). Для измерения массы пробы m в каждом опыте применялись платформенные весы ВТ 8908-500, а продолжительность наполнения t массой пробы измерялась электронным секундомером Junsd JS-9005.

Для установки заслонкой заданного значения зазора h применялась металлическая линейка. Для этого при демонтированном разгрузочном патрубке установки (поз. 13 на рис. 3.1), находящейся в выключенном состоянии с пустой рабочей камерой, была выполнена градуировка заслонки (поз. 14 на рис 3.1) с шагом 5 мм путем установки линейкой заданной величины зазора между поверхностью нижнего рабочего органа и нижней кромкой заслонки и нанесения на заслонке градуировочной отметки, отсчитываемой относительно плоской кромки верхнего рабочего органа. Для установки значения зазора в каждом опыте соответствующая величине зазора отметка на заслонке совмещалась с кромкой рабочего органа, после чего заслонка плотно закреплялась прижимными болтами на верхнем рабочем органе.

Определение гранулометрического состава песка выполнялось путем рассева материала с помощью набора лабораторных сит с последующим взвешиванием остатков на электронных весах МК-6.2-а21.

Таблица 3.1. Перечень используемой аппаратуры и приборов

Наименование	Тип, марка, ГОСТ	Область использования, контроль, измерение
Сита лабораторные №016, №0315, №063, №125, №25	КСИ по ГОСТ Р 51568-99	Определение гранулометрического состава песка
Весы электронные	МК-6.2-а21	
Весы платформенные	ВТ 8908-500	Измерение производительности
Секундомер электронный	Junsd JS-9005	
Виброграф ручной	ВР-1	Оперативный контроль параметров вибрации и тарировка вибродатчиков
Тахометр стробоскопический	СТ-5	
Датчики ускорений	ДУ-5С	Измерение параметров вибрации
Виброизмерительная аппаратура	ВИ6-6ТН	
Датчики усилия (пьезорезистивные)	Honeywell FSG15N1A	Измерение силы нормальной реакции
Датчики давления	Freescale semiconductor MPXV7007GC6U	Измерение давления (разрежения) воздуха
Фильтр нижних частот		Фильтрация измерительного сигнала
АЦП	L-Card E14-440	Преобразование измерительного сигнала в цифровую форму
ПК	Intel T2370 1,73 ГГц	Регистрация, запись и обработка измерительного сигнала
ПО	Powergraph Professional 3.3	

Линейка	ГОСТ 427-75	
Набор гирь	София Кофарджиев Г-4-1111,10 по ГОСТ 7328-2001	Тарировка датчиков усилия
Тягонапоромер мембранный показывающий	ТНМП-100-М1 по ГОСТ 2405-88	Тарировка датчиков давления
Источник питания	Mastech NY-3003-2	Питание вибродатчиков постоянным напряжением
Частотный преобразователь	Mitsubishi FR-E 500	Установка частоты вращения дебалансов вибровозбудителей

3.2.4. Порядок проведения экспериментов и обработки результатов опытов

Эксперименты проводились в соответствии изложенной ниже методикой на крупном (с эквивалентным диаметром частиц $d = 0,49$ мм) и мелком ($d = 0,32$ мм) песках (см. табл. 3.4) при параметрах колебаний ТО с изменением частоты вращения дебалансов вибровозбудителей в пределах $880 \text{ кол/мин} < n < 1300 \text{ кол/мин}$, момента дебалансов вибровозбудителей в пределах $0,32 \text{ кг}\cdot\text{м} < M_{\text{деб}} < 0,39 \text{ кг}\cdot\text{м}$, а также положения заслонки 14 с изменением зазора между ее нижним торцом и поверхностью нижнего ТО в пределах $10 \text{ мм} < h < 20 \text{ мм}$.

Число повторений каждого опыта составлялось не менее трех. При проведении опытов все измерения проводились с использованием упомянутых выше датчиков и фиксировались в виде осциллограмм (см. рис. 3.13) для использования этих данных при проведении идентификации параметров модели (см. раздел 3.3).

Поскольку согласно выбранным средствам измерений (табл. 3.1) во всех опытах применялись датчики индуктивного и пьезорезистивного типов, в экспериментах для перевода электрических измерительных сигналов в единицы измеряемых величин была произведена тарировка датчиков ускорений, усилия и давления. При этом перед проведением каждой новой серии опытов также осуществлялся контроль показаний датчиков по тарировочной характеристике и при необходимости производилась корректировка их показаний.

Тарировка датчиков производилась следующим образом.

Тарировка датчиков ускорений производилась на виброплощадке с направленными колебаниями (рис. 3.8, *а*). При этом значения амплитуд и частот гармонической вибрации соответствовали диапазону параметров исследуемого процесса (см. раздел 3.2.1). В каждом тарировочном опыте амплитудное значение сигнала напряжения с датчика сопоставлялось с фактическим значением амплитуды ускорения колебаний виброплощадки, получаемым расчетом по формуле $\ddot{y} = A\omega^2$ (измерения амплитуды A и частоты вибрации ω осуществлялись вибрографом ВР-1 и строботахометром СТ-5), и наносилось на тарировочный график. По полученным тарировочным характеристикам определялась чувствительность датчиков виброускорений (т.е. тарировочные коэффициенты).

*а**б*



в

Рис 3.8. Тарировка датчиков на виброплощадке с вертикально направленными колебаниями: *а* – датчики ускорений; *б* – датчик усилия; *в* – общий вид аппаратуры для тарировки датчиков.

Статическая тарировка датчика усилия проводилась путем поочередной установки на силовоспринимающий элемент (поз. 3 на рис. 3.5) тарировочных эталонных гирь (см. табл. 3.1) массой от 50 до 750 г. Измерения проводились не менее четырех раз. Указанный диапазон значений тарировочных масс выбран на основе расчетных значений сжимающих усилий воздействия на слой ТО экспериментальной установки, колеблющимися с ускорением в диапазоне: $1,0g \leq A\omega^2 \leq 3,8g$.

Показания датчика усилия отображались на шкале осциллографа ПК (программное обеспечение Powergraph Professional 3.3) в виде отклика, т.е. отклонения от нулевой линии, характеризующего изменение напряжения выходного сигнала датчика от величины давления на силовоспринимающий элемент (расчетным в экспериментах принимается значение максимального отклонения).

На основании полученных данных прямых измерений (величин отклика датчика усилия в милливольтках (мВ)) проведена статистическая обработка результатов данных тарировки датчика, по результатам которой построен тарировочный график датчика. На рис. 3.9 в качестве примера показан

тарировочный график для одного из датчиков усилия, применяемых в эксперименте. На графике (рис. 3.9) точками нанесены среднеарифметические

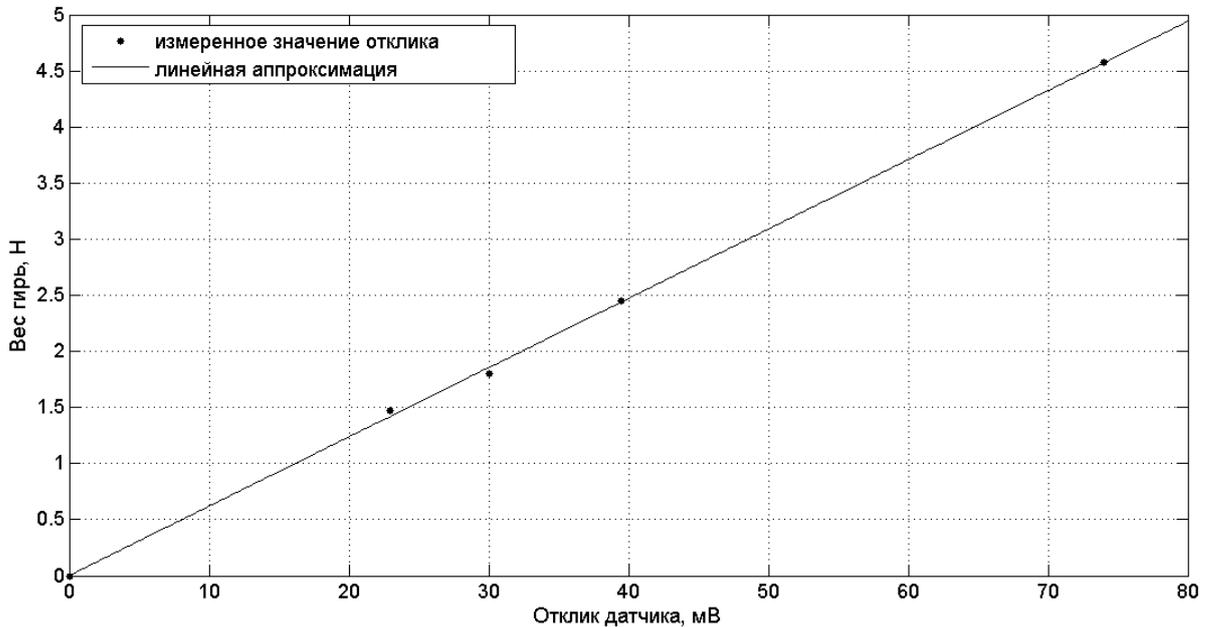


Рис. 3.9. График статической тарировки датчика усилия для измерения силы нормальной реакции слоя материала на нижний ТО

значения отклика датчика усилия (напряжения, мВ) в зависимости от веса гирь (Н), аппроксимированные линейной зависимостью.

Динамическая тарировка датчиков усилия производилась посредством испытания датчиков с тарировочной массой на виброплощадке. На силовоспринимающий элемент датчика усилия (поз. 3 на рис. 3.5) наклеивалась эталонная гирька массой $m_r=50$ г и датчик с гирькой устанавливался на виброплощадку. При этом силовоспринимающая поверхность датчика располагалась горизонтально в направлении колебаний виброплощадки (см. рис. 3.8, б). Параметры вибрации при динамической тарировке датчика назначались из диапазонов значений, приведенных в разделе 3.2.1.

При тарировке производилась запись показаний датчика усилий на осциллограмме с помощью ПК с одновременным контролем параметров колебаний виброплощадки при помощи оттарированных датчиков ускорений ДУ-5С, а также

вибрографа ВР-1 и строботахометра СТ-5. Каждый опыт повторялся не менее трех раз. Фрагмент тарировочной осциллограммы приведен на рис. 3.10.

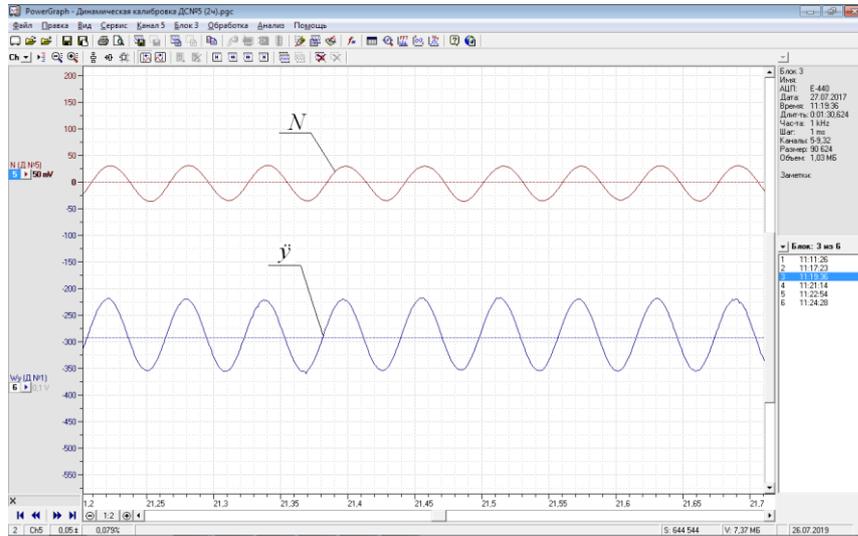


Рис. 3.10. Фрагмент осциллограмм ускорения колебаний виброплощадки y'' ($A=3,65$ мм, $n=1025$ кол/мин) и силы N датчика усилия с гирькой 50 г.

Из осциллограмм (рис. 3.10) видно, что показания датчика ускорений и датчика усилий синфазны и синхронны, что свидетельствует об отсутствии запаздывания сигнала датчика усилия N относительно ускорения воздействия виброплощадки на датчик усилия. Динамическая тарировка показала пригодность датчиков для измерений силы нормальной реакции во всем принятом при тарировке диапазоне амплитудных и частотных характеристик колебаний.

Тарировка датчиков давления воздуха, используемых для контроля пульсации воздушной среды в пространстве между слоем и ТО на этапе полета слоя относительно ТО, осуществлялась путем измерения статического давления и разрежения в пневмоцилиндре, в котором было смонтировано два штуцера для измерения давления (разрежения) в пространстве под поршнем. Один из штуцеров поршня с помощью резиновой трубки диаметром 3 мм был соединен с датчиком давления MPXV7007GC6U, а второй также с помощью резиновой трубки был соединен с тягонапоромером ТНМП-100-М1. В полости цилиндра под поршнем устанавливалось необходимое давление или разрежение (диапазон давления/разрежения $-7 < P < +7$ кПа) и производилось его измерение датчиком

давления и тягонапоромером. По полученным измерениям строился тарировочный график, на который по вертикальной оси наносились показания датчика MPXV7007GC6U в мВ, а по горизонтальной оси – показания тягонапоромера ТНМП-100-М1 в кПа. В результате по данному графику был определен тарировочный коэффициент датчика давления. Также была выполнена динамическая тарировка датчика давления в том же диапазоне параметров колебаний штока пневмоцилиндра, в котором проводилась тарировка датчика усилия. Динамическая тарировка показала пригодность датчиков давления для измерения пульсации воздушной среды во всем принятом при тарировке диапазоне амплитудных и частотных характеристик колебаний.

Результаты выполненной тарировки измерительных датчиков позволяют преобразовывать информацию, получаемую с датчиков в электрических сигналах (в милливольтгах), в единицы, присущие измерениям физических величин, таких как ускорение вибрации (м/с^2), сила нормальной реакции (Н) и давление (Па).

Для оценки надежности результатов повторных измерений при проведении экспериментов и выявления функциональных взаимосвязей в виде уравнений регрессии производится обработка измерений и их статистический анализ, в процессе которого находят и заносят в таблицу следующие характеристики:

а) среднее арифметическое \bar{y}_i параллельных опытов

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ji}}{m};$$

б) дисперсию каждого опыта s_i^2

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_i)^2}{m-1};$$

По F -критерию проверяют однородность дисперсий $F = \frac{s_{i \max}^2}{s_{i \min}^2}$.

Если табличное значение F меньше табличного $F_{\text{табл}}$, то дисперсии однородны, т.е. дают одинаковое рассеяние;

в) критерий Стьюдента $t = \frac{y_i - \bar{y}_i}{s_i}$ для каждого опыта. По нему проверяют

однородность опытов. Если рассчитанное значение t меньше табличного $t_{\text{табл}}$, то опыты однородны. В противном случае опыты неоднородны и число параллельных опытов нужно увеличить;

г) дисперсию воспроизводимости эксперимента

$$s_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_i)^2}{N(m-1)};$$

д) коэффициенты регрессии для линейной модели функции отклика:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N}; b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ji}}{N}; b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ui} x_{ji}}{N},$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – число опытов;

$j = 1, 2, \dots, k$ – число факторов;

x_{ji} – кодированное значение j -го фактора в i -м опыте;

\bar{y}_i – среднее значение функции отклика в каждом опыте.

После определения коэффициентов регрессии проверяют адекватность (пригодность) модели по F -критерию. В этом случае F -критерий определяют по формуле

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_{\{y\}}^2},$$

где $s_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2}{f}$ – дисперсия адекватности, $f = N - (k+1)$, $\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2$ –

остаточная сумма квадратов, \tilde{y}_i – значение функции отклика, вычисленное по

уравнению регрессии в условиях каждого опыта. Если рассчитанное значение F меньше табличного $F_{\text{табл}}$, то модель адекватна.

Проверяют значимость каждого коэффициента регрессии по t -критерию Стьюдента:

$$\Delta b_j = t_{\text{табл}} \cdot s_{\{b_j\}},$$

где $s_{\{b_j\}} = \sqrt{\frac{s_{\{y\}}^2}{N}}$, $t_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Стьюдента.

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При наличии незначимых коэффициентов они исключаются из уравнения регрессии и выполняется повторная проверка адекватности модели и значимости ее коэффициентов.

3.3. Проведение и результаты экспериментальных исследований

В соответствии с поставленной целью и задачами экспериментальных исследований (раздел 3.1) были выполнены натурные опыты на экспериментальной установке (раздел 3.2.2) по принятой методике проведения экспериментальных исследований закономерностей процесса перемещения обрабатываемого слоя песка ТО (раздел 3.2), включая идентификацию параметров упруго-вязко-инерционной модели слоя сыпучей среды, а также определение скорости транспортирования слоя сыпучей среды.

При идентификации параметров упруго-вязко-инерционной модели слоя сыпучей среды осуществлялось сравнение основных параметров движения ТО, перемещения слоя песка и усилий, возникающих в зоне контакта слоя при его деформации с ТО, найденных расчетным и экспериментальным методами. Как приведено в работах [29, 33], достаточным условием подобия модели реальному слою транспортируемой сыпучей среды является совпадение расчетных и экспериментально полученных данных продолжительностей этапа полета слоя (или этапа движения слоя в контакте с ТО) за полный период колебаний ТО,

характеризуемого моментами начала и окончания контактов слоя с ТО, а также силы реакции, возникающей между слоем и ТО. Кроме этого, интегральным признаком, определяющим подобие вибрационного перемещения модели и реального слоя материала, является средняя скорость его вибротранспортирования. При удовлетворительном совпадении (в пределах 20% [33, 98]) теоретически и экспериментально найденных параметров движения и сил взаимодействия инерционных элементов системы идентификацию можно считать успешной.

Основываясь на сказанном, на первом этапе был осуществлен подбор численных значений коэффициентов c_{3y} , b_{3y} , c_{3y}^* , b_{3y}^* по осциллограммам, отображающим динамику перемещения слоя по оси oy . Поиск численных значений коэффициентов c_{3x} , b_{3x} на втором этапе производился путем сопоставления рассчитанных значений скорости транспортирования слоя с ее средними значениями, полученными в каждом опыте при проведении экспериментов.

Для оценки достоверности характеристик параметров колебаний установки, полученных расчетом, с целью возможности их дальнейшего использования при моделировании предварительно было проведено сопоставление параметров реальных (измеренных) колебаний ТО при их работе на холостом ходу (без материала) и параметров колебаний модели ТО, учитывающих расчетные (проектные) коэффициенты упругих и вязких характеристик опорных пружин c_{1x} , b_{1x} , c_{1y} , b_{1y} , пружин взаимодействия c_{2x} , b_{2x} , c_{2y} , b_{2y} (рис. 2.4) и масс ТО m_1 и m_2 (см. раздел 3.2.2).

Далее проводились опыты при работе установки под нагрузкой для определения параметров перемещения мелкого ($d_{\text{эКВ}} = 0,32$ мм) и крупного песка ($d_{\text{эКВ}} = 0,49$ мм) транспортирующими органами с целью изучения его деформационных свойств. При этом выполнялись измерения параметров перемещения слоя песка колеблющимися ТО (моментов начала и окончания контактов слоя с ТО, силы нормальной реакции слоя песка на поверхности ТО, а также пульсации воздушной среды в пространстве между поверхностями ТО и транспортируемым слоем (см. рис. 3.13)). Эксперименты по идентификации

параметров модели песка проводились при колебаниях ТО в диапазоне ранее принятых ограничений ($1,2 \leq \Gamma \leq 3,8$) и параметров режимов работы ТО $0,32 \leq M_{\text{деб}} \leq 0,388$ кг·м, $800 \leq n \leq 1300$ об/мин (см. раздел 3.2.1). Значения факторов, устанавливаемых в каждом из опытов упомянутых экспериментов, приведены в табл 3.2.

При проведении экспериментов (как без материала, так и с материалом) использовались методы измерений и аппаратура для определения параметров перемещения слоя материала ТО, указанные в разделе 3.2.3. Все измерения производились при установившихся режимах процесса виброперемещения слоя. Результаты измерений параметров движения ТО на

Таблица 3.2. Условия проведения опытов для идентификации механо-реологической модели слоя песка.

№ опыта	n , об/мин	$M_{\text{деб}}$, кг·м	$d_{\text{экв}}$, мм	h , мм
1	892	0,388	0,32	10
2	992	0,388	0,32	20
3	1000	0,32	0,32	10
4	1000	0,388	0,32	20
5	1000	0,32	0,32	20
6	1038	0,49	0,32	10
7	1064	0,32	0,32	20
8	1300	0,32	0,32	20
9	1300	0,388	0,32	10
10	886	0,32	0,49	20
11	886	0,36	0,49	15
12	989	0,388	0,49	20
13	1000	0,32	0,49	20
14	1000	0,388	0,49	10
15	1040	0,36	0,49	15
16	1096	0,388	0,49	15
17	1145	0,32	0,49	20
18	1242	0,388	0,49	20
19	1282	0,388	0,49	20
20	1300	0,32	0,49	10
21	1300	0,388	0,49	20

холостом ходу (без материала) и под нагрузкой (со слоем материала) были получены в виде осциллограмм для различных параметров колебаний ТО в диапазоне значений, указанном в разделе 3.2.1.

На рис. 3.11 и 3.12 в качестве примера показаны осциллограммы параметров колебаний ТО без нагрузки (на холостом ходу) для двух режимов их колебаний, отличающихся частотой колебаний и величиной моментов дебалансов вибровозбудителей, полученные экспериментальным путем (сплошные кривые) с применением датчиков ускорений ДУ-5С. На этих же рисунках приведены осциллограммы, полученные расчетным путем (пунктирные кривые) с использованием данных конструктивных параметров 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 $M_{деб}$ (см. раздел 3.2.2)).

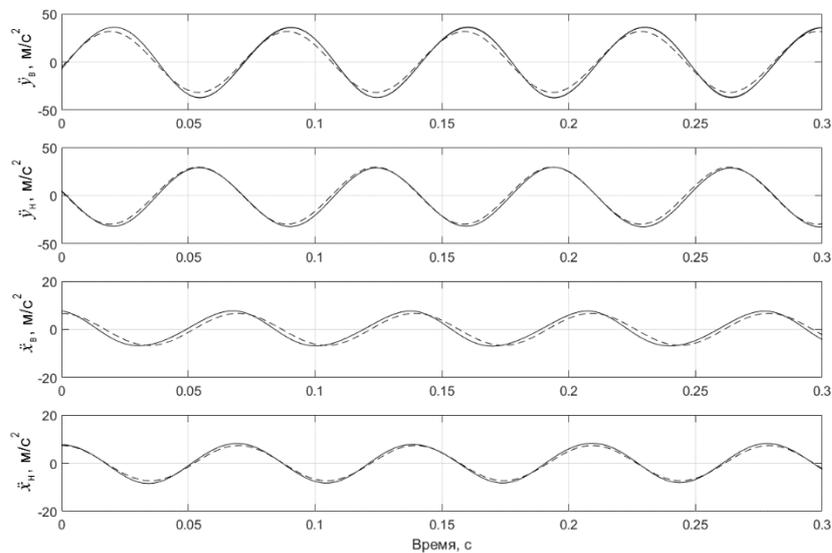


Рис. 3.11. Пример осциллограммы параметров колебаний ТО без нагрузки ($n=860$ кол/мин, $M_{деб}=0,2$ кг·м): $\ddot{y}_н$ и $\ddot{y}_в$ – вертикальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО, $\ddot{x}_н$ и $\ddot{x}_в$ – горизонтальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО.

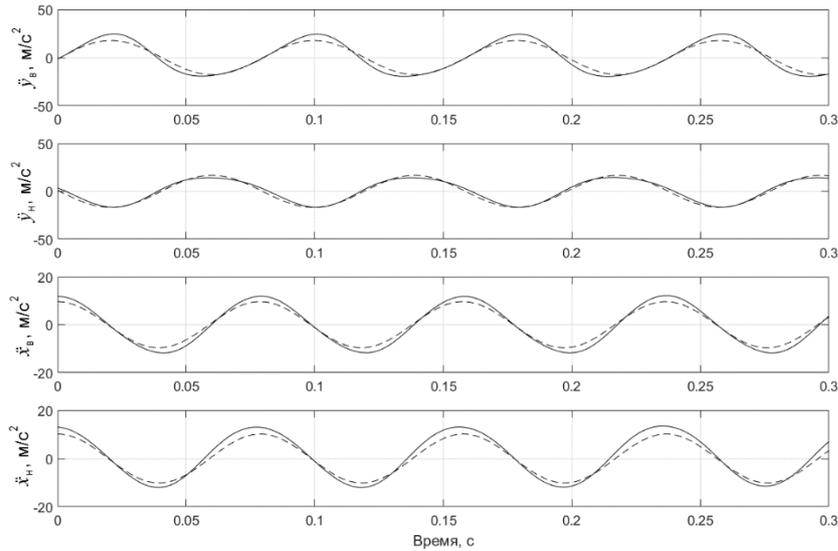


Рис. 3.12. Пример осциллограммы параметров колебаний ТО без нагрузки ($n=761$ кол/мин, $M_{\text{деб}}=0,36$ кг·м): $\ddot{y}_н$ и $\ddot{y}_в$ – вертикальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО, $\ddot{x}_н$ и $\ddot{x}_в$ – горизонтальные ускорения колебаний нижнего и верхнего ТО.

Сравнение осциллограмм колебаний ТО на холостом ходу, полученных экспериментальным и расчетным методами во всем диапазоне исследуемых параметров колебаний ТО, указывает на относительно близкое совпадение расчетного и экспериментального законов движения, которое оценивалось среднеквадратическим отклонением (до 15%), что позволяет считать модель механической системы установки адекватной.

На рис. 3.13 представлены измеренные в мВ сигналы, отображающие параметры перемещения материала ТО при работе установки под нагрузкой. На осциллограммах рис. 3.13 зафиксированы следующие параметры: вынуждающие силы $F_н=M_{\text{деб}}\omega^2\sin(\omega t)$ и $F_в=-M_{\text{деб}}\omega^2\sin(\omega t)$, действующие на нижний и верхний ТО по вертикали, вертикальные $\ddot{y}_н^э$ и $\ddot{y}_в^э$ и горизонтальные $\ddot{x}_н^э$ и $\ddot{x}_в^э$ ускорения нижнего и верхнего ТО, силы нормальной реакции $N_н^э$ и $N_в^э$ слоя песка на нижний и верхний ТО в вертикальном направлении и сила нормальной реакции $N_x^э$ слоя материала на заслонку в горизонтальном направлении (по оси x), давление

(разрежение) P_H^{ϑ} и $P_{\varepsilon}^{\vartheta}$ воздуха в прослойке между поверхностями нижнего и верхнего ТО и слоем песка.

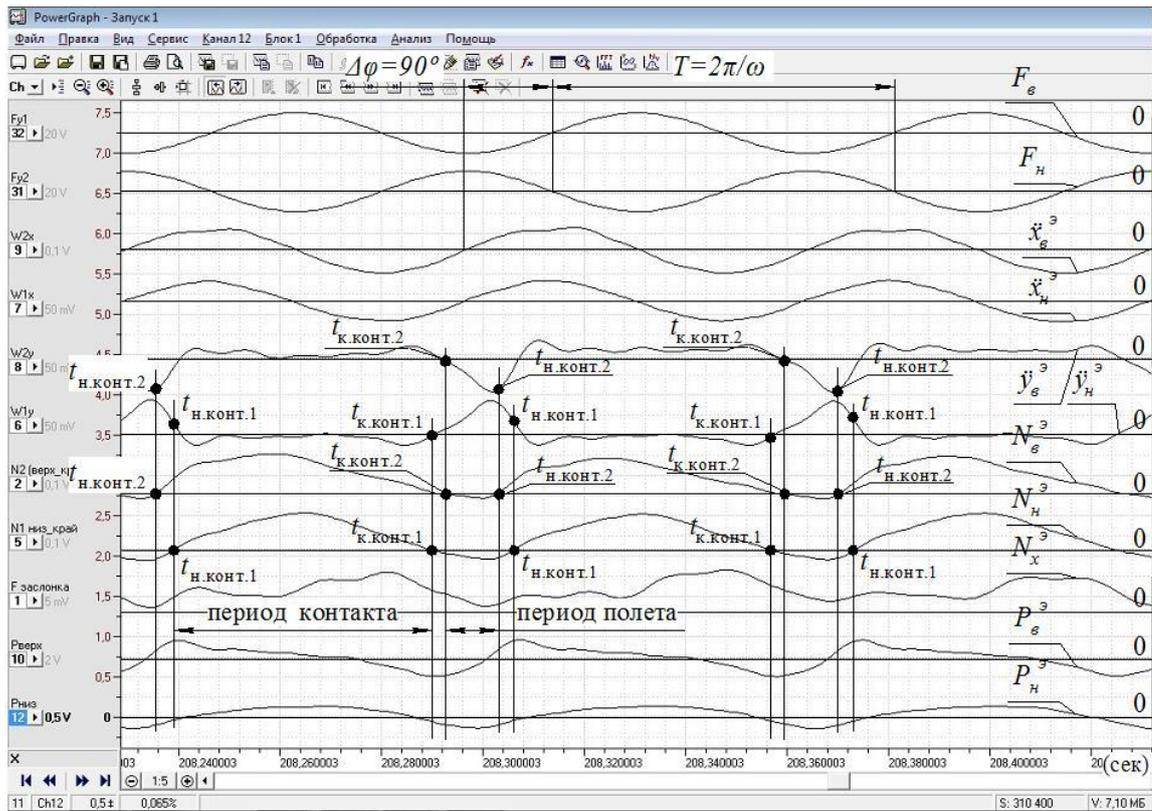


Рис. 3.13. Пример осциллограммы параметров перемещения слоя песка ТО: $n=892$ об/мин, $M_{деб}=0,388$ кг·м, $d_{эКВ}=0,32$ мм, $h=10$ мм.

На всех осциллограммах прямая горизонтальная линия означает нулевое значение исследуемых параметров. На диаграммах изменения сил нормальной реакции N_H^{ϑ} и $N_{\varepsilon}^{\vartheta}$ отмечены моменты начала контакта слоя с нижним ТО ($t_{н.конт.1}$) и начала контакта слоя с верхним ТО ($t_{н.конт.2}$). Также на пересечении кривой силы нормальной реакции с нулевой линией показаны моменты окончания контакта слоя с нижним ТО ($t_{к.конт.1}$) и окончания контакта слоя с верхним ТО ($t_{к.конт.2}$). Отметим, что проявившиеся незначительные отличия параметров перемещения слоя нижним и верхним ТО (разные значения величин $t_{н.конт.1}$ и $t_{н.конт.2}$ и величин $t_{к.конт.1}$ и $t_{к.конт.2}$) свидетельствуют о наличии различий сил сопротивлений, возникающих на различных этапах движения слоя (его совместном движении с ТО и полете). На отмеченные отличия моментов взаимодействия слоя с нижним и верхним ТО кроме

сил инерции слоя и ТО также оказывают существенное влияние параметры давления (разрежения) воздуха соответственно под слоем $P_H^{\text{э}}$ и над слоем $P_B^{\text{э}}$, экспериментальные измерения которых показаны на рис. 3.13 в виде осциллограмм. Кривые обеих осциллограмм, расположенных над нулевой линией, ограничивают области значений избыточного давления воздуха, а кривые, расположенные под нулевой линией – области отрицательного давления (разрежения) воздуха. Приведенная осциллограмма параметров перемещения слоя песка ТО характерна и для других полученных осциллограмм опытов, приведенных в табл. 3.2.

Результаты приведенных экспериментов показывают достаточную информативность экспериментальных данных, полученных в виде осциллограмм, для проведения последующей идентификации модели при деформации двумя ТО слоя различного по крупности песка как в поперечном, так и в продольном направлениях. Кроме того, высокая степень сходимости результатов оценки параметров колебаний ТО на холостом ходу, найденных расчетным и экспериментальными методами (рис. 3.11 и 3.12), обеспечивает возможность применения полученных расчетных характеристик конструктивных параметров экспериментальной установки для проведения дальнейшей идентификации модели слоя материала и определения скорости его транспортирования.

3.3.1. Идентификация параметров модели слоя песка при его поперечной деформации вибротранспортирующими органами

На основе полученных экспериментальных осциллограмм (аналогичных примеру на рис. 3.13) перемещения слоя материала ТО выполнялась идентификация расчетных параметров модели слоя песка при его поперечной деформации ТО с применением разработанной программы для ЭВМ (раздел 2.2). При идентификации подбор значений упруго-вязких коэффициентов модели слоя производился итерационным методом таким образом, чтобы обеспечить

совпадение найденных экспериментальным и расчетным методами моментов начала и окончания контактов модели слоя песка с ТО и величин сил нормальной реакции N_H и N_B в пределах погрешности 20%, что как указано в работах [6, 13, 33, 98] является достаточным для использования подобных моделей в инженерной практике проектирования вибротранспортирующих машин. Отметим, что при определении упомянутых коэффициентов одновременно осуществлялся подбор параметра e (см. рис. 2.7, раздел 2.2), являющегося одним из важнейших параметров модели, характеризующих процесс перемещения слоя ТО. Подбор параметра e осуществлялся итерационным методом в каждой серии опытов, приведенных в табл. 3.2.

Результаты идентификации параметров модели слоя с применением одинаковых значений упругих и вязких коэффициентов модели слоя песка показали значительное расхождение (более 20 %) расчетных и экспериментальных значений продолжительности этапа полета слоя (и соответственно этапа движения слоя в контакте с ТО), характеризуемого моментами начала и окончания контактов слоя с ТО за полный период колебаний ТО. Кроме того, также не удалось с погрешностью до 20% смоделировать процесс перемещения слоя с отличающимися моментами начала и окончания контактов слоя с нижним и верхним ТО, как это было обнаружено на экспериментальных осциллограммах, где моменты начала и окончания контактов слоя с нижним и верхним ТО оказались различными (см. точки $t_{н.конт.1}$, $t_{н.конт.2}$ и $t_{к.конт.1}$, $t_{к.конт.2}$ на рис. 3.13).

С учетом отмеченного отличия параметров перемещения модели и реального песка нижним и верхним ТО с целью получения более точных результатов идентификации упомянутая программа «Виброоттирка» (раздел 2.2) была скорректирована и получила название «Виброоттирка 1». В программу «Виброоттирка 1» вместо ранее принятых в программе «Виброоттирка» одинаковых значений коэффициентов $\frac{1}{2}c_{3y}^*$ и $\frac{1}{2}b_{3y}^*$ под и над слоем (приведенных на рисунках 2.3, 2.5, 2.8, 2.9) были введены различные значения коэффициентов

упругих и вязких сопротивлений $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$ под слоем и $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$ над слоем в направлении оси ou , возникающих в прослойке воздушной среды между материалом и ТО при ее деформации. Вычисления параметров перемещения слоя материала ТО, выполненные по скорректированной программе «Виброоттирка 1», позволили для каждого вида песка (крупного и мелкого) подобрать средние значения упругих и вязких коэффициентов модели слоя $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$, а также c_{3y} , b_{3y} (см. табл. 3.3), обеспечивающих ее подобие применяемым пескам с погрешностью менее 20 % совпадения основных экспериментальных и расчетных параметров перемещения слоя ТО. При этом при идентификации модели слоя мелкого песка при режимах колебаний ТО с частотой в диапазоне от 900 до 1100 кол/мин и в диапазоне от 1100 до 1300 кол/мин были получены различные значения упругих коэффициентов $c_{1_3y}^*$ и $c_{2_3y}^*$. Полученные средние значения упругих и вязких коэффициентов модели соответственно для крупного и мелкого песков, используемых в экспериментах, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Средние расчетные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению слоя песка по оси ou .

Крупность частиц песка $d_{\text{экв}}$, 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

Примеры экспериментальных и расчетных параметров перемещения слоя песка ТО, рассчитанных с применением подобранных упруго-вязких коэффициентов по программе «Виброоттирка 1», показаны на осциллограммах, представленных на рис. 3.14 – 3.19. На этих осциллограммах сплошными линиями показаны экспериментальные, а пунктирными – теоретические параметры (вертикальные ускорения нижнего \ddot{y}_H и верхнего \ddot{y}_B ТО, силы нормальной реакции слоя на нижний N_H и верхний N_B ТО), полученные для опытов из табл. 3.2 при различных значениях крупности песка, частоты вращения и момента дебалансов вибровозбудителей и устанавливаемого заслонкой зазора. Также на осциллограммах отмечены основные параметры перемещения слоя ТО (расчетные моменты (точки) начала $t_{н.конт.}$ и окончания $t_{к.конт.}$ контактов слоя песка с ТО и максимальные величины расчетных (N_H^T и N_B^T) и теоретических ($N_H^Э$ и $N_B^Э$) сил нормальной реакции, действующих со стороны слоя песка на поверхности нижнего и верхнего ТО).

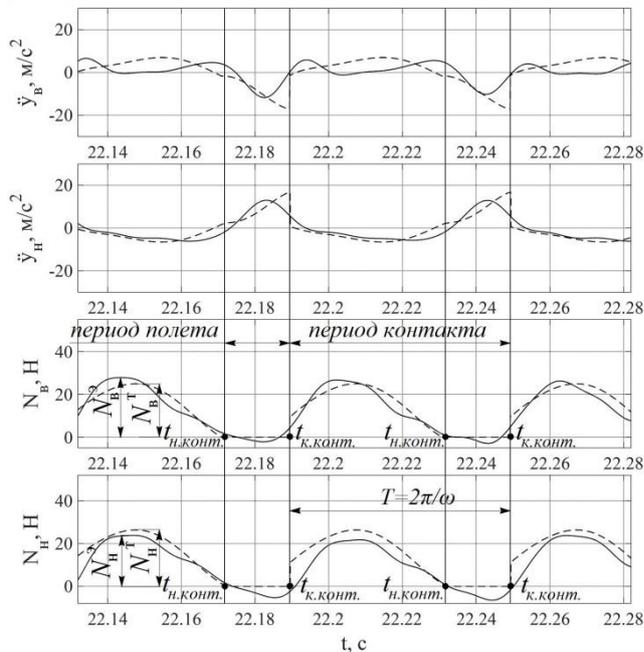


Рис. 3.14. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №14 из

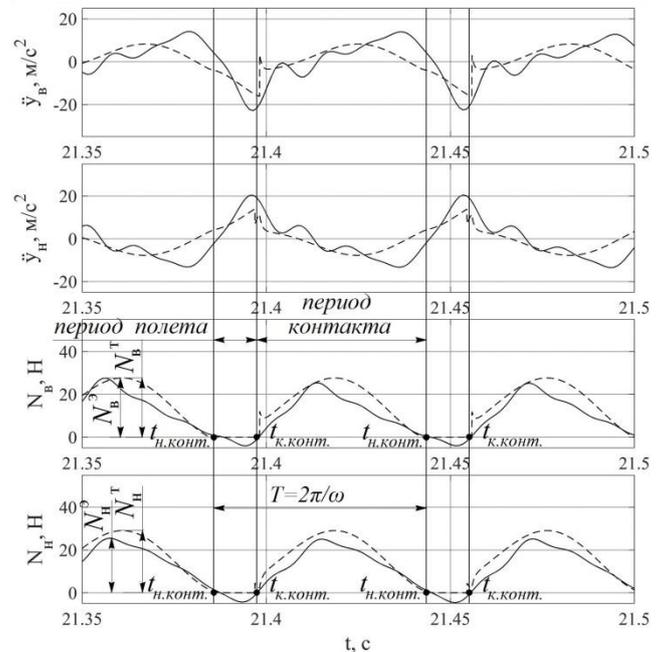


Рис. 3.15. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №15 из

табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,49$ мм, $n=1000$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,388$ кг·м, $h=10$ мм.

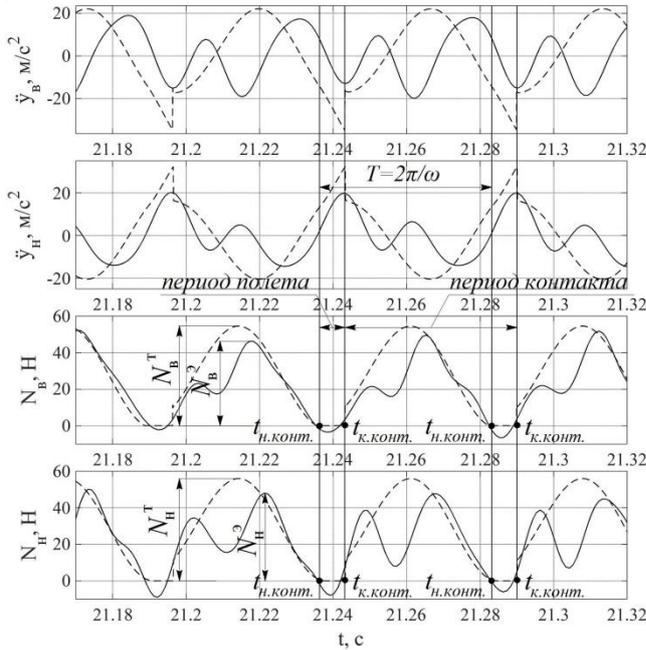


Рис. 3.16. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №19 из табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,49$ мм, $n=1282$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,388$ кг·м, $h=20$ мм.

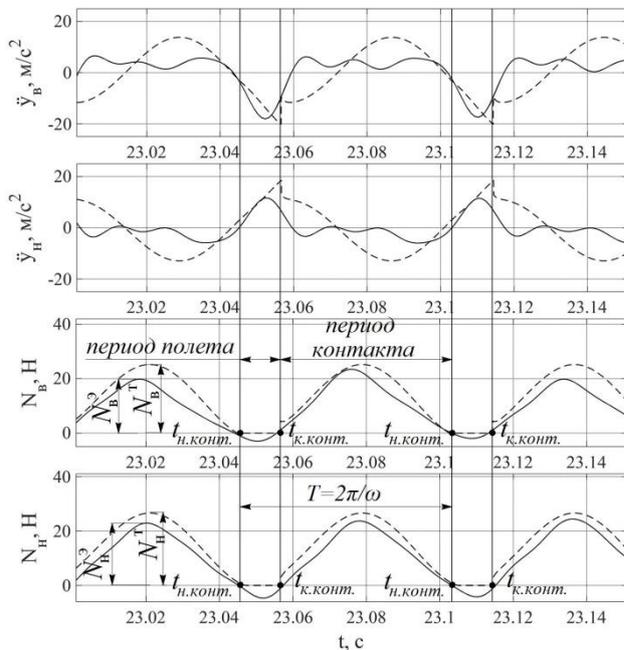


Рис. 3.18. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №6 из табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,32$ мм, $n=1038$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,32$ кг·м, $h=10$ мм.

табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,49$ мм, $n=1040$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,36$ кг·м, $h=15$ мм.

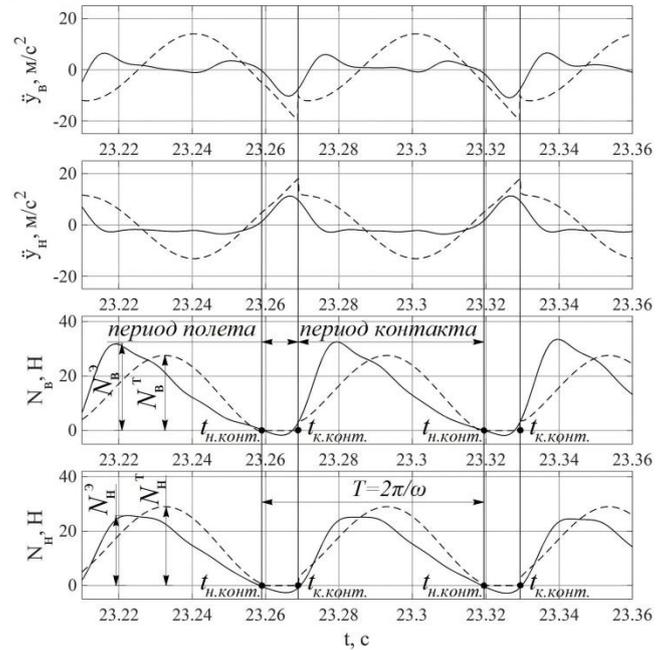


Рис. 3.17. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №2 из табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,32$ мм, $n=992$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,388$ кг·м, $h=20$ мм.

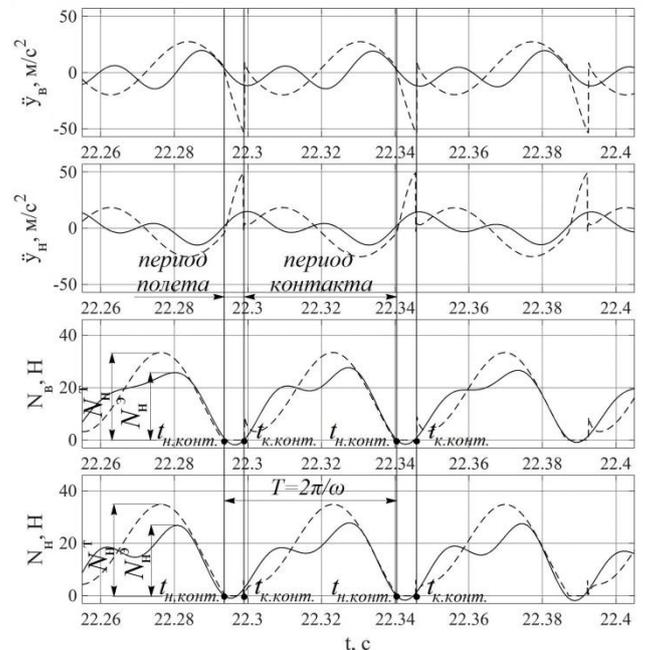


Рис. 3.19. Пример экспериментальной и расчетной осциллограмм параметров перемещения слоя песка ТО (опыт №8 из табл. 3.2): $d_{\text{экв}}=0,32$ мм, $n=1300$ об/мин,
 $M_{\text{деб}}=0,32$ кг·м, $h=20$ мм.

Данные параметры использовались при идентификации модели слоя, т.е. при нахождении (подборе) упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению ее центра масс как на этапе совместного движения слоя с ТО (c_{3y} и b_{3y}), так и на этапе их движения без контакта друг с другом ($c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$).

Важными параметрами, характеризующими принятую модель слоя материала в виде упруго-вязко-инерционного тела, являются [26]: параметр $p = \sqrt{c/m}$, являющийся собственной частотой свободных колебаний тела, которая тем больше, чем выше жесткость тела c и меньше его масса m , и параметр $n = b/2m$, являющийся коэффициентом демпфирования, характеризующим затухание свободных колебаний тела, который тем больше, чем выше коэффициент вязкости тела b и меньше его масса m . В соответствии с приведенными в табл. 3.3 коэффициентами упругого и вязкого сопротивлений слоя песка высотой 100 мм на этапе его совместного движения, полученных для реальных крупных и мелких песков, собственные частоты упругих элементов модели составляют $p_{3y}=338 \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $p_{3y}=500 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка, а коэффициенты демпфирования вязких элементов модели составляют $n_{3y}=571 \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $n_{3y}=786 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка. На этапе полета собственные частоты упругих элементов модели составляют $p_{1_3y}^*=134 (548) \text{ с}^{-1}$ и $p_{2_3y}^*=166 (535) \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $p_{1_3y}^*=189 \text{ с}^{-1}$ и $p_{2_3y}^*=207 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка, а коэффициенты демпфирования вязких элементов модели составляют $n_{1_3y}^*=2,5 \text{ с}^{-1}$ и $n_{2_3y}^*=5,4 \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $n_{1_3y}^*=1,8 \text{ с}^{-1}$ и $n_{2_3y}^*=2,7 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка. Отметим, что указанные для каждого этапа движения слоя значения собственных частот упругих элементов модели и коэффициентов демпфирования вязких элементов модели соответствуют слою песка массой 140 кг с высотой слоя 100 мм и насыпной плотностью 1400 кг/м^3 , а при ином значении высоты слоя материала, и следовательно, его массы значения этих характеристик будут другими.

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных, характеризующих величину силы нормальной реакции как на нижнем N_H^T , так и на верхнем N_B^T рабочем органе на этапе движения слоя в контакте с ТО и продолжительность этапа полета с момента окончания контакта слоя с ТО ($t_{к.конт.}$) до момента начала контакта слоя с ТО ($t_{н.конт.}$), подтверждает достоверность найденных средних значений коэффициентов упругих и вязких коэффициентов модели слоя материала и в целом адекватность предложенной модели. Данные значения упругих и вязких коэффициентов модели определены с учетом подбора соответствующей величины e для каждого режима колебаний ТО.

Параметр e (рис. 2.7) отображает разность двух величин – высоты свободно лежащего слоя материала и расстояния между двумя ТО в состоянии равновесия. По существу параметр e характеризует степень заполнения материалом пространства между двумя ТО и соответственно влияет на характер перемещения слоя материала ТО. При подборе величины e учитывалось, что при достаточно больших положительных значениях e (за положительные значения e принято (см. раздел 2.2) состояние, когда высота слоя больше расстояния между двумя ТО) поджатие слоя материала ТО будет настолько велико, что отрыва ТО от нижней и верхней границ слоя не будет происходить (т.е. наступит безотрывный режим без этапа полета), и, наоборот при большом отрицательном значении e может не происходить сжатия слоя ввиду недостаточности амплитудного значения сближения ТО друг к другу.

Из сказанного следует, что при идентификации модели слоя материала реальной сыпучей среде наряду с упомянутыми выше упругими и вязкими коэффициентами параметр e является важным параметром модели, влияющим на момент ее отрыва от ТО, а следовательно, и на длительность этапа ее полета.

Таким образом, для каждого режима перемещения слоя материала ТО существует сочетание идентифицируемых параметров математической модели c_{3y} , b_{3y} , $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$ и e , позволяющее применять ее для расчета

основных параметров такого перемещения и обеспечивающее совпадение расчетных данных с экспериментальными в пределах принятой погрешности.

В процессе идентификации параметров модели слоя материала при их подборе итерационным методом для каждого вида песка (мелкого и крупного) были подобраны одинаковые средние значения упругих и вязких коэффициентов модели слоя (см. табл. 3.3) для всех (см. табл. 3.2) режимов колебаний ТО, при этом величины параметра e были получены различными для различных режимов колебаний ТО. Полученные значения использовались при определении зависимостей величины параметра e от различных режимов колебаний ТО, которые представлены в виде графиков (рис. 3.20 – 3.23), на которых по оси абсцисс отложены амплитудные значения вынуждающей силы вибровозбудителей $F = M_{\text{деб}}\omega^2$ (величины F вычислялись в соответствии с режимами колебаний ТО из табл. 3.2), а по оси ординат – значения параметра e .

Графики построены для каждого вида песка ($d_{\text{эКВ}}=0,32$ и $0,49$ мм) при различных значениях устанавливаемого заслонкой зазора ($h=10$ и 20 мм). Точками на каждом графике показаны величины параметра e , полученные в результате идентификации, а сплошными линиями – их аппроксимации по методу наименьших квадратов: линейные зависимости для крупного песка и квадратичные зависимости для мелкого песка. Полученные зависимости приведены ниже в формульном виде:

$$\text{- при } d_{\text{эКВ}}=0,32 \text{ мм и } h=10 \text{ мм: } e(F) = -18,66 + 0,01017F - 9 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \text{ (мм); (3.1)}$$

$$\text{- при } d_{\text{эКВ}}=0,32 \text{ мм и } h=20 \text{ мм: } e(F) = -10,51 + 0,00678F - 6 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \text{ (мм); (3.2)}$$

$$\text{- при } d_{\text{эКВ}}=0,49 \text{ мм и } h=10 \text{ мм: } e(F) = -7,58 + 0,00294F \text{ (мм); (3.3)}$$

$$\text{- при } d_{\text{эКВ}}=0,49 \text{ мм и } h=20 \text{ мм: } e(F) = -6,62 + 0,00271F, \text{ (мм). (3.4)}$$

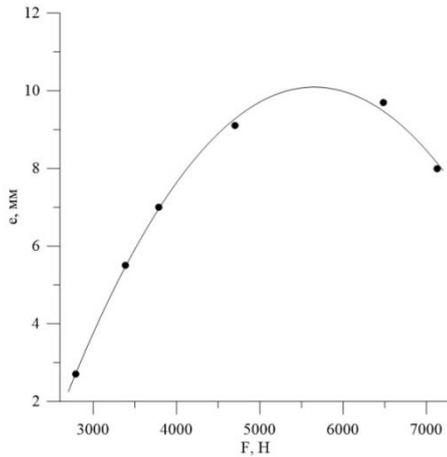


Рис. 3.20. Зависимость параметра e от амплитудного значения вынуждающей силы F при $d_{\text{экв}}=0,32$ мм, $h=10$ мм ($R^2=0,997$).

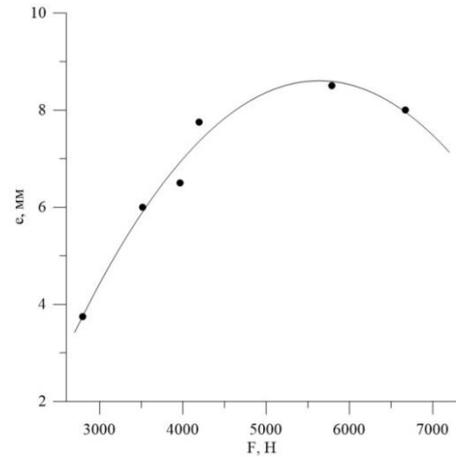


Рис. 3.21. Зависимость параметра e от амплитудного значения вынуждающей силы F при $d_{\text{экв}}=0,32$ мм, $h=20$ мм ($R^2=0,976$).

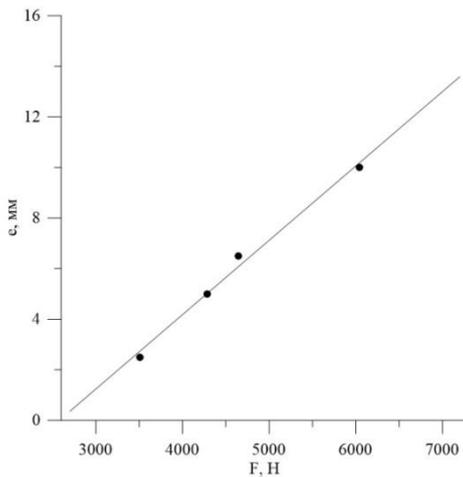


Рис. 3.22. Зависимость параметра e от амплитудного значения вынуждающей силы F при $d_{\text{экв}}=0,49$ мм, $h=10$ мм ($R^2=0,990$).

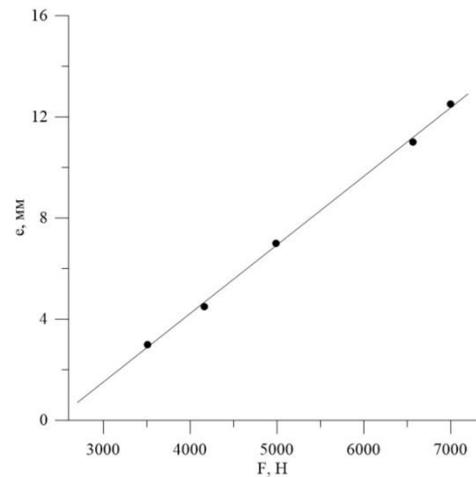


Рис. 3.23. Зависимость параметра e от амплитудного значения вынуждающей силы F при $d_{\text{экв}}=0,49$ мм, $h=20$ мм ($R^2=0,999$).

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

Полученные в результате идентификации параметров модели слоя материала зависимости (3.1) – (3.4) позволяют определять значения e во всем принятом в эксперименте диапазоне параметров перемещения слоя песка ТО.

Основываясь на приведенном, можно заключить, что найденные параметры модели (c_{3y} , b_{3y} , $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$ и e) с достаточной точностью (до 20%)

обеспечивают моделирование реального процесса перемещения слоя песка ГО при его деформировании в поперечном направлении.

3.3.2. Определение скорости транспортирования слоя песка и идентификация параметров модели слоя при его продольной деформации вибротранспортирующими органами

Определение скорости транспортирования слоя песка осуществлялось экспериментальным методом с применением регрессионного анализа для установления закономерностей продольного перемещения слоя песка относительно двух горизонтально расположенных вибротранспортирующих органов. Эксперименты проводились на экспериментальной установке (рис. 3.1) по методике проведения экспериментальных исследований (раздел 3.2).

В экспериментах по изучению скорости вибротранспортирования слоя песка $V_{тр}$ двумя ГО машины для обработки поверхности его зерен исследовалось влияние на функцию отклика (скорость транспортирования) четырех независимых факторов:

$d_{эkv}$ – эквивалентный диаметр частиц песка;

h – зазор, устанавливаемый заслонкой аппарата;

$M_{деб}$ – статический момент дебалансов вибровозбудителей;

n – частота вращения дебалансов вибровозбудителей.

Физико-механические свойства применяемых песков приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Физико-механические свойства природного песка

Вид материала	Частные остатки по весу, %							Насыпная масса, т/м ³
	Размер отверстий контрольных сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	дно	
Песок мелкий	0	9,45	34,5	22,81	28,32	4,92	1,41	
Песок крупный	0	19,69	54,61	22,54	3,04	0,12	1,43	

Согласно принятой области, которой принадлежат исследуемые параметры (раздел 3.2.1), были приняты следующие уровни факторов и интервалы их варьирования (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Уровни факторов и интервалы их варьирования

Наименование факторов	Обозначение	Уровни			Интервал варьирования	Размерность
		-1	0	+1		
$d_{\text{эКВ}}$	X_1	0,32	0,405	0,49	0,085	мм
h	X_2	10	15	20	5	мм
$M_{\text{деб}}$	X_3	0,32	0,355	0,39	0,035	кг·м
n	X_4	1000	1150	1300	150	об/мин

С целью минимизации количества опытов использовался метод рационального планирования многофакторных экспериментов, основанный на математической статистике и теории вероятностей [2]. По причине того, что интервалы варьирования факторов были выбраны достаточно узкими и на основе анализа предыдущих работ [100, 114] была принята гипотеза о линейной модели для функции отклика с последующей оценкой адекватности модели. При этом выполнялась 1/2 реплики от полного факторного эксперимента.

Эксперименты проводились согласно матрице планирования [2], представленной в табл. 3.6. Каждый опыт проводился три раза. Последовательность опытов была рандомизирована. Обработка результатов эксперимента осуществлялась по методике, изложенной в разделе 3.2.4. Результаты опытов и оценки коэффициентов регрессии представлены в табл. 3.6.

В результате предварительной оценки вида регрессионного уравнения, с учетом исключения из него незначимых факторов было получено уравнение регрессии для расчета скорости транспортирования слоя песка в следующем виде:

$$y = 0,0525 + 0,0092x_1 + 0,0192x_2 + 0,0035x_3 + 0,0108x_4 + 0,0091x_1x_2 + 0,0027x_1x_3. \quad (3.5)$$

Таблица 3.6. Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Случайный порядок реализации опытов	Кодовые и натуральные значения факторов									Функция отклика	
		x_0	x_1	X_1	x_2	X_2	x_3	X_3	x_4	X_4	Измеренное значение скорости транспортирования U_{ji}	Среднее арифметическое значение \bar{U}_j
				мм		мм		кг·м		об/мин	м/с	м/с
1	9 1 21	+	+	0,49	+	20	-	0,32	-	1000	0,0708 0,0759 0,0727	0,0731
2	11 6 18	+	-	0,32	-	10	-	0,32	-	1000	0,0204 0,0219 0,0217	0,0213
3	16 12 19	+	+	0,49	-	10	-	0,32	+	1300	0,0370 0,0385 0,0378	0,0378
4	2 10 24	+	-	0,32	+	20	-	0,32	+	1300	0,0662 0,0613 0,0637	0,0637
5	23 13 17	+	+	0,49	+	20	+	0,39	+	1300	0,1079 0,1049 0,1069	0,1066
6	20 15 8	+	-	0,32	-	10	+	0,39	+	1300	0,0459 0,0457 0,0436	0,0451
7	22 7 4	+	+	0,49	-	10	+	0,39	-	1000	0,0285 0,0302 0,0283	0,0290
8	5 3 14	+	-	0,32	+	20	+	0,39	-	1000	0,0441 0,0439 0,0415	0,0432
b_i	$b_0=0,0525;$ $b_1=0,0092;$ $b_2=0,0192;$ $b_3=0,0035;$ $b_4=0,0108;$ $b_{12}=0,0091;$									$b_{13}= 0,0027.$		

Результаты расчета остаточной суммы квадратов при проверке адекватности линейной модели по уравнению (3.5) приведены в табл. 3.7.

Статистический анализ экспериментальных данных показал, что дисперсии однородны (т.к. критерий Фишера $F=6,54 \cdot 10^{-6}/0,56 \cdot 10^{-6}=11,67 < F_{\text{табл}}=19,2$ при числе степеней свободы $f_1=2$ и $f_2=2$), опыты также однородны (т.к. критерий Стьюдента $t=1,151 < t_{\text{табл}}=4,3$ при числе степеней свободы $f_1=2$). Уравнение регрессии (3.5) адекватно (т.к. критерий Фишера для функции отклика $F=5,24 \cdot 10^{-$

$\sqrt{2,58 \cdot 10^{-6}} = 0,020 < F_{\text{табл}} = 4,49$ при числе степеней свободы $f_1=16$ и $f_2=1$), все коэффициенты уравнения значимы (поскольку абсолютные величины всех коэффициентов b_i больше доверительного интервала $\Delta b_i = t_{\text{табл}} \cdot 5,68 \cdot 10^{-4} = 0,0012$, где $t_{\text{табл}} = 2,12$ – критерий Стьюдента при числе степеней свободы $f_1=16$). При проведении статистической обработки результатов эксперимента табличные значения критериев Фишера и Стьюдента были приняты при пятипроцентном уровне значимости.

Таблица 3.7. Расчет дисперсий опытов и остаточной суммы квадратов

№ опы-та	y_i	s_i^2	s_i	$s_{\{y\}}^2$	$s_{\text{ад}}^2$	$S\{b_j\}$	t	\bar{y}_i	$\Delta y_i = y_i - \bar{y}_i$	Δy_i^2
1	0,0731	$6,54 \cdot 10^{-6}$	0,0026	2,58 $\cdot 10^{-6}$	5,24 $\cdot 10^{-7}$	5,68 $\cdot 10^{-4}$	1,074	0,0729	0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
2	0,0213	$0,60 \cdot 10^{-6}$	0,0008				1,148	0,0216	-0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
3	0,0378	$0,56 \cdot 10^{-6}$	0,0007				1,019	0,0380	-0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
4	0,0637	$6,02 \cdot 10^{-6}$	0,0025				1,008	0,0634	0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
5	0,1066	$2,21 \cdot 10^{-6}$	0,0015				1,090	0,1068	-0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
6	0,0451	$1,64 \cdot 10^{-6}$	0,0013				1,151	0,0448	0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
7	0,0290	$1,05 \cdot 10^{-6}$	0,0010				1,151	0,0287	0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$
8	0,0432	$2,06 \cdot 10^{-6}$	0,0014				1,149	0,0434	-0,0003	$6,55 \cdot 10^{-8}$

Анализ уравнения (3.5) показывает, что на увеличение скорости транспортирования слоя песка положительно влияет увеличение значений всех факторов в принятой области их исследования.

При переходе от кодированных значений аргументов к натуральным, принимая за параметр оптимизации скорость вибротранспортирования, запишем уравнение (3.5) в виде

$$\begin{aligned}
 V_{\text{тр}} = 10^{-3} \cdot (52,5 + 107,6(d_{\text{эКВ}} - 0,405) + 3,8(h - 15) + 99,6(M_{\text{деб}} - 0,355) + \\
 + 0,072(n - 1150) + 21,3(d_{\text{эКВ}} - 0,405)(h - 15) + \\
 + 901,9(d_{\text{эКВ}} - 0,405)(M_{\text{деб}} - 0,355)), \text{ м/с.} \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

Уравнение (3.6) позволяет определять скорость транспортирования слоя песка колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях ТО машины для обработки поверхности его зерен методом

виброобъемного деформирования в области значений факторов, принятых при выполнении экспериментов.

С целью проверки адекватности модели слоя материала в целом для описания процесса перемещения слоя песка ТО (включая деформирование слоя в продольном направлении) требуется провести идентификацию параметров модели слоя материала c_{3x} и b_{3x} , отображающих ее деформационные свойства по оси ox (рис. 2.4). Критерием правильности подбора величин указанных коэффициентов является совпадение средней скорости транспортирования модели слоя материала с ее значениями, полученными для слоя реального песка на различных режимах колебаний ТО при проведении экспериментов. Отметим также, что совпадение значений скорости транспортирования, полученных экспериментальным и расчетным путем с применением модели слоя, учитывающей коэффициенты сопротивлений перемещению слоя как в продольном, так и в поперечном направлениях на всех этапах его перемещения, интегрально подтверждает адекватность принятой модели слоя материала [33].

Процедура идентификации коэффициентов c_{3x} и b_{3x} состояла в том, что перебирались значения коэффициентов c_{3x} и b_{3x} и для каждого их сочетания рассчитывалась с применением разработанной программы для ЭВМ «Виброоттирка 1» скорость транспортирования модели слоя до тех пор, пока не были найдены такие значения коэффициентов, при которых достигалось с заданной точностью совпадение величин теоретической скорости транспортирования модели и экспериментально найденной скорости транспортирования слоя песка. При этом экспериментальные значения скорости транспортирования соответствовали условиям проведения опытов, приведенным в таблице 3.6, и также при этом в расчетах использовались значения параметров деформирования модели слоя по оси oy (c_{3y} , b_{3y} , $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$ и e), найденные на предыдущем этапе идентификации (раздел 3.3.1).

В результате проведения идентификации параметров модели слоя были получены одинаковые средние значения коэффициентов сопротивлений

перемещению слоя материала c_{3x} и b_{3x} для каждого вида песка (крупного и мелкого), которые приведены в табл. 3.8. В таблице также указана погрешность расчета скорости вибротранспортирования слоя материала, выполненного по программе «Виброотгирка 1» с применением найденных коэффициентов c_{3x} и b_{3x} , по отношению к значениям скорости транспортирования слоя песка для опытов из табл. 3.6.

Таблица 3.8. Средние расчетные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений перемещению слоя песка по оси ox .

Крупность частиц песка $d_{экр}, \text{мм}$	$c_{3x}, 10^6 \text{ Н/м}$	$b_{3x}, 10^4 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$	№ опыта по табл. 3.6	Экспериментальные значения $V_{тр}, \text{м/с}$	Расчетные значения $V_{тр}, \text{м/с}$	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

В соответствии с приведенными в табл. 3.8 коэффициентами упругого и вязкого сопротивлений слоя песка высотой 100 мм в горизонтальном направлении, полученных для песков с различной крупностью частиц, собственные частоты упругих элементов модели составляют $p_{3x}=136 \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $p_{3x}=150 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка, а коэффициенты демпфирования вязких элементов модели составляют $n_{3x}=35 \text{ с}^{-1}$ для мелкого и $n_{3x}=47 \text{ с}^{-1}$ для крупного песка.

В целом по разделу 3.3.2 можно заключить, что удовлетворительная сходимость (с погрешностью до 20%) значений скоростей, полученных расчетным и экспериментальным методами, свидетельствует о пригодности найденных

значений коэффициентов сопротивлений c_{3x} и b_{3x} , отображающих деформационные свойства слоя материала по оси ox , для расчета средней скорости вибротранспортирования слоя различного по крупности песка по разработанной программе «Виброоттирка 1» с использованием предложенной упруго-вязкой модели слоя материала.

Приведенные в настоящем разделе результаты выполненной идентификации модели слоя материала на основе полученных значений параметров модели слоя песка (коэффициентов c_{3y} , b_{3y} , $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$, $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$, e , c_{3x} и b_{3x}) подтверждают адекватность принятой модели слоя в целом для отображения реальных процессов перемещения слоя песка ТО, колеблющимися антифазно в поперечном и синфазно в продольном направлениях, при транспортировании слоя на всех характерных этапах его перемещения в направлении осей oy и ox . Также существенным практическим результатом является полученное уравнение регрессии (3.6) скорости транспортирования слоя обрабатываемого материала для выполнения упрощенным способом инженерных расчетов транспортной производительности установок для оттирки и механоактивации с двумя ТО, совершающими колебания с упомянутыми соотношениями сдвигов фаз.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика проведения и обработки методами математической статистики и теории вероятностей результатов экспериментов по исследованию параметров перемещения слоя песка вибрационными транспортирующими органами (ТО), определению его скорости транспортирования и идентификации параметров механо-реологической модели слоя сыпучего материала реальному крупному и мелкому песку. Эксперименты проводились на экспериментальной установке в диапазоне колебаний ее ТО на холостом ходу с динамическим параметром режима их работы в пределах $1,2 \leq \Gamma \leq 3,8$, обеспечивающих

надежность конструкции промышленных вибрационных установок и устойчивые режимы работы двухмассовых виброконвейеров для сыпучих материалов.

2. В соответствии с методикой проведения экспериментов разработана экспериментальная установка, измерительная аппаратура, включая конструкцию датчика контактного давления для измерения силовых параметров перемещения слоя песка ТО, и система для преобразования измерительных сигналов и их регистрации на ЭВМ в виде осциллограмм параметров колебаний, пульсаций давления воздуха и сил нормальной реакции слоя на ТО в режиме реального времени.

3. Экспериментально подтверждена адекватность модели механической системы конструкции экспериментальной установки при ее работе на холостом ходу (без материала) и обосновано применение рассчитанных значений характеристик ее конструктивных элементов для последующего выполнения идентификации параметров перемещения обрабатываемого песка ТО.

4. В результате проведения предварительных опытов на экспериментальной установке с двумя отличающимися по крупностью песками определены области параметров, обеспечивающих устойчивые режимы сжимающего воздействия колеблющимися ТО на слой материала. На этой основе выбраны диапазоны изменения факторов исследуемого процесса перемещения обрабатываемой сыпучей среды вибротранспортирующими органами.

5. В результате проведения и обработки экспериментальных данных определены параметры перемещения слоя песка ТО (моменты начала и окончания контакта слоя с ТО, величины сил нормальной реакции слоя на ТО и средняя скорость вибротранспортирования материала) для отличающихся по крупности песков в принятом диапазоне режимов колебаний ТО и положений заслонки, регулирующей транспортную производительность установки. Анализ объема полученной выборки числа проведенных экспериментов показал их достаточность для выполнения последующей идентификации параметров модели слоя в принятой области исследования.

6. На основе полученных данных с применением разработанной программы для ЭВМ «Виброоттирка 1» выполнена идентификация параметров механо-реологической модели слоя материала реальному песку при ее поперечной деформации ТО и определены численные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений вертикальному перемещению слоя для двух видов песков, позволившие подтвердить адекватность предложенной математической модели слоя удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных.

7. Определены функциональные зависимости степени заполнения материалом пространства между двумя ТО, отображаемой в математической модели параметром e , от режимов колебаний ТО, эквивалентного диаметра зерен песка и положений заслонки, регулирующей транспортную производительность установки, для выполнения расчета параметров перемещения слоя песка ТО, колеблющимися с амплитудой и частотой, достаточными для осуществления режимов объемного деформирования слоя и транспортирования его с отрывом от ТО.

8. Получено уравнение регрессии для определения средней скорости вибротранспортирования слоя песка виброконвейером с двумя ТО, совершающими антифазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях, которое показывает, что в исследуемом диапазоне принятых факторов на увеличение скорости транспортирования положительно влияет увеличение частоты колебаний ТО, увеличение момента дебалансов вибропривода, увеличение крупности частиц обрабатываемого материала и увеличение зазора под заслонкой, регулирующей скорость транспортирования материала. Данное уравнение позволяет простым методом выполнять инженерные расчеты транспортной производительности установок для виброобогащения поверхности мелких заполнителей бетонов в области значений параметров, удовлетворяющим наиболее практически важным режимам работы двухмассовых виброконвейеров.

9. На основе полученных экспериментальных данных путем численного моделирования выполнена идентификация параметров механо-реологической

модели слоя материала реальной сыпучей среде при ее продольной деформации ТО и определены численные значения упругих и вязких коэффициентов сопротивлений горизонтальному перемещению слоя для двух видов песков. Подтверждена в целом адекватность предложенной модели слоя материала при двухкомпонентной деформации ТО и достоверность найденных параметров модели для песков различной крупности и при различных параметрах вибрационного воздействия для расчета основных характеристик перемещения слоя материала ТО, что обосновано выполнением интегрального критерия подобия модели реальному песку при совпадении теоретических и экспериментальных значений средней скорости вибротранспортирования.

10. Результаты проведенных экспериментов и выполненной идентификации параметров модели трехмассовой механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО», включая подобранные значения параметров механо-реологической модели слоя материала при его деформации ТО в продольном и поперечном направлениях и принятые расчетом значения упруго-инерционных параметров экспериментальной установки (упругих элементов взаимодействия, опорных пружин и ТО), подтверждают 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 позволяет рекомендовать разработанную модель для расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибрационными ТО оттирочно-очистительной установки.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты внедрения рекомендаций по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки

Результатом настоящих диссертационных исследований на первом этапе явилось создание программы «Виброоттирка» для расчета и анализа на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двухмассовым виброконвейером с двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях транспортирующими органами (ТО) [87]. На основе применения упомянутой программы при участии автора в ЗАО НИПКБ «Стройтехника» была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис. 4.1) для проведения исследований по определению рациональных режимов обогащения строительного песка методами оттирки и механоактивации. При проектировании осуществлялся расчет и выбор основных параметров установки на основе проведения вычислительного эксперимента путем многовариантного анализа с применением программы «Виброоттирка» параметров перемещения ТО обрабатываемого слоя песка, в результате которого были получены регрессионные зависимости для определения средней скорости транспортирования слоя песка, сил нормальной реакции, действующих со стороны слоя на ТО установки на этапе сжатия слоя, продолжительности действия этапов сжатия слоя и его полета и величины наибольшего сжатия слоя ТО [96]. Также полученные уравнения регрессии применены при расчете элементов (упругих элементов взаимодействия двух ТО, опорных пружин установки, вибраторов, размеров рабочего пространства между ТО и др.) и проектировании конструкции экспериментальной установки в целом. Программа «Виброоттирка» также использовалась при создании методики экспериментов для исследований процесса перемещения песка ТО, для отладки режимов работы установки на холостом ходу и под нагрузкой, а также в экспериментах по идентификации параметров модели виброперемещения слоя

песка двумя ТО установки и разработки уточненного алгоритма программы «Виброоттирка 1» (см. рис. 4.А в приложении А). Программа «Виброоттирка 1» для расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами применена для нахождения эффективных режимов обработки песков виброорганами экспериментальной установки, времени обработки песка и производительности процесса.



Рис. 4.1. Экспериментальная установка для оттирки и механоактивации песка.

Данная работа выполнялась в соответствии с договором о творческом сотрудничестве от 12.03.2015 по теме «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон» (приложение В), и разделом 2.1 договора о творческом сотрудничестве от 20.11.2017 по теме «Разработка и внедрение инновационной строительной техники и оборудования для предприятий стройиндустрии» между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» (приложение В).

Работа, направленная на совершенствование технологии производства сухих строительных смесей (ССС) ЗАО «Метробетон», проводилась с целью оценки

улучшения качества и снижения себестоимости приготовления ССС за счет их приготовления из полученных методами оттирки и механоактивации обогащенных песков. С этой целью были проведены эксперименты на двух видах песка: мелкого песка крупностью до 0,63 мм Лужского месторождения и крупного песка фракцией до 2,5 мм «Воронцовского» карьера ООО «ЦБИ». При этом были определены рациональные режимы работы установки, примененные для изготовления двух партий отличающихся по крупности песков (до 0,63 мм и до 2,5 мм), с использованием которых на производстве сухих строительных смесей (ПССС) ЗАО «Метробетон» были произведены две партии сухих цементно-песчаных смесей марки М200. Проведенные лабораторией ЗАО «Метробетон» сравнительные испытания по ГОСТ 31357-2007 и ГОСТ 310.4-81 этих партий смесей, приготовленных по одинаковым рецептам с применением обогащенных и необогащенных крупных и мелких песков одинакового фракционного состава, показали, что более высокие прочностные показатели получены на испытуемых образцах затвердевших растворов, приготовленных из смесей с использованием двух видов обогащенного песка, которые имели пределы прочности на изгиб и на сжатие на 10% выше по сравнению с образцами затвердевших растворов, приготовленных на соответствующих видах необогащенного песка (см. Акт от 26.12.2017 в приложении В).

Проведенные испытания на данном этапе практической апробации результатов работы показали высокую эффективность применения инновационной оттирко-очистительной установки для обогащения оттиркой и механоактивацией поверхности песков виброобъемным методом их обработки для применения таких песков в технологии производства сухих строительных смесей. При этом подтверждена эффективность применения программы «Виброоттирка 1» для определения рациональных режимов работы упомянутой установки при обработке отличающихся по своим физико-механическим свойствам песков. По результатам выполненной работы в ЗАО «Метробетон» запланировано внедрение промышленной обогатительной установки данного типа производительностью 20

т/ч в технологию производства сухих строительных смесей (см. Акт от 26.12.2017 в приложении В).

По результатам положительной апробации методики и программы «Виброоттирка 1» для расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами (приложение А) разработаны рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров промышленных оттирочно-очистительных установок (приложение Б), которые были внедрены в ЗАО НИПКБ «Стройтехника» для проектирования оттирочно-очистительного оборудования (см. Акт от 23.03.2018 в приложении В).

4.2. Оценка экономической эффективности применения инновационной оттирочно-очистительной установки для обогащения методом оттирки природных песков

Оценка технико-экономических показателей эффективности внедрения новой установки для обогащения очисткой поверхности зерен мелких заполнителей бетонов (песков) в технологию предприятий дорожно-строительной и нерудной промышленности, осуществляющих переработку и обогащение каменных материалов, выполнялась путем сравнения показателей эффективности новой установки с основными технико-экономическими показателями серийно выпускаемой ООО «Сибтехлит» горизонтальной оттирочно-очистительной машины производительностью 10 т/ч [35], предназначенной для оттирки зерен природного песка от загрязняющих пленок и других примесей и принятой в качестве базовой техники (БТ).

Применение в качестве новой техники (НТ) инновационной установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка [101] по сравнению с другими существующими в настоящее время оттирочно-очистительными машинами позволяет существенно интенсифицировать процесс оттирки и механоактивации поверхности частиц, что сокращает время обработки материала и соответственно позволяет (см. раздел 1.1) значительно снизить металлоемкость, капитальные

вложения и энергопотребление новой установки по сравнению с другими известными оттирочно-очистительными установками такой же производительности, что обуславливает перспективность ее применения в производствах строительной и других отраслей промышленности, занимающихся переработкой природных сыпучих сред.

Подробный расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения новой установки в строительное производство приведен в приложении Г. Расчет выполнен в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [99], а также действующими требованиями «Руководства по обогащению отсеков дробления и разнопрочных каменных материалов. М.: СОЮЗДОРНИИ, 1992 г.» [49], предназначенного для предприятий дорожно-строительной и нерудной промышленности, занимающихся переработкой и обогащением каменных материалов.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой установки достигается за счет снижения капитальных затрат на ее приобретение и снижения себестоимости производства обогащенного строительного песка и составляет 1,079 млн. руб. со сроком окупаемости 1,2 года.

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами оттирочно-очистительной установки, составленная в виде алгоритма программы «Виброоттирка 1», а также рекомендации по расчету и выбору основных конструктивных и технологических параметров упомянутой установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка, которые в частности были применены при разработке и создании экспериментальной установки и использовании ее для получения экспериментальной партии обогащенных песков, показавших высокую эффективность их применения при производстве сухих строительных смесей.

2. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новой установки для обогащения методом оттирки поверхности зерен песка достигается за счет снижения капитальных вложений и снижения себестоимости производства продукции по сравнению с технико-экономическими показателями базового варианта (горизонтальной оттирко-очистительной машины конструкции ООО «Сибтехлит» производительностью до 10 т/ч [35], предназначенной для оттирки зерен природного песка от загрязняющих пленок и других примесей) и составляет 1,079 млн. руб. со сроком окупаемости 1,2 года.

3. Результаты внедрения рекомендаций по расчету и выбору основных параметров установки для обогащения очисткой поверхности зерен песка, включающих разработанную методику расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибрационными ТО двухмассового виброконвейера и программу «Виброоттирка 1», показали практическую значимость выполненных исследований для создания высокоэффективного оборудования для оттирки и механоактивации строительного песка.

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 №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 ϵ , 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 оттирочно-очистительной установки.

6. Разработана методика расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки. Данная методика и рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-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 оттирочно-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.

Список литературы

1. Агапьев Б.Д. и др. Обработка экспериментальных данных: учеб. пособие./ Агапьев Б.Д., Белов В.Н., Кесаманлы Ф.П., Козловский В.В., Марков С.И. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 83 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановская. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
3. Арсентьев В.А., Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Шулояков А.Д. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ. 2004.
4. Арсентьев В. А. и др. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов // Арсентьев В. А., Блехман И. И., Блехман Л. И., Вайсберг Л. А., Иванов К. С., Кривцов А. М. Обогащение руд. 2010. №1. – с. 30-35.
5. Архипенко В. П. Динамика перемещения мелкодисперсных грузов на виброконвейерах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1977. 18 с.
6. Архипенко, В. П. Механико-технологические основы создания вибрационных машин для бункерного выпуска и контейнерной обработки [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен.степ. докт. техн. наук (05.15.16) / Архипенко, Валентин Павлович, НАН Украины, Ин-т геотехн. механики. – Днепропетровск, 1995. - 35 с.
7. Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.
8. Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учебное пособие для студентов вузов. М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.
9. Баскаков А.П., Берг Б.В., Рыжков А.Ф., Филиповский Н.Ф. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое. — М.: Metallurgy, 1978. – 248 с.

10. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. – 313 с.
11. Бауман В. А. и др. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: справочник/ ред.: В. А. Бауман, И. И. Быховский, Б. Г. Гольдштейн. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.
12. Белоглазов И. И., Степанян А С., Феоктистов А. Ю., Юсупов Г. А. Моделирование процесса дезинтеграции в щековой дробилке со сложным качанием щек // Обогащение руд. 2018. №. 2. – с. 3-8.
13. Бельков, Н. И. Исследование закономерности и особенностей вибрационного перемещения тонкоизмельченных сыпучих материалов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. И. Бельков. — Л.: ЛГИ им. Плеханова, 1974. — 22 с.
14. Блехман И. И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.
15. Блехман И.И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. – 412 с.
16. Богданов О. С., Олевский В. А. и др. Справочник по обогащению руд: подготовительные процессы. – М.: Недра, 1982. – 367 с.
17. Брагина В.И., Брагин В.И. Технология обогащения полезных ископаемых: Конспект лекций. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 380 с.
18. Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники /М., Машиностроение, 1968. – 362 с.
19. Вайсберг Л. А., Демидов И. В., Иванов К. С. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования //Обогащение руд. 2015. №. 4. С. 21-31.
20. Вайсберг Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов /М.: Недра, 1986. – 144 с.
21. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Туркин В.Я. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ. 2004.

22. Величко Б. П., Тацки Л. Н., Кузьмичев Н. В. Автоматизация работы измельчительно-сепарационной установки /Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – №. 2. – С. 104-110.

23. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.

24. Вибропресс ВИПР1-2м для тротуарной плитки и блоков// <http://www.ibeton.ru>: Завод «Строй-Бетон» (сайт производителя оборудования для производства строительных материалов). 2019. 09 июн. URL: <http://www.ibeton.ru/vibro-m.php> (дата обращения: 10.06.2019).

25. Голиков В.М., Репин С.В., Сапожников А.И. Развитие технологии измельчения строительных материалов, Строительные дорожные машины. – 2016. - №4, с. 27-31.

26. Гончаревич, И. Ф. Виброреология в горном деле [Текст] / И. Ф. Гончаревич. — М.: Наука, 1974. — 144 с.

27. Гончаревич И. Ф. Вибротехника в горном производстве. М.: – Недра, 1992. – 319 с.

28. Гончаревич И. Ф., Гудушаури Э. Г. Защита от вибрационных воздействий человека-оператора и повышение эффективности технологического оборудования методами вибрационной техники защита от вибрационных воздействий человека-оператора и повышение эффективности технологического оборудования методами вибрационной техники / Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – №. 3. – с. 69-81.

29. Гончаревич, И. Ф. Динамика вибрационного транспортирования [Текст] / И. Ф. Гончаревич. — М.: Наука, 1973. — 244 с.

30. Гончаревич И. Ф. К вопросу о разработке феноменологии нанотехнологий производства строительных материалов (Использование импульсных режимов для повышения эффективности нанотехнологий) / Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2009. – №. 1. – с. 35-44.

31. Гончаревич И. Ф. и др. Некоторые подходы оптимального компьютерного проектирования машинно-технологических комплексов с использованием феноменологических моделей перерабатываемых дисперсных сред / И.Ф. Гончаревич, Э.Г. Гудушаури, В.С. Рыков, Н.И. Никольский. – Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – №. 2. – С. 81-91.

32. Гончаревич И. Ф. О повышении производительности и рентабельности промышленных нанотехнологий / Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2009. – №. 3. – с. 36-49.

33. Гончаревич, И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии [Текст] / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. — М.: Наука, 1981. — 320 с.

34. Гордон Г. М., Пейсахов И. Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1977.

35. Горизонтальная оттирочная машина // <http://www.sibtehlit.ru>: ООО «Сибтехлит» (сайт поставщика оборудования для литейных производств). URL: <http://sibtehlit.ru/oborudovanie-regeneraczii-otrabotannyix-smesej-xts-szentrobezhnaya-ottirochnaya-mashina> (дата обращения: 29.09.2019).

36. ГОСТ 2138-91. Пески формовочные. Общие технические условия/Введ. 1993-01-01. М.: Стандартиформ, 2005. – 12 с.

37. ГОСТ 22551-77. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия /Введ. 1979-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 16 с.

38. ГОСТ 22552.1-77. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Метод определения диоксида кремния. /Введ. 1979-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 4 с.

39. ГОСТ 29234.1-91. Пески формовочные. Методы определения глинистых частиц /Введ. 1993-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 7 с.

40. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии /Введ. 1983-01-07. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 22 с.

41. ГОСТ 31357-2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия /Введ. 2009-01-01. М.: Стандартиформ, 2008. – 12 с.
42. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний /Введ. 1989-07-01. М.: Стандартиформ, 2006. – 29 с.
43. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия /Введ. 2015-04-01. М.: Стандартиформ, 2015. – 12 с.
44. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство — Введ. 01.07.2017. — М.: Изд. стандартов. 2016. — 12 с.
45. Двухмассный виброударный грохот: пат. 2424067 Рос. Федерация: МПК В07В 1/40, В07В 1/54 / Сизиков С.А., Сизиков В.С., Скрипилов А.П., Вяткин Г.М.; заявитель и патентообладатель ЗАО Научно-исследовательское и проектно-конструкторское бюро «Стройтехника» – № 2010111988/03; заявл. 29.03.2010, опубл. 20.07.2011, бюл. № 20. – 9 с.
46. Дмитриев Ю. Г. [и др.] Оттирочная машина А.с. СССР № 411903, МПК В 03 В 5/48 / Дмитриев Ю. Г., Лебедев А. В., Затопляев Н. А., Ревнивцев В. И., Полетаев В. А., Кропанев С. И., Булыгин И. Ф. (СССР). – 1649128/22-3; заявлено 24.04.71; опубл. 25.01.74. Бюл. №3.
47. Евтюков С.А., Сизиков В.С. Динамика взаимодействия рабочих элементов виброударного грохота со слоем перемещаемого материала// Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4(51). С. 133–139.
48. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение. 1964, – 252 с.
49. Зимин М.А., Панфилов Ф.В., Матросов А.А., Афонин И.А. Руководство по обогащению отсевов дробления и разнопрочных каменных материалов. М.: СОЮЗДОРНИИ, 1992. – 66 с.
50. Ивович В. А. Рекомендации по проектированию виброизоляции обогатительного оборудования/ Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР – 1989. – 151 с.

51. Исагулов А. З. Динамические и импульсные процессы и машины для уплотнения литейных форм [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук /А. З. Исагулов — М.:ГНЦ РФ ЦНИИТМАШ, 1999. — 68 с.
52. Исагулова Д.А. Выбор параметров низкоимпульсной головки для изготовления форм из стальных и чугунных отливок /Республиканский журнал «Труды Университета» – 2011. – №. 3(44). – С. 30-33.
53. Исследование процесса обогащения заполнителей бетона вибропневматическим способом: отчет о НИР / Ленинградский инженерно-строительный ин-т. Л.,1980. № ГР 78002323. Инв. № Б92028.
54. Казаков С.В. Обоснование рациональных конструктивных и режимных параметров ударно-вибрационной конусной дробилки с двумя самосинхронизирующимися возбудителями колебаний: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.05.06 — СПб. 2007.
55. Карнаухов А.А., «Проблемы и перспективы сухого обогащения кварцевых песков», Сборник докладов IX международного семинара "Применение магнитных сепараторов в промышленности", НПФ Продэкология, Ровно, 2005, с. 5-10.
56. Категоренко Ю. И. [и др.] Технология литейного производства: учебник / Категоренко Ю. И., Филиппенков А. А., Миляев В. М., Майзель С. Г., Афонаскин А. В., Чуркин Б. С., Гофман Э. Б., Чуркин А. Б. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2018. – 684 с. URL: <http://elar.rsvpu.ru/handle/123456789/25527> (дата обращения: 29.09.2019).
57. Клишин С. В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №. 12, с. 273-277.
58. Красников Н. Д. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений из грунтовых материалов. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.
59. Кузьмина В.П. Механоактивация. Виброцентробежные мельницы// <http://www.ibeton.ru>: Завод «Строй-Бетон» (сайт производителя оборудования для

производства строительных материалов). 2019. 06 июн. URL: <http://www.ibeton.ru/a214.php> (дата обращения: 10.06.2019).

60. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

61. Лапшин В. Л., Рудых А. В., Глухов А. В. Математическое моделирование процесса вибрационного движения частиц материала по рабочему органу сепаратора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98) – с. 49-55.

62. Лапшин, В. Л. Совершенствование вибрационного оборудования для дозирования и контроля качества заполнителей бетонов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Л. Лапшин. — Л.: ЛИСИ, 1987. — 24 с.

63. Лапшин В. Л. Теория исследования и моделирования процессов сепарации руд на вибрационных обогатительных аппаратах [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / В. Л. Лапшин. — Иркутск: ИрГТУ, 1999.

64. Лесин А. Д. Элементы теории и методика расчета основных параметров вибромельниц. М.: Промстройиздат, 1957. – 113 с.

65. Локтионова О. Г. Динамика вибрационных технологических процессов и машин для переработки неоднородных гранулированных сред [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / О.Г. Локтионова. — Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2008. — 34 с.

66. Мельницы вибрационные шаровые МВ// <https://www.consit.ru>: Научно-производственная и инжиниринговая фирма ООО "КОНСИТ-А" (сайт производителя оборудования для отсева, смешивания, сушки, транспортирования и измельчения сыпучих материалов). URL: <https://www.consit.ru/dlya-izmelcheniya-i-drobleniya/melnitsy-vibratsionnye-mv#tekhnicheskaya-kharakteristika> (дата обращения: 10.06.2019).

67. Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов В. Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988.

68. Монгуш С.Ч. Совершенствование вибропневмокласификаторов для мелких заполнителей бетонов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Ч. Монгуш. — СПб.: СПбГАСУ, 2005. – 24 с.
69. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 1 / Г. М. Островский [и др.]. СПб.: Профessional, 2004. 848 с.
70. Обзор рынка кварцевого стекольного сырья в России// <http://www.infomine.ru>: ООО «ИГ Инфомайн» (сайт аналитической компании по исследованию рынков промышленной продукции). URL: <http://www.infomine.ru/research/9/444/> (дата обращения: 17.12.2019).
71. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М.: Недра, 1977.
72. Открытое акционерное общество «НПО Центр»: оборудование и технологии// <http://www.npo-center.com>: ООО «НПО Центр» (сайт производителя оборудования для дробления, измельчения и классификации рудных и нерудных материалов). URL: <http://www.npo-center.com/upload/Буклет%20ОАО%20НПО%20Центр.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).
73. Пат. 2065782 Рос. Федерация. Устройство для разделения каменноугольной золы / Зырянов В. В. № 5022977/03; заявл. 22.01.1992; опубл. 27.08.1996. Бюл. № 17.
74. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 240 с.
75. Поскрёбышев, В.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий: учеб. пособие / В.А. Поскрёбышев, А.А. Зиновьев, Н.А. Лохова, А.Б. Исько, С.А. Белых. – 2-е изд., перераб. и доп. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 378 с.
76. Потураев В. Н., Червоненко А. Г., Ободан Ю. Я. Динамика и прочность вибрационных транспортно-технологических машин. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 112 с.

77. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / под ред. А. П. Баскакова. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
78. Разработка новой технологии сухого обогащения нерудных строительных материалов: отчет о НИР (заключ.) / Всесоюзн. науч.-исслед. ин-т нерудных строит. материалов и гидромеханизации. Тольятти, 1975. № ГР 73017979. Инв. № Б476117.
79. Расчет производительности установок для сушки и обеспыливания отсевов производства щебня в аэровиброкипящем слое / С. А. Сизиков [и др.] // Обогащение руд. 2013. № 5. С. 25–29.
80. Репин С.В., Сизиков В.С., Сизиков С.А., Скрипилов А.П. Совершенствование оборудования для производства бетонов и растворов в зимних условиях // Строительные и дорожные машины. 2017. №. 1. С. 15-20.
81. Рушелюк К. С. Исследование и выбор оптимальных параметров вибропневматического очистителя заполнителей бетона [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. С. Рушелюк. — Л.: ЛИСИ, 1981. — 22 с.
82. Саблин Р. А. Экспериментальные исследования режима работы вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. 1, с. 406-409.
83. Садовская О. В., Садовский В. М. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред. М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
84. Сапожников М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высшая школа, 1971.
85. Сизиков В. С. Анализ параметров динамики взаимодействия механоактиватора со слоем материала при его вибротранспортировании // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (сер. «Актуальные проблемы современного строительства»); СПбГАСУ. – СПб, 2018. – 256 с. С. 100-107.

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

87. Сизиков В. С. Виброорган с двумя антифазно колеблющимися стенками. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016618506, 06.06.2016 г.

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

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

90. Сизиков В. С. Математическое моделирование виброперемещения слоя сыпучей среды, расположенной между противофазно вибрирующими стенками// Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 69-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», СПбГАСУ. СПб, 2016. – 260 с. С. 139-144.

91. Сизиков В. С. Обогащение зернистых материалов методами оттирки и механоактивации способами виброобъемного деформирования Архитектура – строительство – транспорт: материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы, СПбГАСУ. – СПб, 2017. – 196 с. С. 64-67.

92. Сизиков В. С. Определение параметров виброперемещения слоя сыпучей среды двумя противофазно колеблющимися транспортирующими рабочими органами. Архитектура – строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. II. Транспортные и инженерно-экологические системы, СПбГАСУ. – СПб, 2016. – 275 с. С. 72-77.

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

94. Сизиков С.А., Вяткин Г.М., Сизиков В.С., Шулояков А.Д. Расчет производительности установок для сушки и обеспыливания отсевов производства щебня в аэровиброкипящем слое // Обогащение руд. 2013. № 5. С. 25-29.

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

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

97. Сизиков С. А. Динамика перемещения сыпучих сред вибротранспортирующими органами строительных машин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Сизиков. Л.: ЛИСИ, 1985. — 24 с.

98. Скрипилов, А. П. Методика определения эффективных параметров виброударного грохота для фракционирования строительных песков [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. П. Скрипилов. – СПб: СПбГАСУ, 2013. — 21 с.

99. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений // Введ. 1978-12-13. М.: Госстрой СССР, 1979. – 52 с.

100. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: – Машиностроение, 1973. – 328 с.

101. Способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления [Текст] : пат. 2675554 Рос. Федерация: МПК В01F 3/18, В01F 11/00, В02С 19/18 / Сизиков В.С., Сизиков С.А.; заявитель и патентообладатель Сизиков В.С. – № 2016140584/05; заявл. 14.10.2016; опубл. 19.12.2018 Бюл. № 35. – 2 с.

102. Структурно-минералогические изменения цеолитсодержащего сырья в результате электромассклассификации / А. В. Корнилов [и др.] // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов: сб. науч. ст. по материалам рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. С. 130–136.
103. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 1024 с.
104. Троицкий В.В. Обогащение нерудных строительных материалов. Л.: Стройиздат. 1986. – 192 с.
105. Тропман А. Г. Вибрационные конвейеры для транспортирования горячих материалов/ А. Г. Тропман, Н. И. Бельков, Ю. Н. Макеева. — М.: Машиностроение, 1972 — 120 с.
106. Туркин В. Я., Тягушев С. Ю., Шонин О. Б. Повышение технологических показателей вибрационной щековой дробилки средствами автоматизированного электропривода //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. 2, с. 130-136.
107. Ударно-центробежная дробилка [Текст]: пат. 2499632 Рос. Федерация: МПК В02С 13/00 / Бородавко В.И., Бороха Э.Л., Бутяев А.Г., Воробьев В.В., Горобец А.В., Козин А.Ю.; № 2012119127/13; заявл. 10.05.2012; опубл. 27.11.2013 Бюл. № 33. – 4 с.
108. Устройство для формования строительных изделий: пат. №2017603 Рос. Федерация: МПК В28В 1/087, В28В 1/08/ Батулов А.И., Карпов В.В., Птичников В.П.; заявитель и патентообладатель Батулов А.И., Карпов В.В., Птичников В.П. – № 4937697/33; заявл. 1991.05.22; опубл. 15.08.1994.
109. Центробежная оттирочная машина // <http://www.sibtehlit.ru>: ООО «Сибтехлит» (сайт поставщика оборудования для литейных производств). URL: <http://sibtehlit.ru/oborudovanie-regeneraczii-otrabotannyix-smesej-xts-szentrobezhnaya-ottirochnaya-mashina> (дата обращения: 29.09.2019).
110. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. 3-е изд., доп. М.: Высшая школа, 1979. 272 с.

111. Червоненко А.Г. и др. Динамические нагрузки и напряженное состояние короба вибрационного питателя тяжелого типа при загрузке крупнокусковой горной массой // Червоненко А. Г., Взоров А. А., Ободан Ю. Я. и др. Механика горнотранспортных машин. Киев: Наукова думка. 1979. С. 23-32.

112. Червоненко А. Г. Математическое моделирование реологических процессов взаимодействия сыпучей среды с вибрационным питателем для выпуска руды // Теория и расчет горных машин. Киев: Наукова думка. 1982. С. 101-116.

113. Червоненко А. Г., Ободан Ю. Я. Анализ напряженного состояния рабочего органа доставочного виброконвейера при учете взаимодействия с транспортируемой рудой // Механика и технология подземных горных работ. Киев: Наукова думка. 1978. С. 8-15.

114. Шашков, И.П. Разработка и исследование вибрационного конвейера для строительных машин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.П. Шашков. — Омск.: Сиб. автомоб.-дор. ин-т им. В. В. Куйбышева, 1973. — 32 с.

115. Шестопалов А. А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / А. А. Шестопалов – М.: Моск. автомобильно-дорожный ин-т. 1990. – 32 с.

116. Электромассклассификатор //а.с. 1403439 СССР. МКИ4 В 03 С 7/02. / Зырянов В. В. (СССР), 1988.

117. Яшин В. П., Бортников А. В. Теория и практика самоизмельчения //М.: Недра. – 1978, 229 с.

118. Cundall P. A., Strack O. D. L. A distinct element model for granular assemblies. Geotechnique, 1979, № 29(1), p. 47-65.

119. Dong K. J., Yu A. B., Brake I. DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen //Minerals Engineering, 2009, № 22(11). – pp. 910-920.

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

121. Hill J. M., Selvadurai A. P. S. Mathematics and mechanics of granular materials Springer, Dordrecht, 2005. – 320 p.
122. Lichter J., Lim K., Potapov A., Kaja D. New developments in cone crusher performance optimization //Minerals Engineering, 2009, №22(7). – pp. 613-617.
123. Mujumdar A. S. Dryers for particulate solids, slurries and sheet-form materials /Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, 2000. – pp. 37-61.
124. Preston M., Tatarzyn J. Optimizing plant efficiency with attrition scrubbers/ Mining Engineering, 2013, №65(10). – pp. 24-24.
125. Sand attrition unit// [https:// www.joest.com](https://www.joest.com): JÖST GmbH (сайт производителя вибрационного оборудования для транспортирования, грохочения, сортирования и термической переработки сыпучих материалов). URL: <https://www.joest.com/en/products/breaking/sand-attrition-unit/> (дата обращения: 30.09.2019).
126. Vibra-drum grinding mills// <https://www.generalkinematics.com>: General Kinematics Corporation (сайт производителя вибрационного оборудования для переработки, классификации и транспортирования сыпучих материалов в литейной, горной, перерабатывающей и др. отраслях промышленности). 2019. 08 июн. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://greenhatgk-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/04/GKM-02-VIBRADRUM.pdf> (дата обращения: 10.06.2019).
127. Weinstein R., Snoby R. Advances in dry jigging improves coal quality //Mining Engineering, 2007, №59(1). – pp. 29-34.
128. Wołosiewicz-Głąb M., Foszcz D., Gawenda T. Analysis of possibilities of obtaining the fine particle size in mills of various designs/Inżynieria Mineralna. – 2016, №17. – pp. 223-231.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методика расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами оттирочно-очистительной установки

Данная методика для расчета параметров перемещения слоя материала двумя колеблющимися в антифазе в поперечном и в фазе в продольном направлениях транспортирующими органами (ТО) оттирочно-очистительной установки разработана на основе математической модели перемещения элементов трехмассовой нелинейной механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» при взаимодействии ТО со слоем материала в процессе его деформирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см. раздел 2.2 настоящей диссертации) с учетом результатов выполненной идентификации параметров модели с определением численных значений коэффициентов сопротивлений перемещению ее элементов, приведенных в разделе 3.3.1 настоящей диссертации. Методика представлена в виде алгоритма программы «Виброоттирка 1» для расчета на ЭВМ параметров перемещения элементов упомянутой модели на основе представленных на рис. А.1 и рис. А.2 расчетных схем механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО». Все возможные виды движений слоя при взаимодействии с ТО для принятых расчетных схем представлены на рис. А.3.

На расчетных схемах модели механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» (рис. А.1, рис. А.2) введены следующие обозначения: m_1 , m_2 — массы нижнего и верхнего ТО соответственно; m_3 — масса слоя материала; $m_{01} = 0$, $m_{02} = 0$ — безынерционные массы нижней и верхней контактных поверхностей слоя соответственно; c_{1x} , b_{1x} , c_{1y} , b_{1y} — коэффициенты упругих и вязких сопротивлений упругих опор (пружин) нижнего ТО в направлениях осей ox и oy соответственно; c_{2x} , b_{2x} , c_{2y} , b_{2y} — коэффициенты упругих и вязких сопротивлений упругих элементов взаимодействия между нижним и верхним ТО в направлениях осей ox и oy соответственно; c_{3x} , b_{3x} , c_{3y} , b_{3y} — коэффициенты, моделирующие упругие и

вязкие свойства слоя материала в направлениях осей ox и oy соответственно; $c_{1_3y}^*$, $b_{1_3y}^*$ и $c_{2_3y}^*$, $b_{2_3y}^*$ — 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, передающиеся ТО от вибровозбудителей.

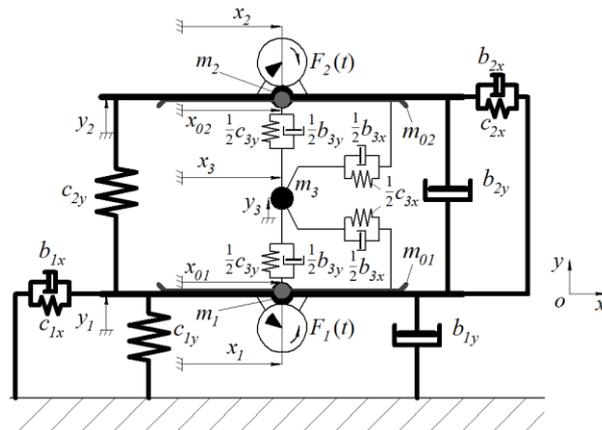


Рис. А.1. Расчетная схема перемещения слоя материала ТО на этапе совместного (в контакте) движения

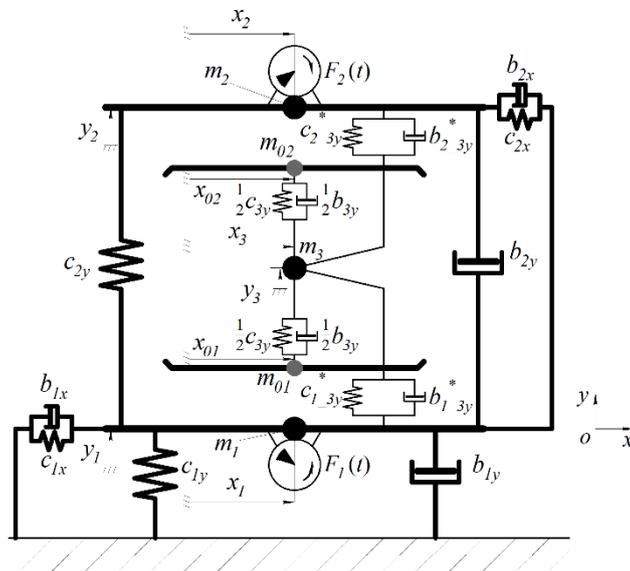


Рис. А.2. Расчетная схема перемещения слоя материала ТО на этапе полёта (без контакта)

Вынуждающие силы $F_1(t)$ и $F_2(t)$ передаются ТО от дебалансных вибраторов, синхронно вращающихся в разноименных направлениях, вызывающих противофазное возбуждение колебаний ТО в поперечном направлении синфазное

– в продольном. Данные силы могут быть записаны в проекциях на оси ox и oy следующим образом:

$$F_{1x}(t) = P \cos(\omega t),$$

$$F_{2x}(t) = P \cos(\omega t),$$

$$F_{1y}(t) = P \sin(\omega t),$$

$$F_{2y}(t) = -P \sin(\omega t),$$

где $P = M_{\text{деб}} \cdot \omega^2$ – амплитудное значение вынуждающей центробежной силы одного вибровозбудителя, ω – угловая частота вращения дебалансов, t – время.

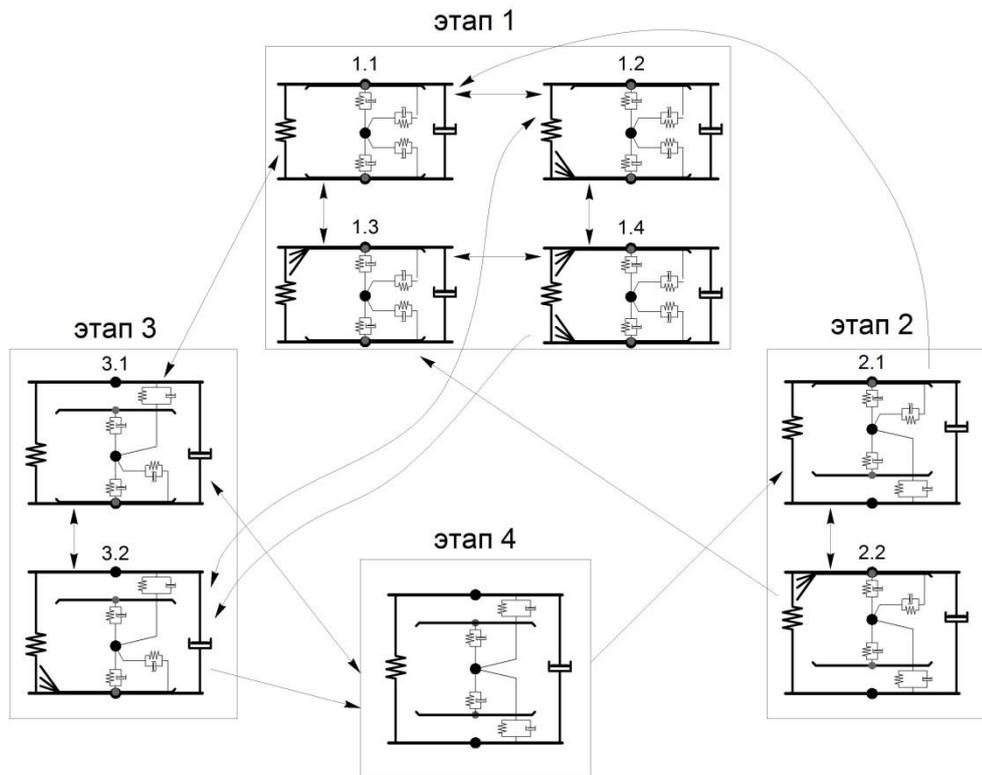
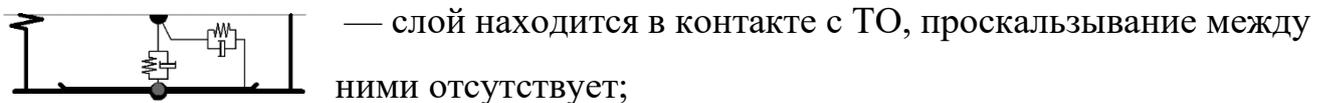
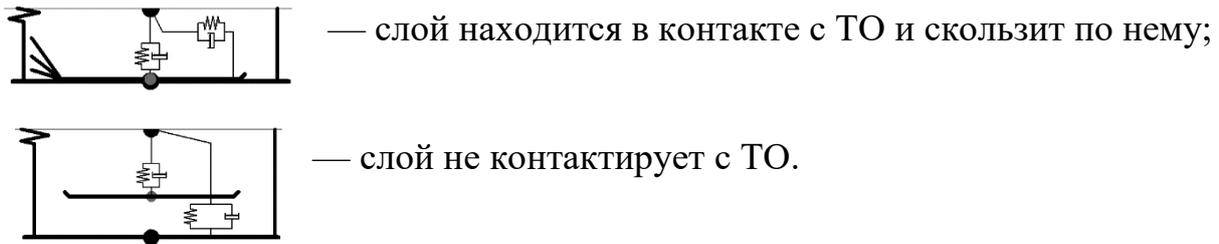


Рис. А.3. Схема всех возможных видов движения слоя материала и переходов между ними при взаимодействии слоя с Т

Виды движения слоя материала относительно ТО обозначены на рис. А.3 следующим образом:





Для учета в представленной модели механической системы «верхний ТО – слой песка – нижний ТО» степени заполнения материалом пространства между ТО в алгоритм и программу для ЭВМ введен параметр e , представляющий собой разность высоты слоя материала и высоты пространства между ТО в статике.

На основе приведенных схем и математического описания взаимодействия их элементов составлен алгоритм программы «Виброоттирка 1» для расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя ТО оттирочно-очистительной установки (рис. А.4), состоящий из следующих основных частей (нумерация этапов и видов движения слоя материала относительно ТО соответствует рис. А.3):

- блоки 1-4, осуществляющие ввод исходных данных, поиск установившегося режима колебаний и подготовку начальных условий для запуска расчета на этапе 1;

- блоки 5-29, осуществляющие расчет параметров перемещения модели слоя материала ТО на этапе 1 с учетом видов движения модели слоя относительно ТО 1.1-1.4;

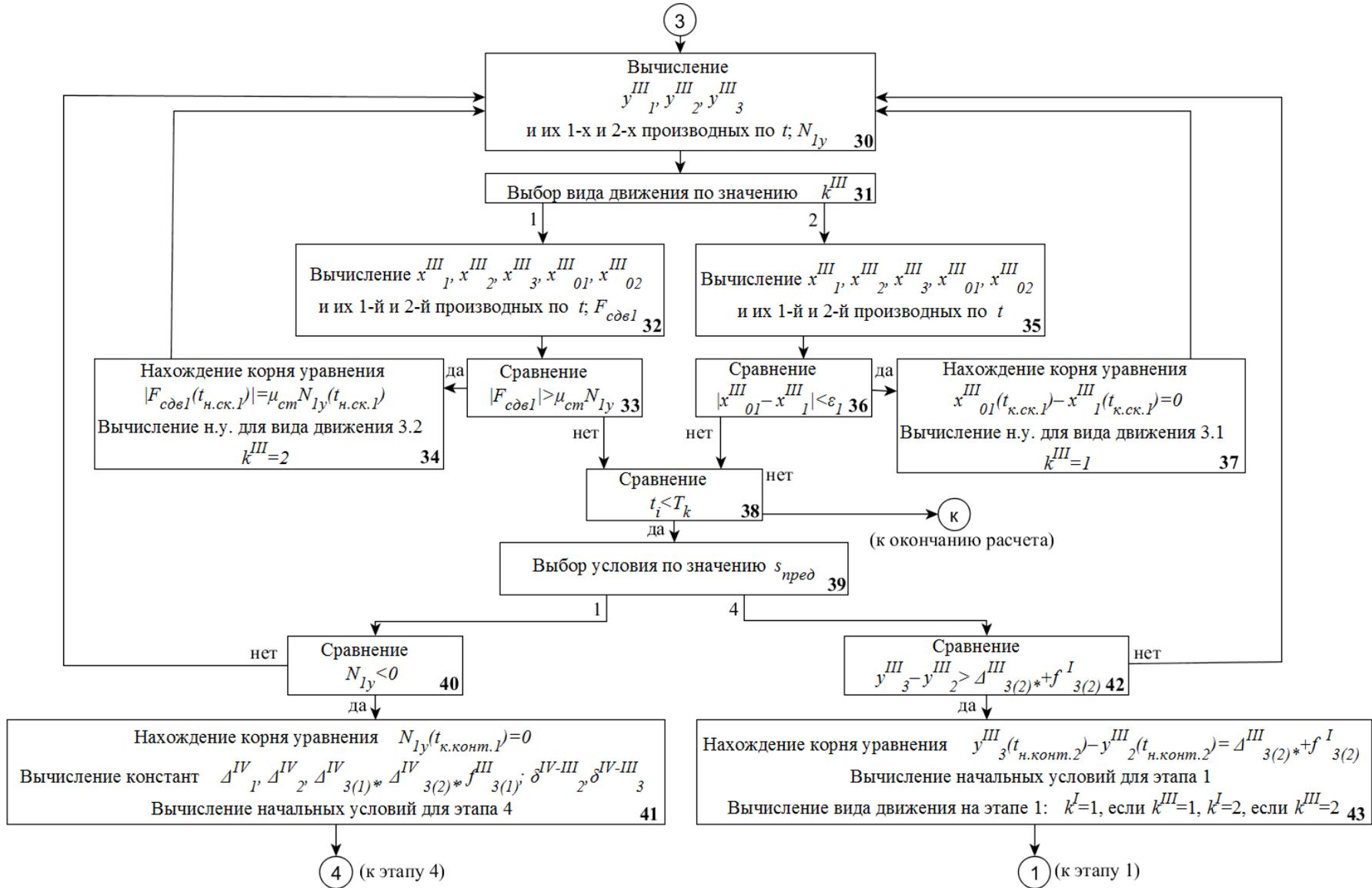
- блоки 30-43, осуществляющие расчет параметров перемещения модели слоя материала ТО на этапе 3 с учетом видов движения модели слоя относительно ТО 3.1-3.2;

- блоки 44-49, осуществляющие расчет параметров перемещения модели слоя материала ТО на этапе 4;

- блоки 50-60, осуществляющие расчет параметров перемещения модели слоя материала ТО на этапе 2 с учетом видов движения модели слоя относительно ТО 2.1-2.2;

- блоки 61-63, осуществляющие вычисление скорости транспортирования слоя и вывод на печать результатов расчета параметров перемещения слоя ТО.





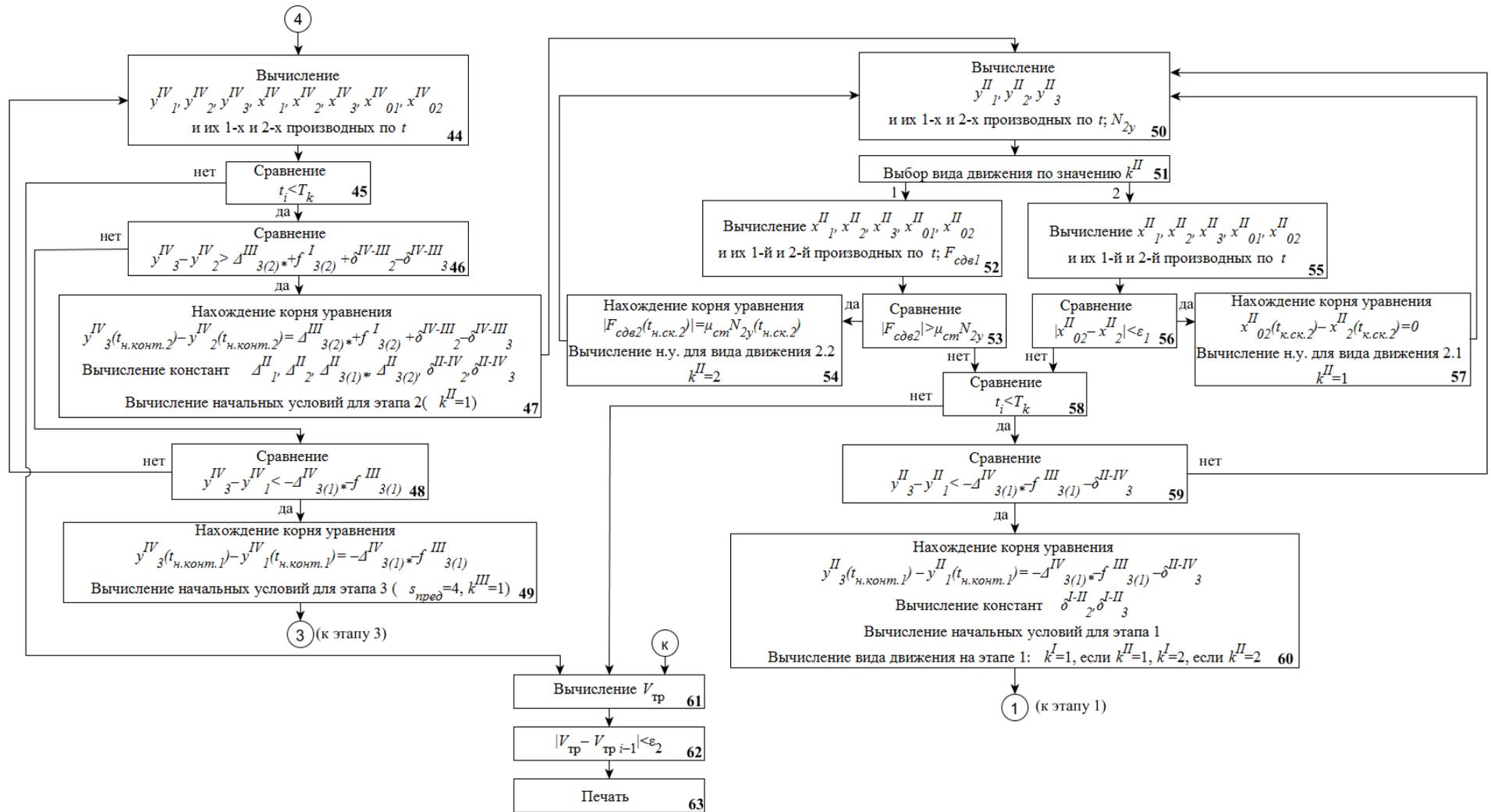


Рис. А.4. Алгоритм программы «Виброоттирка 1» для расчета параметров перемещения слоя песка двумя двумя вибротранспортирующими органами.

Работа блоков алгоритма программы и последовательность их использования:

Блок 1 осуществляет ввод программы и исходных данных, определяющих параметры процесса перемещения слоя материала ТО.

Блоки 2 и 3 осуществляют поиск начальных условий для запуска расчета путем решения уравнений движения этапа 1 с нулевыми начальными условиями. Вычисления продолжаются до момента времени, когда будет достигнут установившийся режим колебаний ТО и слоя материала, т. е. совпадут перемещения ТО m_1 и m_2 и ц. м. слоя m_3 по оси ou для двух соседних периодов их движения.

Блок 4 осуществляет ввод полученных в предыдущем блоке перемещений и скоростей элементов моделируемой системы в качестве начальных условий для запуска расчета на этапе 1 (вид движения модели слоя 1.1), ввод момента окончания расчета и вычисление статических растяжений пружин моделируемой системы на этапе 1.

Блок 5 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси ou на этапе 1 на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты с шагом 0,00005 с, а также вычисляет силы нормальной реакции слоя материала на ТО.

Блок 6 переводит решение в зависимости от действующего вида движения слоя материала относительно ТО, характеризуемого наличием проскальзывания между ними, к соответствующей группе блоков, которые осуществляют решение уравнений движения моделируемой системы по оси ox . К ним относятся следующие блоки: блоки 7-11 – вид движения 1.1, блоки 12-16 – вид движения 1.2, блоки 17-21 – вид движения 1.3, блоки 22-26 – вид движения 1.4.

Блок 7 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси ox на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты с шагом 0,00005 с, а также вычисляет сдвигающие слой материала силы.

Блок 8 сравнивает абсолютную величину сдвигающей силы, действующей на слой со стороны нижнего ТО, с соответствующей ей силой статического трения. Если сдвигающая сила больше силы трения, управление передается в блок 9, который находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала проскальзывания слоя относительно нижнего ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения по оси ox на следующем шаге расчета для нового вида движения слоя относительно ТО (вид движения 1.2). В противном случае управление передается в блок 10.

Блок 10 сравнивает абсолютную величину сдвигающей силы, действующей на слой со стороны верхнего ТО, с соответствующей ей силой статического трения. Если сдвигающая сила больше силы трения, управление передается в блок 11, который находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала проскальзывания слоя относительно верхнего ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения по оси ox на следующем шаге расчета для нового вида перемещения слоя относительно ТО (вид перемещения 1.3). В противном случае управление передается в блок 27.

Работа блоков для видов движения 1.2, 1.3 и 1.4 (блоки 12-16, блоки 17-21, блоки 22-26) осуществляется аналогично работе блоков 7-11, поэтому ее описание не приводится.

Блок 27 сравнивает время на текущем шаге расчета с моментом окончания расчета и в случае наступления последнего передает управление в блок 61. В противном случае управление передается в блок 28.

Блок 28 определяет знак силы нормальной реакции слоя материала на верхний ТО на текущем шаге расчета и в случае положительного знака переводит решение в блок 5 для продолжения расчета параметров перемещения слоя материала ТО на этапе 1 на следующем шаге расчета. В противном случае управление передается в блок 29, осуществляющий подготовку данных для выполнения расчета на этапе 3.

Блок 29 вычисляет момент окончания контакта слоя с верхним ТО путем решения трансцендентного уравнения, находит величины статических растяжений

пружин моделируемой системы на этапе 3 и расстояния между положениями статического равновесия инерционных элементов системы по оси ou на 3-м и на 1-м этапах, а также вычисляет начальные условия (скорости и перемещения элементов системы по осям ox и ou) для решения уравнений движения на новом этапе на следующем шаге расчета с учетом вида движения слоя.

Блок 30 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси ou на этапе 3 на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты, а также вычисляет силу нормальной реакции слоя материала на нижний ТО.

Блок 31 переводит решение в зависимости от действующего вида движения слоя материала относительно нижнего ТО, характеризуемого наличием проскальзывания между ними, к соответствующей группе блоков, которые осуществляют решение уравнений движения моделируемой системы по оси ox . К ним относятся следующие блоки: блоки 32-34 – вид движения 3.1, блоки 35-37 – вид движения 3.2.

Блок 32 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси ox на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты, а также вычисляет сдвигающую силу, действующую на слой со стороны нижнего ТО.

Блок 33 сравнивает абсолютную величину сдвигающей силы, действующей на слой со стороны нижнего ТО, с силой статического трения. Если сдвигающая сила больше силы трения, управление передается в блок 34, который находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала проскальзывания слоя относительно нижнего ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения по оси ox на следующем шаге расчета для нового вида движения слоя относительно ТО (вид движения 3.2). В противном случае управление передается в блок 38.

Работа блоков 35-37 для вида движения 3.2 осуществляется аналогично работе блоков 32-34, поэтому ее описание не приводится.

Блок 38 сравнивает время на текущем шаге расчета с моментом окончания расчета и в случае наступления последнего передает управление в блок 61. В противном случае управление передается в блок 39.

Блок 39 переводит решение в зависимости от предшествующего этапа движения к группе блоков, каждая из которых осуществляет проверку условия окончания этапа 3 и подготовку данных для продолжения расчета на новом этапе движения.

В случае, если текущему этапу движения предшествовал этап 1, управление передается в блок 40, который определяет знак силы нормальной реакции слоя материала на нижний ТО на текущем шаге расчета и в случае положительного знака переводит решение в блок 30 для продолжения расчета параметров перемещения слоя материала ТО на этапе 3 на следующем шаге расчета. В случае отрицательного значения силы нормальной реакции управление передается в блок 41. Блок 41 вычисляет момент окончания контакта слоя с нижним ТО путем решения трансцендентного уравнения, находит величины статических растяжений пружин моделируемой системы для нового этапа 4 и расстояния между положениями статического равновесия инерционных элементов системы по оси ou на 3-м и на 4-м этапах, а также вычисляет начальные условия (скорости и перемещения элементов системы по осям ox и ou) для решения уравнений движения на новом этапе движения на следующем шаге расчета.

В случае, если текущему этапу движения предшествовал этап 4, управление передается в блок 42, который проверяет условие начала контакта слоя горизонтальной поверхности верхнего ТО на текущем шаге расчета. Если условие не выполняется, управление передается в блок 30 для продолжения расчета параметров перемещения слоя материала ТО на этапе 3 на следующем шаге расчета. В случае выполнения условия начала контакта управление передается в блок 43. Блок 43 находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала контакта слоя с верхним ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения нового этапа 1 на следующем шаге расчета с учетом вида движения слоя относительно ТО.

Блок 44 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по осям ox и oy на этапе 4 на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты.

Блок 45 сравнивает время на текущем шаге расчета с моментом окончания расчета и в случае наступления последнего передает управление в блок 61. В противном случае управление передается в блок 46.

Блок 46 проверяет условие начала контакта слоя горизонтальной поверхности верхнего ТО. Если условие не выполняется, управление передается в блок 48. В противном случае управление передается в блок 47.

Блок 47 находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала контакта слоя с верхним ТО, находит величины статических растяжений пружин моделируемой системы на новом этапе 2 по уравнениям и расстояния между положениями статического равновесия инерционных элементов системы по оси oy на 4-м и на 2-м этапах, а также вычисляет начальные условия для решения уравнений движения нового этапа 2 на следующем шаге расчета с учетом вида перемещения слоя относительно ТО.

Блок 48 проверяет условие начала контакта слоя горизонтальной поверхности нижнего ТО. Если условие не выполняется, управление передается в блок 44 для продолжения расчета параметров перемещения слоя материала ТО на этапе 4 на следующем шаге расчета. В противном случае управление передается в блок 49.

Блок 49 находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала контакта слоя с нижним ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения нового этапа 3 на следующем шаге расчета с учетом вида движения слоя относительно ТО.

Блок 50 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси oy на этапе 2 на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты, а также вычисляет силу нормальной реакции слоя материала на верхний ТО.

Блок 51 переводит решение в зависимости от действующего вида движения слоя материала относительно верхнего ТО, характеризуемого наличием проскальзывания между ними, к соответствующей группе блоков, которые осуществляют решение уравнений движения моделируемой системы по оси ox . К ним относятся следующие блоки: блоки 52-54 – вид движения 2.1, блоки 55-57 – вид движения 2.2.

Блок 52 вычисляет перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя материала по оси ox на текущем шаге расчета путем решения уравнений движения методом Рунге-Кутты, а также вычисляет сдвигающую силу, действующую на слой со стороны верхнего ТО.

Блок 53 сравнивает абсолютную величину сдвигающей силы, действующую на слой со стороны верхнего ТО, с силой статического трения. Если сдвигающая сила больше силы трения, управление передается в блок 54, который находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала проскальзывания слоя относительно верхнего ТО и вычисляет начальные условия для решения уравнений движения по оси ox на следующем шаге расчета для нового вида движения слоя относительно ТО (вид движения 2.2). В противном случае управление передается в блок 58.

Работа блоков 55-57 для вида движения 2.2 осуществляется аналогично работе блоков 52-54, поэтому ее описание не приводится.

Блок 58 сравнивает время на текущем шаге расчета с моментом окончания расчета и в случае наступления последнего передает управление в блок 61. В противном случае управление передается в блок 59.

Блок 59 проверяет условие начала контакта слоя горизонтальной поверхности нижнего ТО на текущем шаге расчета. Если условие не выполняется, управление передается в блок 50 для продолжения расчета параметров перемещения слоя материала ТО на этапе 2 на следующем шаге расчета. В случае выполнения условия начала контакта управление передается в блок 60. Блок 60 находит корень трансцендентного уравнения для определения момента начала контакта слоя с нижним ТО, определяет расстояния между положениями

статического равновесия инерционных элементов системы по оси ou на 2-м и на 1-м этапах, а также вычисляет начальные условия для решения уравнений движения нового этапа 1 на следующем шаге расчета с учетом вида движения слоя относительно ТО.

Блок 61 вычисляет среднюю скорость транспортирования слоя материала.

Блок 62 сравнивает среднюю скорость транспортирования с ее значениями, полученными для каждого предыдущего периода движения слоя и ТО.

Блок 63 выводит на печать максимальное значение средней скорости транспортирования и соответствующие ей параметры перемещения слоя материала и ТО (перемещения, скорости и ускорения ТО и модели слоя, силы нормальной реакции слоя на ТО и сдвигающие силы, действующие на слой).

Разработанная методика, представленная в виде алгоритма программы «Виброоттирка 1» для анализа и расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами, может использоваться для решения как прямых задач по расчету параметров перемещения слоя и его виброобъемного деформирования двумя ТО (скорости вибротранспортирования и сил нормальной реакции между слоем и ТО) при заданных параметрах режимов работы и характеристиках конструктивных элементов оттирко-очистительной установки, так и обратных задач по подбору характеристик элементов конструкции и режимов работы установки, обеспечивающих достижение заданных параметров перемещения слоя и его деформирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров оттирочно-очистительной установки

Основными технологическими параметрами оттирочно-очистительных установок и оборудования непрерывного действия для обогащения очисткой поверхности зерен строительных, стекольных, формовочных и других песков являются производительность Q и эффективность их очистки методом самооттирки поверхности частиц.

Производительность транспортно-технологических машин непрерывного действия определяется площадью сечения потока транспортируемого материала $B \times H_{сл}$ и скоростью его транспортирования $V_{тр}$. Скорость транспортирования и длина пути L , проходимого материалом в процессе его обработки, назначаются с учетом требования к продолжительности обработки материала $T_{обр}$, т. е. времени нахождения материала в установке для окончательного завершения технологического процесса его обработки двумя ТО (здесь и далее все обозначения соответствуют принятым в главах 2 и 3 настоящей диссертации).

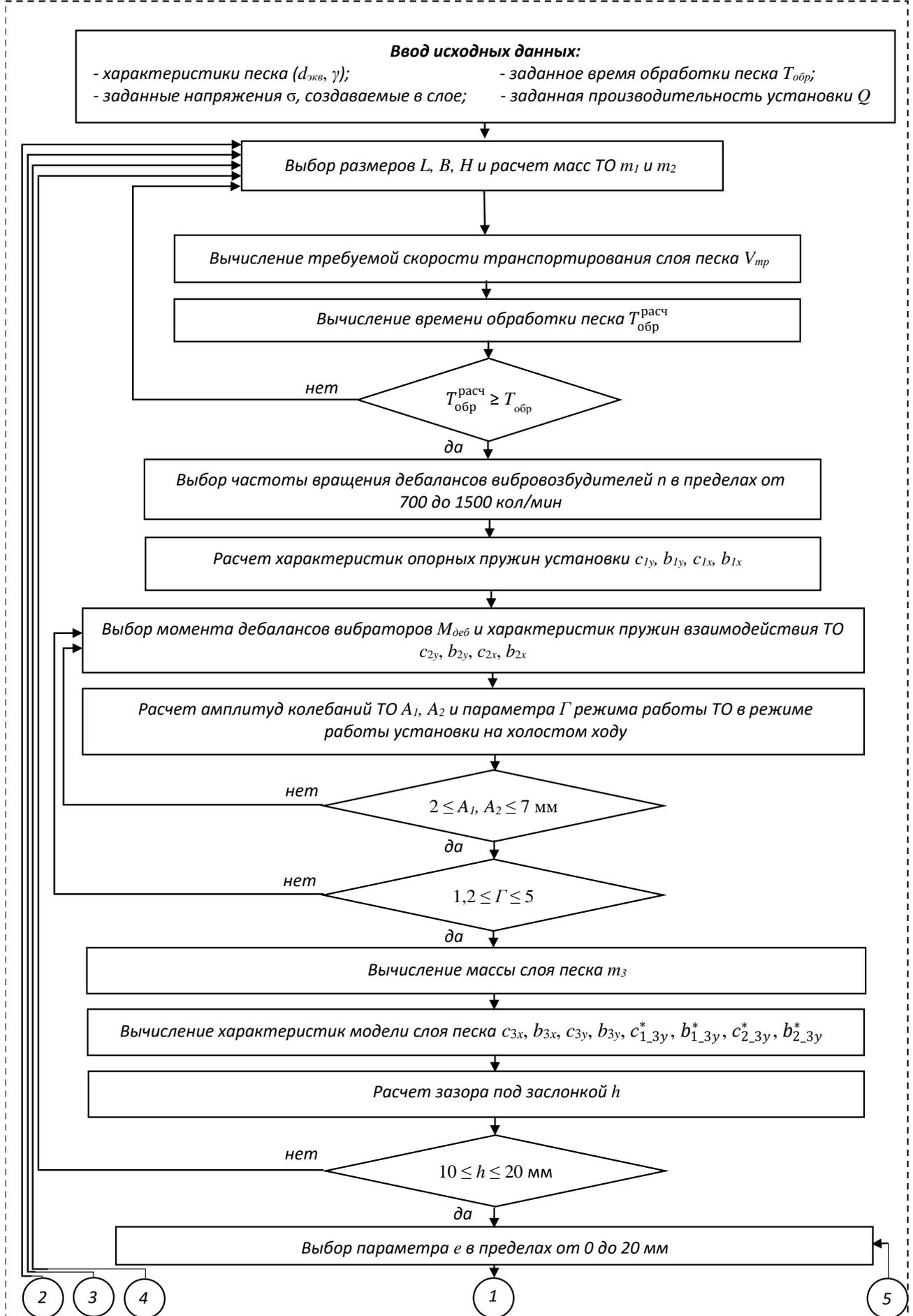
Эффективность очистки поверхности зерен песков методом их самооттирки зависит от величины напряжений в слое σ , создаваемых силами нормальной реакции N_n и N_v при взаимодействии слоя с ТО, и продолжительности обработки материала $T_{обр}$.

Основными факторами, влияющими на продолжительность обработки материала $T_{обр}$ и силы нормальной реакции N_n и N_v , являются: параметры элементов двухмассовой механической системы установки (частота вращения дебалансов вибровозбудителей n и момент дебалансов $M_{деб}$, коэффициенты сопротивлений упругих и вязких элементов механической системы установки c_{1x} , b_{1x} , c_{1y} , b_{1y} , c_{2x} , b_{2x} , c_{2y} , b_{2y} и массы m_1 и m_2 каждого ТО), упруго-вязкие коэффициенты сопротивлений модели слоя массой m_3 обрабатываемого крупного и мелкого песка с частицами диаметром $d_{эКВ}$, действующие как на этапе его полета (без контакта с

ТО), так и на этапе его совместного движения с ТО ($c_{3x}, b_{3x}, c_{3y}, b_{3y}, c_{1_3y}^*, b_{1_3y}^*, c_{2_3y}^*$), и зазор h под заслонкой (поз. 14 на рис. 3.1), регулирующей скорость транспортирования песка $V_{тр}$ и влияющий на степень заполнения материалом пространства между ТО, обозначаемую в уравнениях математической модели параметром e .

Разработанные рекомендации обеспечивают определение заданных (желаемых) технологических параметров установки, таких как напряжения σ , создаваемые в слое обрабатываемого песка, продолжительность его обработки $T_{обр}$ и производительность установки Q , путем последовательного уточнения принятых на первом этапе параметров конструкции и режимов работы установки с переходом от первого приближения ее конструктивного исполнения к окончательным конструктивным решениям. Такая задача решается итерационным методом и относится к задачам обратного типа. Процесс расчета и выбора конструктивных и режимных параметров оттирочно-очистительной установки представлен в виде алгоритма на рис. Б.1.

Исходными данными для расчета параметров проектируемой установки являются характеристики песка (крупность частиц $d_{эkv}$ и насыпная плотность γ), параметры эффективности очистки поверхности зерен (сжимающие напряжения σ в слое песка и продолжительность его обработки $T_{обр}$), а также производительность установки Q . Далее необходимо задаться длиной и шириной ТО L и B и расстоянием между ТО по вертикали H , равным высоте слоя песка $H_{сл}$ в пространстве между ТО, по которым выполняется первоначальная конструктивная проработка вибротранспортирующей установки и определяются массы нижнего и верхнего ТО m_1 и m_2 . При этом длину ТО установки L рекомендуется принимать не более 5-6 м с учетом требований по обеспечению достаточной прочности и надежности ее конструкции [20], а для достижения эффективной обработки песка в установке с обеспечением ее производительности до 25 т/ч следует принимать ширину ТО B диапазоне от 0,1 до 1 м и расстояние между ТО по вертикали H в диапазоне от 0,04 до 0,1 м. Кроме того, в процессе уточнения масс верхнего и



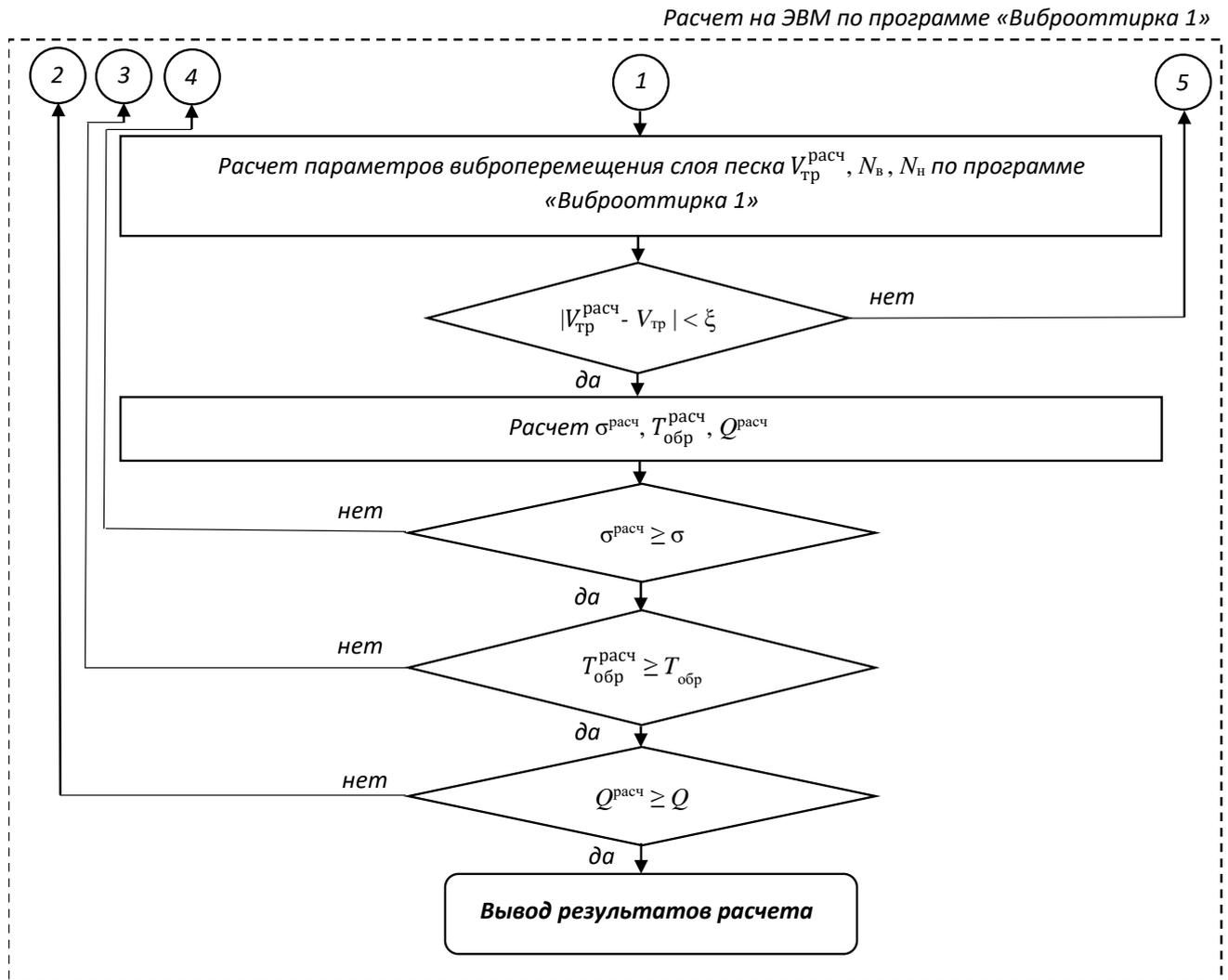


Рис. Б.1. Алгоритм расчета конструктивных и режимных параметров оттирко-очистительной установки

нижнего ТО следует стремиться достигать их одинаковых значений для обеспечения необходимого режима колебаний ТО.

Определение скорости транспортирования $V_{тр}$, позволяющей обеспечить заданную производительность установки, осуществляется по формуле

$$V_{тр} = \frac{Q}{S \cdot \gamma},$$

где $S = B \cdot H$ – площадь поперечного сечения слоя песка между двумя ТО. Полученное значение позволяет рассчитать продолжительность обработки слоя песка $T_{обр}^{расч}$ двумя ТО по выражению

$$T_{\text{обр}}^{\text{расч}} = \frac{L}{V_{\text{тр}}}.$$

В случае, если заданная продолжительность обработки $T_{\text{обр}}$ не достигается, необходимо вернуться к выбору длины L ТО и назначить ее бóльшей (также при этом можно увеличить ширину B ТО), после чего повторить приведенные выше вычисления.

Частота вращения вибровозбудителей n выбирается из диапазона от 700 до 1500 об/мин. Жесткости мягких опорных пружин c_{1y} и c_{1x} определяются требованиями к виброизоляции основания и рассчитываются по известным методикам расчета допускаемых нагрузок на фундамент вибрационных машин [50].

Режимы колебаний ТО установки рекомендуется принимать исходя из условия обеспечения прочности и надежности ее конструкции в режиме работы на холостом ходу. С учетом этого момент дебалансов вибровозбудителей $M_{\text{деб}}$ и жесткости пружин взаимодействия c_{2y} и c_{2x} выбираются так, чтобы обеспечить значения параметра режима Γ работы ТО в пределах от 1,2 до 5 и величины амплитуд колебаний нижнего и верхнего ТО A_1 и A_2 в пределах от 2 до 7 мм. При подборе методом итераций $M_{\text{деб}}$, c_{2y} и c_{2x} значения A_1 и A_2 допускается вычислять по известным формулам [18], описывающим движение двухмассовой колебательной системы без учета вязких сопротивлений пружин:

$$A_1 = \frac{m_2 \omega^2 F}{\Delta}, \quad A_2 = \frac{(c_{1y} - m_1 \omega^2) F}{\Delta},$$

где $\Delta = (c_{1y} + c_{2y} - m_1 \omega^2)(c_{2y} - m_2 \omega^2) - c_{2y}^2$; $F = M_{\text{деб}} \omega^2$ – вынуждающая сила вибровозбудителей, Н; A_1 и A_2 – амплитуды соответственно нижнего и верхнего ТО, м; ω – частота колебаний ТО, с^{-1} ($\omega = 2\pi n/60$). При этом рекомендуется обеспечивать дорезонансный режим колебаний ТО.

После определения характеристик колебательной системы установки определяются параметры модели слоя песка. Масса песка зависит от его насыпной плотности γ и рассчитывается по формуле

$$m_3 = \gamma BHL.$$

Упруго-вязкие коэффициенты сопротивлений модели слоя песка $c_{3x}, b_{3x}, c_{3y}, b_{3y}, c_{1_3y}^*, b_{1_3y}^*, c_{2_3y}^*, b_{2_3y}^*$, действующих как на этапе его полета без контакта с ТО, так и на этапе его совместного движения с ТО, в зависимости от эквивалентного диаметра частиц $d_{\text{экв}}$ определяются по табл. 3.3 и табл. 3.8. В том случае, когда высота слоя песка, равная принятому расстоянию H между ТО по вертикали, отличается от $H_{\text{сл}} = 0,1$ м, значения упомянутых характеристик сопротивлений домножаются на коэффициент β , учитывающий соотношение указанных высот:

$$\beta = \frac{0,1}{H}.$$

Режим обработки и транспортирования песка в проектируемой установке существенно зависит от степени заполнения материалом пространства между ТО, определяемой положением заслонки. Зазор под заслонкой h определяется по уравнению регрессии (3.6) на основе принятых значений $V_{\text{тр}}, M_{\text{деб}}, n$ и заданной величины $d_{\text{экв}}$. Рассчитанная величина зазора должна находиться в пределах от 10 до 20 мм, в противном случае следует назначить новое расстояние между ТО по вертикали H и повторить все приведенные выше вычисления.

В модели процесса перемещения слоя ТО характеристикой заполнения пространства между ТО служит параметр e . Для его определения принимается первое приближение этого параметра из диапазона от 0 до 20 мм и производится расчет параметров виброперемещения слоя песка по программе для ЭВМ «Виброоттирка 1», в результате чего рассчитывается скорость транспортирования $V_{\text{тр}}^{\text{расч}}$ и силы нормальной реакции $N_{\text{н}}$ и $N_{\text{в}}$ при взаимодействии слоя с ТО. Если разность рассчитанного $V_{\text{тр}}^{\text{расч}}$ и требуемого $V_{\text{тр}}$ значений превышает заданную погрешность ξ , то выполняется корректировка значения e методом последовательных приближений до тех пор, пока указанное условие не будет удовлетворено.

На основе полученных значений N_H и N_B рассчитывается величина сжимающих напряжений в слое песка $\sigma^{\text{расч}}$. Исходя из того, что в программе «Виброоттирка 1» силы нормальной реакции N_H и N_B определяются на границах слоя с нижним и верхним ТО для слоя с единичной площадью поверхности $S = L \cdot B = 1$, значение сжимающих напряжений внутри слоя можно определить как их среднее значение:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{N_H + N_B}{2S}.$$

Производительность установки $Q^{\text{расч}}$ и новое уточненное значение продолжительности обработки песка $T_{\text{обр}}^{\text{расч}}$ определяются с учетом найденной $V_{\text{тр}}^{\text{расч}}$ по формулам

$$Q_{\text{расч}} = \gamma B H V_{\text{тр}}^{\text{расч}},$$

$$T_{\text{обр}}^{\text{расч}} = \frac{L}{V_{\text{тр}}^{\text{расч}}}.$$

Рассчитанные характеристики эффективности и производительности установки сравниваются с заданными σ , $T_{\text{обр}}$ и Q , и если требуемые значения не достигаются, то производится итерационный подбор конструктивных и режимных параметров установки до тех пор, пока не будут обеспечены указанные заданием параметры. При этом для увеличения $\sigma^{\text{расч}}$ следует выбирать бóльшие значения $M_{\text{деб}}$ и n , либо меньшее H , для увеличения $T_{\text{обр}}^{\text{расч}}$ – бóльшие L и B , а для увеличения Q – бóльшее B .

Данные рекомендации позволяют на стадии проектирования промышленных оттирко-очистительных установок для обогащения поверхности песков определять параметры их конструктивных элементов (массы ТО, жесткости упругих элементов установки, размеры слоя и ТО) и режимов их работы (момент дебалансов вибраторов и частота их вращения и положение заслонки для регулирования скорости транспортирования песка), а также технологические параметры (производительность установки, напряжения в слое обрабатываемого песка и время процесса его обработки).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Документация по внедрению результатов диссертационных исследований

1. Договор о творческом сотрудничестве от 20.11.2017 по теме «Разработка и внедрение инновационной строительной техники и оборудования для предприятий стройиндустрии» между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ФГБОУ ВО «СПбГАСУ».....175
2. Технический акт внедрения научно-исследовательской работы от 23.08.2018.....179
3. Договор о творческом сотрудничестве от 12.03.2015 по теме «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство» между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон».....182
4. Акт выполнения работ по договору творческом сотрудничестве от 12.03.2015 по теме: «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон».....186

ДОГОВОР**о творческом сотрудничестве**

г. Санкт-Петербург "20" ноября 2017 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (сокращенное наименование – СПбГАСУ), в лице проректора по научной и инновационной деятельности Смирнова Евгения Борисовича, действующего на основании доверенности № 97 от 27.03.2017 г. с одной стороны, и Закрытое акционерное общество Научно-исследовательское и проектно-конструкторское бюро «Стройтехника» (ЗАО НИПКБ «Стройтехника»), в лице заместителя генерального директора по научной и проектно-конструкторской работе Вяткина Георгия Михайловича, действующего на основании генеральной доверенности от 09.01.2017 г. с другой стороны, именуемые в дальнейшем «Стороны», заключили настоящий Договор о нижеследующем:

1. Целью двустороннего сотрудничества является **Разработка и внедрение инновационной строительной техники и оборудования для предприятий стройиндустрии.**

2. Для достижения указанной цели Стороны договорились объединить усилия для проведения следующих научно-исследовательских работ по созданию:

2.1. Инновационного оборудования (виброконусные мельницы и вибромеханоактиваторы) для измельчения и механоактивации твердых нерудных материалов.

2.2. Инновационного оборудования для производства микробетона на основе тонкого вибропомола песчано-цементных смесей.

2.3. Инновационных устройств для гашения (предотвращения) резонансных колебаний вибромашин, возникающих в периоды их пуска и останова.

2.4. Эффективного оборудования для классификации и обогащения сухим методом заполнителей цемента – и асфальтобетонных смесей и сухих строительных смесей (пнеumo- и вибропнеumoклассификаторы, виброударные грохоты, сушилки, охладители и обеспыливатели виброкипящего слоя).

2.5. Инновационного оборудования (обжиговая печь виброкипящего слоя) для получения методом обжига сырьевой смеси из отходов щебеночных карьеров и др., пористых заполнителей для производства легких бетонных изделий и конструкций с высокими теплоизоляционными свойствами.

2.6. Инновационного оборудования для бетонных и асфальтовых заводов: вибродозаторов непрерывного действия, гранулометров и других устройств, основанных на контактно-динамическом способе определения массы движущегося слоя сыпучей среды.

2.7. Для заводов сухих строительных смесей (ССС) инновационного виброфасовщика для упаковки СССР в клапанные бумажные мешки.

2.8. Для заводов СССР инновационного робота-манипулятора для укладки мешков СССР на поддоны.

3. Исходя из поставленных целей, стороны согласовали следующие условия по договору:

- 3.1. Настоящий договор не накладывает на подписавшие его Стороны финансовых обязательств. Все расходы, связанные с объединением усилий Сторон по выполнению намерений и обязательств, принятых друг перед другом по настоящему Договору, несёт каждая Сторона из собственных средств.
- 3.2. По ходу работ по настоящему Договору Стороны по обоюдному согласению могут расширить круг обозначенных выше задач и обязательств друг перед другом с заключением дополнительного соглашения к настоящему договору.
- 3.3. Настоящий договор является предпосылкой для заключения, в случае, если Стороны сочтут это необходимым, конкретных хозяйственных договоров на проведение НИР, выполнения проектных или ОКР, изготовление и внедрение оборудования и т.п.).

3.4. Стороны договорились:

- Не реже 1 раза в квартал проводить совещание (семинары, обсуждения), в том числе с привлечением заинтересованных лиц и организаций для обсуждения упомянутых задач и согласования совместных усилий по их разрешению;
- По согласованной программе налаживать творческие связи с третьими лицами и информировать друг друга о результатах таких контактов;
- Обмениваться имеющимися в их распоряжении информационными материалами и публиковать информацию о достигнутых результатах работ по Договору в открытой печати и на сайтах своих организаций с обязательным упоминанием участника другой Стороны;
- Каждая из Сторон для выполнения работ по Договору может передать по Акту другой Стороне или в обоюдное временное пользование Сторон принадлежащие ей материальные в том числе технические ценности (экспериментальные стенды, приборы, помещение и пр.) без арендной платы и на возвратной основе;
- При невозможности по каким-либо причинам одной из Сторон исполнять принятые на себя обязательства она обязуется уведомить об этом другую Сторону и в этом случае по истечению одного месяца с момента упомянутого уведомления каждая из Сторон может воспользоваться правом свободного выхода из Договора (Договор досрочно расторгается) и вернуть технические и другие материальные средства, предоставленные ей в распоряжении другой Стороны для выполнению работ по настоящему Договору. Ни одна из Сторон не может препятствовать свободному выходу из Договора и возврате материальных ценностей другой Стороны и предъявлять в этом случае какие-либо претензии к неисполнению другой Стороной обязательств по настоящему Договору.

4. Обязательства Сторон по выполнению работ по Договору.

4.1. Обязательства ЗАО НИПКБ «Стройтехника»:

- Передать во временное обоюдное пользование экспериментальные стенды для виброактивации заполнителей бетонов, сушки и обеспыливания, виброплощадка с пультом управления и преобразователем частоты на 2, 5 кВт, пылесос Makita 448, вентилятор, преобразователь частоты на 5 кВт, и пр. оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ по обогащению сыпучих материалов;

- Оснастить основными контрольно-измерительными приборами экспериментальные стенды для контроля параметров их работы (комплект виброизмерительной аппаратуры ВИ-6, датчики ускорений ДИ, источник питания НУ-3005-2, стробоскопический тахометр СТ-5, микроанометры с трубками Пито-Прандтля и пр. оборудование и приборы);
- Участвовать в монтаже, наладке экспериментальных стендов и выполнении экспериментальных работ, предусмотренных договором;
- Участвовать в разработке программ и методик проведения экспериментальных работ для решения каждого вида задач, предусмотренных отдельно договором;
- Принимать участие в проведении лабораторных испытаниях полученных модифицированных материалов;
- Участвовать в проектных и ОКР, подготовки отчётов по НИР, внедрении результатов работ, предусмотренных договором и поиске потенциальных Заказчиков;
- Участвовать в разработке методики расчета проектировании новых стендов, экспериментальных и опытных образцов машин, механизмов и параметров сложных динамических процессов с использованием пакетов программ AnsysMechanical (v18), MSC.ADAMS 2017 и Rocky 4.
- Соблюдать порядок и общие режимные правила, предусмотренные в СПбГАСУ.

4.2. Обязательства СПбГАСУ:

- Выделить помещение (часть помещения) для размещения экспериментальных стендов и проведения экспериментальных работ площадью 40÷50 м²;
- Участвовать в монтаже, наладке экспериментальных стендов и выполнении экспериментальных работ, предусмотренных договором;
- Обеспечивать на безвозмездной основе всем необходимым для проведения экспериментальных работ, включая подключение и энергоснабжение экспериментальных стендов, а также предоставление компьютерной техники и программного обеспечения для записи и обработки контролируемых данных, расчета и моделирования параметров исследуемых процессов с применением пакетов программ AnsysMechanical (v18), MSC.ADAMS 2017 и Rocky 4 и др.;
- Участвовать в разработке программ и методик проведения экспериментальных работ для решения каждого вида задач, предусмотренных договором;
- Комплектовать необходимыми контрольно-измерительными приборами и датчиками экспериментальные стенды в соответствии с принятыми программами и методиками проведения экспериментальных работ, предусмотренных договором;
- Проводить отбор проб полученных в ходе экспериментальных работ модифицированных материалов и проводить их испытания в лабораториях СПбГАСУ;
- Участвовать в проектных и ОКР, подготовки отчётов по НИР, внедрении результатов работ, предусмотренных договором и поиске потенциальных Заказчиков.

5. Заключительные положения Договора.

5.1. Настоящий Договор заключен на срок до 31.12.2020 г., с пролонгацией действия Договора по согласованию Сторон и вступает в силу с даты подписания обеими сторонами.

5.2. Настоящий Договор составлен на русском языке в двух экземплярах, по одному для каждой из Сторон. Оба экземпляра имеют равную юридическую силу.

5.3. Все изменения и дополнения к настоящему Договору действительны только при условии, если они совершены в письменной форме и подписаны обеими Сторонами.

5.4. Реквизиты Сторон:

ЗАО НИПКБ "Стройтехника"

ИНН 7808034243 КПП 784101001

191025, г. Санкт-Петербург,

Невский пр. д. 74

р/с 40702810325000001257

в ОПЕРУ-5 ОАО «Банк ВТБ в Санкт-Петербурге»
г. Санкт-Петербург

к/с 30101810200000000791

БИК 044030791

mail: stroitehnika1@mail.ru

тел./факс 812/321-63-81

СПбГАСУ

190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4,

ИНН 7809011023, КПП 783901001,

УФК по г. Санкт-Петербургу (СПбГАСУ, л/сч. 20726X57900)

р/сN40501810300002000001 в Северо-Западном ГУ Банка России, г. Санкт-Петербург, БИК 044030001

ОГРН 1027810225310, ОКТМО 40305000, ОКПО 02068580

От ЗАО НИПКБ «Стройтехника»

Зам. генерального директора по НИПКБ



Г. М. Вяткин

Ответственный исполнитель Договора

А. П. Скрипилов

От СПбГАСУ

Проректор по научной и инновационной деятельности



Е. Б. Смирнов

М.П.

Заведующий кафедрой НТТМ

С. А. Евтюков

Научный руководитель Договора

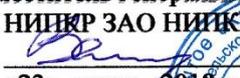
С. В. Репин

**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «СТРОЙТЕХНИКА»
(ЗАО НИПКБ «Стройтехника»)**

191025, г. Санкт-Петербург, Невский пр.д.74
тел./факс (812) 321-63-81, эл. адрес: stroitehnika1@mail.ru
ОКПО 13195577, ОГРН 1027809170355, ИНН/КПП 7808034243/784101001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
по НИПКБ ЗАО НИПКБ «Стройтехника»


Г.М. Вяткин
«23» марта 2018 г.



**ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ
научно-исследовательской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, представители ЗАО Научно-исследовательского и проектно-конструкторского бюро «Стройтехника» заведующий научно-исследовательским сектором А.П. Скрипилов и главный конструктор Б.И. Есипович, с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО СПбГАСУ профессор кафедры НТТМ С.В. Репин и аспирант В.С. Сизиков, с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов НИР по теме: «Разработка и внедрение инновационной строительной техники и оборудования для предприятий стройиндустрии» (раздел 2.1), выполняемой СПбГАСУ по договору о творческом сотрудничестве от 20 ноября 2017 года с ЗАО НИПКБ «Стройтехника» в период с 20 ноября 2017 года по 15 марта 2018 года.

Результаты выполненной работы:

1. На основе предложенного аспирантом СПбГАСУ Сизиковым В.С. инновационного способа и устройства для переработки сыпучих материалов виброобъемным способом (патент РФ № 2675554), а также созданной им программы «Виброоттирка» для расчета на ЭВМ конструктивных и режимных параметров двухмассового виброконвейера с двумя транспортирующими органами, деформирующими слой обрабатываемого материала в процессе его перемещения, в ЗАО НИПКБ «Стройтехника» совместно со специалистами СПбГАСУ была разработана и изготовлена экспериментальная установка и методика экспериментальных исследований процессов оттирки, а также механоактивации строительных песков методом виброобъемного деформирования слоя песка в процессе его транспортирования.

2. Результатом выполненных экспериментальных исследований явилось установление регрессионных зависимостей влияния параметров воздействия двух вибрирующих транспортирующих органов виброконвейера на обрабатываемый слой песка на величину создаваемых напряжений в слое при его деформировании, характеризующих качество обработки поверхности песка, скорость транспортирования

слоя двухмассовым виброконвейером и факторов, характеризующих продолжительность процесса обработки песка в установке и производительность установки. Также в результате экспериментов была выполнена идентификация параметров модели перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами установки и найдены численные значения упруго-вязких коэффициентов сопротивления слоя песка при его виброперемещении, что обеспечило практическую значимость программы для расчета на ЭВМ конструктивных и режимных параметров двухмассового виброконвейера, получившей название «Виброоттирка 1».

3. Применение программы «Виброоттирка 1» обеспечило определение рациональных параметров работы экспериментальной установки для решения практической задачи: изготовление двух опытных партий обогащенного крупного и мелкого песка и приготовления на их основе двух видов сухих строительных смесей (ССС) с целью оценки эффективности применения модифицированных предложенным методом оттирки и механоактивации песков в промышленном производстве по выпуску СССР по сравнению с сухими смесями, приготовляемыми на небогащенных песках с таким же фракционным составом того же месторождения. Данная работа выполнялась в соответствии с договором о творческом сотрудничестве по теме: «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон» 12 марта 2015 года (приложение №1) и проводилась на производстве по выпуску СССР ЗАО «Метробетон» сотрудниками СПбГАСУ, ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон». Проведенные сравнительные испытания сухих цементно-песчаных смесей марки М200, приготовленных с использованием механоактивированных песков (крупного и мелкого) и с использованием небогащенных исходных крупных и мелких песков, показали, что в первом случае по сравнению со вторым были достигнуты более высокие прочностные показатели строительной смеси, в частности испытываемые образцы смесей, приготовленные на каждом виде обогащенного песка, имели пределы прочности на изгиб и на сжатие выше на 10% по сравнению с образцами смесей, приготовленными на соответствующих видах небогащенного песка. Результаты, подтвердившие эффективность применения обогащенных песков предложенным инновационным методом оттирки и механоактивации песков, послужили основанием для решения ЗАО «Метробетон» о создании ЗАО НИПКБ «Стройтехника» совместно с СПбГАСУ промышленной установки для виброоттирки и механоактивации песков производительностью 20 т/ч (приложение №2).

4. По результатам выполненной НИР по данному договору аспирантом СПбГАСУ В.С. Сизиковым разработаны рекомендации по расчету и выбору режимов работы и конструктивных параметров инновационной оттирко-очистительной установки для обработки строительных песков виброобъемным методом при их вибротранспортировании двухмассовым виброконвейером (приложение 3), включающая методику и программу для

ЭВМ «Виброотгирка 1» для расчета параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами (приложение 4), которые приняты ЗАО НИПКБ «Стройтехника» для проектирования промышленного обогащительного оборудования для строительных песков и внедрения его в технологию строительного производства.

Приложения:

- Приложение №1. Договор о творческом сотрудничестве от 12.03.2015 по теме: «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон».

- Приложение №2. Акт от 26.12.2017 по выполнению работ по договору о творческом сотрудничестве от 12.03.2015 по теме: «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон».

- Приложение №3. Рекомендации по расчету по выбору режимов работы и конструктивных параметров отгирочно-очистительной установки.

- Приложение №4. Методика расчета на ЭВМ параметров перемещения слоя песка двумя вибротранспортирующими органами отгирочно-очистительной установки.

Представители
ЗАО НИПКБ «Стройтехника»:


_____ А.П. Скрипилов

_____ Б.И. Есипович

Представители
ФГБВОУ ВО СПБГАСУ:


_____ С.В. Репин

_____ В.С. Сизиков

ДОГОВОР

о творческом сотрудничестве

г. Санкт-Петербург

"12" марта 2015 г.

ЗАО «Метробетон» в лице генерального директора Кондратенко В.В., действующего на основании Устава, с одной стороны, и ЗАО НИПКБ «Стройтехника» в лице генерального директора Сизиков С.А., действующего на основании Устава, с другой стороны, заключили настоящее соглашение о нижеследующем:

1. Стороны исходят из того, что совместное приложение их творческих усилий может повысить эффективность и ускорить достижение следующей цели: «Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство».

2. Для достижения указанной цели Стороны договорились объединить усилия для решения следующих первоочередных задач:

- 2.1. Техничко-экономическая оценка (качество - затраты на вяжущее) экспериментальной партии ССС, приготовленной с использованием механоактивированного песка на стендах ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и смесителе действующего производства ССС ЗАО «Метробетон».
- 2.2. Техничко-экономическая оценка (качество - затраты на вяжущее) экспериментальной партии ССС (0,5 тонны), приготовленной с использованием механоактиватора песка с поверхностью, покрытой нанослоем цемента, приготовленной на стендах ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и смесителе действующего производства ССС ЗАО «Метробетон».
- 2.3. Стендовые испытания виброфасовщика ССС в бумажные мешки.
- 2.4. Стендовые испытания дозаторов вибрационного и проходного типа для порционного дозирования (до 0,5 тонны и более) заполнителей и вяжущих для технологии производства бетона и ССС.
- 2.5. Стендовые испытания робота-манипулятора для укладки мешков ССС на поддон.
- 2.6. Стендовые испытания манипулятора для автоматического «одевания» на штуцер фасовщика бумажных мешков.

3. Общие условия по договору:

- 3.1. Настоящий договор не накладывает на подписавшие его Стороны ни финансовых, ни правовых обязательств. Все расходы, связанные с объединением усилий Сторон

по выполнению намерений и обязательств, принятых друг перед другом по настоящему Договору, несёт каждая Сторона из собственных средств.

3.2. По ходу работ по настоящему Договору Стороны по обоюдному соглашению могут расширить круг обозначенных выше задач и обязательств друг перед другом с заключением дополнительного соглашения к настоящему договору.

3.3. Настоящий договор является предпосылкой для заключения, в случае, если Стороны сочтут это необходимым, конкретных договоров (на проведение НИР, поставки, о совместной деятельности и т.п.).

3.4. Стороны договорились:

- Не реже 1 раза в квартал проводить совещание (семинары, обсуждения) с привлечением заинтересованных лиц и организаций для обсуждения упомянутых задач и согласования совместных усилий по их разрешению;
- По согласованной программе налаживать творческие связи с третьими лицами и информировать друг друга о результатах таких контактов;
- Обмениваться имеющимися в их распоряжении информационными материалами и публиковать информацию о достигнутых результатах работ по Договору в открытой печати и на сайтах своей организации с обязательным упоминанием участника другой Стороны;
- Каждая из Сторон для выполнения работ по Договору может передать по Акту другой Стороне или в обоюдное временное пользование Сторон принадлежащие ей материальные в том числе технические ценности (технику, приборы, помещение и пр.) без арендной платы и на возвратной основе;
- При невозможности по каким-либо причинам одной из Сторон исполнять принятые на себя обязательства она обязуется уведомить об этом другую Сторону и в этом случае по истечению одного месяца с момента упомянутого уведомления каждая из Сторон может воспользоваться правом свободного выхода из Договора (Договор досрочно расторгается) и вернуть технические и другие материальные средства, предоставленные ей в распоряжении другой Стороны для выполнению работ по Договору. Ни одна из Сторон не может препятствовать свободному выходу из Договора и возврате материальных ценностей другой Стороны и предъявлять в этом случае какие-либо претензии к неисполнению другой Стороной обязательств по настоящему Договору.

4. Обязательства Сторон по выполнению работ по Договору.

4.1. Обязательства ЗАО НИПКБ «Стройтехника»:

- Передать во временное обоюдное пользование экспериментальные стенды для виброактивации заполнителей бетонов, их сушки, обогащения, классификации, измельчения, вибросмешивания, дозирования, фасовки ССС в мешки, манипуляторов и пр. оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ;

- Оснастить контрольно-измерительными приборами экспериментальные стенды для контроля параметров их работы;
- Произвести монтаж, наладку экспериментальных стендов и выполнить необходимые экспериментальные работы собственными силами;
- Разработать программу и методику проведения экспериментальных работ для решения каждого вида задач, предусмотренных договором;
- Принимать участие в проведении лабораторных испытаниях полученных модифицированных материалов;
- Организовать безопасные условия и охрану труда при проведении экспериментальных работ на стендах и нести ответственность за их соблюдением на территории размещения экспериментальных стендов. Соблюдать порядок и общие режимные правила, предусмотренные на предприятии ЗАО «Метробетон».

4.2. Обязательства ЗАО «Метробетон»:

- Принимать участие в проведении экспериментальных работ с целью контроля получения достоверных результатов.
- Осуществлять собственными силами проведение лабораторных испытаний модифицированных материалов, полученных при проведении экспериментальных работ;
- Проводить отбор проб полученных модифицированных материалов и проводить их испытания в лаборатории ЗАО «Метробетон»;
- Выделить помещение (часть помещения) для размещения экспериментальных стендов и проведения работ площадью $40 \div 50 \text{ м}^2$;
- Содействовать в проведении монтажа и пуско-наладки экспериментальных стендов;
- Обеспечивать в необходимых объёмах исходным материалом и сырьём для проведения экспериментальных работ, а также осуществлять подключение и энергоснабжение работы экспериментальных стендов на безвозмездной основе.

5. Заключительные положения Договора.

5.1. Срок действия Договора с 12.03.2015 по 31.03.2018 г., с пролонгацией действия Договора по согласованию Сторон.

5.3. Реквизиты Сторон:

ЗАО НИПКБ "Стройтехника"

ИНН 7808034243 КПП 784101001

191025, г. Санкт-Петербург,

ЗАО «Метробетон»

ИНН 7803033447 КПП

197349, г. Санкт-Петербург,

Невский пр. д. 74
 р/с 40702810325000001257
 в ОПЕРУ-5 ОАО «Банк ВТБ в Санкт-Петербурге»
 г. Санкт-Петербург
 к/с 30101810200000000791
 БИК 044030791
 e-mail: stroitehnikal@mail.ru
 тел./факс 812/321-63-81

ул. Ново-Никитинская, д. 17
 р/с 40702810880000002092
 в ОАО «Промстройбанк»
 г. Санкт-Петербург,
 ф-л «Удельный»
 к/с № 30101810200000000791
 БИК 044030791
 e-mail: office@metrobeton.ru
 тел./факс 812/320-42-22

От ЗАО НИПКБ «Стройтехника»

Генеральный директор



С. А. Сизиков

От ЗАО «Метробетон»

Генеральный директор



В.В. Кондратенко

АКТ

выполнения работ по договору о творческом сотрудничестве от 12.03.2015
по теме: «**Совершенствование технологии производства бетона, растворов и сухих строительных смесей (ССС) на основе экспериментальной оценки эффективности применения инновационной техники на стадии принятия решений по внедрению её в производство**», заключенного между ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и ЗАО «Метробетон»

г. Санкт-Петербург

«26» декабря 2017 года

Мы, нижеподписавшиеся, Заместитель генерального директора по НИПКР ЗАО НИПКБ «Стройтехника» Вяткин Г.М., действующий на основании Доверенности от 09.01.2017 г., с одной стороны, и Генеральный директор ЗАО «Метробетон» Кондратенко В.В., действующий на основании Устава, с другой стороны, составили настоящий Акт о нижеследующем:

1. В соответствии с настоящим договором (п. 2.1. «Технико-экономическая оценка экспериментальной партии СССР, приготовленной с использованием механоактивированного песка на стендах ЗАО НИПКБ «Стройтехника» и смесителе действующего производства СССР ЗАО «Метробетон»») Сторонами на участке производства сухих строительных смесей (ПССС) ЗАО «Метробетон» в сентябре 2015 г. был выполнен монтаж экспериментальной установки для оттирки и механоактивации песка, разработанной в ЗАО НИПКБ «Стройтехника». На данной установке в период с октября 2015 г. по декабрь 2017 г. аспирантом СПбГАСУ Сизиковым В.С. совместно с сотрудниками лаборатории ПССС ЗАО «Метробетон» проводились экспериментальные работы, целью которых являлось улучшение качественных характеристик СССР. При этом основная задача экспериментальных исследований заключалась в определении эффективных режимов обработки песков виброорганами установки, времени обработки песка и производительности процесса. Эксперименты проводились на двух видах песка: мелкого песка крупностью до 0,63 мм Лужского месторождения и крупного песка фракцией до 2,5 мм «Воронцовского» карьера ООО «ЦБИ». В результате исследований производительность процесса виброобработки песков на выбранных рациональных режимах работы экспериментальной установки составляла от 1,5 до 2 т/ч при продолжительности процесса обработки от 1,5 до 2 минут.

Проведенные сравнительные лабораторные испытания по ГОСТ 31357-2007 и ГОСТ 310.4-81 сухих цементно-песчаных смесей марки М200, приготовленных с использованием механоактивированных песков (крупного и мелкого) и с использованием необогащенных исходных крупных и мелких песков, показали, что в первом случае по сравнению со вторым были достигнуты более высокие прочностные показатели смеси, в частности испытываемые образцы затвердевших растворов, приготовленных на каждом виде обогащенного песка, имели пределы прочности на изгиб и на сжатие выше на 10% по сравнению с образцами, приготовленными на соответствующих видах необогащенного песка.

2. Основываясь на результатах проведенных экспериментов и положительных данных лабораторных испытаний, подтвердивших эффективность производства сухих строительных смесей с использованием в качестве заполнителей обогащенных песков, полученных методом их виброобъемной обработки в предложенной установке, Сторонами принято решение продолжить работы по созданию промышленной установки для виброоттирки и механоактивации песков производительностью до 20 т/ч и внедрению ее в технологию ПССС ЗАО «Метробетон» с целью повышения качества сухих строительных смесей и снижения потребления цемента, извести и других вяжущих при их производстве.

От ЗАО НИПКБ "Стройтехника"

ИНН 7808034243 КПП 784101001

191025, г. Санкт-Петербург,

Невский пр. д. 74, а/я 4

Заместитель ген. директора по НИПКР

ЗАО НИПКБ «Стройтехника»

Г.М.Вяткин



От ЗАО «Метробетон»

ИНН 7803033447 КПП 781401001

197349, Санкт-Петербург,

ул. Новое Никитинская, д. 17

Генеральный директор

ЗАО «Метробетон»

В.В.Кондратенко



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Технико-экономическое обоснование использования установки для обогащения очисткой поверхности зерен мелких заполнителей бетонов (песков)

Для оценки технико-экономических показателей эффективности внедрения новой (принимаемой в качестве новой техники (НТ)) установки для обогащения очисткой поверхности зерен мелких заполнителей бетонов (песков) в технологию предприятий дорожно-строительной и нерудной промышленности, занимающихся переработкой и обогащением каменных материалов, сравним показатели эффективности новой установки с основными технико-экономическими показателями горизонтальной оттирочно-очистительной машины производства ООО «Сибтехлит» [29], предназначенной для оттирки зерен природного песка от пленок и загрязняющих примесей (принимаемой в качестве базовой техники (БТ)).

Расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения новой установки выполнен в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [1, 6], а также действующими требованиями «Руководства по обогащению отсевов дробления и разнопрочных каменных материалов. М.: СОЮЗДОРНИИ, 1992 г.» [2], предназначенного для предприятий дорожно-строительной и нерудной промышленности, занимающихся переработкой и обогащением каменных материалов.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой установки определяется снижением капитальных затрат на ее приобретение и снижением себестоимости производства обогащенного строительного песка.

Основными характеристиками БТ – горизонтальной оттирочной машины конструкции ООО «Сибтехлит» – являются: установленная мощность двигателя 25,5 кВт, производительность по исходному сырью 10 т/ч, стоимость 2 437,5 тыс. руб.

Основные характеристики НТ – установки для обогащения очисткой поверхности зерен мелких заполнителей бетонов (песков) – определены расчетом капитальных и эксплуатационных затрат по применяемой в качестве аналога машине, по конструкции подобной НТ, приведением ее основных характеристик путем пересчета капитальных и эксплуатационных затрат к соответствующей производительности, массе и мощности электропривода. При этом при сравнении основных характеристик БТ и НТ принята производительность конструкции новой техники одинаковой с производительностью БТ, т.е. с величиной технической производительности $P_T=10$ т/ч. Также учитывая то, что конструкция инновационной установки для обогащения очисткой поверхности зерен песков (НТ) [8], представляет собой двухмассовый виброконвейер с двумя расположенными друг над другом вибротранспортирующими органами с установленными на каждом из них вибраторами, обеспечивающими их противофазные колебания в поперечном направлении и синфазные в продольном направлении, в качестве аналога обоих вибротранспортирующих органов НТ приняты два расположенных друг над другом виброконвейера одинаковой длины с упомянутыми органами НТ и аналогичной производительности. С учетом изложенного на основе рекомендаций по расчету и выбору основных параметров установки для обогащения очисткой поверхности зерен песков (см. раздел 4.1 настоящей диссертации) для обеспечения одинаковой с БТ производительности $P_T=10$ т/ч длина вибротранспортирующих органов установки, принятой в качестве НТ, должна составлять 6 м. В качестве аналога вибротранспортирующих органов НТ приняты два виброконвейера с длиной транспортирующего органа 6 м, при оценке параметров которых используются характеристики вибропитателя КВ1Т-0,15 производства ООО «Вибротехника» стоимостью 270 тыс. руб. с производительностью по песку до 12 т/ч, мощностью вибропривода 0,7 кВт, массой 124 кг и длиной транспортирующего органа 3 м. Принято, что параметры двух виброконвейеров длиной 6 м, выбранных в качестве аналога вибротранспортирующих органов НТ, соответствуют четырем вибропитателям КВ1Т-0,15 и обладают следующими техническими характеристиками:

производительностью по песку 10 т/ч, мощностью виброприводов 2,8 кВт, массой 496 кг, и соответствуют стоимости 1 080 тыс. руб.

При определении эксплуатационных затрат и прибыли от реализации готовой продукции в настоящем технико-экономическом расчете использованы данные (тарифы на электроэнергию, заработную плату и расценки на используемые материалы и производимую продукцию) для Северо-Западного

Таблица Г.1

№ п/п	Наименование	Единица измерения	БТ (Горизонтальная оттирочная машина песка ООО «Сибтехлит»)	НТ (Установка для обогащения поверхности мелких заполнителей бетонов (песков))
1	Годовой фонд времени работы техники	ч	3750	3750
2	Мощность привода	кВт	25,5	2,8
3	Оптовая цена	млн. руб.	2,438	1,08
4	Техническая производительность	т/ч	10	10

региона РФ, при этом согласно данным источника [4] стоимость строительного песка (исходный материал) и обогащенного строительного песка (готовая продукция) составляет соответственно 285 руб./м³ (427,5 руб./т) и 180 руб./м³ (270 руб./т).

1. Расчет годовой эксплуатационной производительности P_2 :

$$P_2 = P_3 T_2 K_{II},$$

где P_3 – часовая эксплуатационная производительность машины, ед. прод./ч ($P_3 = P_T K_T$, ед. прод./ч, где P_T – часовая эксплуатационная производительность машины, ед. прод./ч, K_T – коэффициент перехода от технической производительности к эксплуатационной); T_2 – годовой фонд времени работы техники, ч; K_{II} – коэффициент использования внутрисменного времени ($K_T = 1$, $K_{II} = 1$, $T_2 = 3750$ ч для классификационного оборудования, грохотов и др. [1]).

Для БТ и НТ: $\Pi_2^{BT} = \Pi_2^{HT} = 10 \cdot 1 \cdot 3750 \cdot 1 = 37\,500$ т/год.

2. Определение расчетно-балансовой стоимости C_B :

$$C_B = K_B C,$$

где K_B – коэффициент перехода от оптовой цены к расчетно-балансовой стоимости ($K_B=1,14$ для грохотов [1]); C – оптовая цена машины, руб.

Для БТ: $C_B^{BT} = 1,14 \cdot 2\,437\,500 = 2\,778\,750$ руб.;

для НТ: $C_B^{HT} = 1,14 \cdot 1\,080\,000 = 1\,231\,200$ руб.

3. Расчет текущих затрат S_{BT} и S_{HT} за год работы БТ и НТ.

$$S = S_{ЗП} + S_{AP} + S_{KP} + S_{ЭР} + S_{ЭЛ} + S_{СМ},$$

где:

$S_{ЗП}$ – затраты на заработную плату;

S_{AP} – затраты на амортизационные отчисления на реновацию техники;

S_{KP} – затраты на капитальный ремонт;

$S_{ЭР}$ – затраты на техническое обслуживание и текущие ремонты;

$S_{ЭЛ}$ – затраты на энергию;

$S_{СМ}$ – затраты на смазочные и материалы.

3.1. Затраты на заработную плату $S_{ЗП}$:

$$S_{ЗП} = \lambda T_2 \sum_{i=1}^N C m_i,$$

где λ – коэффициент перехода от тарифного фонда заработной платы к общему фонду с начислениями ($\lambda=1,4$ для строительных машин [1]); T_2 – годовой фонд времени работы техники, ч; N – количество рабочих в бригаде ($N=1$), $C m_i$ – часовая тарифная ставка рабочего, входящего в состав бригады, руб ($C m_i = 224,25$ руб./чел.ч. для рабочего 4-го разряда[9]).

Для БТ и НТ: $S_{ЗП}^{BT} = S_{ЗП}^{HT} = 1,4 \cdot 3750 \cdot 224,25 = 1\,177\,313$ руб.

3.2. Затраты на амортизационные отчисления на реновацию техники S_{AP} :

$$S_{AP} = \frac{Ц_B K_{AP}}{100},$$

где $Ц_B$ – расчетно-балансовая стоимость, руб; K_{AP} – нормы амортизационных отчислений ($K_{AP} = 12,2\%$ для грохотов [1]).

Для БТ: $S_{AP}^{BT} = 2\,778\,750 \cdot 12,2 / 100 = 339\,007$ руб.;

для НТ: $S_{AP}^{HT} = 1\,231\,200 \cdot 12,2 / 100 = 150\,206$ руб.

3.3. Затраты на капитальный ремонт S_{KP} :

$$S_{KP} = \frac{Ц_B A_{KP}}{100},$$

где $Ц_B$ – расчетно-балансовая стоимость, руб; A_{KP} – нормы амортизационных отчислений на капремонт ($A_{KP} = 5,6\%$ для грохотов в условиях двухсменной работы [1]).

Для БТ: $S_{KP}^{BT} = 2\,778\,750 \cdot 5,6 / 100 = 155\,610$ руб.;

для НТ: $S_{KP}^{HT} = 1\,231\,200 \cdot 5,6 / 100 = 68\,947$ руб.

3.4. Затраты на техническое обслуживание и текущие ремонты $S_{ЭР}$:

$$S_{ЭР} = H_p \cdot B_c,$$

где H_p – норма годовых затрат на ремонт и техническое обслуживание в процентах от восстановительной стоимости машин ($H_p = 0,083$ для стационарных машин с электроприводом для всех районов РФ кроме районов Крайнего Севера [3]); B_c – восстановительная стоимость машин (принята равной оптовой цене машины $Ц$ без учета затрат на доставку машины к потребителю, монтаж и пр. [7]).

Для БТ: $S_{ЭР}^{BT} = 0,083 \cdot 2\,438\,000 = 202\,354$ руб.;

для НТ: $S_{ЭР}^{HT} = 0,083 \cdot 1\,080\,000 = 89\,640$ руб.;

3.5. Затраты на энергию $S_{ЭЛ}$:

$$S_{ЭЛ} = C_{ЭЛ} W_{ЭЛ} T_2,$$

где $C_{ЭЛ}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб. ($C_{ЭЛ}=4,75$ руб./кВт·ч согласно [5]); $W_{ЭЛ}$ – расход электроэнергии, кВт·ч; T_2 – годовой фонд времени работы техники, ч.

$$\text{Для БТ: } S_{ЭЛ}^{БТ} = 4,75 \cdot 25,5 \cdot 3750 = 454\,218 \text{ руб.};$$

$$\text{для НТ: } S_{ЭЛ}^{НТ} = 4,75 \cdot 2,8 \cdot 3750 = 49\,875 \text{ руб.}$$

3.6. Затраты на смазочные материалы $S_{СМ}$:

$$S_{СМ} = 0,1vW_{ЭЛ}T_2,$$

где: v – стоимость смазочных и вспомогательных материалов на 10 кВт·ч расходуемой электроэнергии, руб. ($v=0,02 \cdot \mathcal{E}_{ЭЛ} \cdot 10$ [3], где $\mathcal{E}_{ЭЛ}=S_{ЭЛ}/T_2$ – показатель затрат на электроэнергию за 1 ч работы машины, руб./ч); $W_{ЭЛ}$ – расход электроэнергии, кВт·ч; T_2 – годовой фонд времени работы техники.

$$\text{Для БТ: } S_{СМ}^{БТ} = 0,1 \cdot 0,02 \cdot 454\,218 / 3750 \cdot 10 \cdot 25,5 \cdot 3750 = 231\,651 \text{ руб.};$$

$$\text{для НТ: } S_{СМ}^{НТ} = 0,1 \cdot 0,02 \cdot 49\,875 / 3750 \cdot 10 \cdot 2,8 \cdot 3750 = 2\,793 \text{ руб.}$$

3.8. Суммарные текущие затраты $S^{БТ}$ и $S^{НТ}$ за год работы БТ и НТ.

$$\text{Для БТ: } S^{БТ} = S_M^{БТ} + S_{ЗП}^{БТ} + S_{АП}^{БТ} + S_{КР}^{БТ} + S_{ЭП}^{БТ} + S_{ЭЛ}^{БТ} + S_{СМ}^{БТ} =$$

$$= 1\,177\,313 + 339\,007 + 155\,610 + 202\,354 + 454\,218 + 231\,651 = 2\,560\,153 \text{ руб.};$$

$$\text{для НТ: } S^{НТ} = S_M^{НТ} + S_{ЗП}^{НТ} + S_{АП}^{НТ} + S_{КР}^{НТ} + S_{ЭП}^{НТ} + S_{ЭЛ}^{НТ} + S_{СМ}^{НТ} =$$

$$= 1\,177\,313 + 150\,206 + 68\,947 + 89\,640 + 49\,875 + 2\,793 = 1\,538\,774 \text{ руб.}$$

4. Себестоимость производства продукции C БТ и НТ: $C = \frac{S}{\Pi_2}$,

где: S – суммарные текущие затраты, руб.; Π_2 – годовая эксплуатационная производительность машины, ед. прод./ч.

Для БТ: $C^{BT} = 2\,560\,153/37\,500 = 68,27$ руб.;

для НТ: $C^{HT} = 1\,538\,774/37\,500 = 41,03$ руб.

5. Выручка от реализации готовой продукции V :

$$V = C_G P_2,$$

где C_G – оптовая цена реализации готовой продукции, руб./т ($C_G=427,5$ руб./т); P_2 – годовая эксплуатационная производительность машины, ед. прод./ч.

Для БТ и НТ: $V^{BT} = V^{HT} = 427,5 \cdot 37\,500 = 16\,031\,250$ руб.

5. Прибыль от реализации готовой продукции P :

$$P = V - C_{II} \cdot P_2 - C \cdot P_2,$$

где: V – выручка годовая от реализации готовой продукции, руб.; C_{II} – оптовая цена закупки исходного материала ($C_{II}=270$ руб./т); C – себестоимость производства продукции БТ; P_2 – годовая эксплуатационная производительность машины, ед. прод./ч.

Для БТ: $P^{BT} = 16\,031\,250 - 270 \cdot 37\,500 - 68,27 \cdot 37\,500 = 3\,346\,125$ руб.;

для НТ: $P^{HT} = 16\,031\,250 - 270 \cdot 37\,500 - 41,03 \cdot 37\,500 = 4\,367\,625$ руб.

6. Годовой экономический эффект.

Годовой экономический эффект \mathcal{E} от внедрения НТ характеризуется прибылью P от реализации дополнительной продукции НТ:

$$\mathcal{E} = P^{HT} - P^{BT} = 4\,321\,500 - 3\,242\,625 = 1\,021\,500 \text{ руб.},$$

где P^{HT}, P^{BT} – прибыль от реализации готовой продукции БТ и НТ.

7. Срок окупаемости НТ:

$C_{ок} = C_B^{HT} / \mathcal{E} = 1\,231\,200 / 1\,021\,500 = 1,21$ года (или 1 год и 3 месяца),

где C_B^{HT} – расчетно-балансовая стоимость НТ; Э – годовой экономический эффект от внедрения НТ.

8. Техничко-экономические показатели

Таблица Г.2

№ п/п	Показатель	Единица измерения	БТ (Горизонтальная оттирочная машина песка ООО «Сибтехлит»)	НТ (Установка для обогащения поверхности мелких заполнителей бетонов (песков))
1	Капитальные вложения	млн. руб.	2,779	1,231
2	Эксплуатационная годовая производительность	т/год	37 500	37 500
3	Текущие затраты за год	млн. руб.	2,560	1,539
4	Себестоимость единицы продукции (1 т обогащенного строительного песка)	руб.	68,27	41,03
5	Годовая выручка от продажи продукции	млн. руб.	16,031	16,031
6	Годовая прибыль от продажи продукции	млн. руб.	3,346	4,368
7	Годовой экономический эффект	млн. руб	-	1,022
8	Срок окупаемости	год	-	1,21

Литература

1. Бауман В. А. Строительные машины: справочник в 2 т. //В.А. Бауман, Ф.А. Лапира. Т. 1. Машины для строительства промышленных, гражданских и гидротехнических сооружений и дорог. М.: Машиностроение, 1976. – 502 с.
2. Зимин М.А., Панфилов Ф.В., Матросов А.А., Афонин И.А. Руководство по обогащению отсеков дробления и разнопрочных каменных материалов. М.: СОЮЗДОРНИИ, 1992. – 66 с.
3. Методика определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов (Приложение к приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20 декабря 2016 г. № 999/пр) //Официальный сайт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: [сайт]. [2019]. URL: <http://www.minstroyrf.ru/docs/13182/> (дата обращения: 03.10.2019).
4. Прайс-лист на продукцию АО «ЛСР.Базовые» на условиях самовывоза при условии безналичного и наличного расчета от 18 сентября 2019 г. //: Сайт поставщика строительных материалов в Санкт-Петербурге АО «ЛСР. Базовые» [сайт]. [2019]. URL: <http://lsrbase.ru/assets/images/price/prajs-list-na-pesok-ot-18.09.2019.pdf> (дата обращения: 03.10.2019).
5. Распоряжение Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 24.12.2018 № 283-р «Об установлении тарифов на электрическую энергию, поставляемую населению и приравненным к нему категориям потребителей, по Санкт-Петербургу на 2019 год» //Официальный сайт администрации Санкт-Петербурга: [сайт]. [2019]. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/documents/2018/12/28/%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF_283-%D1%80_%D0%BE%D1%82_24.12.2018.pdf (дата обращения: 03.10.2019).
6. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений // Введ. 1978-12-13. М.: Госстрой СССР, 1979. – 52 с.

7. СНиП-МДС 81-3.2002 Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств и их пересчету в текущий уровень цен// М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России), 2002. – 107 с.

8. Способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления: пат. 2675554 Рос. Федерация: МПК В01F 3/18, В01F 11/00, В02С 19/18 / Сизиков В.С., Сизиков С.А.; заявитель и патентообладатель Сизиков В.С. – № 2016140584/05; заявл. 14.10.2016; опубл. 19.12.2018 Бюл. № 35. – 2 с.

9. Текущие тарифные ставки оплаты труда рабочих в строительстве на январь 2019 года //Официальный сайт администрации Санкт-Петербурга: [сайт]. [2019]. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/01/17/34/%D0%A2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%84%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B8__%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D1%8F%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%8C_2019.pdf (дата обращения: 03.10.2019).