

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И ТОРГОВЛИ
ИМЕНИ МИХАИЛА ТУГАН-БАРАНОВСКОГО»**

На правах рукописи

КОВАЛЕНКО АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 621.867.52

**ПРОЦЕСС ВИБРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС И
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЕГО ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

Специальность 05. 18. 12 – процессы и аппараты пищевых производств.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Соколов Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент

Донецк-2020

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 РАЗДЕЛ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ.....	11
1.1 Способы и средства транспортирования сыпучих масс на пищевых производствах.....	11
1.2 Классификация и структурные схемы вибрационных конвейеров	18
1.3 Обзор конструкций вибрационных конвейеров.....	25
1.4 Физико-механические свойства зерновых смесей.....	33
2 РАЗДЕЛ. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС ПО СТУПЕНЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ	39
2.1 Направления исследований диссертации.....	39
2.2 Разработка расчётной модели и принятие допущений.....	42
2.3 Закономерность целенаправленного перемещения зерновой массы на ступенчатом рабочем органе при его горизонтальных колебаниях....	59
2.4 Обоснование нового процесса виброперемещения зерновой массы по ступенчатой деке совершающей возвратно-поступательные движения в горизонтальной плоскости.....	72
2.5 Экспериментальное определение коэффициента внешнего трения зерновой массы по поверхности.....	79
3 РАЗДЕЛ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТЁРОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ» ИССЛЕДУЕТСЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВИБРОТРАНСПОРТЕРОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ	85

3.1	Общие подходы к определению эффективности рабочих процессов вибрационных конвейеров	85
3.2	Энергозатраты, связанные с сообщением колебательных движений рабочему органу вибрационного транспортера.....	92
3.3	Затраты потребляемой мощности при использовании гармонических колебаний ступенчатого рабочего органа в горизонтальной плоскости	96
3.4	Обоснование сохранности зерновой смеси от механических повреждений при транспортировании по деке ступенчатой конструкции.....	101
4	РАЗДЕЛ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ТРАНСПОРТЕРА СО СТУПЕНЧАТЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС.....	106
4.1	Обоснование выбора технологических параметров и режимов работы экспериментальной установки	106
4.2	Определение геометрических параметров ступени рабочего органа.....	107
4.3	Экспериментальный стенд для исследования вибротранспортирования зерновых масс.....	113
4.4	Экспериментальная проверка рациональности длины ступеней деки и соответствующего угла ее наклона.....	121
4.5	Экспериментальное определение общей средней скорости виброперемещения зерновой массы.....	124
5	РАЗДЕЛ. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	131
5.1	Обоснование основных направлений конструирования вибрационных транспортеров.....	131
5.2.	Одномерная ячеечная модель теории цепей Маркова для описания кинетики движения зернового материала на ступенчатой поверхности..	133
5.3.	Техническая реализация процессов перемещения сыпучих материалов горизонтальным вибрационным органом со ступенчатой поверхностью	136

5.4	Технико-экономическая оценка предлагаемых новых технических решений вибротранспортеров.....	149
	ВЫВОДЫ.....	152
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	174
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	178
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	200

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На любых современных производствах всегда существует необходимость транспортировки предметов производства в пределах своей территории и внутри цехов. Стремясь к увеличению объема и качества выпускаемой продукции, разных областей пищевой промышленности, постоянно повышаются темпы производства. Любое развитие требует, прежде всего энергетических затрат, с каждым годом потребности в электроэнергии возрастают. И при существующей форме национальной экономики нашего государства можно ждать возникновения серьезной энергетической проблемы.

Вибрационные транспортирующие машины имеют существенные преимущества перед многими другими видами транспортирующих машин [8, 49, 50, 52, 64, 69, 71, 89, 90, 91, 100-102, 114, 116]: простота конструктивного исполнения; минимальное число пар трения; удобство обслуживания; возможность герметизации рабочего органа и совмещение транспортирования с разными технологическими процессами; возможность перемещения продуктов, которые трудно транспортировать другими способами; возможность безперегрузочной транспортировки, самая большая оптимальная длина на один привод; возможность промежуточной загрузки и разгрузки конвейера; малые габариты по высоте; небольшой удельный расход энергии на перемещение груза; возможность создания уравновешенных конструкций, которые не передают колебания на фундамент; продолжительный срок службы.

Выбор оборудования на производствах проводится исходя из себестоимости, производительности, габаритных размеров, энергопотребления и др.

В связи с вышесказанным возникает необходимость в создании новых конструкций вибротранспортеров с рациональными режимами и параметрами работы. Разработка конструкций машин со ступенчатой поверхностью рабочего органа, который совершает гармонические колебания в горизонтальной плоскости, работающих с меньшим энергопотреблением будет

способствовать повышению производительности и снижению себестоимости пищевых продуктов, произведенных из зернового материала, и увеличению объёма их производства.

Связь работы с научными программами, планами. Работа содержит результаты исследований, выполненных автором по плану трех финансируемых госбюджетных тем: Д 2002-4 «Интенсификация рабочих процессов и улучшение эксплуатационных характеристик оборудования пищевых производств и общественного питания; Д 2006-3 «Улучшение виброакустических характеристик технологического оборудования пищевых производств» и Д 2009-3 «Научно-технические способы усовершенствования конструкций оборудования пищевых производств с целью улучшения их эксплуатационных характеристик».

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является научное обоснование направленного энергосберегающего процесса перемещения зерновых масс на ступенчатом горизонтальном органе вибрационного транспортёра и предложения по его технической реализации.

Для достижения основной цели необходимо решить ряд задач, а именно:

- выполнить системный анализ применения вибрационных транспортёров для перемещения зерновых масс, обратив особое внимание на использование ступенчатых рабочих поверхностей;
- разработать математическую модель процесса направленного перемещения ступенчатым рабочим органом вибрационного конвейера, которая позволила бы производить оценку его энергоёмкости при транспортировании различных зерновых материалов: пшеницы, фасоли, гороха и др.;
- получить аналитические зависимости, позволяющие назначить рациональные режимы работы вибрационного транспортёра, его упругие связи, мощность и частоту колебания;
- провести обоснование использования универсального стенда ВЭДС-10А для исследования процессов, происходящих при перемещении зерновых масс на горизонтальном ступенчатом рабочем органе;

- разработать методику экспериментальных процессов целенаправленного движения зерновых масс, провести экспериментальные исследования и выполнить численный анализ результатов исследований;

- на базе установленных закономерностей процессов перемещения зерновых масс ступенчатым рабочим органом при его горизонтальных колебаниях разработать технические предложения по созданию новых типов вибрационных транспортёров;

- оценить технико-экономические показатели предложенных новых технических решений вибрационных транспортёров со ступенчатым рабочим органом.

Объект исследования – технологические процессы, происходящие на ступенчатом рабочем органе горизонтального вибрационного транспортёра.

Предмет исследования – процессы целенаправленного перемещения зерновых масс с различными физико-механическими характеристиками на горизонтальном вибрационном транспортёре со ступенчатым рабочим органом.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые установлены закономерности поведения одиночных зёрен на ступенчатых поверхностях с учётом их физико-механических характеристик и режима работы горизонтальных вибрационных транспортёрах;

2. Установлена взаимосвязь геометрических параметров ступеней рабочего органа с физико-механическими характеристиками транспортируемого материала при различных режимах работы горизонтального транспортёра;

3. Получены аналитические зависимости для назначения режимов работы вибрационного транспортёра, которые обеспечивают заданные направления движения зерновой массы различных продуктов: пшеницы, гороха, фасоли и др.;

4. Предложены и обоснованы технические решения горизонтальных вибротранспортёров, обеспечивающих перемещение зерновой массы с минимальными энергозатратами.

Практическая ценность работы заключается в разработке новых конструкций вибрационных транспортеров для зерновых масс, работающих с более низким энергопотреблением, в отличие от существующих вибрационных транспортеров и обеспечивающих такую же технологическую производительность.

В работе предложена схема вибрационного транспортера для реализации рациональных режимов и параметров его работы. А также экспериментально были апробированы конструкции вибротранспортеров ступенчатого типа с горизонтальным направлением колебаний рабочего органа.

Результаты научных исследований защищены четырьмя патентами: № 26133, № 40430, № 40740, №96293.

Результаты работы внедрены на трех производственных предприятиях (Днепропетровский пивоваренный завод «ДНЕПР», производственно-торговый комплекс «ШАХТЕР», общество с ограниченной ответственностью производственный комплекс «Млин»).

Методы исследования. Теоретические исследования в работе базировались на теории виброперемещения твердых тел [12, 13, 37, 116], методах математического моделирования виброперемещения зернового слоя с применением пакета MathCAD.

Экспериментальные исследования проводились с применением серийно изготавливаемой измерительной аппаратуры: универсального стенда измерения вибрации ВЭДС-10А, пульта управления СУПВ-0,1А, генератора ГЗ-34 и осциллографа С1-5. Исследования базировались на методах прямого сравнения аналитических и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- разработка нового режима виброперемещения зерновых масс на ступенчатом рабочем органе при его горизонтальных колебаниях;
- модель нового режима виброперемещения зерновых масс на ступенчатом рабочем органе при его горизонтальных колебаниях;

- обоснование энергосбережения при использовании продольных колебаний ступенчатого рабочего органа в горизонтальной плоскости при угле направленности колебаний $\beta=0$.

- результаты аналитического исследования виброперемещения частицы продукта по ступенчатой поверхности при вибрации деки в горизонтальной плоскости;

- зависимости средней скорости виброперемещения от кинематических параметров рабочего органа при различных углах наклона ступени;

- разработка конструкций вибротранспортеров со ступенчатыми рабочими органами для зерновых масс, работающих на энергосберегающих режимах с учетом полученных экспериментальных данных;

- внедрение результатов исследований в производство и их социально-экономическая эффективность.

Личный вклад соискателя. Опубликованные научные труды, которые явились основанием для написания диссертации, публиковались непосредственно автором и в соавторстве с другими учеными.

Непосредственно автором данной работы:

- Разработана математическая модель виброперемещения зерновой массы при горизонтальных колебаниях рабочего органа;
- Получены аналитические выражения для определения этапов перемещения при вибрационном движении, максимальной высоты полета, средней скорости виброперемещения и производительности вибрационного конвейера нового типа;
- Созданы экспериментальные образцы вибротранспортеров, а также, планирование и проведение экспериментов.

Апробация диссертационной работы. Основные положения работы и отдельные результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях разного уровня: «Техника и технология пищевых производств» (г. Могилев, 2006 г); «Удосконалення процесів і обладнання харчових виробництв» (г. Донецк, 2006 г.); «Наукові здобутки молоді –

вирішення проблем харчування людства у ХХІ столітті», (г. Киев, 2007 г.); «Інноваційні енерго- й ресурсозберігаючі технології та обладнання в хлібопекарській, кондитерській, макаронній, харчоконцентратній галузях харчової промисловості» (г. Киев, 2008 г.); «Обладнання та технології харчових виробництв» (г. Святогорск, 2009 г.); XLIV научная и учебно-методическая конференция (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); научно-практической конференции преподавателей и аспирантов Донецкого национального университете экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского «Процессы и оборудование пищевых производств» (г. Донецк, 2010-2017 г.), международной научно-практической конференции «Молодёжный форум: технические и математические науки» (Воронеж, 2015 г.); Всероссийский конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, 2016 г.); международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество студентов по процессам и оборудованию пищевых производств» (Донецк, 2016 г); международной научно-практической конференции «Социально-экономическое развитие России: актуальные подходы и перспективные решения» (Краснодар, 2017 г.); научно-практическая конференция «Образование, наука и молодежь 2017» (Керчь 2017г.); III Международная научно-практическая конференция «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» (Донецк, 2018 г); XII Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилёв, 2018 г.).

Публикация. По материалам диссертационной работы опубликовано 30 научных работ, из них 11 статей в специализированных изданиях и получено четыре патента.

1. РАЗДЕЛ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ

1.1. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАСС НА ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Транспортирование сыпучих масс осуществляется конвейерным способом и пневмотранспортированием.

На пищевых производствах конвейерный способ транспортирования сыпучих продуктов осуществляется на ленточных, скребковых, ковшовых, винтовых, инерционных, вибрационных и гравитационных транспортерах, а пневмотранспортирование – с помощью установок пневмотранспорта [2, 8, 32, 36, 38, 39, 54-57, 64, 75, 69, 85, 89, 90, 104-107, 114, 132, 141-149].

Ленточные конвейеры (ленточные транспортеры) получили широкое распространение благодаря своей универсальности [2, 6, 38, 49, 50, 64, 69, 85, 89, 104, 102, 114, 132, 147]. Эти устройства применяют для транспортировки грузов по горизонтальным и комбинированным трассам, они представляют собой непрерывно движущуюся конвейерную ленту. В зависимости от типа роlikоопор конвейерная лента имеет плоскую или желобчатую форму. Необходимое натяжение конвейерной ленты обеспечивает натяжная станция.

При необходимости, ленточные конвейеры оснащают вспомогательным оборудованием, обеспечивающим их эксплуатацию в заданном режиме и создающим условия для нормальной и надежной работы всех механизмов: загрузочных, центрирующих и очистных устройств, средств контроля пробуксовки, целостности и обрыва ленты, устройств для уборки просыпавшихся грузов и пылеподавления, аппаратуры автоматического управления, сигнализации и др.

Все ленточные конвейеры, независимо от их параметров и угла наклона, должны быть оснащены тормозными устройствами, а устанавливаемые с углом наклона более 6° , должны иметь, кроме тормозных устройств и, остановки.

Длина ленточного конвейера может составлять от 1...2 м до 1 км и более, производительность – от нескольких кубометров в час до нескольких тысяч кубометров, ширина ленты – от 0,4 до 1,8 м, скорость движения ленты – от 0,5 до 5 м/с.

Популярность ленточных конвейеров достигается благодаря таким их свойствам, как высокая производительность, обеспечиваемая скоростью движения ленты, низкие энергозатраты, простота конструкции, высокая надежность при продолжительной эксплуатации.

К недостаткам ленточных транспортеров относят высокое сопротивление движению ленты на опорных роликах, обусловленное провисанием ленты и трением её резиновой обкладки о ролики. Происходит повышение энергоёмкости транспортирования груза и снижение их срока службы. Стоимость ленты и роликов составляет соответственно около 50 и 30% общей стоимости транспортера.

Следует также отметить, что использование ленточных транспортеров затруднено при транспортировании пылевидных, горячих и тяжелых штучных грузов, а также при углах наклона трассы, превышающих $18 \dots 20^\circ$.

Конвейеры скребковые перемещают груз движущимися по желобу или трубе скребками [2, 6, 38, 49, 50 64, 69, 85, 89, 104, 102, 114, 132, 149]. Рабочей ветвью обычно является нижняя, реже - верхняя, иногда обе ветви. Скребки бывают штампованными из листовой стали или литыми, а желоба изготавливают металлическими, реже деревянными. Скребковые конвейера могут загружаться и разгружаться в любой точке по всей длине желоба. Применение скребковых конвейеров ограничено из-за измельчения грузов и быстрого износа желоба, особенно при перемещении абразивных материалов. Кроме того, для таких конвейеров характерен большой расход энергии. Скорость рабочего органа конвейера 0,16-0,5 и реже - 1,0 м/сек, производительность 50-350 т/ч.

Скребковые конвейера обычно применяются для перемещения груза на расстояния до 100 м.

Винтовые конвейеры предназначены для транспортирования грузов на расстояния до 40 метров [2, 8, 32, 38, 49, 50, 64, 69, 85, 89, 104, 102, 114, 132, 148]. Преимущество винтового конвейера относительно других видов конвейеров заключается в простоте конструкции и обслуживания, герметичности трассы - транспортирование грузов происходит в закрытом жёлобе, что обеспечивает защиту помещений от пылящих, остропахнувших, газирующих и горячих материалов. Также винтовые конвейеры могут применяться в качестве дозаторов материала в различных технологических цепочках.

В зависимости от условий различают следующие виды: конвейер напольный или подвесной. Напольные могут быть стационарными, передвижными или переносными.

Гибкий винтовой конвейер (безвальный) [146] представляет собой конвейер, альтернативный традиционному шнековому с внутренним валом. Материал подается с помощью спирали большой толщины, без внутреннего вала, которая скользит по поверхности с износостойким и стойким к трению покрытием по дну накопительного лотка. Лотки формы горизонтального швеллерного сечения производятся из углеродистой стали или из нержавеющей стали с соответствующей внешней обработкой. Сечение нижней части лотка немного шире, что позволяет разместить обшивку, которая удерживается на месте верхними боковинами лотка. На одном из краев лотка находится горловина вертикальной или конечной разгрузки. Со стороны двигателя шнек оснащен несущей пластиной, укрепленной у конца лотка для размещения на ней концевого подшипника в комплекте с валом с фланцевым соединением для спирали, транспортирующей материал. Установленный редукторный двигатель соответствует особенностям использования системы. Загрузка материала для транспортировки может производиться сверху на открытый лоток (стандартно) или через загрузочную горловину на присоединенную гайками крышку

(возможная опция), или сбоку через особое отверстие в лотке в зоне загрузки (возможная опция).

Пропускная способность для сыпучих масс до $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ максимальный угол наклона трассы конвейера - 90° ; максимальная длина прямой трассы (с одним питателем) - 25м; максимальная длина изогнутой трассы (с одним питателем) - 20м; максимальная высота подъема - 10м;

Спираль без внутреннего вала предоставляет более широкие возможности транспортировки спутанных материалов, которые имеют тенденцию создавать закупорки, или материалов с инородными включениями. Состав материала, большая толщина и конструктивные решения делают спираль особенно прочной и гарантируют долгий срок функционирования. В этой конструкции отсутствуют промежуточные опоры, которые могли бы создавать помехи движению материала и становиться причиной загромождений. Конвейер полностью закрыт, что позволяет избежать утечек материала; крышки с прокладками препятствуют проникновению запахов и попаданию любых веществ извне, тем не менее, гарантируют доступность для чистки внутренних поверхностей. Требования к техническому обслуживанию сведены к минимуму, и выбор покрытий может производиться из широчайшей гаммы вариантов с учетом специфических характеристик транспортируемого материала.

В качестве основного недостатка винтовых транспортеров следует отметить то, что материал, кроме поступательного движения в направлении оси транспортера, совершает вращательное движение в направлении окружной скорости шнека, что повышает энергозатраты и снижает их производительность, а в некоторых случаях может отрицательно повлиять на свойства груза.

Ковшовые элеваторы — это машины непрерывного действия, предназначены для перемещения сыпучих грузов различной фракции в вертикальном направлении или близком к нему [2, 6, 19, 22, 23, 38, 54-57, 74, 79, 85, 95, 104, 107, 115, 132, 141, 142, 145]. При величине фракции от 0 до 5 мм, рекомендуется применять ленточные элеваторы. При крупности от 5 до 30 мм применяются цепные.

Ковшовый элеватор состоит из металлической опорной конструкции с горизонтальными и вертикальными участками, на которых укреплены направляющие пути и звездочки - приводные, натяжные и поворотные.

Насыпной груз загружается в ковши в любом месте нижнего горизонтального участка и перемещается в них как на горизонтальных, так и на вертикальных участках конвейера без перегрузок. В качестве элемента передачи движения применяют ленты или цепи. Загрузка ковшей осуществляется либо зачерпыванием груза из нижней части кожуха элеватора, либо засыпанием груза в ковши. Элеваторы могут иметь разную скорость.

Преимуществом элеваторов является простота конструкции и возможность транспортировки материалов различных фракций различной влажности на значительную высоту.

К основным недостаткам ковшовых элеваторов относятся: несоответствие фактической и технической производительности из-за недостатков приемных и перегрузочных пунктов, что ведет к увеличению энергозатрат; повышенная запыленность в приемных и перегрузочных пунктах и просыпь сыпучей массы; чувствительность к перегрузке; обязательность равномерной подачи груза; необходимость устройства для предотвращения обратного хода при выключенном приводе.

Инерционные конвейеры служат для транспортирования сыпучих грузов на сравнительно короткие расстояния в горизонтальном или наклонном (до 20°) направлениях [2, 6, 36, 55-57, 74, 79, 95, 96, 105-107, 115, 144]. В инерционных конвейерах частицы груза скользят по грузонесущему органу или совершают полёты в пространстве под действием силы инерции. Инерционные конвейеры делятся на 2 группы: качающиеся, характеризующиеся значительными амплитудами и малой частотой колебаний, и вибрационные – с малой амплитудой и большой частотой колебаний.

В простейшем качающемся конвейере жёлоб находится на упругих стойках, жестко закрепленных на опорной раме под некоторым углом к вертикали. Кривошипный механизм с приводом от электродвигателя сообщает

желобу переменные по направлению движения. Желоб при движении вперед немного поднимается, а при движении назад опускается (качается). При этом меняется давление груза на желоб. При движении жёлоба назад груз скользит по нему вперёд, продвигаясь на некоторое расстояние.

На вибрационном конвейере грузу сообщаются несимметричные колебания. В результате плавного движения трубы конвейера вверх и резкого движения вниз происходит отрыв частиц груза от поверхности трубы и перемещение их вдоль неё. Производительность вибрационных конвейеров составляет от нескольких центнеров до нескольких сотен тонн в час, наибольшая длина - 100 м. Специальные типы вибрационных конвейеров применяют также для перемещения грузов вверх.

Основными достоинствами вибрационных конвейеров [2, 56, 57, 103, 106-107], обеспечивающими их эффективное применение в промышленности являются: отсутствие измельчения перемещаемого груза в процессе транспортирования; ничтожный износ грузонесущего органа; простота конструкции; практически полное отсутствие трущихся и быстроизнашивающихся деталей; легкость обслуживания и ухода; невысокая энергоемкость; безопасность эксплуатации; возможность загрузки и разгрузки в любой точке грузонесущего органа; возрастание эффективности при транспортировании под уклон. Приведем основные факторы, определяющие целесообразность применения вибрационного конвейера того или иного типа.

На предприятиях, где производится перемещение пылящих материалов, вибрационные конвейеры в герметичном исполнении оказываются во многих случаях наиболее рациональным видом транспорта, обеспечивающим безопасные и благоприятные условия труда для обслуживающего персонала.

Вибрационный транспорт оказывается целесообразным при перемещении высокоабразивных, горячих, корродирующих и других агрессивных материалов, так как принцип его работы и конструктивное выполнение, с одной стороны, обуславливают низкую интенсивность износа рабочего органа, а, с другой - позволяют принимать в особых случаях специальные меры такие, как установка

охлаждающих рубашек, применение устойчивых покрытий и пр. Перемещаемые вибрационными конвейерами насыпные грузы по гранулометрическому составу могут быть весьма различными: от мелкодисперсных (с размером зерна в пределах десятка микрон) до весьма крупнокусковых (диаметром более 1 м), а также штучные.

Простота осуществления автоматизации работы, т. е. регулирования режима транспортирования (скорость движения, интенсивность подбрасывания материала и т. д.) в соответствии с процессами сушки или охлаждения. На кондитерских фабриках, оптовых складах пищевой промышленности вибрационные конвейеры используют в программных системах для дозированной подачи разнообразных компонентов данного производства.

Возможность совмещения технологических процессов с одновременным перемещением груза.

Вибрационные конвейеры применяют для транспортирования на небольшое расстояние (не более 200 м). Наиболее целесообразно вибрационные конвейеры большинства типов применять для транспортирования на расстояние до 50 м, так как в этом случае могут быть использованы более простые в конструктивном отношении и более надежные в эксплуатации одноприводные транспортные установки.

Важным фактором является также направление транспортирования. Например, вибрационные конвейеры с винтовым желобом при перемещении грузов вертикально вверх на небольшую высоту (до 12 м на один привод) в ряде случаев успешно конкурируют с элеваторами и другими установками для вертикального транспортирования.

В то же время, в тех случаях, когда необходимо изменить направление транспортирования, можно применять только вибрационные конвейеры, допускающие реверсирование (электромагнитные и уравновешенные с эксцентриковым приводом).

На основании перечисленных достоинств для дальнейших исследований мы выбираем вибрационный конвейер, как наиболее перспективный.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ

При рассмотрении основных структурных схем вибрационных транспортирующих машин в качестве характеристических признаков имеют в виду число степеней свободы динамической системы вибрационной машины, ее привод и характеристику упругих связей [20].

В связи с тем, что особенности принципиального устройства вибрационных транспортирующих машин в значительной степени определяются типом используемого в них привода, структурные схемы рассматривают применительно к электромагнитным, пневматическим, центробежным, эксцентриковым и гидравлическим приводам.

Электромагнитные вибрационные транспортирующие машины в соответствии с числом приводов, делят на одноприводные и многоприводные [20]. Одноприводные машины бывают одномассные, двухмассные и трехмассные, многоприводные – одномассные и многомассные.

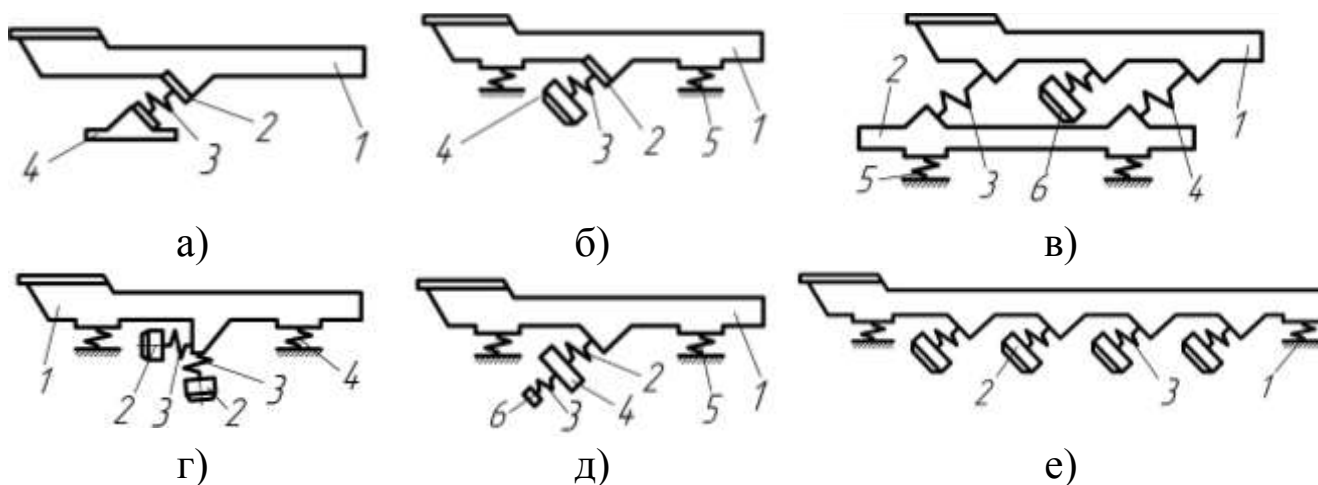


Рис. 1.1. Структурные схемы вибрационных транспортирующих машин с электромагнитным виброприводом

Структурная схема одномассной электромагнитной вибротранспортирующей машины представлена на рис. 1.1, а. К грузонесущему

органу 1 жестко прикреплена активная часть 2 электромагнитного вибровозбудителя. Упругие связи 3 соединяют активную часть с реактивной частью 4, неподвижно укрепленной на фундаменте. Колебания грузонесущего органа возбуждаются и поддерживаются электромагнитным вибровозбудителем. У вибротранспортирующей машины двухмассной системы (рис. 1.1, б) к грузонесущему органу 1 прикреплен электромагнитный вибровозбудитель, состоящий из активной 2 и реактивной 4 частей, со встроенными упругими связями 3. От несущих конструкций вибромашина изолирована с помощью виброизоляторов 5.

Одноприводная трехмассная электромагнитная вибротранспортирующая машина (рис 1.1, в) состоит из грузонесущего органа 1 с активной частью вибровозбудителя, реактивной части вибровозбудителя 6 с упругими связями, реактивной массы 2, вспомогательных рабочих упругих связей 3 и 4 и виброизоляторов 5.

Для реверсирования направления транспортирования используют специальный привод, состоящий из двух вибровозбудителей, направления колебания которых взаимно перпендикулярны. Реверсивная вибротранспортирующая машина (рис. 1.1, г) состоит из грузонесущего органа 1 с жестко закрепленными активными частями вибровозбудителей, реактивных частей двух вибровозбудителей 2 с упругими связями 3 и виброизоляторов 4.

К числу трехмассных относится вибротранспортирующая машина с динамическим виброгасителем, установленным на реактивной части вибровозбудителя. Гашение вибрации реактивной части позволяет уменьшить зазор между полюсами приводом электромагнитов и тем самым повысить полезную мощность привода. Машина, представленная на рис. 1, д, имеет грузонесущий орган 1 с жестко закрепленной на нем активной частью вибровозбудителя, основную упругую систему 2, соединяющую активную часть вибровозбудителя с реактивной частью 4, и динамический гаситель, состоящий из реактивной массы 6, соединенной упругими связями 3 с реактивной частью

вибровозбудителя. Грузонесущий орган устанавливают на несущих конструкциях с помощью виброизоляторов 5.

Многоприводная многомассная машина (рис. 1.1, е) имеет грузонесущий орган 1, на котором установлены электромагнитные вибровозбудители 2 с упругими связями 3.

Пневматические вибрационные транспортирующие машины (рис. 1.2) характеризуются наличием небольшого числа типов и выполняются обычно одноприводными, так как существующие конструкции пневматических вибровозбудителей не обеспечивают возможности синхронизации их работы [20]. Одномассная машина с вибровозбудителем (рис. 1.2, а) имеет грузонесущий орган 1, которому сообщаются силовые импульсы пневматическим вибровозбудителем 2, установленным на фундаменте, и упругие связи 3 к грузонесущему органу 1 двухмассной вибротранспортирующей машины (рис. 1.2, б) жестко прикреплен поршневой пневматический вибровозбудитель, состоящий из активной части 3 (цилиндра) и реактивной части 2 (поршня). Поршень под давлением сжатого воздуха совершает возвратно-поступательные движения.



Рис. 1.2. Структурные схемы вибрационных транспортирующих машин с пневматическим виброприводом

Эксцентрикковые транспортирующие машины имеют в приводе упругий элемент для сообщения необходимой подвижности динамической системе (рис. 1.3) и уменьшения вынуждающих сил.

Структурные схемы вибрационных транспортирующих машин с гидравлическим приводом аналогичны схемам, вибрационным транспортирующим машинам с эксцентрикковым приводом.

Одномассная вибрационная транспортирующая машина (рис. 1.3, а) имеет грузонесущий орган 1, установленный на фундаменте 2 с помощью упругих связей 3; колебания грузонесущему органу сообщаются эксцентриковым приводом 4 с упругим шатуном. Машины этого типа отличаются конструктивной простотой, однако вследствие того, что в них не уравновешены силы инерции колеблющихся частей, их привод подвержен действию больших динамических нагрузок. Недостатком их является также повышенный расход энергии на преодоление вредных сопротивлений, действующих в системе.

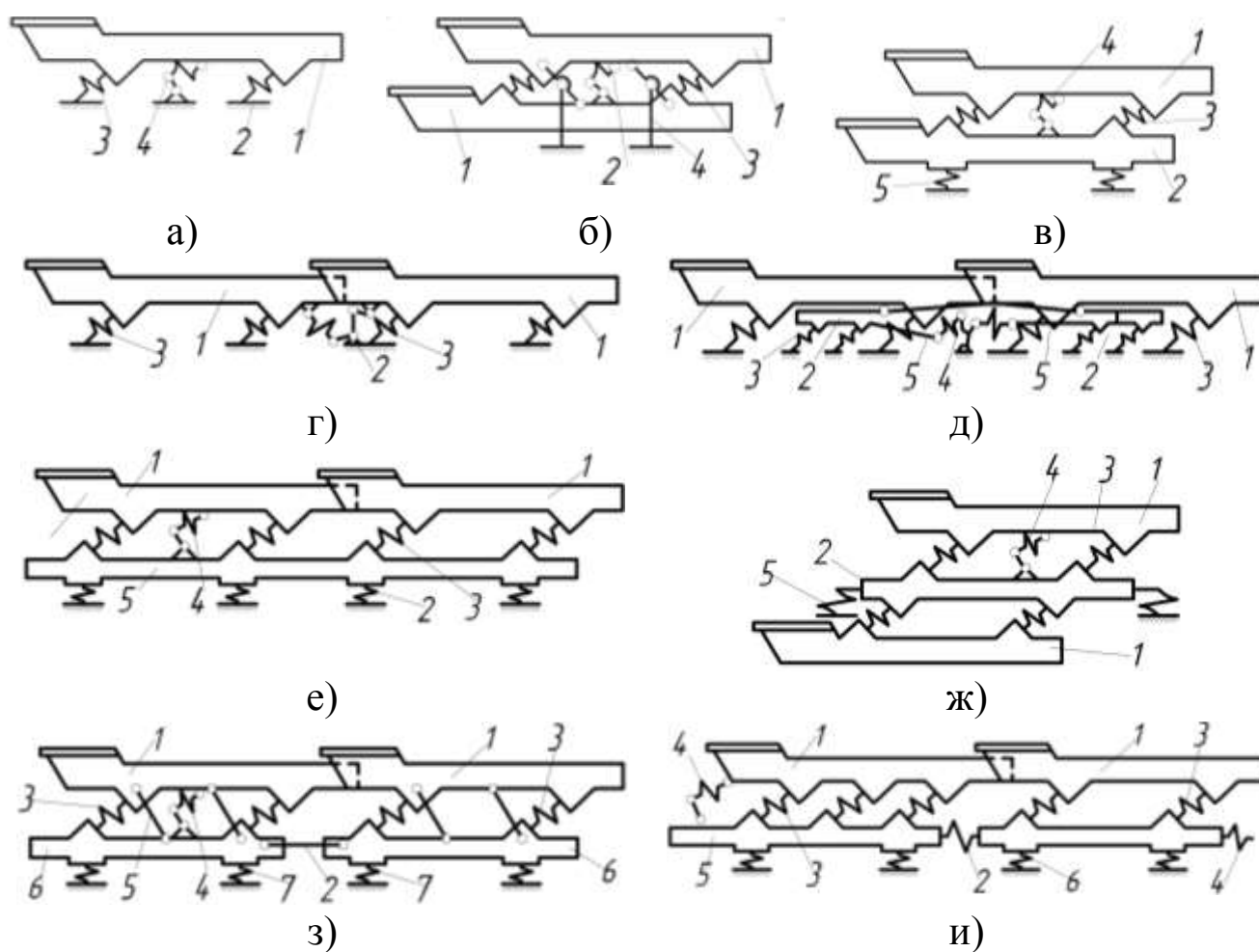


Рис. 1.3. Структурные схемы вибрационных транспортирующих машин с эксцентриковым виброприводом

Для разгрузки привода и устранения передачи динамических нагрузок на опорные конструкции применяют резонансные уравновешенные вибромашины.

Машина, опертая в неподвижной точке системы с эксцентриковым приводом, установленным на колеблющейся массе (рис. 1.3, б), состоит из двух грузонесущих органов 1 или грузонесущего органа и реактивной массы; эксцентрикового привода 2; рабочих упругих связей 3 и опорных стоек 4, крепящихся в неподвижной точке всей системы.

Наибольшее распространение имеют резонансные уравновешенные двухмассные машины. Виброизолированная двухмассная машина с параллельным расположением колеблющихся масс (рис. 1.3, б) состоит из грузонесущего органа 1 и реактивной массы 2, расположенных друг против друга; эксцентрикового привода 4 с упругим шатуном; рабочих упругих связей 3 и виброизоляторов 5.

В двухмассной машине с последовательным расположением колеблющихся масс (рис. 1.3, г) грузонесущие органы 1 расположены один за другим. Эксцентриковый вибропривод 2 сообщает им силовые импульсы, направленные в противоположные стороны, вследствие чего грузонесущие органы, опертые на фундамент на упругих связях 3, колеблются в противофазе, что обеспечивает уравновешивание горизонтальных составляющих сил инерции.

Более полное уравновешивание достигается в вибротранспортирующих машинах с последовательно-параллельным расположением колеблющихся масс (рис. 1.3, д). Каждая колеблющаяся масса состоит из грузонесущих органов 1 и вспомогательных балок 2, жестко соединенных друг с другом тягами 5. Колеблющиеся массы расположены так, что под первым грузонесущим органом находится вспомогательная балка второго грузонесущего органа. Грузонесущие органы и вспомогательные балки опираются через рабочие упругие связи 3 на станину. Машина имеет эксцентриковый вибропривод 4, шатуны которого соединяются с реактивными массами.

В трехмассной машине (рис. 1.3, е) с последовательным расположением грузонесущих органов и эксцентриковым приводом грузонесущие органы 1 опираются с помощью упругих связей 3 на уравновешивающую раму 5. Рама

установлена на виброизоляторах 2. Эксцентриковый вибропривод 4 соединен с одним из грузонесущих органов.

В трехмассной машине с параллельным расположением грузонесущих органов и эксцентриковым приводом (рис. 1.3, ж) грузонесущие органы 1 опираются с помощью упругих связей 3 на уравнивающую раму 2. Рама стоит на виброизоляторах 5. Один из грузонесущих органов соединен с эксцентриковым виброприводом 4. Второму грузонесущему органу колебания сообщаются через упругие связи.

Крупные вибрационные транспортирующие машины часто выполняют четырехмассными, состоящими из двухмассных секций (рис. 1.3, з, и). При этом привод устанавливают только на одной секции. Вторая секция приводится в действие реактивными силами. Четырехмассная машина с эксцентриковым приводом имеет две секции. Каждая секция состоит из грузонесущего органа 1, опорных стоек 5, реактивной массы 6 (рамы), установленной на виброизоляторах 7, и рабочих упругих связей 3, рамы обеих секций связаны друг с другом с помощью жесткой (рис. 1.3, з) или упругой (рис. 1.3, и) соединительной тяги 2. Эксцентриковый вибропривод 4 установлен на одной из секций.

Достоинством вибрационных транспортирующих машин, выполненных по данной структурной схеме, является возможность создания установок значительной длины. Система допускает простую передачу вынуждающей силы через соединительную тягу.

В центробежных вибрационных машинах (рис. 1.4) применяют приводы с направленной прямолинейной и вращающейся вынуждающей силой. В одноприводной одномассной вибротранспортирующей машине (рис. 1.4, а) грузонесущий орган 1 установлен на фундаменте с помощью упругих связей 2. Колебания грузонесущему органу сообщаются центробежным вибровозбудителем 3.

Одномассная вибротранспортирующая машина с центробежным виброприводом, опираемая в неподвижных точках системы (рис. 1.4, б), состоит из двух грузонесущих органов 1, соединенных между собой упругими связями 2

и корпусом центробежного вибровозбудителя 3. Опираение системы в неподвижных точках на несущую раму может производиться либо непосредственно, либо через виброизоляторы.

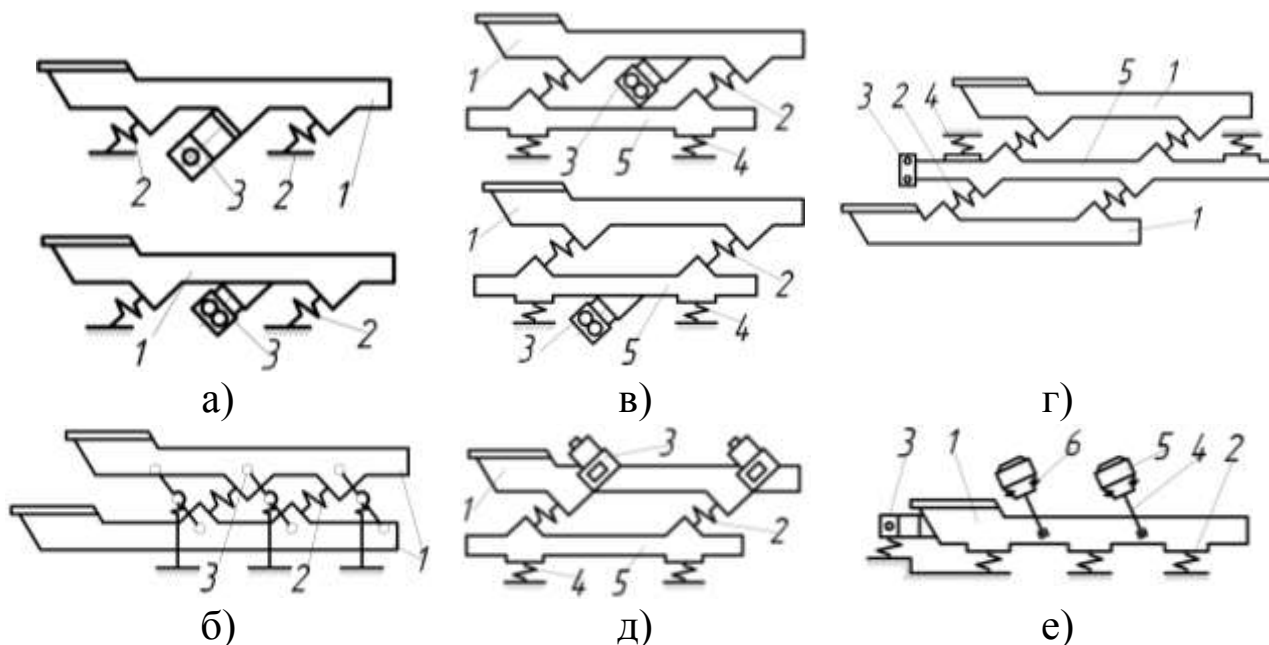


Рис. 1.4. Структурные схемы вибрационных транспортирующих машин с центробежным виброприводом

Двухмассная центробежная транспортирующая машина (рис. 1.4, в) имеет грузонесущий орган 1, вибровозбудитель 3, рабочие упругие связи 2 и виброизоляторы 4. В качестве реактивной массы может служить специальная тяжелая рама 5 или вибровозбудитель. Конструирование вибрационных транспортирующих машин по двухмассной структурной схеме открывает большие возможности в отношении создания резонансных установок с виброизоляцией и динамического уравнивания колеблющихся масс.

В трехмассной вибрационной транспортирующей машине с центробежным виброприводом (рис. 1.4, г) грузонесущие органы 1 опираются с помощью упругих связей 2 на несущую раму 5. Рама установлена на виброизоляторах 4. Привод вибромашины осуществляется вибровозбудителем 3, жестко закрепленным на несущей раме.

Многомассная машина (рис. 1.4, д) имеет несущую раму 5, на которой с помощью упругих связей 2 размещен грузонесущий орган 1. Рама установлена на виброизоляторах 4, привод осуществляется самосинхронизирующимися вибровозбудителями 3.

Многомассная машина (рис. 1.4, е) имеет грузонесущий орган 1, которому центробежным вибровозбудителем 3 с прямолинейно направленной вынуждающей силой сообщаются продольные колебания. На фундамент вибротранспортирующая машина опирается с помощью виброизолирующих упругих связей 2. Для придания грузонесущему органу колебаний под углом к его продольной оси вдоль него на рессорах 4 установлены реактивные массы 5 с упругими связями 6.

1.3. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ВИБРАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ

На основании проведенного обзора оборудования для транспортировки сыпучих масс конвейерным способом, можно выделить перспективное и оборудование с вибрирующим рабочим органом. Такой вид оборудования имеет значительные преимущества по сравнению с другими.

Наиболее широкое применение находят вибрационные транспортирующие машины, работающие в режиме прямолинейных гармонических колебаний.

Существует много конструктивных типов вибрационных конвейеров, которые можно классифицировать по различным признакам [2, 6, 19, 22-24, 36, 55-57, 74, 79, 95, 96, 105-107, 115, 144].

По направлению перемещения груза вибрационные конвейеры разделяют на горизонтальные, пологонаклонные и вертикальные.

По способу крепления грузонесущего элемента (желоба, трубы) различают виброконвейеры на свободных упругих подвесках-амортизаторах (подвесная, свободноколеблющаяся конструкция) и на наклонных направляющих стойках (опорная конструкция с наклонными направляющими упругими элементами). В опорной конструкции наклонные упругие стойки служат не только опорами

грузонесущего элемента, но и обуславливают направление его колебаний (желоб получает направленные колебания).

По числу одновременно колеблющихся масс в колебательной системе конвейера различают конвейеры одномассные, двухмассные и многомассные.

По характеру динамической уравновешенности виброконвейеры разделяют на уравновешенные и неуравновешенные.

По числу грузонесущих элементов различают виброконвейеры одноэлементные (т. е. одножелобные или однотрубные) и двухэлементные (двухжелобные, двухтрубные). Одноэлементные конвейеры могут иметь одинарный или сдвоенный грузонесущий элемент; в последнем случае грузонесущие элементы, например две параллельные трубы, жестко соединенные друг с другом, колеблются как единое целое. Такую конструкцию применяют, например, для одновременного транспортирования различных грузов.

По производственному назначению бывают вибрационные конвейеры, питатели и дозаторы, предназначенные для транспортирования груза; конвейеры-грохоты для одновременного транспортирования и распределения частиц груза по их крупности или отделения, например, литников или литья от земли, виброгрохоты для грохочения груза.

По характеристике и настройке упругих опорных элементов (колеблющейся системы) различают виброконвейеры с резонансной, дорезонансной и зарезонансной настройкой упругой системы.

1.3.1. ВИБРАЦИОННЫЕ КОНВЕЙЕРЫ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ПРИВОДОМ

В большинстве конвейеров используют привод, создающий прямолинейную вынуждающую силу, меняющуюся по гармоническому закону. Наиболее простыми в конструктивном отношении и надежными в эксплуатации

являются одноприводные, одномассные конвейеры, снабженные вибровозбудителями со встроенными электродвигателями.

Одномассные вибрационные конвейеры работают в резонансном режиме. В этом случае вследствие малой жесткости опорных пружин представляется возможность значительно снизить динамические нагрузки, передаваемые на опорные конструкции. Длина одноприводных конвейеров подвесной конструкции, как правило, не превышает 6 м. Длина конвейеров опорной конструкции несколько выше и в среднем составляет 10-14 м; в отдельных случаях обеспечивается удовлетворительная работа конвейеров опорной конструкции при длине до 35 м.

Широко используют конвейеры с центробежными виброприводами направленного действия. Такие конвейеры состоят из рабочего органа, центробежного вибровозбудителя, рабочей упругой системы и вспомогательных или виброизолирующих пружин (рис. 1.5). В двухмассных конвейерах вследствие резонансной настройки и динамической уравновешенности колеблющихся частей значительно увеличивается длина грузонесущего органа на один привод. Еще более значительное увеличение длины конвейера может быть обеспечено при установке на него нескольких вибровозбудителей, т. е. в многоприводной машине.

Весьма высокие конструктивно-технологические показатели имеют вибрационные конвейеры с реактивными массами. Конвейеры этого типа с центробежными вибровозбудителями выполняют двух модификаций. Принцип действия конвейера первой модификации состоит в следующем. Грузонесущему органу, свободно подвешенному или опертому на мягких винтовых пружинах, с помощью дебалансного вибровозбудителя со встроенными электродвигателями сообщают продольные колебания. При этом, соединенным с ним с помощью мягких рессор реактивным массам, также сообщаются колебания в горизонтальной плоскости, но направленные в противоположную сторону (со сдвигом фазы 180°).

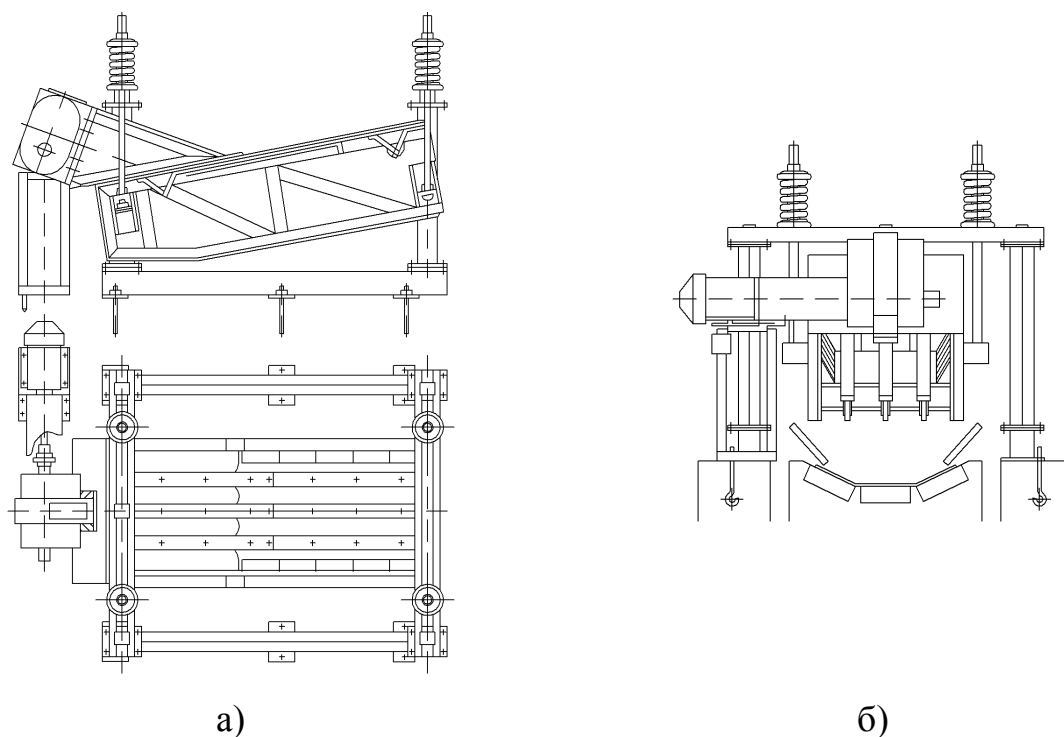


Рис. 1.5. Вибрационный конвейер-грохот центробежным виброприводом

Конструкция устроена так, что рессора соединяется с реактивной массой не непосредственно, а через резинометаллический упругий элемент, допускающий ее относительное перемещение вдоль рессоры. Жесткость резинометаллического упругого элемента подбирают таким образом, чтобы собственная частота системы была близка к частоте вынужденных колебаний. Так как рессора расположена не перпендикулярно к направлению колебаний грузонесущего органа, а под меньшим углом, возникает составляющая, которая возбуждает колебания реактивной массы вдоль рессоры. В свою очередь, возмущения, создаваемые на рессоре, обуславливают возникновение поперечных колебаний грузонесущего органа. Результирующие колебания грузонесущего органа складываются из его поперечных и продольных колебаний.

Конвейеры с реактивными массами выполняют как лотковой, так и трубчатой конструкции. На рис. 1.6, а приведен конвейер, имеющий грузонесущий орган 1, выполненный в виде желоба, к которому снизу с помощью пластинчатых рессор 2 прикреплены реактивные массы 3.

Грузонесущий орган через пружинные виброизоляторы 4 устанавливают на несущие конструкции. Привод конвейера осуществляется центробежным вибровозбудителем 5, который установлен в конце конвейера. Реактивная масса соединена с опорными рессорами с помощью резиновых упругих элементов, работающих на сдвиг и допускающих ее перемещение вдоль рессоры.

В вибрационном конвейере-грохоте, состоящем из центробежного вибровозбудителя 1, укрепленного на грузонесущем органе 2, реактивные части 3 жестко прикреплены к рессорам 4. Конвейер подвешен на опорной раме 5 с помощью винтовых виброизолирующих пружин 6. В процессе работы реактивная масса остается практически неподвижной, а относительно нее на рессорах совершает колебания грузонесущий орган.

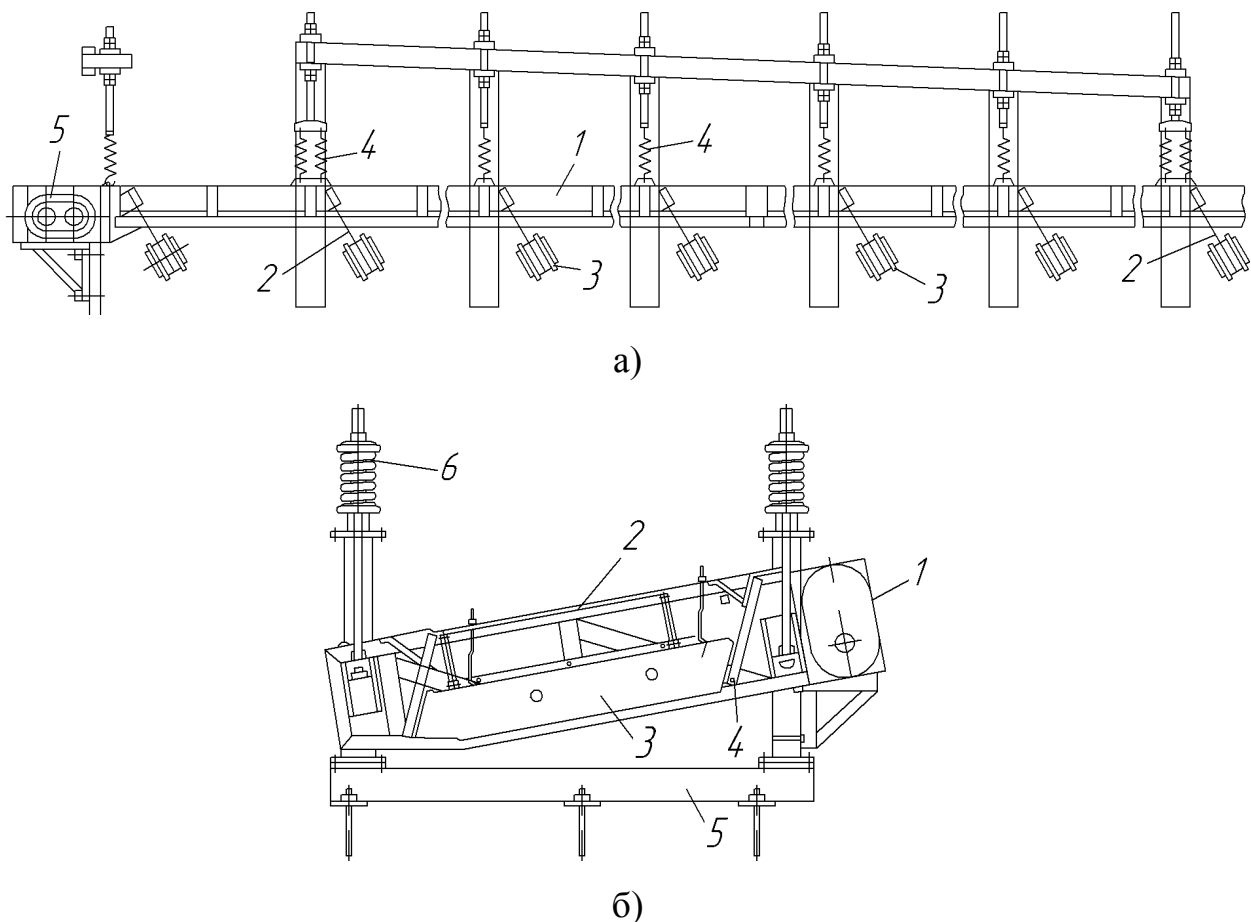
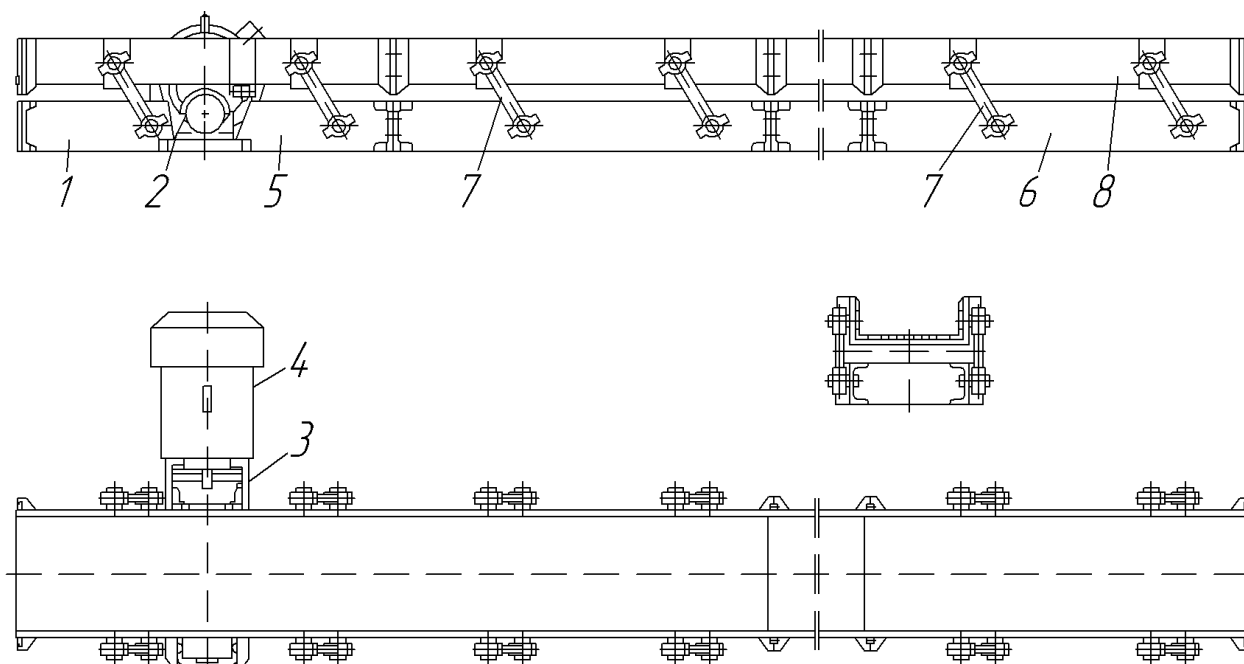


Рис. 1.6. Конвейеры с реактивными частями:

а - с упругим креплением;

б - с жестким креплением.

Эксцентрикковые конвейеры выполняют в основном уравновешенной конструкции, реже одномассные неуравновешенной. Неуравновешенные конвейеры с эксцентриковым виброприводом являются наиболее простыми в конструктивном отношении (рис. 1.7, а). Конвейер состоит из приводной и линейных секций. Приводная секция представляет собой усиленную линейную секцию с эксцентриковым приводным механизмом. На основной раме 1 смонтированы электродвигатель 4, редуктор 3 и эксцентриковый барабан 2. Барабан установлен на эксцентриковом валу, который смонтирован с одной стороны в корпусе редуктора, а с другой — в специальном корпусе, укрепленном на раме 5. На барабане закреплены два шатуна, соединяющиеся через резиновые упругие втулки с желобом, который прикреплен к раме четырьмя наклонно расположенными коромыслами.



а)

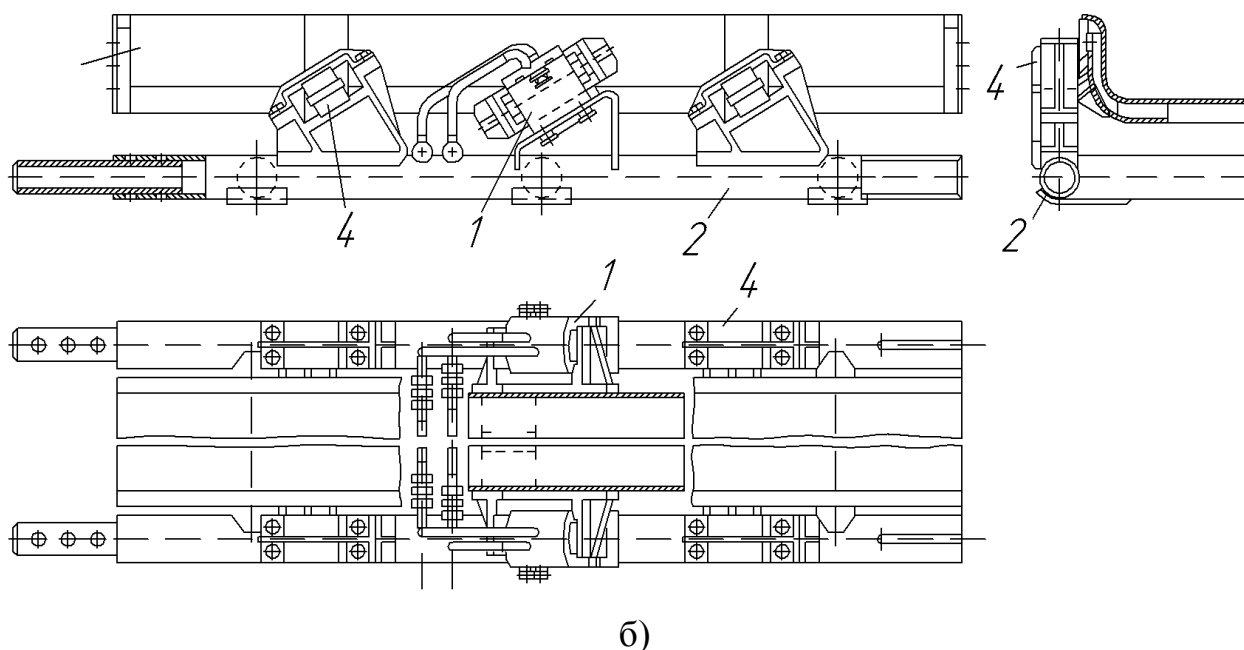


Рис. 1.7. Неуравновешенные вибрационные конвейеры с эксцентриковым и гидравлическим виброприводом:

а - с шатунной упругой системой; б - с резинометаллическими упругими элементами.

Линейная секция состоит из рамы 6 и желоба 8, установленного на ней на наклонно расположенных коромыслах 7. Зарезонансный режим работы и применение упругой системы в виде рычагов с резиновыми втулками обеспечивают в процессе эксплуатации устойчивую работу при переменных нагрузках, незначительную передачу динамических сил на опорную раму и исключают раскачивание конструкции при прохождении через резонанс.

Другая конструкция неуравновешенного виброконвейера с гидравлическим приводом представлена на рис. 1.7, б. В конвейере применена резиновая упругая система, работающая на сдвиг и сжатие; грузонесущий орган выполнен лотковой конструкции с усилительными ребрами. Конвейер состоит из гидравлических вибровозбудителей 1, установленных на трубчатой раме 2. Грузонесущий орган 3 лотковой конструкции установлен на раме с помощью резиновых упругих элементов 4, работающих на сдвиг.

Уравновешенный конвейер с эксцентриковым приводом состоит из двух грузонесущих органов, соединенных между собой пластинчатыми рессорами, установленными попарно с каждой стороны грузонесущего органа. Между рессорами каждой четвертой упругой подвески установлено по коромыслу с тремя резиновыми шарнирами. С помощью крайних шарниров шатун прикреплен к верхнему и нижнему грузонесущим органам. Средний шарнир служит для присоединения поддерживающих стоек опорной рамы. Привод расположен в средней части конвейера. Эксцентриковый вал прикреплен на нижнем грузонесущем органе, а шатуны присоединены к верхнему. Двигатель расположен над грузонесущими органами на специальной площадке.

Находят также применение эксцентриковые и гидравлические вибрационные конвейеры с продольным уравновешиванием колеблющихся масс.

1.3.2. ВИБРАЦИОННЫЕ КОНВЕЙЕРЫ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВИБРОПРИВОДОМ

Такие конвейеры разделяют по типу опорной системы на подвесные и опорные. Каждая секция желобчатого или трубчатого конвейера подвесной конструкции поддерживается двумя – четырьмя пластинчатыми или чаще винтовыми пружинами. Максимальная длина секции подвесного конвейера желобчатого типа составляет 2,5 м, трубчатого 3 м.

Если необходимо осуществлять транспортирование на большее расстояние, то последовательно друг с другом стыкуют необходимое число секций. Для обеспечения герметичности конвейера секции соединяют эластичными муфтами. Для увеличения длины отдельных секций конвейеров открытого типа их желоб делают коробчатой формы для придания большей жесткости, а также наваривают поперечные ребра жесткости.

Конвейеры опорной конструкции устанавливают с помощью пластинчатых или винтовых пружин на опорной раме или непосредственно на несущей конструкции. Такие конвейеры имеют большую длину отдельной секции:

максимальная длина секции желобчатых конвейеров составляет примерно 5 м; длина трубчатых конвейеров 6 м. Отдельные секции конвейеров можно устанавливать также на резиновых виброизоляторах.

Выпускают конвейеры, имеющие значительную длину, в которых на одном транспортирующем органе синхронно работает несколько вибровозбудителей.

1.4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ

Сыпучесть и самосортирование относят к физическим свойствам зерна. Зерновой материал состоит из множества отдельных твердых частиц, различных по размеру и плотности, поэтому обладает большой подвижностью - сыпучестью. Наибольшей сыпучестью обладают округлые зерна с гладкой поверхностью (просо, горох), у зерна продолговатого с шероховатой поверхностью сыпучесть снижается.

С сыпучестью связана способность зернового материала к самосортированию. При любом перемещении или встряхивании зерновой материал «расслаивается». Тяжелые компоненты - минеральная примесь, крупные зерна как бы «тонут», опускаются вниз, а легкие - органический сор, семена сорняков и щуплые зерна «всплывают». Это может оказать отрицательное влияние на сохранность, так как обычно семена сорных трав и щуплое зерно имеют повышенную энергию дыхания, что может привести к порче зерна при хранении. Способность зернового материала к самосортированию учитывается при отборе проб для анализов.

Скважистость - заполненные воздухом промежутки между зернами в насыпи. Обычно скважистость выражают в процентах к общему объему данной насыпи. Плотность укладки зернового материала в объеме хранилища и, следовательно, ее скважистость зависят от формы, размеров и состояния поверхности зерен, от количества и характера примесей, от массы и влажности зерновой насыпи, формы и размеров хранилища. Однородное по крупности зерно, а также зерно с шероховатой поверхностью имеют скважистость

большую, чем зерна разной крупности и округлой формы. Так, скважистость составляет (в %): ржи и пшеницы - 35 - 45, гречихи и риса (зерна) - 50 - 65, овса - 50 - 70.

Запас воздуха в межзерновых пространствах имеет большое значение для сохранения жизнеспособности семян. Большая газопроницаемость зерновых масс позволяет проводить активное вентилирование, регулировать состав газовой среды в межзерновых пространствах, вводить пары ядохимикатов для борьбы с амбарными вредителями. Однако наличие межзерновых пространств и кислорода в них благоприятствует развитию амбарных вредителей.

Сорбционные свойства зерна также относят к физическим. Зерно всех культур и зерновые материалы в целом обладают сорбционной емкостью, т. е. способностью поглощать газы и пары различных веществ. Эта способность зерна обусловлена его капиллярно-пористой структурой, что делает активную поверхность зерновки в 200 - 220 раз больше истинной. Кроме того, для биополимеров (белков, слизей, крахмала) характерно отсутствие прочной кристаллической решетки, поэтому молекулы воды и других веществ могут легко внедряться в них, взаимодействуя с активными центрами. При изменении условий окружающей среды зерно может частично отдавать поглощенные им вещества - десорбировать их. Однако полностью десорбция не происходит.

Явления сорбции принято подразделять на две группы: сорбция и десорбция различных газов и паров, кроме воды; гигроскопичность - сорбция и десорбция паров воды.

Способность зерна и продуктов его переработки активно сорбировать газы и пары различных веществ обязывает руководителей заботиться о чистоте транспорта и хранилищ, иначе продукты по вкусу и запаху могут стать непригодными для пищевых целей.

Ударная вязкость [63, 85] - механическая характеристика, оценивающая работу разрушения образца при ударном изгибе на маятниковом копре. В Международной системе единиц (СИ) ударная вязкость выражается отношением работы к площади поперечного сечения в месте надреза (кгс-м/см^2 или МДж/м^2).

По температурной зависимости ударной вязкости оценивают склонность материала к хрупкому разрушению.

Испытание на маятниковом копре основано на принципе измерения работы, затраченной на разрушении образца, путем сопоставления энергии физического маятника в момент удара с энергией, которой он обладает после удара.

Испытания на ударную вязкость маятниковым копром проводятся по методу Шарпи или Изода (рис. 1.8). Основным отличием методов Шарпи и Изода является способ установки испытуемого образца. При испытании по методу Шарпи образец не зажимают, а свободно устанавливают на опору в горизонтальном положении.

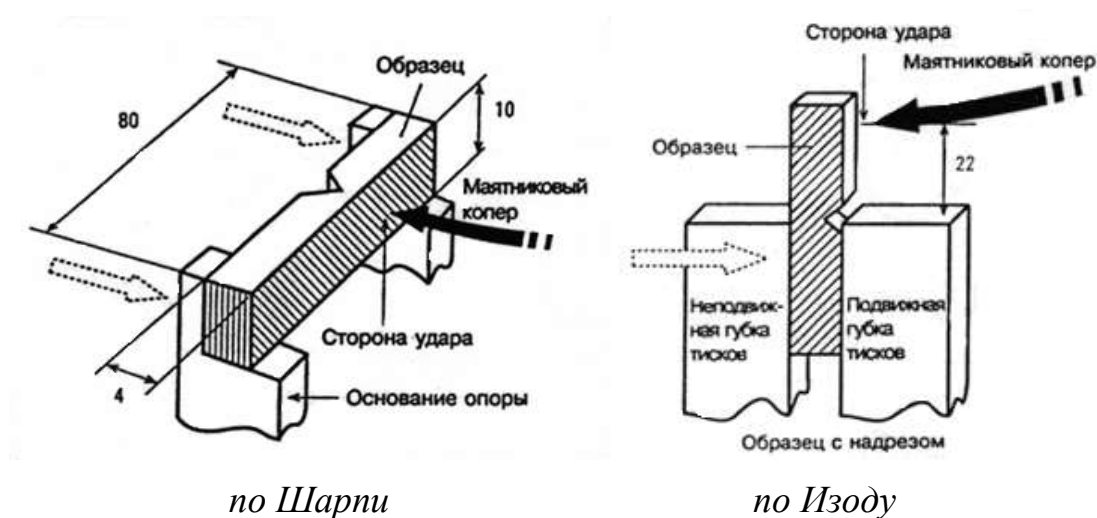


Рис.1.8. Методы измерения ударной прочности

Истираемость – способность материала изменяться в объёме и массе под действием истирающих усилий. Истираемость зависит от твердости материала: чем выше твердость, тем меньше истираемость.

Испытания на истираемость пищевых фракций можно производить с помощью автоматических барабанных тестеров хрупкости и истираемости (например, тестер PTF 1DR рис. 1.9).



Рис. 1.9. Автоматический тестер хрупкости и истираемости трёхбарабанный.

Принцип действия автоматического барабанного тестера: образцы взвешиваются и через специальные отверстия помещаются в барабан. Вводится программа тестирования: скорость, время и т.д. После окончания теста образцы автоматически попадают в индивидуальный приёмник, где отсеивается измельчённая фракция. Оставшиеся образцы снова взвешивают, и результаты выводятся на дисплей в форме отчёта.

Основные физико-механические свойства некоторых сыпучих пищевых продуктов представлены в таблице 1.1.

Приведенный выше обзор информационных источников показывает, что конструкции и принципы работы вибрационных транспортеров в достаточной мере разработаны и освещены в работах [2, 6, 19, 22-24, 36, 55-57, 74, 79, 95, 96, 105-107, 115, 144].

Во всех указанных разработках использованы направленные под углом колебания к рабочему органу.

Однако использование лишь направленных под углом колебаний деки сдерживает разработку теоретических основ вибрационного перемещения и создания новых перспективных конструкций, предназначенных для его осуществления.

Таблица. 1.1

Физико-механические свойства некоторых зерновых масс

Наименование груза	Насыпная плотность ρ , т/м ³	Угол естественного откоса φ , °	Коэффициент трения покоя		Коэффициент трения движения		Коэффициент внутр- него трения f_e	Скорость витания, м/с
			По стали	По резине	По стали	По резине		
Гречиха	0,6-0,7	45	0,53	0,6	0,3-0,5	0,4-0,6	0,52	8,6
Рожь	0,6-0,8	32	0,58	0,6	0,37	0,47	0,49	8,5-10
Пшеница	0,6-0,83	35	0,36-0,58	0,47-0,6	0,3-0,5	0,4-0,5	0,5-0,56	9-11,5
Ячмень	0,6-0,8	26-36	0,37-0,6	0,47-0,66	0,37	0,47	0,51	6,5-11
Подсолнух	0,5-0,7	45	0,6-0,75	0,68-0,75	0,4-0,5	0,6-0,7	0,6	7-8,5
Просо	0,7-0,8	29	0,42-0,44	0,47-0,6	0,4	0,47	0,54	10-12
Кукуруза	0,7-0,8	35	0,36-0,58	0,6-0,8	0,25-0,41	0,54	0,53	12,5-14
Овёс	0,4-0,55	35	0,4-0,6	0,55	0,33-0,39	0,55	0,51	8,9-9
Рис	0,7-0,75	34-38	0,53	0,6	0,53	0,6	0,75-0,8	10,1
Горох	0,78-0,83	25-27	0,42	0,47	0,37	0,45	0,4-0,55	15,5-16,5
Фасоль	0,53-0,56	30-35	0,3-0,5	0,5-0,8	0,28-0,54	0,46-1,08	0,4-0,5	12,5-14

Все продукты принадлежат к группе абразивности А (неабразивные).

Анализ формул Баумана для расчета виброскорости при транспортировании сыпучей массы показывает, что она прямопропорционально зависит от угла направленности колебаний α к рабочему органу.

С целью повышения энергоэффективности вибрационных транспортеров для зерновых масс необходимо использовать возвратно-поступательные колебания деки в горизонтальной плоскости. При этом в первую очередь необходимо теоретически и экспериментально обосновать оптимальный выбор

геометрических размеров и параметров колебаний рабочего органа: размеры и угол наклона ступеней деки, частота и амплитуда колебаний; во-вторых необходимо провести теоретическую проработку режимов перемещения зернового материала по ступенчатой деке вибрационного транспортёра, совершающей возвратно-поступательные колебания в горизонтальной плоскости. Такая теоретическая проработка позволит получить аналитические выражения для определения фазовых углов скольжения, отрыва падения, коэффициента трения и средней скорости виброперемещения слоя частиц зерновой массы.

2. РАЗДЕЛ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС ПО СТУПЕНЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ

Методика диссертационного исследования делится на аналитический и экспериментальный этапы. Предполагается следующий алгоритм аналитического этапа исследований (рис. 2.1.): осознание физической реальности происходящего с сырьем процесса => составление схемы сил действующих на два слоя зернового продукта => составление уравнения сил на оси выбранной координатной системы => получение уравнения движения слоев зернового продукта по поверхности ступенчатого рабочего органа (СРО) методом математических преобразований => определение основных этапов перемещения зернового продукта, основываясь на видеозаписи процесса => вывод уравнения для определения фазовых углов, перемещения, скорости, ускорения зернового продукта на РО, и других необходимых параметров.

Теоретические исследования проводились на основе законов физики, математики, классической и теоретической механики с использованием математического моделирования, были составлены схемы сил действующих на два слоя продукта.

Вычисления проводились с использованием ПК, в частности применялись программные пакеты MathCAD, Maple. По результатам расчетов строились и обрабатывались диаграммы с помощью программы Microsoft Excel, полученные данные анализировались и на основе анализа делались выводы о создании экспериментальных образцов.

Для определения коэффициентов внешнего трения слоя сырья по рабочей поверхности, а также коэффициентов внутреннего трения движения и покоя

(подраздел 2.5) использовались приспособления и методики, изложенные в известных научных работах.



Рис. 2.1. Аналитический этап исследований.

После завершения теоретических исследований были спроектированы конструкции экспериментальных образцов машин, предназначенных для проведения практической проверки данных, полученных расчетным путем.

Следуя методике диссертационного исследования проведение экспериментального этапа (рис. 2.2) проводилось по известным и опубликованным ранее методикам. Были выполнены следующие экспериментальные исследования: исследование процесса направленного виброперемещения по ступенчатой деке [37, 50, 51, 53, 126]; определение

рациональных геометрических параметров рабочего органа [69, 70]; определение скорости перемещения зернового сырья по ступенчатому рабочему органу, при гармонических синусоидальных колебаниях в плоскости горизонта [123].

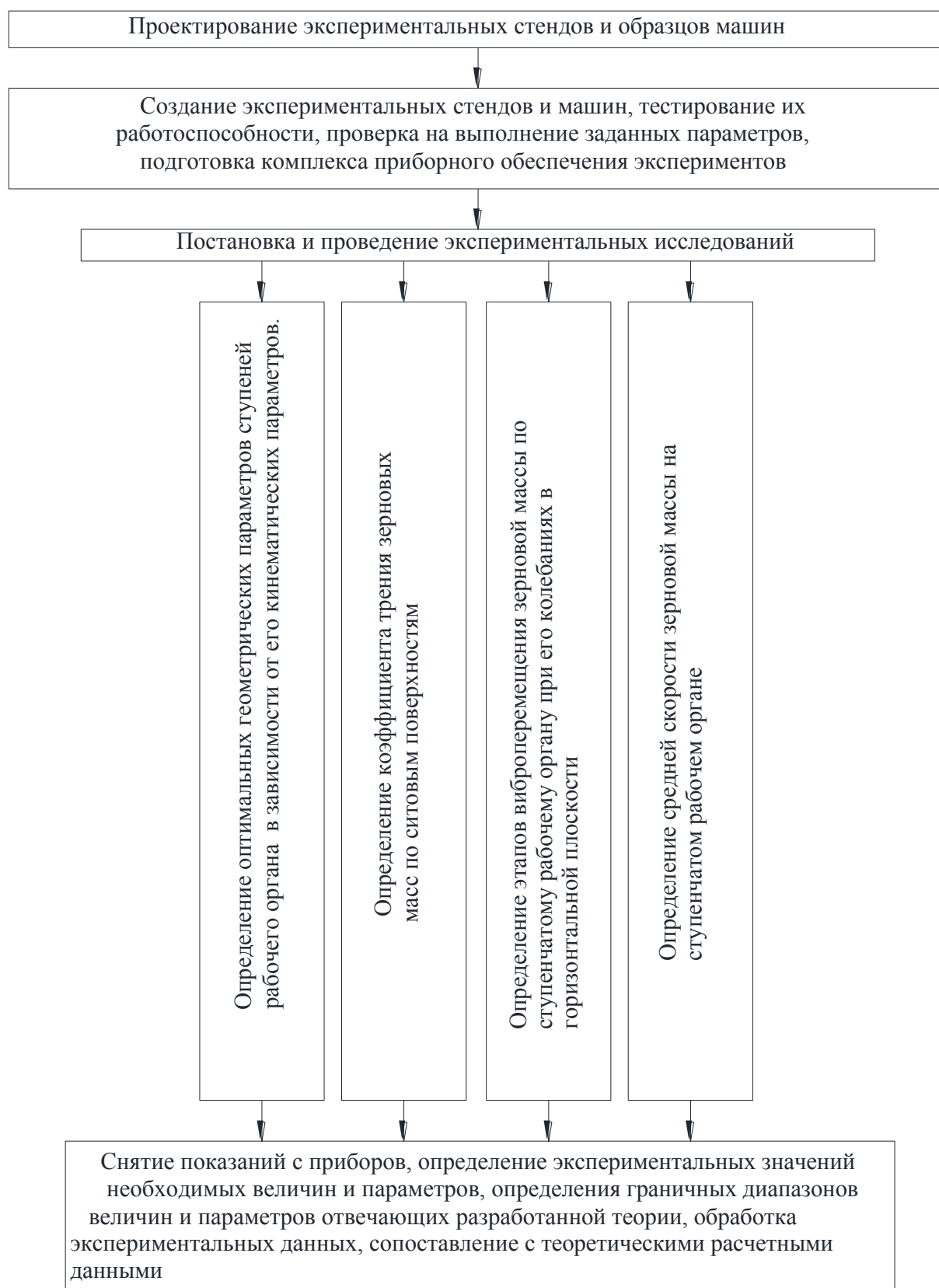


Рис. 2.2. Экспериментальный этап исследований.

Для получения всех необходимых при постановке опытов практических значений определялись: длина пути зерновой массы на деке, начальный угол отрыва зерен продукта от поверхности ступеней деки, количество необходимых соударений слоя зерновой массы со ступенчатой поверхностью деки, максимальная скорость зёрен с рабочим органом и т.п. использовались методы компьютерной обработки данных и скоростной видеосъемки.

Оценка погрешности полученных экспериментальных значений определялась в процентах к расчетным теоретическим данным.

Использованные методики более подробно изложены в соответствующих разделах далее.

2.2. РАЗРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ И ПРИНЯТИЕ ДОПУЩЕНИЙ

Разработанная и представленная в источнике [124] теория виброперемещения идеализированного слоя зерновой массы по ступенчатой поверхности, является серьезной работой, объясняющей принцип такого перемещения. Однако, в этой теории рассматривается виброперемещение сыпучего материала на ступенчатой поверхности только в один слой. Практика показала, что при определённых условиях, имеет место, вибротранспортирование сыпучих продуктов в два слоя.

Как и в работе [124] для аналитического рассмотрения всех стадий процесса [128, 129], примем связанную с декой систему координат XOY (рис. 2.3), в которой будем рассматривать движение двух слоёв зернового продукта массой m в момент начала скольжения вверх по наклонной поверхности ступени. Автор [124] принимает слой зернового продукта массой m , на которую действует сила тяжести, mg (g - ускорение свободного падения), нормальная реакция N , сила инерции I , сила трения $F_{тр}$, это справедливо при аналитическом рассмотрении верхнего слоя целенаправленного двухслойного движения зерновой массы по ступенчатому рабочему органу вибрационного

конвейера с горизонтально-направленными колебаниями. Движение нижнего слоя затруднено из-за воздействия на него верхнего слоя. И зёрна нижнего слоя имеют возможность продвижения по деке только в том случае, когда появляются свободные пространства между зёрнами верхнего слоя. Таким образом зёрна из нижнего слоя, перемещаясь в верхний – уменьшают его порозность, что ведёт к увеличению производительности транспортера.

Также необходимо отметить, что зёрна нижнего слоя движутся по ступенчатой поверхности рабочего органа с коэффициентом внешнего трения μ_1 , а верхний слой по нижнему – с коэффициентом внутреннего трения μ_2 , что нами было учтено в дальнейших исследованиях.

В связи с малым расстоянием полета и достаточно большой плотностью зерновой массы, которая транспортируется, принимаем допущение о том, что сопротивление воздуха не оказывает заметного влияния на процесс виброперемещения частиц, и в нашем случае его можно не учитывать.

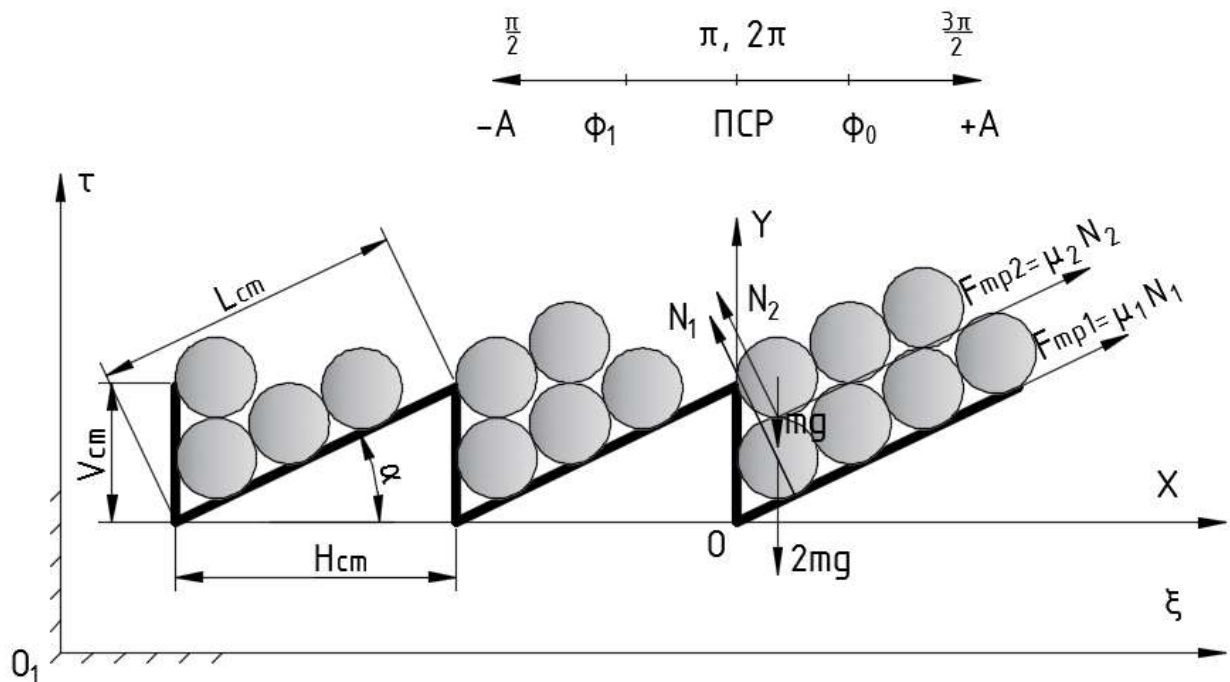


Рис. 2.3. Схема сил, действующих на два слоя зерновой массы

Движение ступенчатого рабочего органа влево от ПСР считаем началом периода колебаний, измеряя фазовые углы и время от ПСР. Влево от ПСР

зерновой продукт движется вместе с СРО, а при движении вправо, после прохождения ПСР, когда у СРО $\ddot{x} > 0$, а $\dot{x} < 0$, сила инерции вынуждает зерновую массу к отрицательному перемещению относительно оси X скольжением по наклонной поверхности ступени, нашей задачей являлось подобрать такие параметры, при которых максимально исключаются такие перемещения.

Составим уравнения сил, действующих на 1^й слой зерновой массы по осям X и Y на этапе скольжения:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t + F_{mp1} \cos \alpha + N_1 \sin \alpha, \\ m\ddot{y} = -mg + N_1 \cos \alpha - F_{mp1} \sin \alpha, \end{cases} \quad (\text{при } \sin \omega t < 0) \quad (2.1)$$

а для второго слоя зерновой массы как

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t + F_{mp2} \cos \alpha + N_2 \sin \alpha, \\ m\ddot{y} = -mg + N_2 \cos \alpha - F_{mp2} \sin \alpha, \end{cases} \quad (2.2)$$

где m – масса частицы зерновой массы;

N_1 и N_2 – нормальные давления частицы зерна на опорную поверхность;

t – текущее время;

F_{mp1} и F_{mp2} – соответственно силы трения частицы в первом и во втором слоях зерновой массы.

Сила трения $F_{mp1} = \pm \mu_1 N_1$, с учетом этого выразим N_1 из 2-го уравнения системы (2.1):

$$N_1 = \frac{m\ddot{y} + mg}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}. \quad (2.3)$$

Аналогичным образом определяем N_2 . Подставив значения N из (2.3) в 1-е уравнение систем (2.1 и 2.2) и разделив обе его части на m , получим:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \sin \omega t + (\ddot{y} + g) \frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}. \quad (2.4)$$

На этапе скольжения по наклонной поверхности соотношение между $\ddot{x}$ и $\ddot{y}$ для 1^{го} и 2^{го} слоя зерновой массы получим исходя из геометрической зависимости, вытекающей из рис. 2.1.

$$y = -x \operatorname{tg} \alpha; \quad \dot{y} = -\dot{x} \operatorname{tg} \alpha; \quad \ddot{y} = -\ddot{x} \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.5)$$

Если учитывать размеры реальной ЕСС, то 1-е уравнение (2.5) примет вид:

$$y = -x \operatorname{tg} \alpha + \frac{r}{\cos \alpha}.$$

Тогда уравнение (2.4) с учетом (2.5) примет вид:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \sin \omega t + (-\ddot{x} \operatorname{tg} \alpha + g) \frac{\mu_1 \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}. \quad (2.6)$$

Преобразуем уравнение (2.6) к виду:

$$\ddot{x} = \frac{A\omega^2 \sin \omega t + g \left(\frac{\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha} \right)}{1 + \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha} \right)}. \quad (2.7)$$

Для упрощения дальнейших аналитических выводов примем постоянные:

$$\begin{cases} k_{12} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu_2 \sin \alpha} \right)}; \\ k_{22} = \frac{g k_{12} (\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu_2 \sin \alpha}. \end{cases} \quad (2.8)$$

С учетом (2.8) дифференциальное уравнение (2.7) примет вид:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \sin(\omega t)k_1 + k_2. \quad (2.9)$$

Интегрируя (2.9), получим закон изменения скорости 1^{го} слоя зерновой массы на этапе скольжения:

$$\dot{x} = -A\omega k_1 (\cos \omega t - \cos \omega t_0) + k_2 (t - t_0) + \dot{x}_0. \quad (2.10)$$

Интегрируя (2.10), получим закон изменения координаты 1^{го} слоя зерновой массы на этапе скольжения:

$$x = -Ak_1 (\sin \omega t - \sin \omega t_0) + A\omega k_1 \cos \omega t_0 (t - t_0) + k_2 \frac{(t - t_0)^2}{2} + \dot{x}_0 (t - t_0) + x_0. \quad (2.11)$$

Аналогично определяем для 2^{го} слоя зерновой массы. Начальные условия: $t_0 = \varphi_0 / \omega$, $\dot{x}_0 = 0$ – в момент начала скольжения. Начальную координату x_0 определим из рис. 2.3. Начальные координаты центра тяжести 1^{го} слоя зерновой массы:

$$\begin{cases} x_{01} = -r; \\ y_{01} = r * \operatorname{ctg}\left(\frac{90 - \alpha}{2}\right), \end{cases} \quad (2.12)$$

Начальные координаты центра тяжести 2^{го} слоя зерновой массы:

$$\begin{cases} x_{02} = -r; \\ y_{02} = 1,5r * \operatorname{ctg}\left(\frac{90 - \alpha}{2}\right), \end{cases} \quad (2.13/)$$

где r – средний радиус частицы зерновой массы, м.

y_{01}, y_{02} – начальные координаты $1^{\text{го}}$ и $2^{\text{го}}$ слоя зерновой массы по оси Y на наклонной поверхности ступени в момент загрузки, м.

Движение идеализированного слоя зерновой массы по СРО скольжением начинается при движении СРО вправо от ПСР (рис. 2.3). Момент начала скольжения t_0 соответствует фазовому углу $\varphi_0 = \omega t_0$. Определим φ_0 из условия равенства нулю равнодействующей сил по оси X (момент начала скольжения), что соответствует приравниванию уравнения (2.9) к нулю: $\ddot{x} = 0$.

Тогда из уравнения (2.9) получим:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \arcsin\left(\frac{-k_2}{A\omega^2 k_1}\right) = -\arcsin\left[\frac{g(\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha)}{A\omega^2 (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha)}\right] = \\ &= \pi + \arcsin\left[\frac{g(\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha)}{A\omega^2 (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha)}\right]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Таким образом, фазовый угол φ_0 (момент начала скольжения) находится справа от ПСР (рис. 2.4), т.к. СРО согласно (2.14), уже прошел угол π – половину периода колебаний, измеряемого от ПСР с начальным движением влево.

Оба слоя зерновой массы будут скользить вправо от ПСР, от t_0 до t_1 – момента отрыва, с которого начинается этап полета $2^{\text{го}}$ слоя зерновой массы над СРО. Фазовый угол отрыва $\varphi_{12} = \omega t_1$. Для определения φ_{12} примем условие $N_2=0$, потому что в момент отрыва нормальная реакция всегда равна нулю. Тогда система (2.2) примет вид:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t_1 \Rightarrow \sin(\omega t_1) = \frac{\ddot{x}}{A\omega^2}; \\ m \ddot{y} = -mg \Rightarrow -\ddot{x} \tan \alpha = -g \Rightarrow \ddot{x} = \frac{g}{\tan \alpha}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Во втором уравнении системы (2.15) была сделана подстановка из 2-го уравнения (2.5): $\ddot{y} = -\ddot{x} \operatorname{tg} \alpha$.

Далее из 2-го уравнения системы (2.12) подставляем значение $\ddot{x}$ в первое уравнение системы (2.14) и получим из него $\varphi_{12} = \omega t_1$:

$$\varphi_{12} = \arcsin \left[\frac{g}{A\omega^2 \operatorname{tg} \alpha} \right] + 2\pi. \quad (2.16)$$

В формулу (2.16) было добавлено « $+ 2\pi$ » т.к. отрыв происходит после φ_{02} и после прохождения СРО пути 2π (полного периода колебаний), т.е. в следующем от начала отсчета периоде колебаний СРО, в отличие от φ_{02} (где СРО до момента φ_0 проходит более $\frac{1}{2}$ периода: более π). Таким образом, если $\varphi_{12} > \varphi_{02}$ а $\varphi_{02} > \pi$, то в (2.16) необходимо добавить « $+ 2\pi$ ».

Начиная с φ_{02} 2^й слой зерновой массы скользит по наклонной поверхности ступени до φ_{12} и набирает на момент t_1 определенную скорость. Когда, ускорение СРО станет отрицательным, а ее скорость останется положительной после прохода ПСР, при $N_2=0$ в момент отрыва t_1 , происходит отрыв и начало полета.

В неподвижной системе координат $\xi O_1 \tau$ (рис. 2.3) координата и скорость полета 2^{го} слоя зерновой массы описывается с учетом скорости СРО (вдоль оси τ СРО не совершает движения), а также с учетом начальной скорости и координаты реального 2^{го} слоя зерновой массы вдоль осей X и Y в момент t_1 .

Закон движения СРО вдоль оси ξ имеет вид:

$$\xi_{\text{PO}} = A \sin(\omega t). \quad (2.17)$$

Положение СРО в момент отрыва t_1 найдем по выражению (2.17) при $t=t_1$:

$$\xi_{1PO} = A \sin(\omega t_1). \quad (2.18)$$

Положение сырья в момент отрыва t_1 в системе $\xi O_1 \tau$ определим путем сложения координаты x зерновой массы в системе XOY из (2.11) при $x = x_1$, $t = t_1$, $\dot{x}_0 = 0$, $x_0 = -r$ с координатой СРО ξ_{1PO} в системе $\xi O_1 \tau$ из (2.18):

$$\begin{aligned} \xi_1 = x_1 + \xi_{1PO} = & -Ak_1(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0) + A\omega k_1 \cos \omega t_0 (t_1 - t_0) \\ & + k_2 \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} - r + A \sin(\omega t_1). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Где x_1 - отрицательное перемещение при скольжении по СРО на момент t_1 в системе XOY . Для реализации выбранного режима перемещения необходимо чтобы $|x_1| < C_{cm}$ (граничное условие). Т.е. перемещение скольжением на момент t_1 должно быть меньше наклонной части ступени C_{cm} .

Координата центра тяжести 2^{го} слоя зерновой массы в момент t_1 по оси τ определится как координата вдоль оси Y из (2.5), т.к. движения СРО вдоль оси τ нет:

$$\begin{aligned} \tau_1 = y_{12} = & -x_1 \operatorname{tg} \alpha + \frac{r}{\cos \alpha} = Ak_{12}(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0) \operatorname{tg} \alpha \\ & - A\omega k_{12} \cos \omega t_0 (t_1 - t_0) \operatorname{tg} \alpha - k_2 \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} \operatorname{tg} \alpha + r * \operatorname{tg} \alpha + \frac{r}{\cos \alpha} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Закон изменения скорости СРО вдоль оси ξ в системе $\xi O_1 \tau$ имеет вид:

$$\dot{\xi}_{PO} = A\omega \cos(\omega t). \quad (2.21)$$

Скорость СРО в момент t_1 найдем по (2.21) при $t = t_1$:

$$\dot{\xi}_{1PO} = A\omega \cos(\omega t_1). \quad (2.22)$$

Скорость зерновой массы в момент t_1 вдоль оси ξ в системе $\xi O_1 \tau$ определим путем сложения скорости СРО (2.22) со скоростью зерновой массы

$\dot{x}_1$ вдоль оси X (2.10) при $t = t_1$ и $\dot{x}_0 = 0$, $t_0 = \frac{\varphi_0}{\omega}$:

$$\dot{\xi}_1 = \dot{x}_{12} + \dot{\xi}_{1PO} = -A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0) + k_{22}(t_1 - t_0) + A\omega \cos(\omega t_1). \quad (2.23)$$

Скорость зерновой массы в момент t_1 вдоль оси τ определится как скорость вдоль оси Y по (2.5), т.к. движения СРО вдоль оси τ нет:

$$\dot{\tau}_1 = \dot{y}_{12} = -\dot{x}_{12} \operatorname{tg} \alpha = A\omega k_{21}(\cos \omega t - \cos \omega t_0) \operatorname{tg} \alpha - k_{22}(t_1 - t_0) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.24)$$

Таким образом, определены координаты и скорости $2^{\text{го}}$ слоя зерновой массы вдоль осей ξ и τ в момент начала полета t_1 .

Перемещение на следующую ступень зерен первого слоя носит единичный характер, т.к. они не имеют возможности сразу перемещаться туда из-за препятствия со стороны верхнего слоя. Своё перемещение на следующую ступень зерна $1^{\text{го}}$ слоя зерновой массы осуществляют только после того, как они переместятся на верхний слой (станут зёрнами $2^{\text{го}}$ слоя). А это становится возможным только тогда, когда во втором слое между зёрнами появляются промежутки, достаточные для размещения в них зерен нижнего слоя.

Весь этап полета слоев зерновой массы рассматриваем в неподвижной системе $\xi O_1 \tau$. Согласно законам механики [138] скорость вдоль оси τ на этапе полета $\dot{\tau}_{12}$ от момента t_1 до момента падения зерновой массы t_2 при отсутствии сопротивления воздушной среды описывается как:

$$\dot{\tau}_{12} = \dot{\tau}_1 - g(t_n - t_1) = A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0)tg \alpha - k_{22}(t_1 - t_0)tg \alpha - g(t_n - t_1), \quad (2.25)$$

где t_n – текущее время полета в интервале $t_1 \dots t_2$, измеряемое от начала общего цикла перемещения.

Приравняв (2.25) к нулю, определим момент времени, в который достигается максимальная высота полета, $t_n = t_{\tau_{\max}}$ (скорость $\dot{\tau}_{12} = 0$ в момент остановки в верхней точке полета):

$$t_{\tau_{\max}} = \frac{\dot{\tau}_1}{g} + t_1 = \frac{A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0)tg \alpha - k_{22}(t_1 - t_0)tg \alpha}{g} + t_1. \quad (2.26)$$

Наибольшую высоту полета относительно точки начала полета слоя зерновой массы определим по законам механики [138]:

$$\begin{aligned} \tau_{\max_{12}} &= \dot{\tau}_1(t_{\tau_{\max}} - t_1) - \frac{1}{2}g(t_{\tau_{\max}} - t_1)^2 = \\ &= [A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0)tg \alpha - k_{22}(t_1 - t_0)tg \alpha](t_{\tau_{\max}} - t_1) - \frac{1}{2}g(t_{\tau_{\max}} - t_1)^2, \end{aligned} \quad (2.27)$$

где $(t_{\tau_{\max}} - t_1)$ – время полета слоя зерновой массы от момента t_1 до момента $t_{\tau_{\max}}$.

Максимальная координата слоя зерновой массы по оси τ за этап скольжения (2.20) и за этап полета (2.27) составит:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \tau_{\max_{12}} + \tau_1 = (A\omega \cos(\omega t_1)k_{12}tg \alpha - k_{22}(t_1 - t_0)tg \alpha)(t_{\tau_{\max}} - t_1) - \\ &- \frac{1}{2}g(t_{\tau_{\max}} - t_1)^2 + Ak_{12}(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0)tg \alpha \\ &- A\omega k_{12} \cos \omega t_0(t_1 - t_0)tg \alpha - k_{22} \frac{(t_1 - t_0)^2}{2}tg \alpha + r * tg \alpha + \frac{r}{\cos \alpha}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Высота полета центра масс слоя зерновой массы должна превышать высоту верхней точки ступени V_{cm} более чем на радиус частицы зерновой массы

для беспрепятственного полета над ступенью, причем учитывая её горизонтальное перемещение по закону $A \sin \omega t$. Из этого вытекает условие:

$$\tau_{\max} > V_{cm} + r \quad (2.29)$$

Формула, описывающая полет слоя зерновой массы вниз вдоль оси τ , согласно законам кинематики будет иметь вид:

$$\tau_{\max} - \frac{gt_{nad}^2}{2} = y_0, \quad (2.30)$$

где t_{nad} – время падения, измеряемое от $t_{\tau_{\max}}$ до момента падения t_2 . Для стабилизации процесса целенаправленного движения было принято условие: высота конца полета на следующей ступени, через которую перелетает сырье на этапе полета, равна y_{02} , согласно формуле (2.30). Реализовать это условие можно подбором геометрических параметров ступени под кинематические параметры колебаний РО, либо наоборот.

Если высота падения будет отличной от y_{02} , то местом падения слоя зерновой массы будет наклонная или вертикальная поверхность следующей ступени. В этом случае неоднократно будет иметь место процесс отражения зёрен между наклонной и вертикальной поверхностями ступени и неотвратно возникнут дополнительные этапы скольжения и полета. Из-за этого скорость виброперемещения значительно снизится. Также станет возможным перемещение зерновой массы в обратном, отрицательном по оси ξ направлении, т.е. будет иметь место совершенно другой режим виброперемещения.

Поскольку поверхность ступеней выполнена из твёрдого материала, то будем считать соударение при падении упругими. Из формулы (2.30) найдем время падения слоя зерновой массы:

$$t_{na\partial} = \sqrt{\frac{2(\tau_{\max} - y_0)}{g}}. \quad (2.31)$$

Общее время этапа полета составит:

$$t_{12} = t_{\tau_{\max}} - t_1 + t_{na\partial}. \quad (2.31)$$

А суммарное время этапов скольжения и полета (момент падения) составит:

$$t_2 = t_{\tau_{\max}} + t_{na\partial} = \frac{A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0)tg \alpha - k_{22}(t_1 - t_0)tg \alpha}{g} + \\ + t_1 + \sqrt{\frac{2(\tau_{\max} - y_0)}{g}}. \quad (2.33)$$

Момент падения t_2 (конец этапа полета) определяет фазовый угол $\Phi_2 = \omega t_2$ и зависит от начальной скорости полета $\dot{t}_1$ и от фазового угла Φ_1 .

Для определения средней скорости виброперемещения и расчета геометрических параметров ступеней СРО необходимо определить перемещение зерновой массы на этапе скольжения ξ_1 и полета ξ_{12} .

Отрицательное перемещение вдоль горизонта на этапе скольжения в неподвижной системе координат ξ_{O_1} τ (рис. 2.3) определим по формуле (2.19), как ξ_1 .

Положительное перемещение вдоль оси ξ на этапе полета определим считая скорость в начале этапа полета ξ_1 (2.23) постоянной на протяжении всего этапа полета:

$$\xi_{12} = \dot{\xi}_1(t_2 - t_1) = \left[\begin{array}{l} -A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0) \\ + k_{22}(t_1 - t_0) + A\omega \cos(\omega t_1) \end{array} \right] (t_2 - t_1). \quad (2.34)$$

Полное перемещение определится как сумма перемещений за этапы скольжения (2.19) и полета (2.34):

$$\begin{aligned}\xi_2 = \xi_1 + \xi_{12} = x_1 + \xi_{1PO} + \dot{\xi}_1(t_2 - t_1) = & -Ak_{12}(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0) \\ & + A\omega k_{12} \cos \omega t_0(t_1 - t_0) + k_{22} \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} - r + A \sin(\omega t_1) \\ & + \left[\begin{aligned} & -A\omega k_{12}(\cos \omega t - \cos \omega t_0) \\ & + k_{22}(t_1 - t_0) + A\omega \cos(\omega t_1) \end{aligned} \right] \times (t_2 - t_1).\end{aligned}\quad (2.35)$$

Среднюю скорость виброперемещения слоя зерновой массы вдоль горизонта определим по аналогии с [242], как сумму перемещений (2.35) деленную на время полного цикла перемещений t_u :

$$\bar{\dot{\xi}} = \frac{\xi_2}{t_u} = \frac{\xi_2 \omega}{\varphi_u}, \quad (2.36)$$

где $\varphi_u = \omega t_u$ – фазовый угол полного цикла перемещений.

Полный цикл перемещений состоит из этапа скольжения слоя зерновой массы по наклонной поверхности СРО, этапа полета над колеблющимся СРО от момента падения φ_2 до момента начала следующего цикла перемещений (последний этап неподвижного нахождения слоя зерновой массы на колеблющемся СРО, когда зёрна находятся между вертикальной и наклонной поверхностями ступени).

Этап полета зерновой массы может длиться на протяжении нескольких периодов колебаний РО. Примем n – число периодов колебаний СРО, на протяжении которых длиться осуществляется этап полета.

Рассмотрим случай, когда момент падения t_2 соответствует положению СРО слева от ПСР (рис. 2.4), т.е. $\varphi_2 \in [2\pi(n+1)...\pi + 2\pi(n+1)]$ – фактически, или же $\varphi_2 \in [2\pi(n+1)...\varphi_0 + 2\pi(n+1)]$.

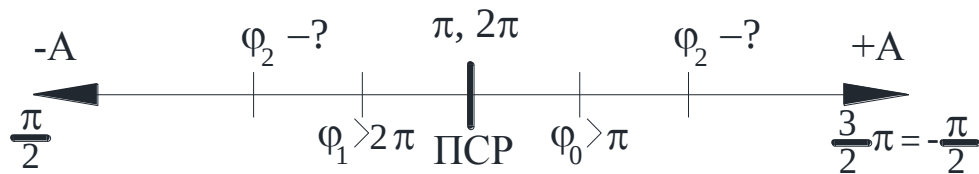


Рис. 2.4. Положение фазовых углов в цикле колебания РО.

В этом случае фазовый угол всего цикла $\varphi_{\text{ц}}$ будет меньшим, чем φ_2 : он будет уменьшен до значения фазового угла начала нового цикла перемещений $\varphi = 2\pi(n+1)$, от которого будет измеряться фазовый угол начала скольжения нового цикла перемещений $\varphi_0 = \varphi_0 + 2\pi n$.

По аналогии с программой MathCad примем обозначения: функция $\text{floor}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right)$ – которая возвращает округленное до наименьшего целого стоящее в скобках выражение $\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right)$. Тогда фазовый угол всего цикла перемещений составит:

$$\varphi_{\text{ц}} = 2\pi \cdot \text{floor}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right). \quad (2.37)$$

А время полного цикла перемещений с учетом (2.37) составит:

$$t_{\text{ц}} = \frac{\varphi_{\text{ц}}}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \text{floor}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right). \quad (2.38)$$

Согласно расчетам и экспериментам рассмотренный случай, когда $\varphi_2 \in [2\pi(n+1) \dots \pi + 2\pi(n+1)]$ наиболее часто имеет место, т.е. момент падения t_2 на СРО происходит, когда СРО находится слева от ПСР. Однако при редком сочетании кинематических и геометрических параметров колебаний возможны и другие варианты.

Рассмотрим случай (рис. 2.4), когда момент падения t_{Π} соответствует положению СРО справа от ПСР при ее движении влево:

$$\varphi_2 \in \left[\frac{3}{2}\pi + 2\pi(n+1) \dots 2\pi + 2\pi(n+1) \right], \text{ т.е. } \xi_{PO} = A \sin \varphi_2 < 0, \dot{\xi}_{PO} = A\omega \cos \varphi_2 > 0.$$

В таком случае фазовый угол всего цикла φ_{Π} будет большим, чем φ_2 , т.е. необходимо увеличить φ_{Π} до значения фазового угла начала нового цикла перемещений $\varphi = 2\pi + 2\pi(n+1)$, от которого будет измеряться $\varphi_0 = \varphi_0 + 2\pi(n+1)$ – фазовый угол начала скольжения следующего цикла перемещений.

По аналогии с программой MathCad примем обозначения: функцию $\text{ceil}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right)$, которая возвращает округленное до наибольшего целого значение $\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right)$. Тогда фазовый угол всего цикла перемещений составит:

$$\varphi_{\Pi} = 2\pi \cdot \text{ceil}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right). \quad (2.39)$$

А время полного цикла перемещений с учетом (2.39) составит:

$$t_{\Pi} = \frac{\varphi_{\Pi}}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \text{ceil}\left(\frac{\varphi_2}{2\pi}\right). \quad (2.40)$$

В третьем случае $\varphi_2 \in \left[\varphi_0 + 2\pi(n+1) \dots \frac{3}{2}\pi + 2\pi(n+1) \right]$, т.е. момент падения φ_2 на СРО может произойти, когда СРО находится справа от ПСР т.е. $\xi_{PO} = A \sin \varphi_2 < 0$, и движется вправо $\dot{\xi}_{PO} = A\omega \cos \varphi_2 < 0$.

Этот случай наиболее непредсказуем, т.к. становится возможным либо отсутствие этапа неподвижного нахождения зерновой массы на СРО (сырье сразу же после φ_2 начинает скольжение и полет), либо перескакивание на

ступеньку назад (обратное движение слоя зерновой массы дестабилизирует процесс виброперемещения), либо действительны формулы (2.39) и (2.40) для второго случая.

С учетом рассмотренных случаев (2.37) и (2.39) формулы для определения средней скорости виброперемещения (2.36) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\dot{\xi}} = \frac{\xi_2 \omega}{\Phi_{\text{ц}}} = \frac{\xi_2 \omega}{2\pi \cdot \text{floor}\left(\frac{\Phi_2}{2\pi}\right)}, \quad \text{при } \sin \varphi_2 > 0 \\ \bar{\dot{\xi}} = \frac{\xi_2 \omega}{\Phi_{\text{ц}}} = \frac{\xi_2 \omega}{2\pi \cdot \text{ceil}\left(\frac{\Phi_2}{2\pi}\right)}, \quad \text{при } \sin \varphi_2 < 0, \cos \varphi_2 > 0. \end{array} \right. \quad (2.41)$$

Наиболее вероятным (что обеспечивается геометрическими и кинематическими параметрами колебаний) является первый случай и формулы (2.37) и (2.38) имеют место наиболее часто и гарантировано, поэтому дальнейшие исследования ведем по ним.

Среднюю скорость виброперемещения вдоль горизонта определим как сумму перемещений за этапы скольжения и полета разделенную на время полных колебаний СРО [126], на протяжении которых осуществляются оба этапа перемещения. Считая первый случай (2.37) и 1-е уравнение (2.41) базовым, обеспеченным геометрическими и кинематическими параметрами РО, выражение для определения средней скорости перемещения зерновой массы, с учетом (2.35) примет вид:

$$\bar{\dot{\xi}} = \frac{\omega}{2\pi \cdot \text{floor}\left(\frac{\Phi_2}{2\pi}\right)} \left[\begin{array}{l} -Ak_{12}(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0) + \\ + A\omega k_{12} \cos \omega t_0 (t_1 - t_0) + \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} - r + A \sin(\omega t_1) + \\ + \left[-A\omega k_{12}(\cos \omega t_1 - \cos \omega t_0) + \right. \\ \left. + k_{22}(t_1 - t_0) + A\omega \cos(\omega t_1) \right] (t_2 - t_1) \end{array} \right]. \quad (2.42)$$

Теоретическая производительность разработанного транспортёра по аналогии с рядом известных вибрационных конструкций [117] составит:

$$Q = 3600 \left| \dot{\xi} \right| B \gamma, \quad (2.43)$$

где B – ширина ступенчатой поверхности РО, м.

γ – коэффициент удельной загрузки СРО зерновой массой, кг/м² (определяется экспериментально, этим коэффициентом определяются граничные условия процесса).

Для получения необходимой скорости виброперемещения зерновой массы и производительности машины, нужно выдержать определенные геометрические параметры ступени СРО.

Если конечная высота падения слоя зерновой массы в каждом этапе полета должна быть равна y_0 , то момент падения φ_2 должен осуществляться между наклонной и вертикальной частями ступени ближе к нижнему краю наклонной ступенчатой поверхности.

В момент φ_2 сдвиг СРО относительно ПСР составит:

$$\xi_{PO} = A \sin \varphi_2, \quad (2.44)$$

Длина L_{cm} (рис. 2.3) вдоль оси ξ должна составлять геометрическую сумму из перемещений за два этапа ξ_2 , которая определяется по формуле (2.35) и сдвига СРО относительно ПСР в момент падения (2.44). Именно такое перемещение в горизонтальной плоскости должен преодолевать слой зерновой массы за оба этапа, или за единичный цикл перемещения по поверхности СРО.

$$L_{ct} = \xi_2 + \xi_{PO} = \xi_1 + \xi_{12} + \xi_{PO} = x_1 + \xi_{1PO} + \dot{\xi}_1(t_2 - t_1) + \xi_{PO}. \quad (2.45)$$

Длина наклонной поверхности C_{CT} в этом случае составит:

$$C_{cm} = \frac{L_{cm}}{\cos \alpha}. \quad (2.46)$$

Длина наклонной ступенчатой поверхности C_{CT} должна быть больше, чем перемещение зерновой массы за этап скольжения x_1 , т.к. иначе частицы зерновой массы могут перескакивать на другую ступень в отрицательном направлении. Высота ступени V_{cm} определится как:

$$V_{cm} = L_{cm} \operatorname{tg} \alpha \quad (2.47)$$

2.3. ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ МАССЫ НА СТУПЕНЧАТОМ РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ПРИ ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Скорость вибротранспортирования рекомендуется определять на основе экспериментальных исследований, используя следующую зависимость [2, 102]:

$$V = V_{\text{э}} * K \quad (2.48)$$

где $V_{\text{э}}$ - скорость вибрационного транспортирования эталонного продукта (исходя из рис. 2.5 скорость $V_{\text{э}} = 0,2 \dots 0,6$ м/с);

K - коэффициент транспортабельности насыпного продукта.

За эталонный продукт принят песок влажностью 5-6 %, транспортабельность которого принята за единицу.

Данная формула позволяет определить скорость наиболее точно (практическая скорость), однако требует лабораторных исследований для определения коэффициента транспортабельности.

Коэффициенты транспортабельности некоторых сыпучих продуктов приведены в таблице 2.1.

Скорость вибротранспортирования сыпучей массы зависит от многих факторов, таких как параметры вибраций, угол наклона лотка и угол наклона вибраций, степень заполнения лотка, реологические свойства продуктов. Решающее значение имеют частота и амплитуда вибраций, от соотношения которых зависит возникновение режимов псевдосжижения или виброкипения при транспортировании.

Таблица 2.1

Коэффициент транспортабельности

Наименование продукта	Коэффициент транспортабельности, K
Песок влажный (эталон)	1
Кофе в зернах	0,65-075
Крупа манная	0,6-0,7
Рис	0,85
Зерно пшеницы	0,9
Мука грубого помола	0,2-0,4
Мука тонкого помола	0,1-0,2

Для практических расчетов можно использовать экспериментальные кривые зависимости скорости вибротранспортирования эталонного сыпучего продукта от частоты и амплитуды вибраций [11]. На рис. 2.5 представлены кривые зависимости скорости вибротранспортирования эталона слоем 50 мм при горизонтальной установке вибрототка и угла наклона вибраций 20 градусов от частоты при различных амплитудах колебаний.

Анализ этой зависимости показывает, что при малых амплитудах колебаний увеличение частоты не приводит к резкому увеличению скорости. Амплитуда колебаний свыше 5,0 мм даже при низких частотах вызывают значительный рост скорости вибротранспортирования, что обусловлено созданием режима псевдосжижения.

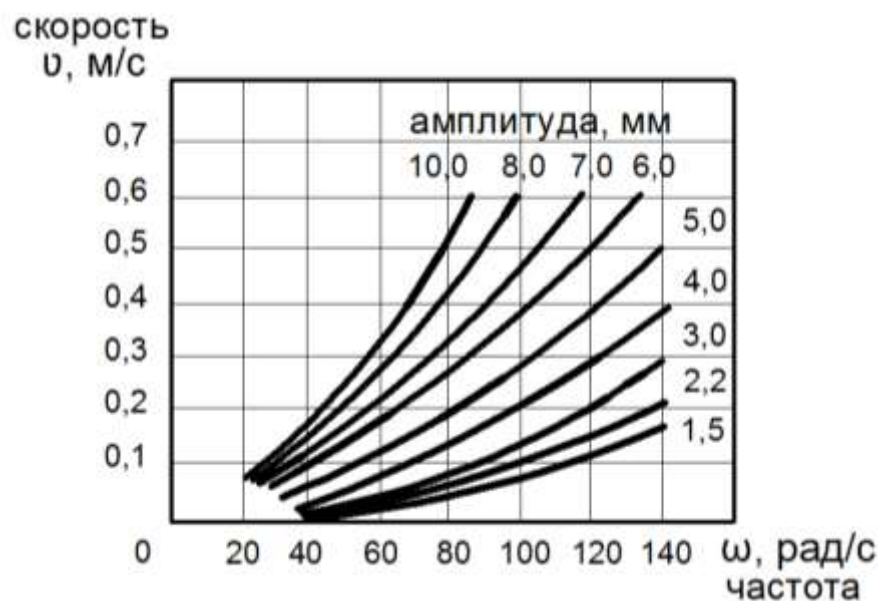


Рис. 2.5. Зависимость скорости вибротранспортирования от частоты и амплитуды колебаний.

Наибольший эффект достигается при транспортировании сухих однородных порошкообразных, зернистых и мелкокусковых насыпных грузов; скорость горизонтального транспортирования достигает до 0,3 м/с и в отдельных случаях до 0,6 м/с при наиболее рациональных режимах вибрации. Менее эффективно использовать вибрационные конвейеры для транспортирования неоднородных насыпных грузов с большой примесью пылевидных частиц — скорость их перемещения в 2-3 раза меньше. Неэффективно транспортируются пылевидные грузы с размером частиц менее 0,05 мм. Скорость их горизонтального перемещения обычно составляет 0,1 - 0,15 м/с при высоте слоя 50 - 60 мм, даже при наибольшей амплитуде колебаний. В процессе вибрационного транспортирования пылевидных грузов, при подбрасывании их частиц возникают воздушные прослойки и создается повышенное сопротивление воздуха их микрополету. Этим обуславливается малая эффективность транспортирования пылевидных тонкодисперсных грузов методом вибрации. Важнейшей проблемой является выбор рационального режима вибрации и конструкции вибрационного конвейера, которые бы обеспечили эффективное транспортирование пылевидных грузов. С увеличением амплитуды колебаний

эффективность транспортирования пылевидных грузов увеличивается, поэтому для их перемещения используют вибрационные конвейеры с эксцентриковым приводом (амплитуда колебаний 12-15 мм, частота 500-400 1/мин). На конвейерах с электромагнитным вибровозбудителем, имеющим малую амплитуду (0,5 - 1,2 мм) и большую частоту (3000 1/мин) колебаний, транспортирование пылевидных грузов практически неэффективно.

У наклонных конвейеров с подачей груза вверх скорость перемещения и производительность понижаются примерно на 3-5% на каждый градус подъема. Поэтому, как правило, вибрационные конвейеры не выполняют с углом подъёма более 10%, а для пылевидных частиц 5%(при больших углах транспортирование практически прекращается). При подаче по уклону вниз, на спуск (практически под углом 10%) значительно лучше транспортируются все виды грузов.

Незначительная влажность (до 10%) грузов, не обладающих липкостью и вязкостью, не препятствует его перемещению, а в некоторых случаях даже наоборот способствует увеличению скорости. Липкие или влажные грузы транспортируются очень плохо.

Сортированные крупно- и среднекусовые грузы при отсутствии мелких частиц хорошо перемещаются виброконвейером, однако при движении они издадут шум от ударов о дно желоба и вызывают его изнашивание. Для повышения износостойкости стенки желоба футеруют резиной.

Разнородные несортированные грузы имеют пониженную скорость транспортирования, однако полного разделения частиц груза по фракциям в общем слое не наблюдается, хотя на поверхности слоя замечается некоторое увеличение скорости движения более крупных кусков груза по более мелким частицам. Несортированные комбинированные грузы из частиц одинаковой крупности транспортируются единой массой без разделения.

Скорость транспортирования однородных кусковых грузов почти не зависит от высоты слоя и практически остаётся постоянной при коэффициенте заполнения желоба 0,2 - 0,8. Легкоподвижные пылевые и сухие зернистые грузы при тонком слое перемещаются с наибольшей скоростью. С повышением высоты

слоя, скорость транспортирования заметно уменьшается, поэтому такие грузы транспортируют при малой высоте слоя (50 - 100 мм).

В кратных режимах с непрерывным подбрасыванием, имеющих место при выполнении условий (21) или (24) [22], касательная составляющая относительной скорости имеет такое значение, при котором справедлива зависимость (9). Средняя скорость [6, 8]

$$V = \frac{\pi p g}{\omega} \left(\frac{1-R}{1+R} \operatorname{ctg} \beta \cos \alpha - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \alpha \right), (\lambda \neq 0, p=1, 2, \dots) \quad (2.49)$$

В случае, когда параметр перегрузки удовлетворяет условию:

$$w > 2 \frac{1+R^2}{(1+R)^2}, \quad (2.50)$$

т. е. в случае достаточно интенсивного подбрасывания, приближенное выражение для скорости в любых режимах:

$$V \approx \frac{\pi p'(w, R) g}{\omega} \left(\frac{1-R}{1+R} \operatorname{ctg} \beta \cos \alpha - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \alpha \right), (\lambda \neq 0) \quad (2.51)$$

где

$$p'(w, R) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{w(1+R)}{1-R} + \sqrt{\frac{w^2(1+R)^4 - 4(1+R^2)^2}{(1-R^2)^2}} \right] \quad (2.52)$$

Формула (2.51) образована путем интерполяции формулы (31) [22] (см. стр. 28), строго справедливой при w , лежащих в интервалах (24) [22] (см. стр. 24), на все промежуточные значения w , причем интерполирующаяся кривая проходит через средние точки интервалов (24) [22] (см. стр. 24).

Для облегчения расчетов на рис. 10 [22] представлена функция $p'(w, R)$, соответствующая (2.52), а на рис. 11, а-в [22] даны зависимости безразмерной

величины $V/(A\omega)$ от параметра $A\omega^2/g$ и угла вибраций β для случая горизонтальной поверхности ($\alpha=0$) при коэффициенте восстановления R , равном 0; 0,1 и 0,2.

При интенсивности подбрасывания, отвечающей значениям параметра перегрузки:

$$w > 3,5 \frac{1+R^2}{(1+R)^2}$$

с погрешностью не выше 15 %, можно пренебречь вторым слагаемым в подкоренном выражении (2.52) по сравнению с первым и принять $p' \approx \frac{1}{\pi} \left(\frac{1+R}{1-R} \right) w_0$. Тогда выражение (2.51) для средней скорости существенно упрощается:

$$V \approx A\omega \left(\cos\beta - \frac{1+R}{1-R} \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin\beta \operatorname{tg}\alpha \right), \quad (2.53)$$

При $\alpha=0$ получаем:

$$V \approx A\omega \cos\beta, \quad (2.54)$$

т. е. скорость транспортирования оказывается приблизительно равной амплитуде продольной проекции скорости колебаний вибрирующей плоской поверхности.

Недостаток приведенных простых приближенных формул состоит в том, что они не отражают зависимость средней скорости от коэффициентов трения f_1 и f . Однако при наличии интенсивного подбрасывания эта зависимость является довольно слабой, и во многих случаях может не учитываться.

Выражение (2.54) близко к полуэмпирической формуле В. А. Баумана [22] (см. стр. 87), если положить в последней $\alpha=0$ и опустить близкие к единице эмпирические коэффициенты, а также к другим хорошо проверенным

полуэмпирическим формулам, рекомендуемым зарубежными исследователями для случаев транспортирования сыпучих тел.

В случае режимов со слабоинтенсивным подбрасыванием, когда параметр перегрузки $w > 1$ близок к единице и справедлива f -гипотеза [13], для определения скорости вибротранспортирования можно воспользоваться номограммами [22] (см. рис. 8 стр. 27).

При работе вибрационных конвейеров энергия расходуется на приведение в колебательное движение грузонесущих элементов и на транспортирование груза [8, 49, 50, 52, 64, 69, 71, 89, 90, 91, 100-102, 114, 116]. Потребная мощность при пуске в 5 и более раз превышает нагрузку при установившемся режиме движения груза. Поэтому для привода вибрационных конвейеров принимают двигатели с повышенным пусковым моментом.

Среднее значение мощности, необходимое для поддержания установившейся периодической вибрации в системе с сосредоточенными параметрами:

$$N_{cp} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^s \int_0^T B_i \dot{x}_i dt, \quad (2.55)$$

где B_i - диссипативная сила (или момент);

$\dot{x}_i$ - скорость (или угловая скорость);

t - время;

T - период вибрации;

s - общее число действующих в системе диссипативных сил и моментов.

Скорость $\dot{x}_i$ - это относительная скорость двух элементов, в результате относительного движения которых возникает диссипативная сила B_i . Один из элементов принадлежит системе, а второй либо принадлежит ей, либо находится вне ее.

Если система линейна, то выражение (3.33) можно написать в виде:

$$N_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^T \Phi \dot{\Phi} dt, \quad (2.56)$$

где диссипативная функция

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (2.57)$$

$\dot{q}_i, \dot{q}_j$ - обобщенные скорости; b_{ij} - элемент матрицы коэффициентов сопротивления; n - число степеней свободы системы.

Вместо зависимости (2.55) можно пользоваться эквивалентным ей равенством, пригодным также и для систем с распределенными параметрами при действии сосредоточенных вынуждающих сил и моментов:

$$N_{cp} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \int_0^T F_i \dot{x}_i \cos \alpha_i dt, \quad (2.58)$$

где F_i - модуль вынуждающей силы (или момента); $\dot{x}_i$ - модуль скорости точки приложения вынуждающей силы (или угловой скорости сечения инерционного элемента, в котором приложен вынуждающий момент); α_i - угол между направлениями вынуждающей силы и скорости (или между векторами момента и угловой скорости); k - число приложенных к системе вынуждающих сил и моментов.

Используя программный пакет MathCAD (Приложение А), определим рациональную среднюю скорость виброперемещения в зависимости от амплитуды A и частоты колебаний ν при различных углах наклона ступени α . Значения α выбраны в диапазоне, который соответствует наибольшей средней скорости виброперемещения зерновой массы.

Расчеты теоретической средней скорости перемещения зерновой массы произведены с помощью выражения:

$$\bar{\zeta} = \frac{\omega}{2\pi j} \left\{ \begin{aligned} & A \cos \alpha (\mu \sin \alpha - \cos \alpha) [(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_0) + (\varphi_2 - \varphi_1)(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0)] + \\ & + A \cos \alpha \cos \varphi_0 (\varphi_1 - \varphi_0)(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + A \cos \varphi_1 (\varphi_2 - \varphi_1) + A \sin \varphi_2 + \\ & + \frac{g \cos \alpha}{\omega^2} \left[\varphi_0 (\mu \cos \alpha + \sin \alpha)(\varphi_1 - \varphi_0) - \frac{1}{2}(\varphi_1^2 - \varphi_0^2) - (\varphi_2 - \varphi_1)(\varphi_1 - \varphi_0) \right] \cdot \\ & \cdot (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

Коэффициент внешнего трения зерновой массы по стальной рифленой поверхности с выступами 0,002×0,002 м, определен по методике, изложенной в разделе 2.5, $\mu=0,35$. Результаты расчетов представлены в таблицах 2.2 – 2.4 и графически отображены на рис. 2.6 – 2.8.

Таблица 2.2

Значения средней скорости виброперемещения при $\alpha=24$ градуса

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	-	-	0,0115	0,0264	0,0521
17,5	-	0,0245	0,04	0,0757	0,1193
20	0,0181	0,0414	0,0857	0,1415	0,2089
22,5	0,0301	0,0789	0,1443	0,1508	0,2162
25	0,0565	0,1258	0,1452	0,2214	0,3127
27,5	0,0887	0,1221	0,2051	0,3080	0,3231
30	0,1273	0,1681	0,2773	0,3092	0,3438
32,5	0,1154	0,2226	0,2720	0,3214	0,4448
35	0,1511	0,2147	0,3469	0,4079	0,4690
37,5	0,1923	0,2700	0,3468	0,4233	0,4995
40	0,1796	0,2666	0,3551	0,4446	0,6110
42,5	0,2199	0,3240	0,4302	0,5374	0,6453
45	0,2652	0,3240	0,4412	0,5617	0,6845

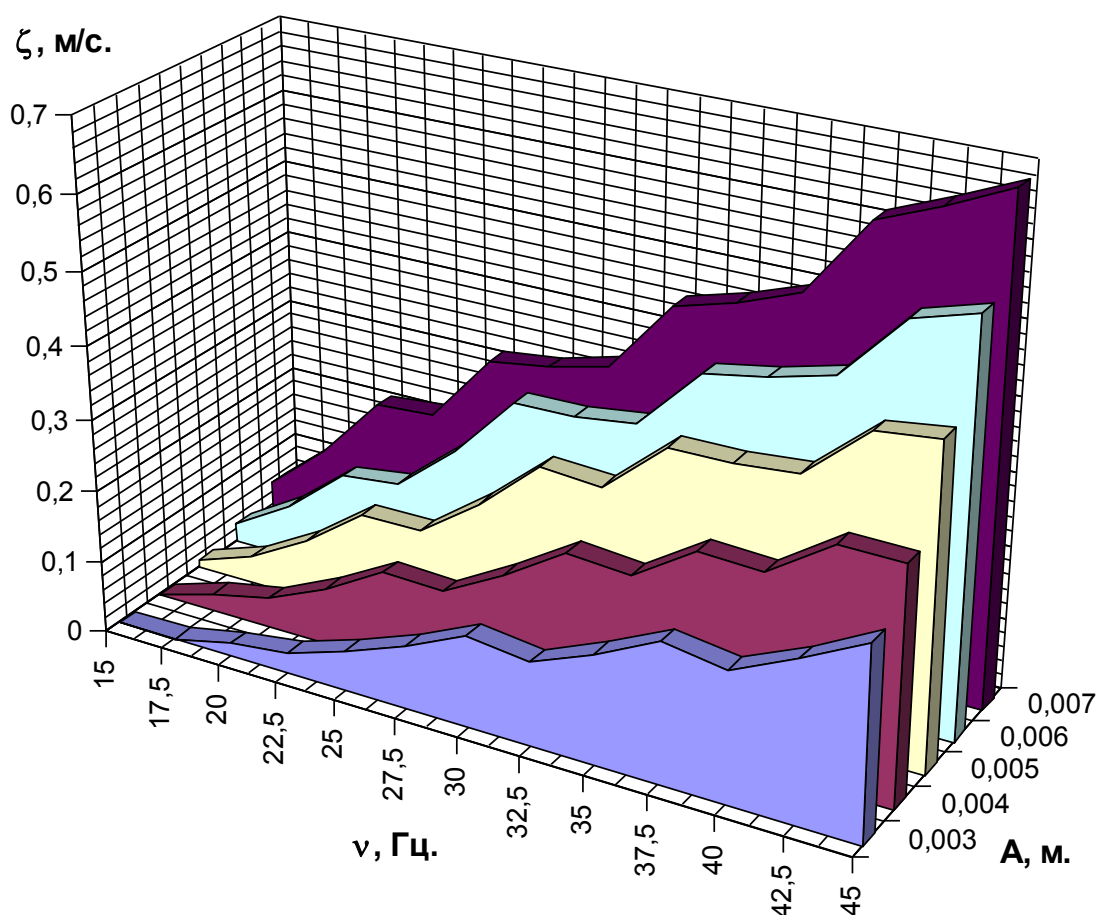


Рис. 2.6. Зависимость теоретической скорости виброперемещения зерновой массы от кинематических параметров, при $\alpha=24$ градуса.

Таблица 2.3

Значения средней скорости виброперемещения при $\alpha=26$ градусов

ν , Гц	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	-	-	0,0767	0,1446	0,1121
17,5	-	0,0904	0,0891	0,1424	0,2052
20	0,0735	0,0877	0,1527	0,2318	0,3250
22,5	0,0678	0,1398	0,2319	0,3440	0,3174
25	0,1047	0,2031	0,3289	0,3214	0,4419
27,5	0,1486	0,2790	0,2973	0,4329	0,4447
30	0,2003	0,2460	0,3901	0,4244	0,5799
32,5	0,2605	0,3164	0,3745	0,5418	0,5914
35	0,2201	0,3980	0,4696	0,5426	0,7396
37,5	0,2734	0,3689	0,5790	0,6683	0,7587
40	0,3339	0,4490	0,5630	0,6764	0,7895
42,5	0,3017	0,4317	0,5632	0,8117	0,9472
45	0,3592	0,5131	0,6690	0,8260	0,9838

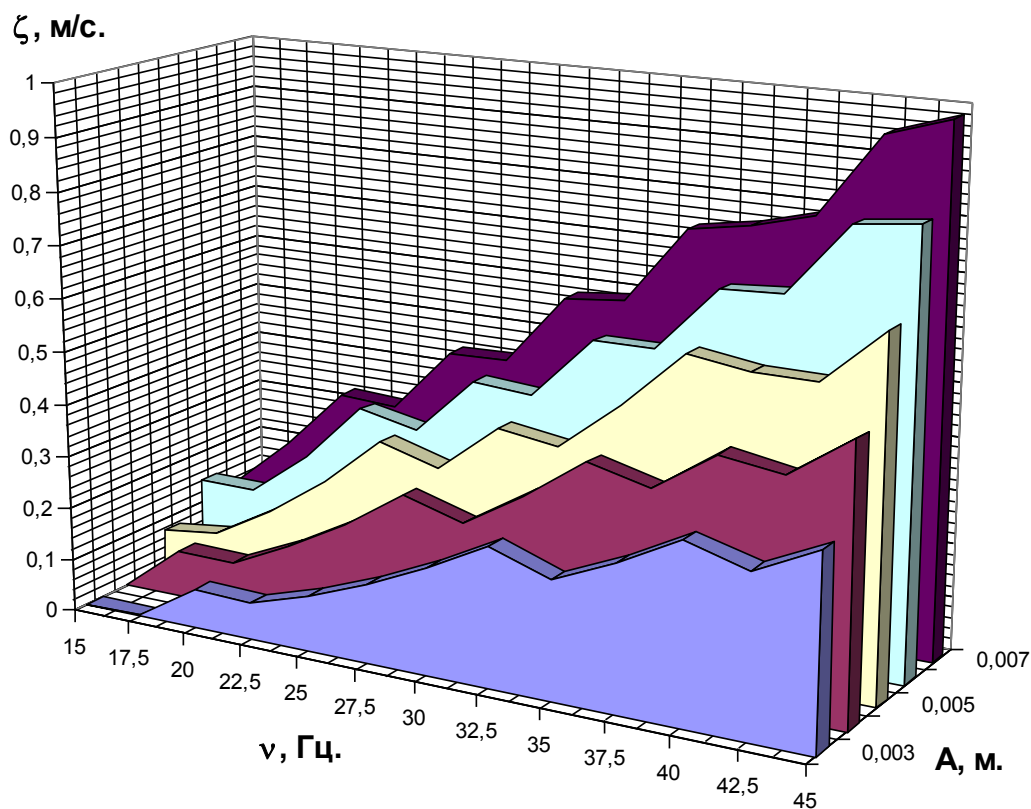


Рис. 2.7. Зависимость теоретической средней скорости виброперемещения зерновой массы от кинематических параметров, при $\alpha=26$ градусов.

Таблица 2.4

Значения средней скорости виброперемещения при $\alpha=28$ градусов

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	-	-	0,0044	0,0148	0,0364
17,5	-	0,0082	0,0273	0,0579	0,0957
20	0,0044	0,0293	0,0674	0,1162	0,1755
22,5	0,0204	0,0623	0,1195	0,1279	0,1861
25	0,0435	0,1040	0,1235	0,1914	0,2730
27,5	0,0720	0,1036	0,1774	0,2696	0,2849
30	0,1065	0,1449	0,2425	0,2729	0,3056
32,5	0,0983	0,1940	0,2398	0,2854	0,3970

35	0,1304	0,1887	0,3078	0,3640	0,4203
37,5	0,1676	0,2387	0,3091	0,3791	0,4490
40	0,1577	0,2368	0,3177	0,3994	0,4817
42,5	0,1941	0,2890	0,3859	0,4840	0,5180
45	0,2352	0,2899	0,3968	0,5069	0,5572

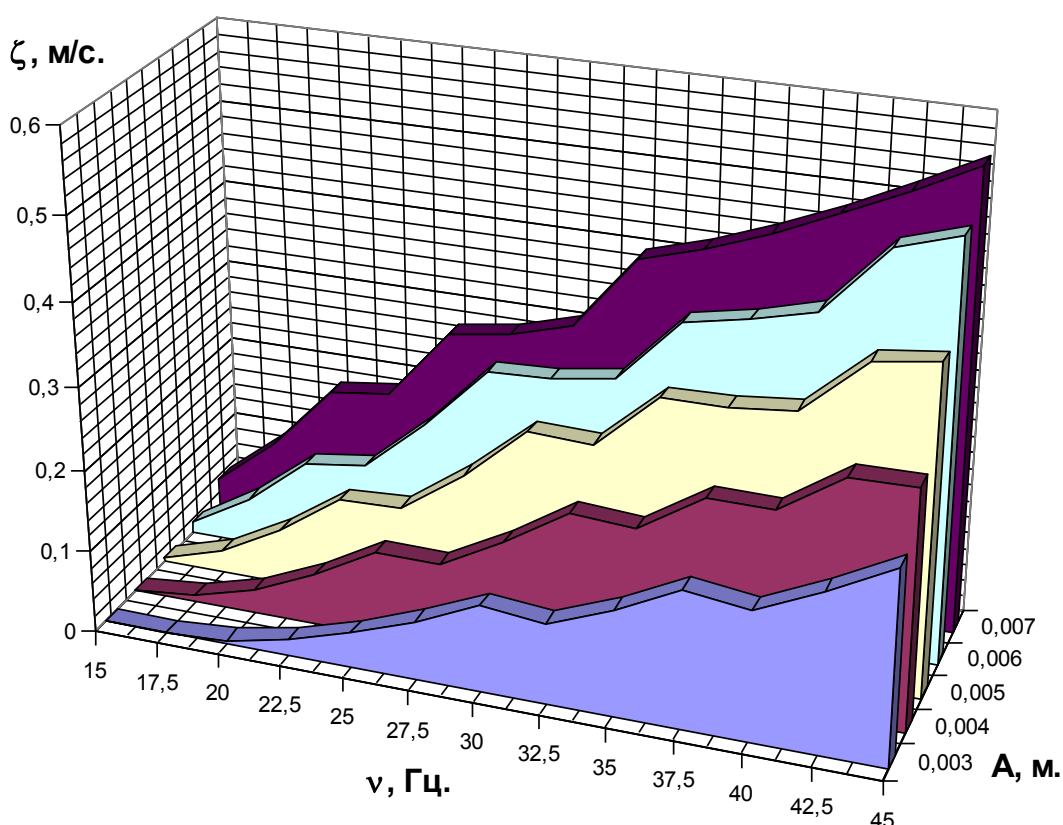


Рис. 2.8. Зависимость теоретической скорости виброперемещения зерновой массы от кинематических параметров, при $\alpha=28$ градусов.

При анализе графиков теоретической скорости виброперемещения зерновой массы следует обратить внимание на выступающие углы графиков, которые возникают из-за резко меняющегося при расчетах значения φ_2 . Определяется φ_2 моментом падения зерна сыпучей массы на ступенчатую поверхность. Согласно представленной теории, от значения φ_2 зависит величина ζ_{02} – общее перемещение зерновой массы за два этапа, $\zeta_{02} = \zeta_{01} + \zeta_{12}$, где ζ_{01} –

положительное перемещение зерновой массы скольжением и ζ_{12} – отрицательное перемещение зерновой массы на этапе полета над ступенчатой поверхностью.

Уравнение колебательного движения деки $\dot{A} \sin \omega t$. Когда $\omega t \in \left[\frac{\pi}{2} \dots \pi \dots \frac{3\pi}{2} \right]$, дека двигается влево из правого крайнего положения в левое, противоположно направлению оси ξ . Т.е., если значение момента падения φ_2 соответствует интервалу $\left[\frac{\pi}{2} \dots \pi \dots \frac{3\pi}{2} \right]$, то момент падения зерновой массы на деку осуществляется при её движении влево. Скорость зерновой массы вдоль горизонта (вдоль оси ξ) приблизительно равна средней скорости деки, а удар о деку фактически неупругий (ввиду близости скоростей и свойств материала поверхности деки), из-за чего зерно сыпучей массы при контакте с декой не получает необходимого импульса для полета через следующую ступень. Поэтому, зерно скатывается в самое нижнее положение между наклонной и вертикальной поверхностями деки и с начала следующего периода начинает новый цикл движения. То же самое, но с небольшими отличиями, происходит, когда значение момента падения φ_2 соответствует интервалу $\left[\frac{3\pi}{2} \dots 2\pi \right]$, т.е. момент падения зерна на наклонную (а не на вертикальную) поверхность ступени осуществляется уже при её движении вправо до положения статического равновесия. В этих случаях, в следующем периоде колебаний, частица наберет нужную высоту полета на этапе скольжения для последующего перемещения на другую ступень. При этом «холостое» движение зерновой массы вместе с колеблющейся декой не превысит $\frac{3}{4}$ периода колебаний. Т.е. средняя скорость виброперемещения будет достаточно высокой, особенно в последнем случае, когда значение φ_2 соответствует интервалу $\left[\frac{3\pi}{2} \dots 2\pi \right]$, т.е. «холостое» движение зерновой массы вместе с колеблющейся декой не превысит $\frac{1}{4}$ периода колебаний. Таким образом, новый цикл перемещения начинается каждые два неполных периода колебаний от момента падения. Скорость в таком случае, будет достаточно высокой.

А вот в случае, когда значение момента падения φ_2 соответствует интервалу $[2\pi(0)...\pi/2]$, т.е. когда момент падения зерна сыпучей массы на наклонную или вертикальную поверхность деки осуществляется уже при её движении вправо, после прохождения положения статического равновесия, холостое движение в виде соударений зерен между вертикальной и наклонной поверхностями ступени может проходить на протяжении двух и более периодов колебаний. Также, возможно кратковременное движение назад на 1–2 ступени. Таким образом, начало нового цикла перемещений затягивается на два и более периодов колебаний от момента падения. Скорость в таком случае, будет более низкой, чем в предыдущем случае.

Ввиду описанных закономерностей, средняя скорость виброперемещения будет скачкообразно изменяться при незначительном изменении φ_2 , т.е., соответственно, при незначительном изменении кинематических параметров A и v , что на графиках отображено в виде ступеней и впадин.

2.4. ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО ПРОЦЕССА ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ МАССЫ ПО СТУПЕНЧАТОЙ ДЕКЕ СОВЕРШАЮЩЕЙ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Для современных пищевых производств важно, чтобы процессы перемещения сыпучих смесей имели непрерывный цикл, что объясняется непрерывностью существующих технологических процессов переработки. Принцип виброконвейера приемлем во всех отношениях, это экономичность, рациональные габариты, простота конструкции, достаточная эффективность оборудования. Для вибротранспортировании зерновых масс, бесспорное преимущество имеют искусственные режимы виброперемещения [116, 118]. Особое внимание следует уделить виброперемещению при прямолинейных синусоидальных колебаниях. Можно создавать такие условия, при которых

сыпучие массы транспортируется в заданном направлении за счет генерации искусственных режимов виброперемещения [12, 13, 116, 118].

Однако вибрационные транспортеры имеют определенные недостатки [2]. Главным образом, они связаны с применением направленных колебаний, которые создавать сложнее, чем вертикальные или горизонтальные. Направление таких колебаний необходимо периодически контролировать потому, что упругие рессоры любого типа с течением времени или под влиянием температуры меняют свои упругие свойства и это отражается на точности задаваемых колебаний рабочего органа [90]. Опыт многолетних теоретических и экспериментальных исследований в этой области [12, 13, 116, 118] приводит к выводам, что высокодисперсные, мелко- и крупнозернистые материалы можно транспортировать при совмещении с другими технологическими процессами на рабочем органе с использованием горизонтальных колебаний. Это представляется возможным за счет особой конструкции поверхности деки. Если спроектировать горизонтальную поверхность с выступающими ступенями (рис.2.9), то вполне можно предположить возможность направленного виброперемещения.

В основу осуществления такого процесса виброперемещения по ступенчатой поверхности при горизонтальных прямолинейных синусоидальных синхронных колебаниях, положено правило, согласно которому, угол падения равен углу отражения. В нашем случае, угол наклона к горизонту отражательной поверхности ступени рабочего органа равняется 30° , а угол отражения от нее, можно принять равным 60° . Это действительно в случае если тело падает на ступенчатую поверхность рабочего органа по траектории, близкой к вертикали.

Однако, как видно из рисунка, не вся площадь поверхности отражения является полезной. Часть площади, которая прилегает к вертикальной стенке ступени, будет зоной многократных столкновений. Если частица материала попадает в эту зону, то она подвергается ряду столкновений с вертикальной и отражательной поверхностью ступени. Это будет происходить пока в результате

скольжения по наклонной поверхности ступени, частица не попадет в полезную зону, после чего она имеет возможность перемещения на следующую ступень.

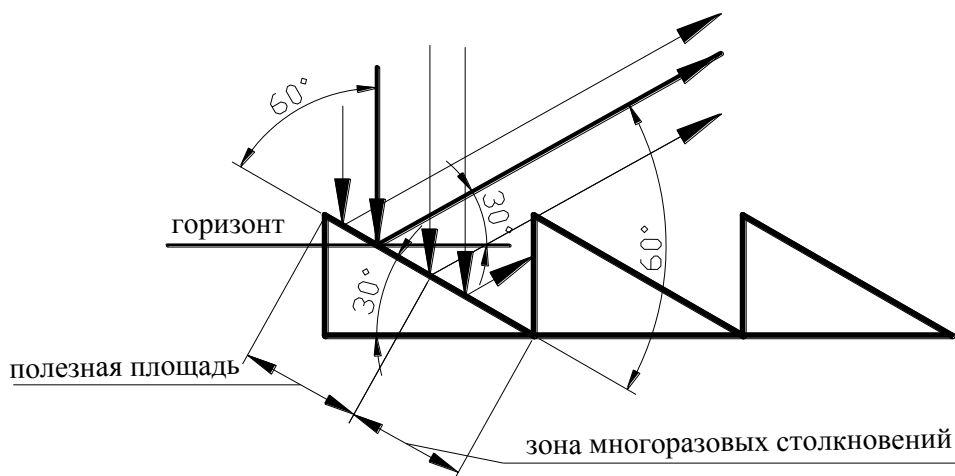


Рис. 2.9. Схема отражения зерен от ступенчатой поверхности деки.

Схема конструкции ступенчатой поверхности имеет следующий вид по рис. 2.9.

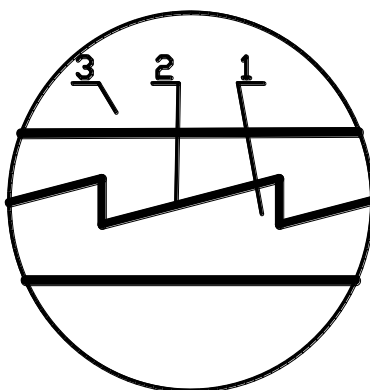


Рис. 2.10. Ступенчатая поверхность рабочего органа.

В сварную металлическую или деревянную раму 1 установлены текстолитовые пластины 2 со ступенчатой поверхностью и ограждены бортиками из листового металла 3.

Экспериментальный образец такой машины (рис. 2.10) состоит из рамы 1, на которой установлен электродинамический вибровозбудитель 2 и направляющие полозья 3 для рабочего органа 4. Ступенчатая дека 4 соединена с якорем вибровозбудителя 2 через шток 5. Снизу к деке жестко крепятся две оси,

установленные на четыре ролика 6. Ролики 6 находятся в пазах полозьев 3, которые ограничивают перемещение роликов вверх и вниз, т.е. перемещение рабочего органа (деки) возможно только в горизонтальном направлении. Ограничивающие бортики 7 служат для удержания исходной смеси на поверхности рабочего органа в процессе вибротранспортирования, а также приемный и загрузочный бункер.

Для эксперимента было выбрано три вида зерновой массы: зерна гречихи, зерна ячменя, зерна фасоли. Такой выбор обосновывается распространенностью культур и тем, что они являются удобными для многократных экспериментов, т.к. не повреждаются при вибрациях.

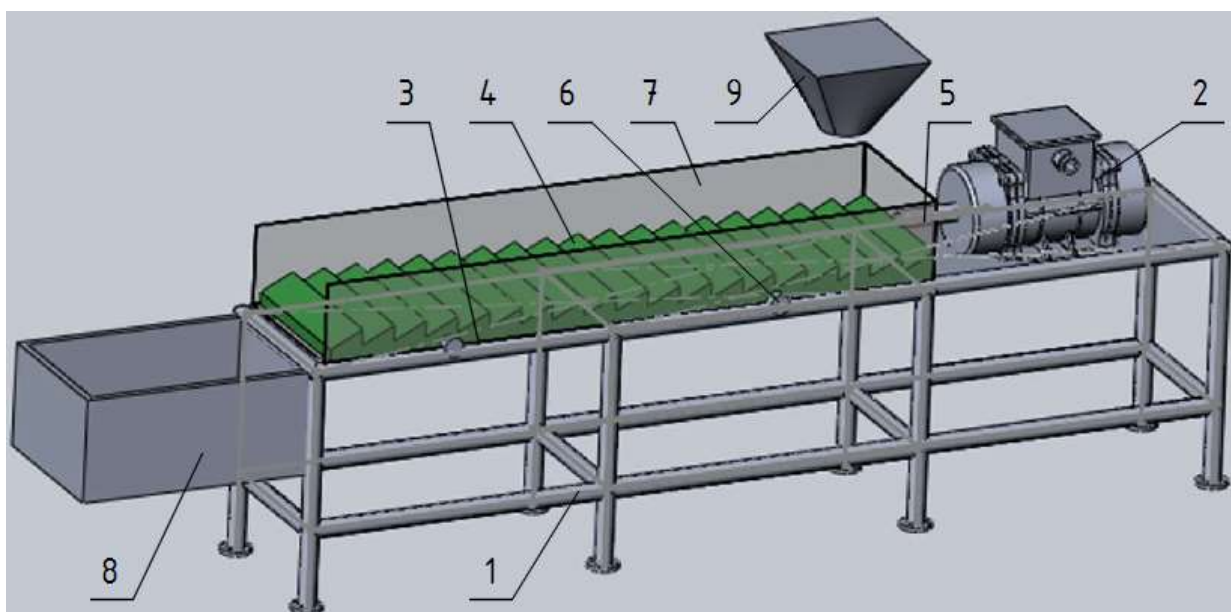


Рис. 2.11. Схема экспериментального стенда.

Дека (рис. 2.12) состоит из рамы, в которую устанавливаются текстолитовые пластины со ступенчатой поверхностью. С обеих сторон деки установлены ограничивающие бортики. Ступени имеют следующие размеры: длина наклонной поверхности 0,025 м, ширина полотна 0,085 м, угол наклона к горизонту 30° . Геометрические параметры выбраны исходя из обобщенных опытных данных.



Рис. 2.12. Ступенчатая поверхность текстолитовой деки.

Для эксперимента нами были выбраны зерновые культуры с разными размерами, формой и массой, и, также, с разными коэффициентами трения, что позволит получить наиболее полную картину при рассмотрении и изучении данного процесса. Амплитуда колебаний рабочего органа (деки) во время проведения эксперимента изменялась от 0,002 м до 0,010 м, частота от 15 Гц до 40 Гц.

Попадая на рабочую поверхность деки, разные по форме, размеру и физическим свойствам зерна перемещаются с разными скоростями в направлении, которое предполагалось. Однако любые зерна, сталкиваясь с наклонной поверхностью в момент перемещения деки в сторону, противоположную перемещению зерновой массы, остаются на поверхности рабочего органа, а в момент обратного перемещения сбрасываются поверхностью ступени в направлении движения смеси. Зерна, которые падают на рабочую поверхность, когда она перемещается в направлении перемещения сыпучей массы, сразу сбрасываются в направлении движения всей смеси. Можно заметить случаи, когда зерна попадают в вершину ступени, тогда зерно летит по направлению движения рабочего органа на момент столкновения. Если, в результате этого, перемещение зерна не согласуется с общим направлением

движения зерен, то при последующих столкновениях с поверхностью рабочего органа направление движения все равно изменяется.

Просмотр видеозаписей с различными геометрическими параметрами ступеней показали, что наиболее упорядоченное перемещение, имеющее максимальную скорость слоя зерновых смесей происходит в случае, если высота ступени равна диаметру частицы [46, 82, 126, 130]. Центр частицы, в таком случае, будет находиться близко к горизонтальному уровню верхней точки ступени, что фактически позволит избежать этапа многочисленных соударений между вертикальной и наклонной плоскостями ступени деки.

Для практического исследования процесса целесообразно выбрать модель частицы с правильной шарообразной формой и ощутимой массой. На такой модели можно будет четко различить различные особенности и стадии процесса, которые труднее будет заметить на натуральной зерновой массе. В качестве модели, был выбран стальной шарик, диаметр которого, сопоставим с высотой ступеней деки. Эксперимент проводился при параметрах, которые соответствовали наиболее интенсивному виброперемещению модели. Частота синусоидальных горизонтальных колебаний 18 Гц, амплитуда 0,006м.

Рассматривая различные эпизоды, периодически повторяющегося процесса, можно разделить его на четыре основных стадии (рис. 2.13): 1) перемещение сыпучей массы вместе с колеблющейся декой, когда зерна находятся между вертикальной и наклонной гранями ступени; 2) скольжение по наклонной грани ступени деки; 3) полет частицы зерновой массы; 4) приземление в исходное положение на следующей ступеньке.

Замедленный просмотр скоростной видеозаписи процесса виброперемещения осуществлялся для разных зерновых смесей, и если в таком процессе скорость виброперемещения рассматривать как параметр оптимизации, то, внимательно просмотрев и детально проанализировав видеозапись процесса виброперемещения, можно заключить следующее:

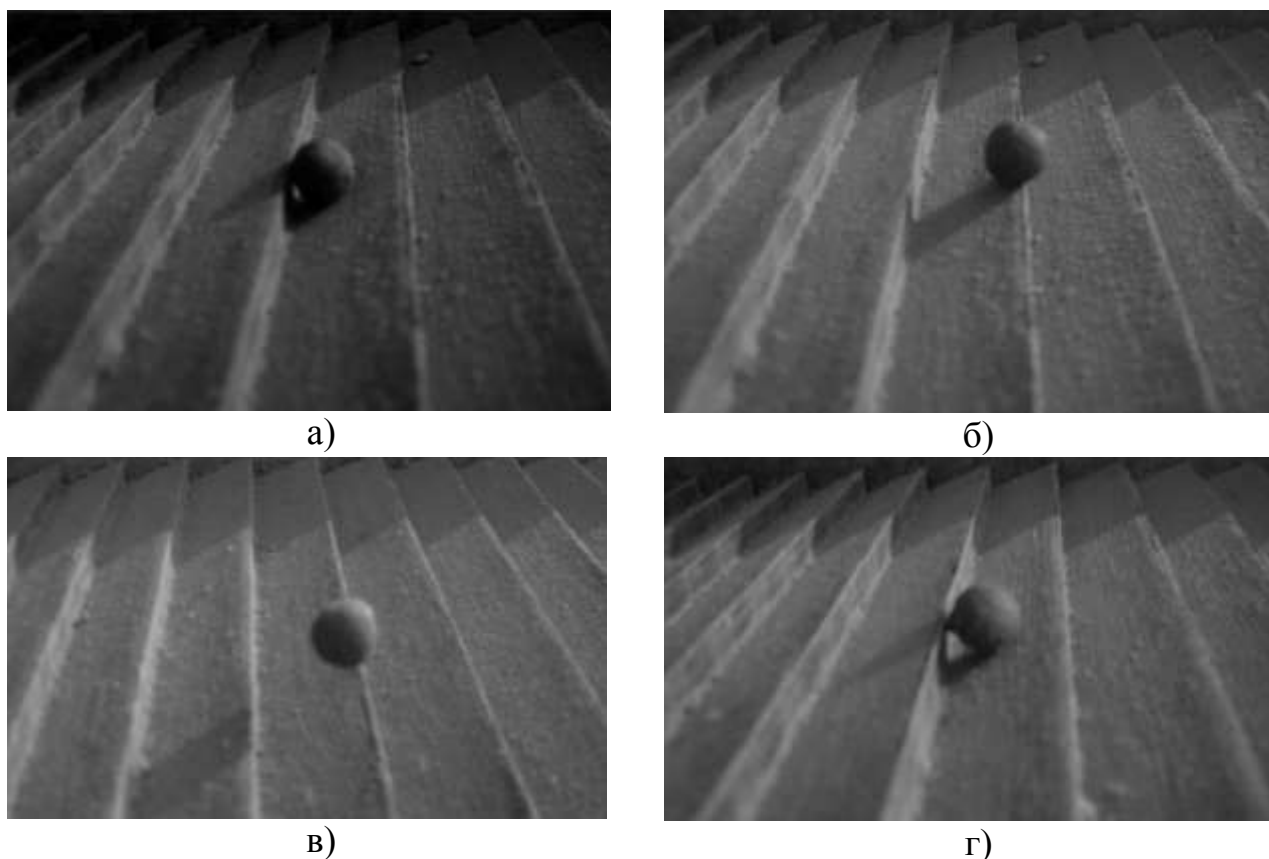


Рис. 2.13. Стадии процесса виброперемещения зерна гороха по ступенчатой поверхности текстолитовой деки:

- а) начальное положение между гранями ступени;
- б) перемещение скольжением по наклонной грани ступени;
- в) начало полета от наклоненной поверхности ступени;
- г) завершение полета, приземление в исходное положение на следующей ступеньке.

1. Коэффициент трения используемых сыпучих материалов на рабочей поверхности деки влияет на скорость процесса, но это влияние меньше, чем при виброперемещении тех же сыпучих материалов на плоской горизонтальной поверхности из того же материала при той же частоте, амплитуде и направленности колебаний.

2. Весь процесс протекает с разной интенсивностью для однородных сыпучих смесей, которые включают в себя зерна разного фракционного состава, таким образом: соотношение размеров перемещаемых частиц с размерами

ступеней поверхности деки влияет на интенсивность процесса и как следствие на значение скорости виброперемещения.

3. В рассмотренном способе виброперемещения сыпучие материалы, которые имеют зерна близкие по размерам, демонстрируют однообразие синхронного перемещения с одинаковыми высотой и длиной полета, длиной скольжения по наклонной поверхности ступени.

4. В связи с тем что, скорость виброперемещения для различных фракций разная и влияют на нее, кроме кинематических параметров колебаний, также геометрические параметры ступеней деки, то для аналитических исследований скорости виброперемещения будет необходимо учитывать соотношение размеров частицы и ступени деки.

2.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ МАССЫ ПО ПОВЕРХНОСТИ

При прохождении процесса виброперемещения зерновых масс по ступенчатой поверхности рабочего органа, который совершает возвратно-поступательные колебания в горизонтальной плоскости, возникают различные силы трения. Наибольшее влияние на процесс виброперемещения оказывает сила трения частиц зерен с наклонной поверхностью ступени.

Коэффициент трения равен тангенсу угла самотека, т.е. наименьшему углу, при котором зерна сыпучей массы начинают скользить по какой-либо поверхности. На сыпучесть зерновой массы влияет ряд факторов - их форма, характер и состояние поверхности, влажность семян, содержание посторонних примесей и характер их, материал и состояние поверхности, по которой перемещаются семена. Так, чем ближе форма зерен к форме шара и чем глаже их поверхность, тем меньше коэффициент трения.

Экспериментальное определение углов (коэффициентов) внешнего трения осуществлялось на приборе, схематично показанном на рисунке 2.14.

Прибор состоит из массивного основания 1, установленного на четырех винтовых опорах 4. Поворотная плита 4 закреплена на основании 1 с помощью оси 5. На поворотной плите крепится исследуемая пластина 8, на которую устанавливается имитирующий образец 6. Скольжение образца вниз по пластине 8 ограничивается упором 10. Положение поворотной плиты определяется мерительной линейкой 3. Вращение поворотной плиты 7 осуществляется с помощью струны 9 и катушки 12, закрепленной на валу синхронного электропривода (СД-54) 13.

Выходной вал электропривода 13, закрепленного на стойке 14, вращается с угловой скоростью $\omega_0 = 1,1 \text{ с}^{-1}$. На основании 1 также установлены кнопка пуска 15 и уровень 2.

Имитирующий образец изготовлен из листового полиэтилена толщиной $\delta = 0,0003 \text{ м}$ и диаметром $\varnothing = 0,062 \text{ м}$. Имитирующий образец 6, заполненный сыпучей массой, устанавливается на поверхности исследуемого материала пластины 8, закрепленной на поворотной плите 7. При включении синхронного электропривода СД-54 с помощью кнопки пуска 15 поворотная плита 7 поворачивается вокруг оси 5 с угловой скоростью $\omega_n = 0,011 \text{ с}^{-1}$. В начальный момент скольжения образца 6 по пластине 8 вращение плиты 7 прекращалось.

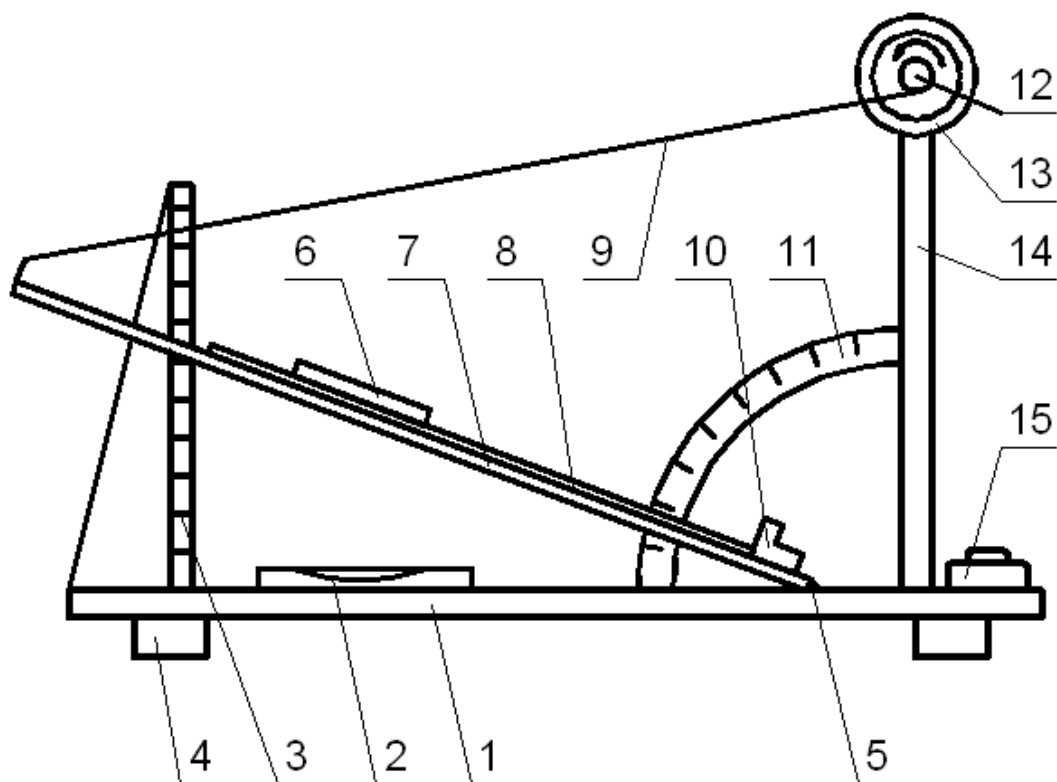


Рис. 2.14. Схема прибора для определения углов внешнего трения:

- 1 – основание; 2 – уровень; 3 – мерительная линейка; 4 – винтовая опора; 5 – ось; 6 – образец; 7 – поворотная плита; 8 – исследуемая пластина; 9 – струна; 10 – упор; 11 – транспортир; 12 – катушка; 13 – электропривод; 14 – стойка; 15 – кнопка "пуск".

Определение коэффициента внешнего трения соответствующей зерновой массы по исследуемой поверхности производили по шкале линейки 3 и контролировался с помощью транспортира 11. Поскольку база прибора ($L=0,250\text{м}$) представляет собой горизонтальный катет прямоугольного треугольника и является постоянной величиной, то другой катет треугольника - высота H , выраженная в относительных единицах по отношению к $L = 0,250\text{м}$, оказывается пропорциональной тангенсу угла подъема, равного тангенсу угла внешнего трения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \rho = \mu = H : L . \quad (2.60)$$

Измерения повторялись с трехкратными повторениями, и по среднеарифметическим значениям угла наклона плоскости определялся тангенс. Данные измерений заносились в таблицу 2.5.

Таблица 2.5

Коэффициенты внешнего трения зерновых масс по различным поверхностям

Поверхность	Размер выступов, мм	Усредненные значения тангенса угла α сыпучей массы				
		Рис длинный	Зерно пшеницы	Гречиха	Фасоль белая овальная	Горох
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Рифленая поверхность с квадратными выступами стальная по ГОСТ 5336-80	0,67	0,42	0,40	0,47	0,36	0,34
	0,36	0,49	0,47	0,53	0,42	0,38
	0,30	0,55	0,51	0,58	0,47	0,42
Стальное штампованное сито (круглое) по ГОСТ 6613-86, ТУ 4792-001-50336739-2001	1,0	0,49	0,42	0,44	0,38	0,36
	1,1	0,51	0,47	0,53	0,40	0,38
	1,2	0,53	0,38	0,53	0,34	0,38
Медное плетеное сито по ГОСТ 6613-86	0,05	0,42	0,40	0,47	0,36	0,34
	0,1	0,55	0,51	0,58	0,47	0,42
	0,315	0,53	0,38	0,53	0,34	0,38
	0,63	0,42	0,51	0,47	0,16	0,12
	1,0	0,42	0,44	0,45	0,18	0,14
	1,6	0,42	0,47	0,44	0,18	0,14
Ткань из синтетических нитей (полотняное переплетение) по ГОСТ 4403-91	0,15	0,49	0,53	0,57	0,46	0,44
	0,81	0,49	0,53	0,58	0,46	0,44
	1,14	0,51	0,53	0,6	0,46	0,44
Сталь Ст.3 по ГОСТ 19281-89	-	0,52	0,56	0,58	0,5	0,46
Дерево по ГОСТ 8242-88	-	0,55	0,59	0,6	0,52	0,47
Текстолит по ГОСТ 2910-74	-	0,54	0,58	0,59	0,51	0,46
Резина по ГОСТ 27896-88	-	0,75	0,58	0,60	0,73	0,78

Проанализировав полученные результаты, делаем вывод, что на значение внешнего коэффициента трения кроме материала, из которого изготовлены рифленные поверхности, влияет форма и размер выступов. А коэффициенты трения по гладким поверхностям совпали с имеющимися в литературных источниках сведениями, что подтверждает правильность проведения замеров.

ВЫВОДЫ ПО 2 РАЗДЕЛУ

1. Разработан алгоритм аналитического и экспериментального этапа исследований.

2. Проведены аналитические исследования процесса целенаправленного движения по ступенчатой поверхности при горизонтальных колебаниях, получена математическая модель процесса.

3. Раскрыта механика этапов перемещения двух слоев зерновой массы, получены уравнения для определения их перемещения на этапе скольжения и полета, уравнение для определения общего перемещения и общей средней теоретической скорости.

4. Получено выражение для определения теоретической производительности вибрационного транспортера с горизонтальными колебаниями рабочего органа.

5. Получены выражения для определения фазового угла начала скольжения, отрыва и фазового угла падения, граничные условия протекания процесса.

6. Получены выражения для определения геометрических параметров: высоты, длины наклонной поверхности и угла α , в зависимости от кинематических параметров A и ν .

7. Используя программный пакет MathCAD, аналитически определена средняя скорость целенаправленного движения зерновой массы в зависимости от параметров колебаний рабочего органа при различных углах наклона ступени.

8. Получены зависимости средней теоретической скорости виброперемещения зерновых слоев от кинематических параметров колебаний рабочего органа: амплитуды и частоты. При различных углах наклона ступени α .

9. Раскрыт механизм и этапы виброперемещения слоёв зерновых масс на ступенчатом рабочем органе при его горизонтальных колебаниях, разработана конструкционная схема ступенчатой поверхности.

10. Спроектирован и изготовлен экспериментальный образец вибрационно-транспортной машины для осуществления нового процесса транспортирования зерновых масс.

11. Экспериментально определены коэффициенты внешнего трения зерновых масс широко распространенных в нашем регионе, по различным гладким и рифленым поверхностям.

3 РАЗДЕЛ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТЁРОВ СО СТУПЕНЧАТЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНОМ

3.1. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Основными параметрами определяющие энергоэффективность любого рабочего процесса, в том числе и процесса перемещения зерновых продуктов, являются производительность и мощность.

В работах [78,79] рассматривается метод энергетического баланса системы вибрационный конвейер – сыпучий продукт.

В общем случае внешней энергии подводимой к вибрационному конвейеру можно представить как:

$$A_{акт} = \eta N_{дв} dt_{дв} \quad (3.1)$$

где η - коэффициент полезного действия конвейера, который определяется его конструктивными особенностями;

$N_{дв}$ - мощность двигателя;

Перемещение некоторой массы материала m_m - возможно только при колебательных движениях рабочего органа конвейера m_p . Поэтому требуемые суммарные затраты энергии для перемещения массы материала m_m можно представить как:

$$\sum A_n = A_{m_m} + A_{m_p} \quad (3.2)$$

Работу, необходимую для перемещения некоторой единицы зерновой массы можно записать как:

$$A_{m_m} = E_{m_m} d_{m_{m1}} g m \quad (3.3)$$

Работу, необходимую для приведения в колебательный процесс (с заданной частотой ω и амплитудой A можно записать как:

$$A_{m_p} = E_{m_p} d m_p \quad (3.4)$$

В традиционном вибрационном транспортёре вибрационное усилие P_e к рабочему органу с плоской поверхностью прикладывается под некоторым углом β , на которой расположена транспортируемая зерновая масса.

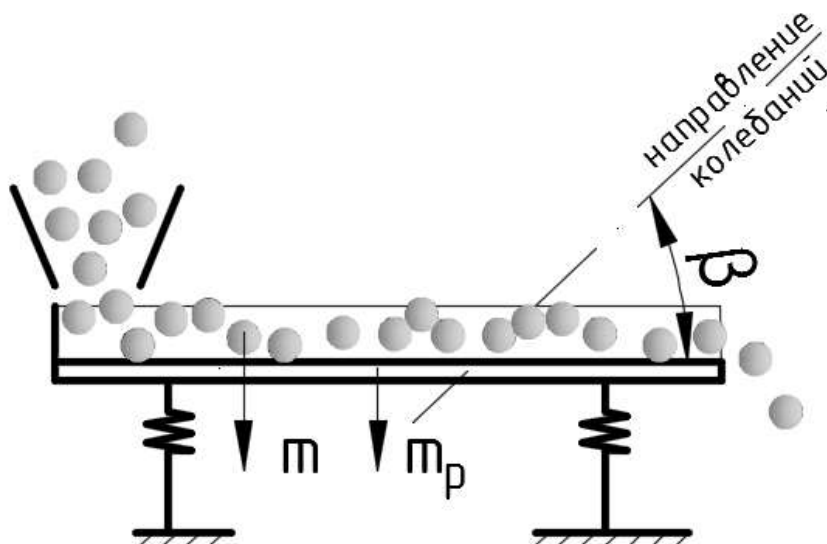


Рис. 3.1. Схема традиционного вибрационного транспортёра

Для обеспечения колебаний рабочего органа транспортёру необходима определённая возмущающая сила P_e , при том важную роль играет частота её приложения (частота вынужденных колебаний ω_e) и частота собственных колебаний ω_c , которая определяется упругими связями рамы конвейера с основанием.

Согласно исследованиям [11] колебания вибромашин могут быть в трёх режимах: дорезонансный, резонансный и зарезонансный (рис. 3.2.).

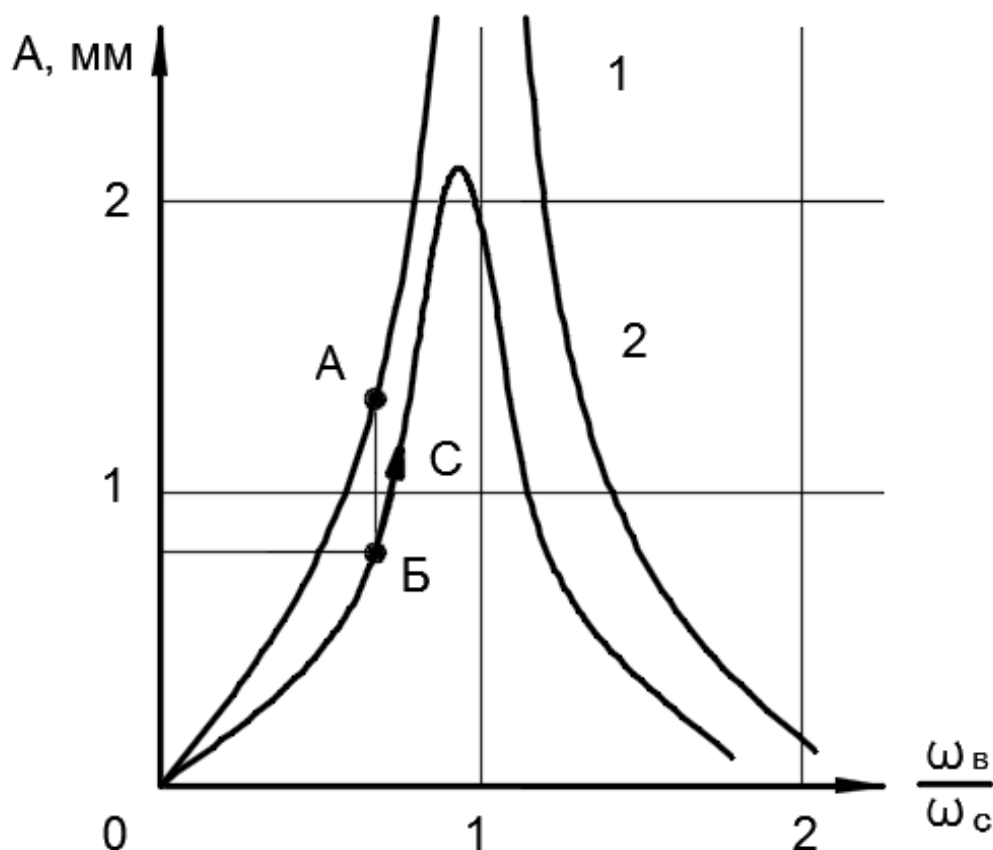


Рис. 3.2. – Режимы работы вибромашины

В таблице 3.1. приведены характеристики наиболее применяемых горизонтальных питателей, которые показывают, что применяются следующие значения вынужденных и собственных частот колебания рамы конвейера $\omega_6=50$ Гц, $\omega_c=53...56$ Гц. Причём указанная частота соответствует резонансному явлению, когда амплитуда колебаний системы проходит максимум.

Для устойчивой работы питателя целесообразно обеспечить дорезонансный режим работы. В этой зоне (Рис. 3.2. см. точки А, Б и С) колеблющаяся система питателя имеет точку запуска (А), затем появляются дополнительные демпфирующие сопротивления от загрузки материала и система переходит в точку Б или С, т.е. она автоматически настраивается загрузкой лотка материалом.

Таблица 3.1.

Характеристика типовых вибрационных питателей.

Наименование параметра	Значения для типовых вибропитателей			
	ПВЭМ-0,3	ПВЭМ-0,4	ПВЭМ-0,5	ПВЭМ-0,7
Ширина лотка B , мм	300	400	500	700
Длина лотка L , мм	500...1000	800...1200	1000...1400	1400...1800
Производительность при наклоне лотка $1-3^\circ$, м ³ /ч, не более	20	30	50	75
Крупность материала, мм, не более	70	110	130	180
Амплитуда колебаний лотка	0,7	0,7	0,6	0,6
Частота колебаний, Гц	50	50	50	50
Собственная частота, Гц (резонансная)	53...56			
Мощность привода, кВт	0,1	0,25	0,25...0,5	0,5

Схемы нагружения частицы движения материалы на рабочей поверхности вибротранспортёра зависят от её угла наклона и направления действия возмущающей силы P_e представлены на рисунке 3.3.

Таким образом имеется критический угол наклона плоскости рабочего органа $\alpha_{кр} > 5,7^\circ$. Меньше критического $\alpha_{кр}$ перемещение материала не происходит и необходимы возмущения, которые направлены под некоторым углом β к рабочей плоскости. Как видно из Рис. 3.3. б, для движения частицы необходимо сообщать её гармонические движения под углом $\beta \geq \alpha$.

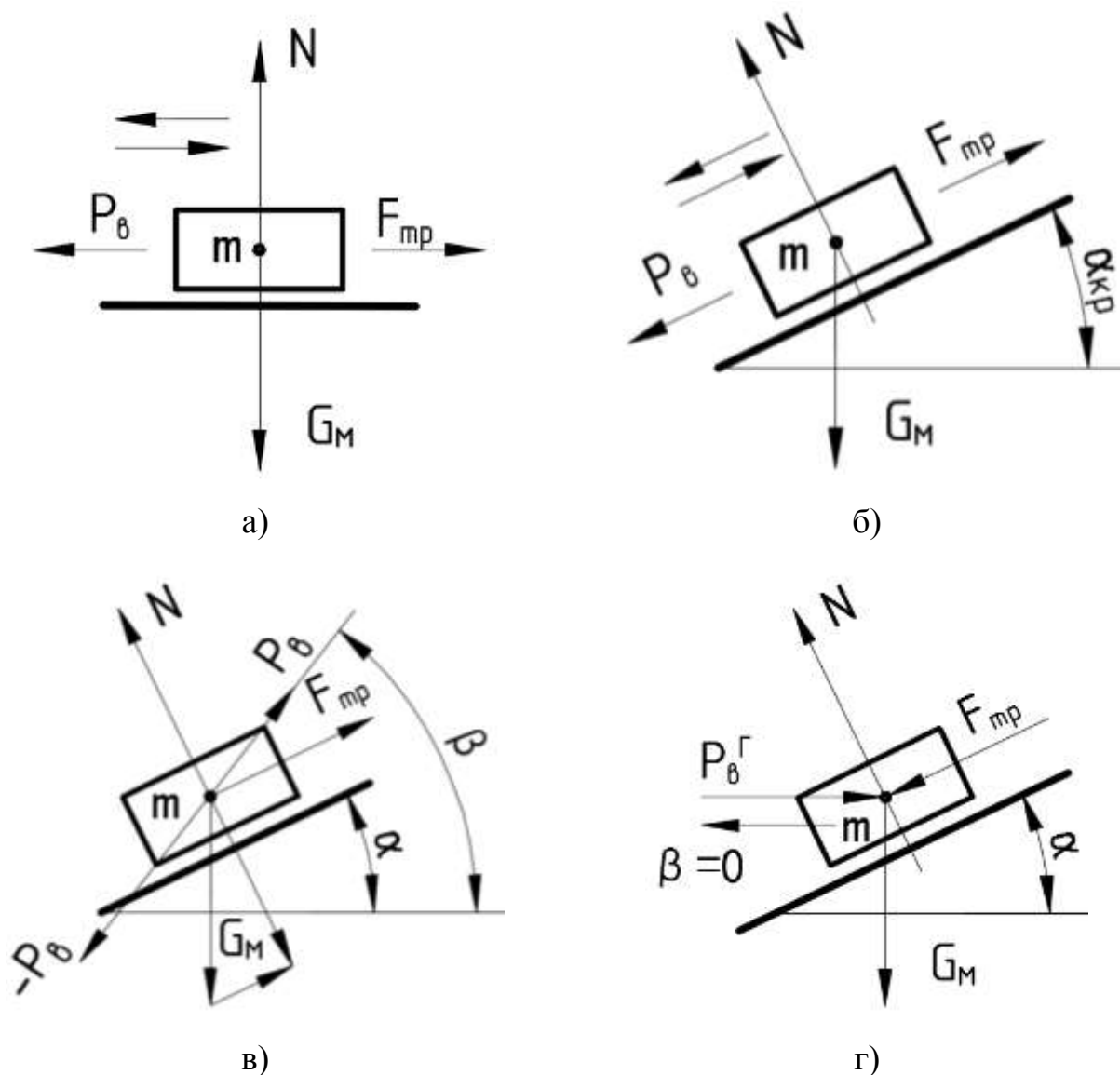


Рис. 3.3. Возможные схемы движения частицы по поверхности рабочего органа вибротранспортёра

Перемещение частицы по лотку вибрационного транспортёра ещё зависит от закона колебаний рабочего органа: не симметричном и симметричном. Наиболее часто используется симметричный режим колебаний.

Критический угол $\alpha_{кр}$ перемещения материала, при котором частица будет перемещаться по лотку и не возвращаться в исходное положение зависит от её коэффициента внешнего трения (рис. 3.3. б).

$$\alpha_{кр} = g(\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (3.5)$$

На Рис. 3.3. в представлена схема перемещения частицы по поверхности с углом наклона α при воздействии силы инерции P_ϵ будет двигать частицу вперёд, а отходе лотка рабочего органа назад сила инерции будет действовать в противоположном направлению движения и будет прижимать продукт к поверхности, увеличивая силу трения $F_{тр}$, под действием которой частица остаётся на поверхности. В зависимости от ускорения рабочего органа и углов α и β могут быть различные режимы движения частицы материала как безотрывные так и отрывные (частица отрывается от поверхности и перемещается в воздушном пространстве).

На Рис. 3.3. г представлена предлагаемая схема движения частицы сыпучего продукта, на которую воздействует горизонтальная сила P_ϵ^0 . Движение частицы при прямом ходе возможно если:

$$P_\epsilon^0 \cos \alpha \geq (gm + P_\epsilon^0 \sin \alpha) \mu \quad (3.6)$$

После преобразования получим, что:

$$P_\epsilon^0 \geq \frac{gm\mu}{\cos \alpha - \sin \alpha \mu} \quad (3.7)$$

Для перемещения частиц при воздействии усилия P_ϵ под углом β в соответствии с рисунком 3.3. в режимах:

$$P_\epsilon^\beta = \frac{mg \cos^2 \alpha \mu}{1 - \sin \alpha \cos \alpha \mu} \quad (3.8)$$

При одинаковых параметрах частиц частота и амплитуда колебаний усилия перемещение частиц по схемам Рис. 3.3. в и Рис. 3.3 г соотносятся следующим образом:

$$\frac{P_{\epsilon}^0}{P_{\epsilon}^{\beta}} = \frac{mg \cos^2 \alpha \mu (\cos \alpha - \sin \alpha \mu)}{mg \mu (1 - \sin \alpha \cos \alpha \mu)} = \frac{\cos^2 \alpha (\cos \alpha - \sin \alpha \mu)}{1 - \sin \alpha \cos \alpha \mu} \quad (3.9)$$

На рисунке 3.4. представлены соотношения требуемых вибрационных усилий для перемещения зерновой массы с коэффициентом внешнего трения по рабочему органу $\mu = 0,3$.

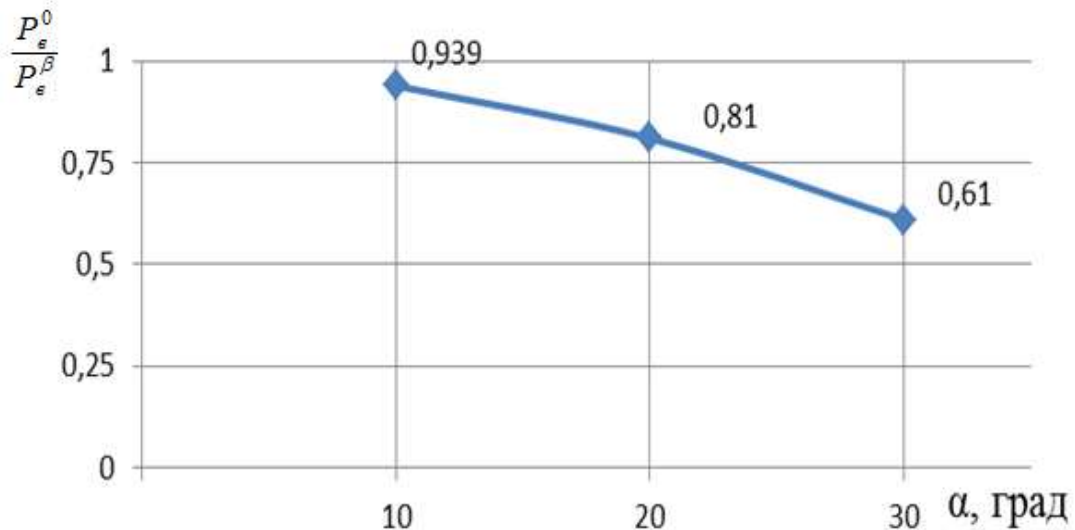


Рис. 3.4. Зависимость изменения соотношения от угла наклона рабочей поверхности к горизонту.

Если принять допущение, что пропускная способность вибрационных транспортёров одинакова и путь их движения одинаков, то соответственно, затраты на перемещение материала в предложенном варианте будут выше. При этом необходимо отметить, что затраты энергии на ступенчатом транспортёре будут ещё больше, так как необходимо ещё поднимать материал на величину высоты ступени.

Эти затраты можно записать как:

$$A_{нод} = \sum_{i=1}^n A_{cm} = \sum_{i=1}^n mgV_{cm} \quad (3.10)$$

где A_{cm} - работа затрачиваемая на подъём частицы на одну ступень высотой V_{cm} ;

n – количество ступеней на рабочей поверхности деки транспортёра.

3.2. ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, СВЯЗАННЫЕ С СООБЩЕНИЕМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ РАБОЧЕМУ ОРГАНУ ВИБРАЦИОННОГО ТРАНСПОРТЁРА

Вибротранспортёры обычно содержат лоток, закреплённый на основании на упругой подвеске с помощью наклонных плоских пружин или пружинных стержней. Вибровозбудитель устанавливается на основании транспортёра с возможностью взаимодействия с лотком. Суммарная жёсткость упругой системы:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3.11)$$

где C_i – жёсткость i -ой пружины.

n – количество пружин.

Частота собственных колебаний лотка массой m_l составляет:

$$\omega_c = \sqrt{k \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{m_p + m_c}} \quad (3.12)$$

где k - коэффициент пропорциональности;

m_p и m_c - соответственно масса подвижного лотка и перемещаемого материала.

Как видно из зависимости (3.12) соотношение масс m_p и m_c , вернее их суммарная величина влияют на частоту собственных колебаний системы, а далее на режим работы вибротранспортёра.

Эффективность работы вибропитателей и вибрационных транспортёров рекомендуется оценивать коэффициентом режима работы [133]

$$k_p = \frac{A\omega_\epsilon \sin \beta^*}{g \cos \alpha} \quad (3.13)$$

где β^* - угол вибраций, т.е. угол между направлением возмущающей силы P_ϵ и плоскостью грузонесущего рабочего органа.

Если сравнить направленные под углом колебательные движения и горизонтальные одного и того питателя, то коэффициенты режимов работы соотносятся как:

$$\frac{k_p^\beta}{k_p^0} = \sin \beta^*; \text{ или } k_p^0 = \frac{k_p^\beta}{\sin \beta^*} \gg 1 \quad (3.14)$$

Явно видно, что коэффициент режима работы для вибротранспортёров с горизонтальными колебаниями выше.

Скорость транспортирования при $k_p^\beta > k_p^0$ согласно исследованиям [139] будет больше исходя из зависимости:

$$v = (k_1 + k_2 \sin \beta) A \omega \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{1}{k_p^0}} \quad (3.15)$$

где k_1 и k_2 - соответственно эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от свойств транспортируемого материала.

При $\beta = 0$ имеем:

$$v_{\beta=0} = (k_1 + k_2)A\omega \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{k_p^\beta}{\sin\beta}} \quad (3.16)$$

Таким образом скорость транспортирования продукта возрастает при предлагаемой модернизации.

Сравним энергетические затраты на сообщение вибрационных колебаний только рабочему органу по традиционной схеме и предлагаемой.

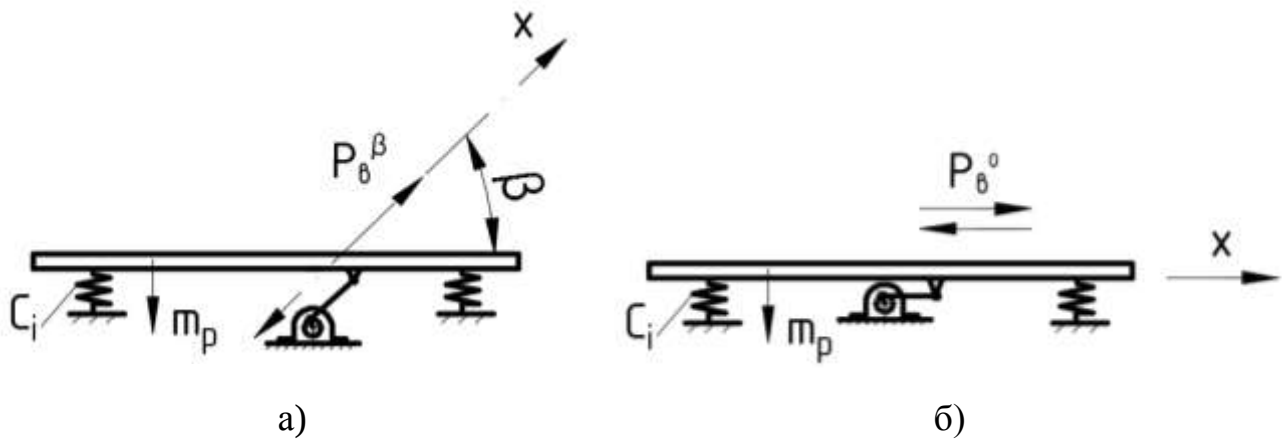


Рис. 3.5. Схемы для сравнения вибрационного конвейера

(Рис. 3.5. а) уравнение для обеспечения перемещения лотка имеет вид:

$$P_\theta^\beta - m_p g \sin\beta - \sum C_i^\beta x = 0 \quad (3.17)$$

Для предлагаемой конструкции:

$$P_\theta^0 - \sum C_i^0 x = 0 \quad (3.18)$$

Можно предположить, что возможно обеспечить одинаковые жёсткости опор при $\beta = 0$ и $\beta \neq 0$, т.е. $C_i^\beta \approx C_i^0$.

Для обеспечения колебаний в первом случае требуется переменное усилие, развиваемое вибратором направленного действия:

$$P_\epsilon^\beta = \sum C_i^\beta x + m_p g \sin \beta \quad (3.19)$$

Во втором:

$$P_\epsilon^0 = \sum C_i^0 x \quad (3.20)$$

Для обеспечения работы традиционного вибрационного транспортёра требуется более мощный вибратор направленного действия:

$$P_\epsilon^\beta - P_\epsilon^0 = m_p g \sin \beta \quad (3.21)$$

Необходимая дополнительная мощность привода традиционного питателя с учётом исследований [95, 54]:

$$\Delta N_{\partial\epsilon} = \frac{P_\epsilon^\beta - P_\epsilon^0}{T} S \quad (3.22)$$

где $S = 4A$ - путь, который проходит i -я точка рабочего органа за период колебания $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

$$\Delta N_{\partial\epsilon} = \frac{m_p g \sin \beta 4A\omega}{2\pi} \quad (3.23)$$

Как видно из зависимости (3.23), по сравнению с горизонтальными колебаниями (предлагаемый вариант) в традиционной конструкции вибротранспортера с действием усилия P_ϵ под углом β требуется дополнительная мощность привода растёт пропорционально массе лотка, амплитуде и частоте колебаний.

Визуализация решения (3.23) представлена на рис. 3.6. при $\beta = 30^\circ$, $A=0,005\text{ м}$, $\nu = 25\text{ Гц}$.

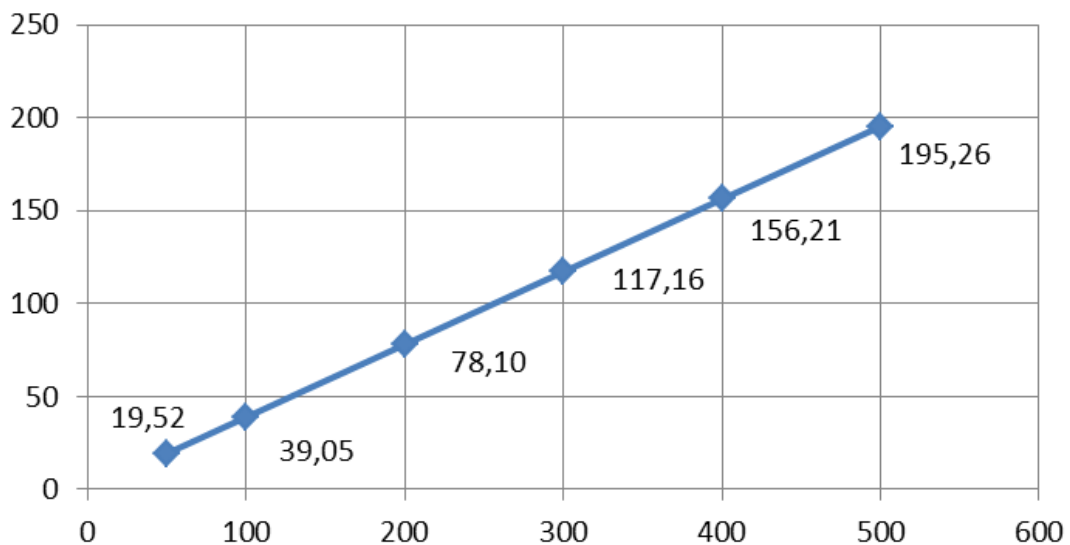


Рис. 3.6. Дополнительная мощность привода вибротранспортера в зависимости от массы лотка m , при $\beta = 30^\circ$, $A=0,005\text{ м}$, $\nu = 25\text{ Гц}$

3.3. ЗАТРАТЫ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СТУПЕНЧАТОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

В существующих конструкциях вибрационных транспортеров колебания, в основном, направлены под углом к рабочему органу [2, 8, 49, 50, 64, 74, 69, 89, 90, 100-102, 114]. Рассмотрим схему работы вибрационного транспортера (рис. 3.7)

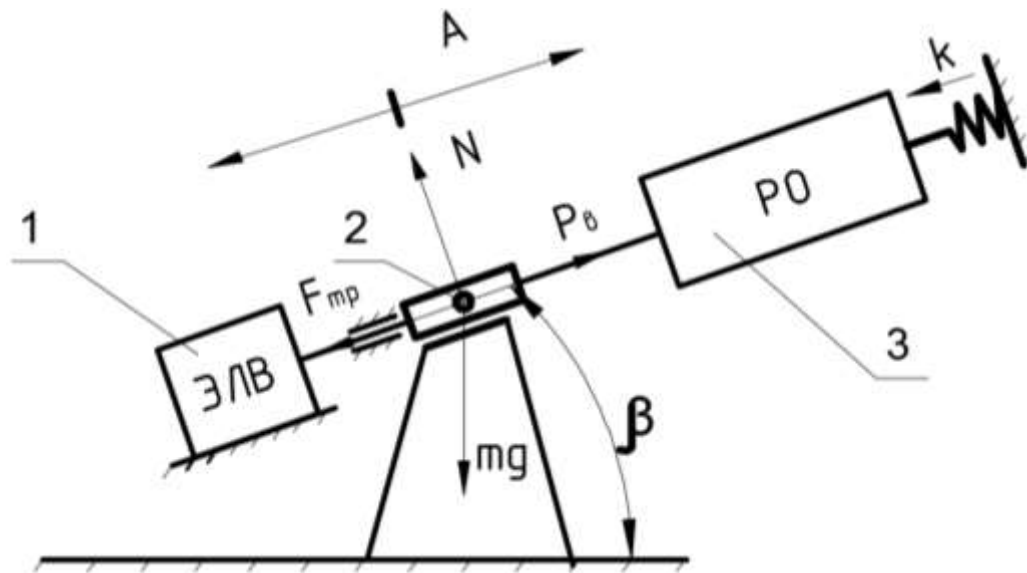


Рис. 3.7. Схема работы транспортера с направленными колебаниями под углом β к рабочему органу:

1 – вибровозбудитель; 2 – пара трения; 3 – рабочий орган.

Из рис. 3.7 видно, что для перемещения рабочего органа 3 необходимо чтобы возмущающая сила P_v от вибровозбудителя 1 была больше, чем силы трения $F_{тр}$ и реакции опоры N в паре трения 2, препятствующие его движению. Инерция рабочего органа 3 в каждом периоде компенсируется упругими элементами, воздействие которых одинаково при любом угле β . Исходя из этого, можем записать следующее выражение:

$$P_v > F_{тр} + mg \sin \beta = \mu mg \cos \beta + mg \sin \beta = mg(\mu \cos \beta + \sin \beta), \quad (3.24)$$

где P_v – возмущающая сила, Н;

$F_{тр}$ – сила трения, Н;

m – масса, кг;

β – угол направления колебаний, град;

μ – коэффициент трения.

Предлагаемая нами конструкция вибрационного транспортера подразумевает колебания рабочего органа в горизонтальной плоскости при $\beta=0^\circ$ [46, 47, 82, 83, 85, 126, 130, 125-132].

Так как $\beta=0^0$, а $\sin 0=0$, то возмущающая сила P_ϵ может быть найдена по следующей формуле:

$$P_\epsilon > F_{mp} = \mu N = \mu mg, \quad (3.25)$$

где N – сила реакции в опоре.

Известно, что работа силы за один период колебаний может быть найдена из выражения:

$$P_{a\delta} = F \cdot S_m, \quad (3.26)$$

где F – сила, Н; в нашем случае $F=P_\epsilon$.

S_m – перемещение рабочего органа за один период колебаний, в нашем случае $S_m=4A$;

Исходя из этого, можно записать выражение для определения работы, при направленных под углом колебаниями:

$$P_{a\delta_\beta} = 4P_{в\beta} \cdot A = 4mgA(\mu \cos \beta + \sin \beta). \quad (3.27)$$

Аналогичным образом, запишем выражение для определения работы при колебаниях рабочего органа в горизонтальной плоскости:

$$P_{a\delta_{\beta=0}} = 4P_{в\beta=0} \cdot A = 4\mu mgA. \quad (3.28)$$

Проанализировав выражения (3.27) и (3.28) видим, что при направленных под углом колебаниях необходимо совершить большую работу, чем при тех же условиях с колебаниями в горизонтальной плоскости.

Необходимая мощность равна отношению работы к промежутку времени, в течение которого она совершена:

$$W = \frac{P_{a\delta}}{t}, \quad (3.29)$$

t – промежуток времени равный одному периоду колебаний деки $t = T_{\kappa}$, с.

$$T_{\kappa} = \frac{2\pi}{\omega},$$

где ω – угловая частота вращения эксцентрикового вала вибровозбудителя, рад/с.

Необходимая мощность, при направленных под углом колебаниях:

$$W_{\beta} = \frac{P_{a\delta_{\beta}}}{t} = \frac{2P_{\beta} \cdot A\omega}{\pi} = \frac{2mgA(\mu \cos \beta + \sin \beta)\omega}{\pi}. \quad (3.30)$$

Необходимая мощность при колебаниях рабочего органа в плоскости горизонта при $\beta=0$:

$$W_{\beta=0} = \frac{P_{a\delta_{\beta=0}}}{t} = \frac{2P_{\beta=0} \cdot A\omega}{\pi} = \frac{2\mu mgA\omega}{\pi}. \quad (3.31)$$

В таком случае соотношение мощностей будет следующим:

$$\frac{W_{\beta}}{W_{\beta=0}} = \frac{\mu \cos \beta + \sin \beta}{\mu} = \cos \beta + \frac{\sin \beta}{\mu} \quad (3.32)$$

Приведенное выражение (3.32) показывает, во сколько раз меньше, необходима мощность для работы вибрационного транспортера со ступенчатой

декой новой конструкции, которая совершает колебательные движения в горизонтальной плоскости (при $\beta=0$).

По найденным значениям мощности при коэффициенте трения $\mu=0,3\div 0,8$ и различных углах направленности колебаний $\beta=0\div 45^\circ$ построена поверхность (рис. 3.8).

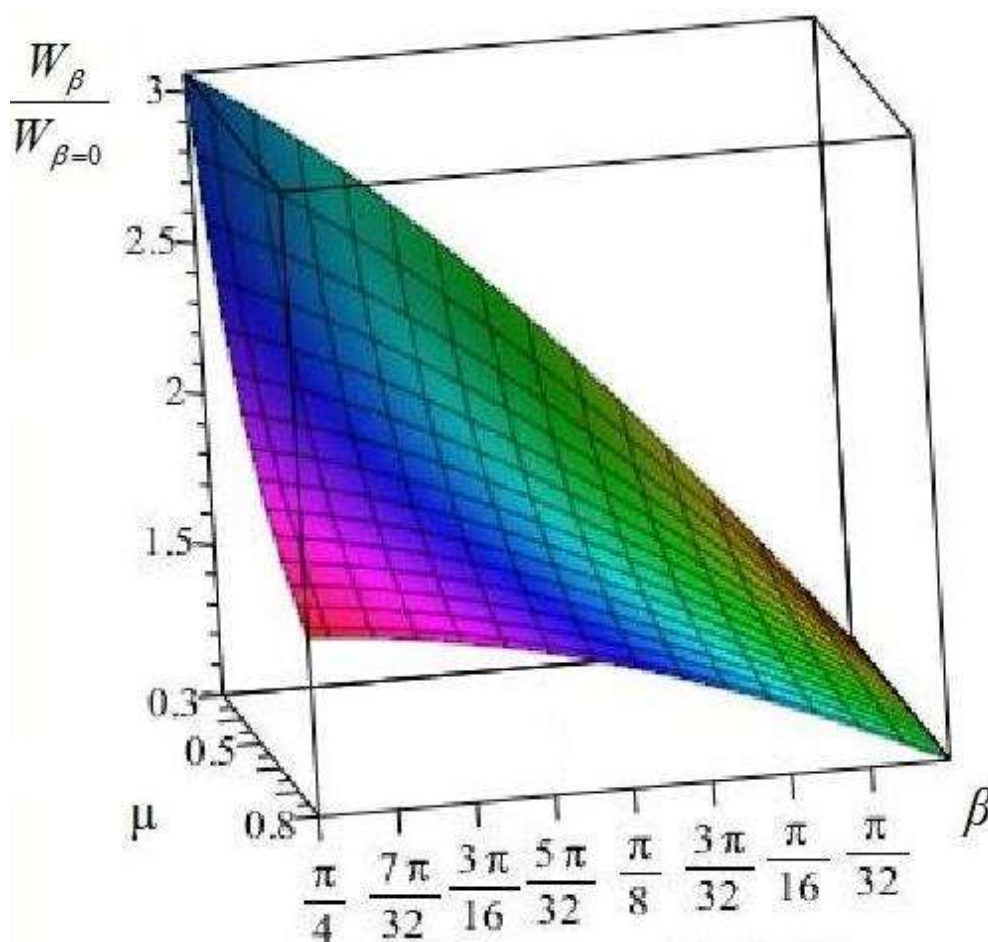


Рис. 3.8 Значения $W_\beta / W_{\beta=0}$ в зависимости от угла β при $\mu=0,3\div 0,8$.

В большинстве вибрационных транспортеров угол направленности колебаний составляет 30° [2, 8, 26, 102, 103, 49, 50, 64, 69, 89, 90, 100-102, 114]. При таком угле, при работе вибрационного транспортера по новой схеме, энергии может расходоваться в 2,54 раза меньше, чем при работе по классической схеме.

3.4. ОБОСНОВАНИЕ СОХРАННОСТИ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ПО ДЕКЕ СТУПЕНЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ

При направленном движении по ступенчатому рабочему органу предлагаемого вибротранспортера зерновая масса испытывает постоянные ударные нагрузки, из-за чего хрупкие продукты могут разрушаться. Необходимо определить убытки, связанные с возможным разрушением зерен продукта. И, если токовые будут иметь место, сравнить с величиной, зависящей от снижения энергозатрат.

Зернам злаковых, в отличие от идеально твердых тел, свойственна пространственная анизотропия, т.е. их механические свойства в различных направлениях не одинаковы. Хрупкость (прочность) продуктов напрямую зависит от истираемости и ударной вязкости зерна продукта.

Если транспортировка с помощью вибротранспортеров приводит к нежелательному измельчению транспортируемых зерновых масс, то в таком случае, следует использовать другие виды конвейеров, например ленточные.

В зависимости от характера и величины, приложенных к зерну внешних сил его линейные размеры и форма изменяются, т.е. в зерне возникают деформации. Они могут быть упругими (обратимыми) и пластическими (необратимыми). Если внешние силы не превышают некоторого предела, то смещение частиц из равновесных положений и возникающие деформации будут обратимыми. При упругой деформации после снятия внешних сил зерно под действием сил межатомного взаимодействия возвращается в первоначальное состояние.

Пластические деформации проявляются при нагрузках, превышающих предел упругости и сопровождается «течением» вещества без нарушения его целостности.

Развитие упругих, а затем пластических деформаций в зерне при воздействии на него внешних сил заканчивается разрушением. Оно наступает

при возникновении в нем напряжений, превышающих некоторый предел, называемый пределом прочности, или критическим напряжением.

Оценивая прочность единичных зерен величиной разрушающего напряжения установлено, что для ячменя оно составляет в среднем $7,03 \pm 1,02$ МПа в статических испытаниях против $12,73 \pm 0,4$ МПа, полученных в динамическом режиме [76]. На основании этих данных С.В. Мельников заключил, что «свойство большинства материалов повышать свою прочность с увеличением скорости нагружения присуще и зерну». При мгновенном и быстром нагружении, как это происходит при вибрационном транспортировании, при продольных колебаниях рабочего органа новой конструкции в горизонтальной плоскости, зерно хорошо подчиняется закону Гука.

Из зерновых культур наибольшей прочностью обладает ячмень, который может быть принят за эталон для сравнительной оценки (прочность зерна ячменя принята за 100%) [76]. О соотношении показателей прочности зерна различных культур можно судить по следующим данным:

- ячмень – 100%;
- пшеница – 91%;
- рожь – 83%;
- горох – 65%;
- овес (без пленок) – 54%.

Данные, полученные Л.А. Глебовым [76], по скоростям разрушения зерна свободным ударом о металлическую поверхность представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Скорости разрушения зернового сырья, (м/с)

Скорость удара	Ячмень	Овес	Пшеница	Рожь
-начала разрушения зерна	70	56	43	45
-полного разрушения зерна	130	105	115	92

Из этих данных следует, что динамические прочностные характеристики зерновых одной и той же культуры имеют большой разброс. Гарантированное вибрационное транспортирование без разрушения всех без исключения зерен ячменя наблюдается при скорости удара о ступенчатую поверхность деки до 70 м/с, пшеницы – 43 м/с, овса – 56 м/с.

Проведем аналитические исследования скорости соударения зерновой массы при транспортировании на рабочем органе новой конструкции, который совершает колебательные движения в горизонтальной плоскости.

Средняя скорость соударения зерна сыпучей массы со ступенчатым рабочим органом будет равна сумме средней скорости движения рабочего органа и средней скорости передвижения зерновой массы:

$$V_{сc\ cр} = V_{PO\ cр} + V_{np\ cр}, \quad (3.33)$$

где $V_{PO\ cр}$ – средняя скорость движения рабочего органа, м/с;

$V_{np\ cр}$ – средняя скорость движения зерновой массы, м/с;

Определим среднюю скорость движения рабочего органа:

$$V_{PO\ cр} = \frac{S}{t}, \quad (3.34)$$

где S – перемещение, м; t – время, с.

Т.к. за полный период колебаний рабочий орган совершает четыре перемещения, равные амплитуде колебаний A , то $S = 4A$.

A время, за которое рабочий орган проходит расстояние S определяем из следующего выражения:

$$t = \frac{T_k}{4}, \quad (3.35)$$

где T_k – период одного полного колебания, с.

Средняя скорость движения рабочего органа может быть представлена как:

$$V_{PO_{cp}} = \frac{A}{4T_{\kappa}} \quad (3.36)$$

Если отрыв единицы зернового слоя произойдет в момент движения рабочего органа со средней скоростью $V_{PO_{cp}}$, то её скорость $V_{np_{cp}} = V_{PO_{cp}}$. Следовательно, возможная средняя скорость столкновения частицы зернового слоя с рабочим органом может быть найдена из выражения:

$$V_{cc_{cp}} = \frac{A}{4T_{\kappa}} + \frac{A}{4T_{\kappa}} = \frac{A}{2T_{\kappa}} \quad (3.37)$$

Максимальная скорость соударения зерна сыпучей массы со ступенчатым рабочим органом будет равна сумме максимальной скорости движения рабочего органа и максимальной скорости передвижения зерновой массы:

$$V_{cc_{max}} = V_{PO_{max}} + V_{np_{max}}, \quad (3.38)$$

где $V_{PO_{max}}$ – максимальная скорость движения рабочего органа, м/с;

$V_{np_{max}}$ – максимальная скорость движения зерновой массы, м/с;

Определим максимально возможную скорость движения рабочего органа, как отношение перемещения рабочего органа ко времени:

$$V_{PO_{max}} = A\omega \cos \beta, \quad (3.39)$$

где A – амплитуда колебания, м;

ω – угловая частота колебаний, рад/с;

β – угол направленности колебаний, град.

Следовательно, возможная максимальная скорость столкновения частиц зернового продукта с рабочим органом может быть найдена из выражения:

$$V_{cc_{max}} = A\omega \cos \alpha + V_{np_{max}} \quad (3.40)$$

ВЫВОДЫ ПО 3 РАЗДЕЛУ

1. Представлены общие подходы к определению эффективности рабочих процессов вибрационных конвейеров.

2. Обоснована целесообразность дорезонансного режима работы разрабатываемого транспортера при гармонических синусоидальных колебаниях рабочего органа в плоскости горизонта.

3. Произведен сравнительный анализ энергетических затрат на сообщение вибрационных колебаний рабочему органу по традиционной и предлагаемой схеме.

4. Обоснована сохранность зерновой массы от механических повреждений при вибротранспортировании в энергоэффективном режиме работы по деке ступенчатой конструкции.

4. РАЗДЕЛ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ТРАНСПОРТЕРА СО СТУПЕНЧАТЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС

4.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В третьем разделе работы представлены аналитические исследования режимов функционирования вибрационного транспортера с рабочим органом, совершающим гармонические синусоидальные колебания в горизонтальной плоскости, со ступенчатой поверхностью. Нами получены выражения для определения фазового угла скольжения φ_0 , угла отрыва или начала полета φ_1 , определено перемещение зерновой массы на всех этапах движения, максимальная высота полета и получено выражение для определения средней скорости виброперемещения зерновой массы. Это дало нам возможность смоделировать прохождение процесса виброперемещения сыпучих масс по рабочему органу в зависимости от размера единицы зерновой массы. А также, спроектировать ступенчатые поверхности рабочего органа для различных зерновых масс, учитывающие тот факт, что движение частиц по ступеням представляет собой четыре этапа: начальное положение между гранями ступени; перемещение скольжением по наклонной поверхности ступени; начало полета от наклоненной поверхности ступени; завершение полета и приземление в исходное положение на следующей ступени рабочего органа.

Поэтому экспериментальным исследованиям процесса виброперемещения зерен по деке вибрационного транспортера отведена решающая роль. Вначале необходимо получить экспериментальные значения средней скорости виброперемещения зерен сыпучей массы по ступенчатой поверхности рабочего органа. В третьем разделе нами также установлена зависимость параметров виброперемещения от геометрических параметров рабочего органа. Необходимо

сравнить полученные теоретические и экспериментальные результаты по основному параметру оптимизации процесса – средней скорости виброперемещения зерновой массы по ступенчатой поверхности деки вибрационного транспортера.

И, как итог, необходимо исследовать скорость на максимум и найти оптимальные параметры работы вибрационного транспортера со ступенчатым рабочим органом, который совершает возвратно-поступательные синусоидальные гармонические колебания в горизонтальной плоскости.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТУПЕНИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Перед началом создания экспериментального стенда, необходимо определиться с рациональными геометрическими параметрами ступенчатой поверхности [125]. Задавшись диаметром одной частицы и, с помощью программного пакета MathCAD (Приложение А), рассчитали оптимальное значения длины ступени H_{cm} , наклонной поверхности L_{cm} , и соответствующие ей значения высоты ступени V_{cm} .

$$L_{cm} = \frac{H_{cm}}{\cos \alpha} = \frac{|\zeta_{02} + \zeta_{\Delta}|}{\cos \alpha}, \quad (4.1)$$

$$V_{cm} = L_{cm} \sin \alpha = |(\zeta_{02} + \zeta_{\Delta})| \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.2)$$

где ζ_{02} и ζ_{Δ} – общее перемещение зерен сыпучей массы за два этапа и сдвиг деки относительно положения статического равновесия, соответственно;

H_{cm} – длина ступени.

Значение V_{cm} , равно размеру частицы зерновой массы. Выбор значения α , в соответствии с подразделом 2.3, основывается на значении максимальной

высоты полета частицы $V_{\max}$, которая теоретически определится из (4.2), но также подтверждена экспериментально.

Используя диапазоны значений для A и ν , которые выбраны для расчета теоретической скорости перемещения зерновой массы, рассчитаем минимальные значения L_{cm} при выбранных значениях α , результаты занесем в таблицы 4.1, 4.2, 4.3. Значения V_{cm} , как видно из зависимости (4.2), будут соответствовать L_{cm} , потому ограничимся определением значений L_{cm} и их анализом.

Таблица 4.1

Зависимость длины наклонной поверхности ступени L_{cm} (м) от кинематических параметров рабочего органа ($\alpha = 24$ град.).

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
1.	2.	3.	4.	5.	6.
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0,0064	0,0049	0,00021	0,0045	0,0038
17,5	0,0034	0,0019	0,0032	0,0018	0,0032
20	0,0011	0,0019	0,0029	0,0037	0,0168
22,5	0,002	0,0024	0,0068	0,0138	0,0075
25	0,0012	0,0048	0,0102	0,0093	0,0287
27,5	0,00011	0,0093	0,0084	0,0233	0,0234
30	0,0064	0,0045	0,0199	0,0234	0,0323
32,5	0,0057	0,0154	0,0165	0,027	0,0507
35	0,0038	0,0111	0,026	0,0435	0,0562
37,5	0,0115	0,0204	0,0311	0,0437	0,0584
40	0,0091	0,0174	0,029	0,0446	0,0649
42,5	0,012	0,0282	0,043	0,055	0,0747
45	0,0161	0,0235	0,0491	0,0679	0,0863

Таблица 4.2

Зависимость длины наклонной поверхности ступени L_{cm} (м) от кинематических параметров рабочего органа ($\alpha = 26$ град.)

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0,0067	0,0067	0,0024	0,0015	0,00011
17,5	0,0047	0,00021	0,00066	0,0058	0,0094
20	0,00045	0,00025	0,0069	0,0022	0,0092
22,5	0,00048	0,0056	0,0018	0,0063	0,0025
25	0,0033	0,00073	0,0037	0,00096	0,0164
27,5	0,003	0,0043	0,0015	0,0117	0,0111
30	0,0033	0,0012	0,0104	0,013	0,013
32,5	0,0017	0,0092	0,0076	0,0107	0,0293
35	0,00035	0,0029	0,0123	0,0258	0,037
37,5	0,0069	0,0127	0,02	0,0288	0,0388
40	0,0029	0,0068	0,014	0,0257	0,0419
42,5	0,0068	0,0177	0,0228	0,0283	0,0484
45	0,008	0,0124	0,0322	0,0353	0,0581

Определение геометрических размеров ступенчатой поверхности по представленной теории не учитывает размера частиц зерновой массы. Изначально мы исходили из условия, что диаметр частицы равен высоте ступени и центр частицы находится на одном горизонтальном уровне с верхней точкой ступени или близок по уровню к ней [124], что на практике позволяет избежать этапа многочисленных соударений частицы между вертикальной и наклонной плоскостями ступени деки.

Таблица 4.3

Зависимость длины наклонной поверхности ступени L_{cm} (м) от кинематических параметров рабочего органа ($\alpha = 28$ град.)

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0,0066	0,0083	0,0052	0,0015	0,0029
17,5	0,006	0,0024	0,0015	0,0092	0,0157
20	0,0021	0,002	0,0105	0,0088	0,0012
22,5	0,00083	0,0086	0,004	0,00058	0,0127
25	0,0051	0,0038	0,0022	0,0085	0,0042
27,5	0,006	0,00022	0,0064	0,00069	0,0035
30	0,00016	0,0072	0,0013	0,00027	0,0053
32,5	0,0019	0,0024	0,0028	0,005	0,0076
35	0,005	0,0051	0,0005	0,0075	0,0137
37,5	0,0018	0,0038	0,0065	0,0098	0,0136
40	0,003	0,0037	0,0016	0,0044	0,0139
42,5	0,00042	0,0061	0,0033	0,0028	0,0171
45	0,00038	0,00012	0,0119	0,0051	0,023

Графические зависимости по данным таблиц 4.1, 4.2, 4.3, представлены на рис. 4.1.

Анализируя графические зависимости на рис. 4.1. можно отметить, что с уменьшением угла наклона ступени α , длина наклонной L_{cm} возрастает. Поскольку увеличение L_{cm} приводит к увеличению V_{cm} , которая по теории сопоставима с диаметром (размером) частицы зерновой массы, то можно сделать предположение о том, что вибротранспортирование этих же частиц на рабочем органе с другим углом наклона ступени α , будет оптимально осуществляться при других геометрических параметрах ступени деки.

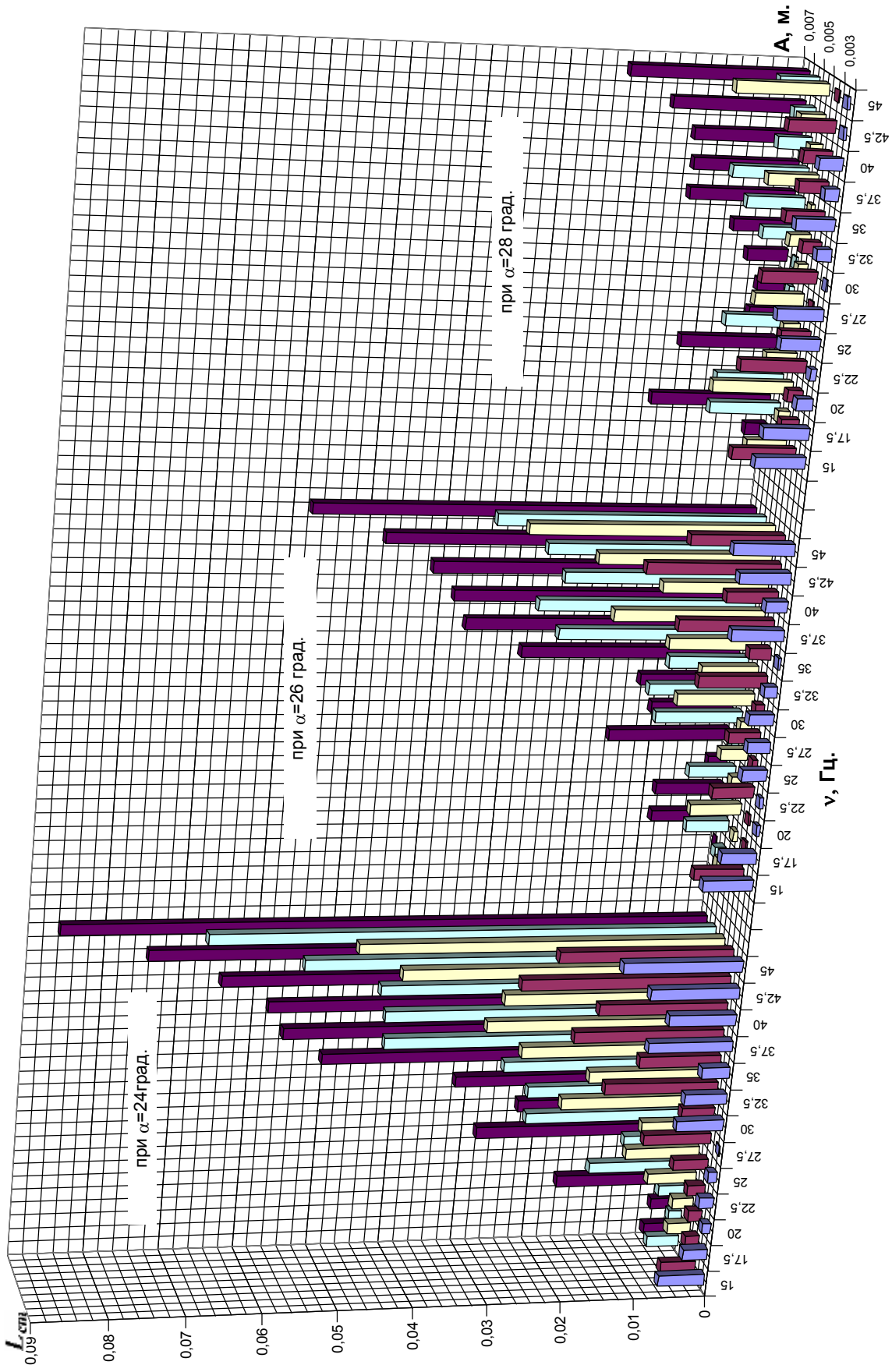


Рис. 4.1. Минимальная длина наклонной поверхности ступени для оптимальных кинематических параметров исходя из максимальной скорости процесса виброперемещения.

Это, в свою очередь, приводит к выводу, что L_{cm} является величиной, которой необходимо варьировать для технологических целей. Влиять на скорость перемещения сыпучей массы, можно подбирая значение L_{cm} , в зависимости от размера зерен сыпучей массы.

Принимая во внимание, стремление к высокой скорости процесса виброперемещения зерновой массы, которое согласно расчетов в подразделе 3.4 достигается при $\alpha=24....28$ градусов относительно горизонта, выберем значения L_{cm} при оптимальных для наибольшей скорости кинематических параметрах, при этом учитывая данные подтвержденные опытным путем. Согласно выбранным значениям L_{cm} представленным в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Минимальная длина наклонной поверхности ступени L_{cm} (м) в зависимости от выбранных кинематических параметров рабочего органа v , (Гц).

	при $\alpha=24$ град.	при $\alpha=26$ град.	при $\alpha=28$ град.
v , Гц	$A=0,007$ м	$A=0,007$ м	$A=0,007$ м
22,5	0,0075	0,0025	0,0127
25	0,0287	0,0164	0,0042
27,5	0,0234	0,0111	0,0035

V_{cm} определяет граничные размеры частиц сыпучей массы. Значит для каждой пары V_{cm} и L_{cm} существует и оптимальный размер частицы. Следовательно, при одинаковых кинематических параметрах, можно создавать рабочие органы с различными параметрами ступени, под размер зерен сыпучей массы.

Определим с помощью выражения (4.2) значения высоты вертикальной поверхности ступени V_{cm} , которые соответствуют длине наклонной поверхности ступени L_{cm} (табл. 4.4) и представим их в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Высота вертикальной поверхности ступени V_{cm} (м) в зависимости от выбранных кинематических параметров рабочего органа

	при $\alpha=24$ град.	при $\alpha=26$ град.	при $\alpha=28$ град.
ν , Гц	$A=0,007$ м	$A=0,007$ м	$A=0,007$ м
22,5	0,003	0,0011	0,006
25	0,0117	0,0072	0,002
27,5	0,0095	0,0049	0,0016

Например, для пшеницы, ширина зерна 1,6 – 4,0 мм [55], могут подойти следующие геометрические параметры ступеней: $L_{cm1} = 0,0111$ м, $V_{cm1} = 0,0049$ м, $L_{cm2} = 0,0035$ м, $V_{cm2} = 0,0016$ м, которые отмечены в таблице 4.4 и 4.5.

4.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАСС

Экспериментальный вибрационный стенд, представленный на рис. 4.2, был создан для изучения влияния на рассматриваемый процесс геометрических параметров рабочей поверхности деки, в частности угла наклона ступени и ее длины.

В состав экспериментального стенда входят следующие элементы: Универсальный стенд измерения вибрации ВЭДС-10А 1, который состоит из блока измерения вибрации 2, генератора частоты синусоидальных колебаний 3, усилителя механических колебаний и пульта управления СУПВ-0,1А 4, блока подмагничивания 5, блок фильтров 6; действующая модель вибрационного транспортера с универсальной декой 9. Контрольные приборы: генератор ГЗ-34 7, осциллограф С1-5 8. Стенд ВЭДС-10А серийно изготовлен на Таганрогском заводе «Виброприбор».

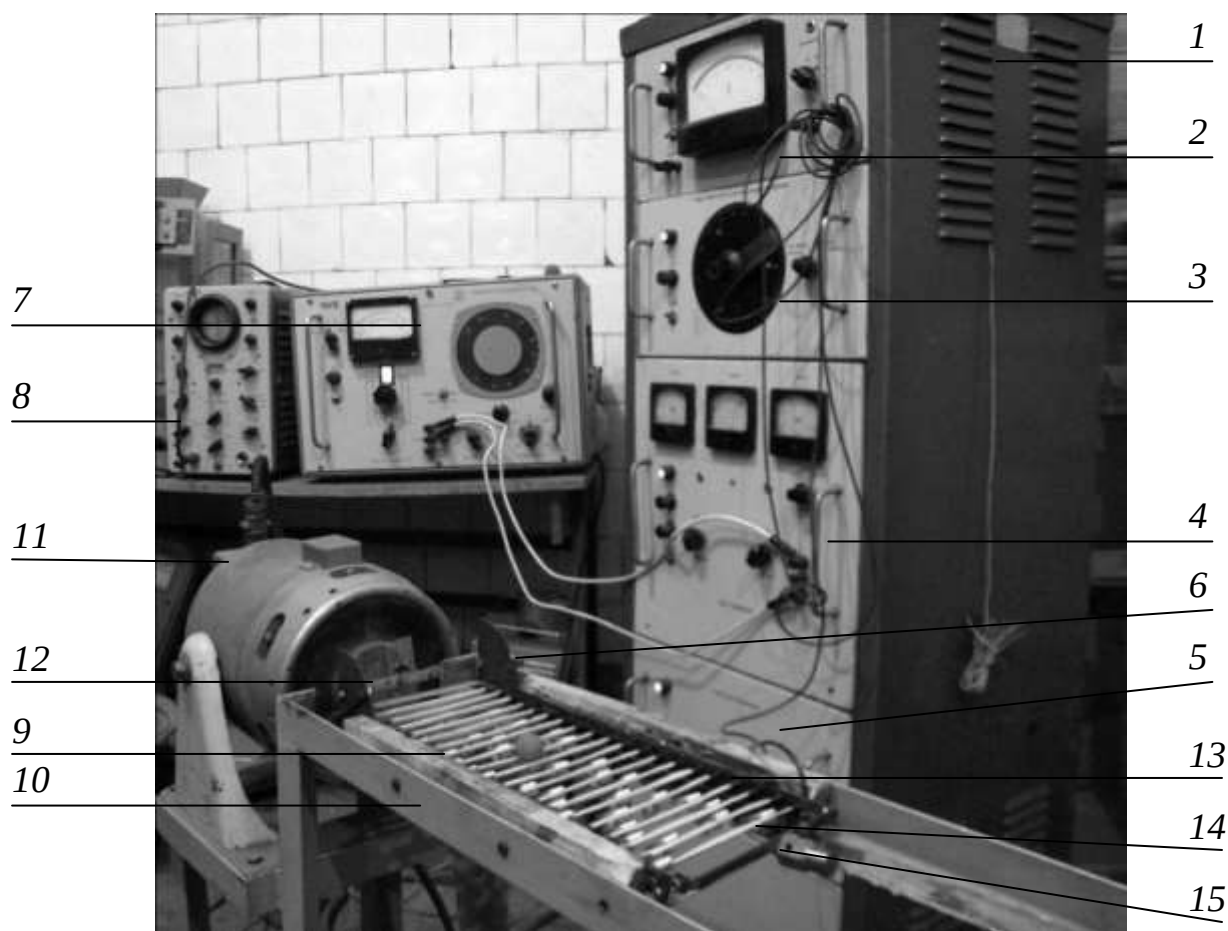


Рис. 4.2. Экспериментальный вибрационный стенд (дека на 20 накл. пластин):

- 1 – ВЭДС-10А; 2 – блок измерения вибрации; 3 – генератор частоты колебаний;
 4 – усилитель колебаний; 5 – блок подмагничивания;
 6 – блок фильтров; 7 – контрольный генератор; 8 – осциллограф;
 9 – универсальная дека; 10 – рама основание; 11 – вибровозбудитель; 12 – шток;
 13 – направляющие пазы; 14 – наклонная пластина;
 15 – пьезоэлектрический датчик.

Стабилизированный усилитель и пульт управления вибровозбудителем СУПВ-0,1А предназначен для питания и управления работой электродинамического вибровозбудителя ВЭД-10А. Блок измерения вибрации служит для измерения виброускорения рабочего органа с помощью пьезоэлектрических датчиков.

Вибрационный транспортер с универсальной декой, изображенный на (рис. 4.2), включает в себя механическую колебательную систему, которая, состоит из рамы-основания 10, установленного на ней электродинамического вибровозбудителя ВЭД-10А [15] 11, шток 12 жестко соединен с подвижной универсальной декой 9. Дека 9 установлена в направляющих пазах 13 основания и имеет возможность возвратно-поступательного перемещения относительно своей продольной оси и рамы основания. Конструкция деки позволяет, с помощью боковых держателей фиксировано изменять угол наклона пластин 14 к горизонту.

Сигнал синусоидальной формы поступает с выхода генератора в усилитель. Напряжение вторичной обмотки выходного трансформатора, подается на подвижную катушку вибровозбудителя через фильтр верхних частот. Стабилизированный выпрямитель питает катушку подмагничивания вибровозбудителя. С пьезодатчика ДН-4 15, установленного на деке 9, сигнал снимается на блок измерения вибрации.

В вибровозбудителе применена электродинамическая приводная система, состоящая из электромагнита с круговым воздушным зазором и подвижной системы – якоря, подвешенной на двух мембранах. Электромагнит представляет собой магнитопровод с катушкой подмагничивания, через которую пропускается постоянный ток. В подвижной катушке течет переменный ток, частота и величина которого определяются заданными параметрами, ток этой катушки взаимодействует с постоянным магнитом и создает толкающую силу [15].

Величина и направление этой силы зависят от величины магнитной индукции в воздушном зазоре электромагнита, силы тока в подвижной катушке, длины проводника катушки. Когда синусоидальный ток пройдет по обмотке подвижной катушки, то частота колебаний вибровозбудителя будет определяться частотой этого тока. Амплитуда виброускорения, создаваемого вибровозбудителем, зависит от тока в подвижной катушке и нагрузки на стол вибровозбудителя.

Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-4 преобразует механические колебания в электрические сигналы, которые усиливаются измерительным трактом до величины, необходимой для нормальной работы среднеквадратичного детектора, и затем поступают на показывающий прибор. Электрические сигналы, снимаемые с ДН-4, пропорциональны виброускорению колеблющегося объекта.

Электронный осциллограф С1-5 служит для контроля формы синусоидальных сигналов подаваемых генератором ГЗ-34, который в свою очередь контролирует работу блока СУПВ-0,1А. Блок фильтров имеет переключатель на 3 положения. В положении «5» фильтр выключен, в положении «200» частота среза фильтра равна 200 Гц, в положении «500» частота среза фильтра равна 500 Гц.

На рис. 4.3 а, показано устройство деки, которая сконструирована таким образом, чтобы наклон рабочих граней ступеней мог плавно меняться и жестко фиксироваться под необходимым углом. В этой конструкции, прямоугольная пластина 2 имеет на всех четырех концах прямоугольные выступы. Все выступы пластины, с натягом вставлены в отверстия четырех боковых держателей 1. Нижние боковые держатели закреплены между собой жестко и неподвижно, как и верхние. Но верхние боковые держатели могут смещаться относительно нижних, и жестко фиксироваться в любом смещенном положении. Отверстия в боковых держателях, сделаны через одинаковые промежутки равные H_{cm} , при такой конструкции H_{cm} всегда остается постоянной. Схема изменения угла α изображенная на рис. 4.3, б, позволяет заключить, что если значение L_{cm} будет меньше значения H_{cm} то между ступенями деки образуются свободные интервалы, если значение L_{cm} будет больше чем H_{cm} , то пластины при выставлении заданного α , будут накладываться друг на друга но при этом выдерживать заданное значение L_{cm} . Значит, значение H_{cm} (катет) должно соответствовать величине L_{cm} (гипотенуза) при максимально выставляемом угле наклона пластины α .

Чтобы доказать оптимальность выбранных в табл. 4.3 значений L_{cm} , было изготовлено 9 комплектов пластин. Первые 3 комплекта пластин изготовлены в соответствии с размерами, отмеченными в табл. 4.6. Следующие 6 комплектов изготовлены с отличием от первых по размеру L_{cm} . Три комплекта из них имеют размер L_{cm} на 3 мм больше, и оставшиеся три комплекта имеют L_{cm} на 3 мм меньше. Такое различие в длине наклонной поверхности, позволит экспериментально подтвердить или опровергнуть оптимальность выбранных значений. Для каждого комплекта пластин, был изготовлен комплект боковых держателей, с соответствующим размером H_{cm} .

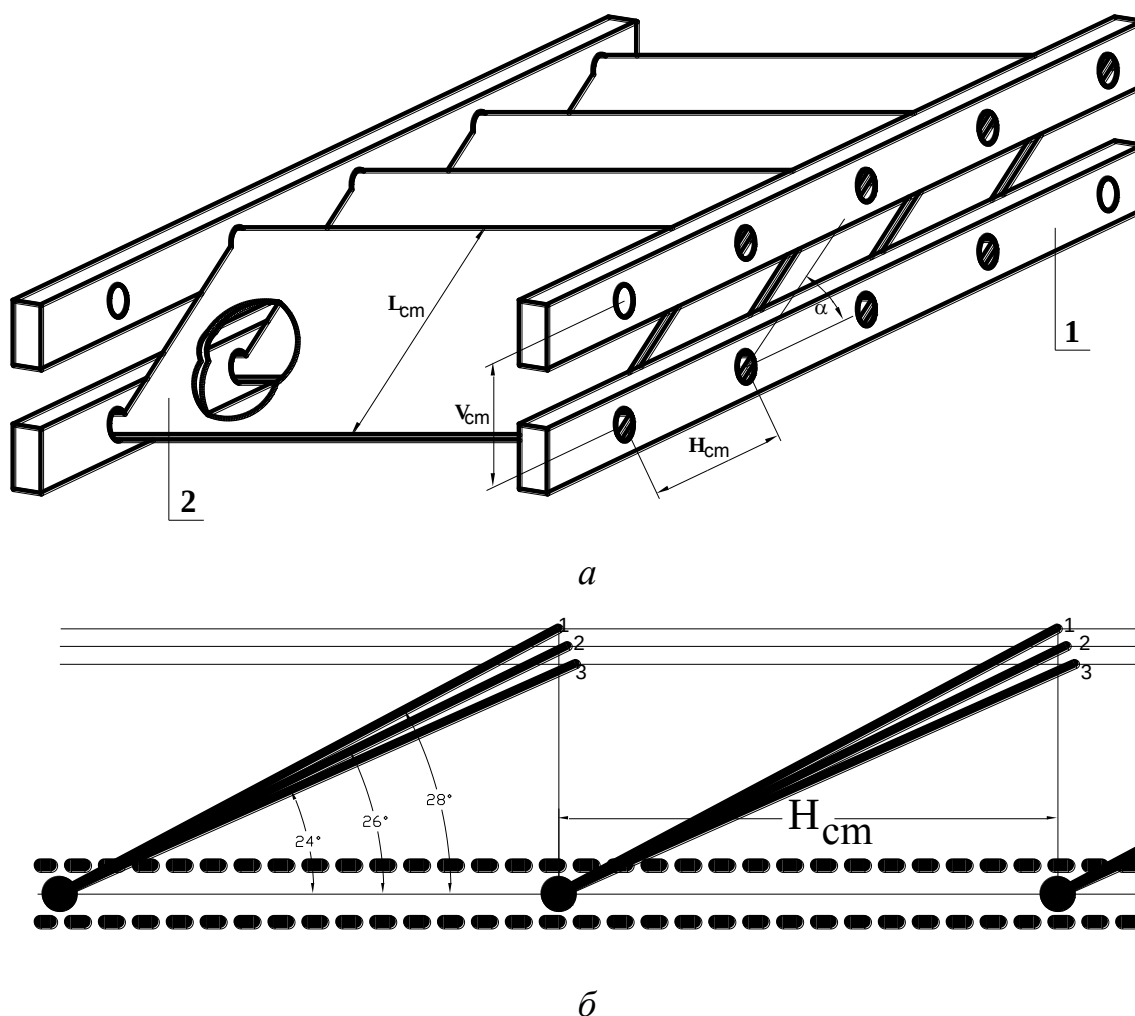


Рис. 4.3. Экспериментальная дека:

a – конструкционное устройство:

1 – боковой держатель; 2 – пластина;

б – схема изменения угла наклона пластины.

Экспериментальная скорость виброперемещения зерновой массы должна определяться посредством засекаемого времени и известного расстояния L_n – полный путь зерна по деке. Длина пути зерна сыпучей массы определяется в зависимости от числа наклонных пластин n , значения L_{cm} и угла α , по следующему выражению:

$$L_n = \frac{n}{2} \cdot L_{cm} \cos \alpha. \quad (4.3)$$

Определим длину пути виброперемещения зерновой массы, используя формулу (4.3). Результаты вычислений для девяти комплектов пластин, исходя из $n=30$ ступеней, занесем в таблицу 4.6.

Таблица 4.6

Значения L_n , (м) для выбранных L_{cm} при различных углах α

L_{cm} , м.	$\alpha=22$ град.	$\alpha=24$ град.	$\alpha=26$ град.	$\alpha=28$ град.	$\alpha=30$ град.
0,0097	-	-	0,2615	0,2569	0,252
0,0127	-	-	0,3424	0,3364	0,33
0,0157	-	-	0,4233	0,4159	0,4079
0,0134	-	0,3672	0,3613	0,3549	-
0,0164	-	0,4495	0,4442	0,4344	-
0,0194	-	0,5317	0,5231	0,5139	-
0,0204	0,5674	0,5591	0,5501	-	-
0,0234	0,6509	0,6413	0,631	-	-
0,0264	0,7343	0,7235	0,7118	-	-

Проанализировав таблицу 4.6, можно сделать следующее заключение: для точного определения времени перемещения зерновой массы, количество отражательных пластин в деке при $L_{cm} = 0,0097...0,0157$ м, должно быть в 2 раза больше 30, а при $L_{cm} = 0,0157...0,0164$ м, должно быть более 30 шт. Это объясняется тем, что на коротких отрезках пути, к примеру 0,2569 м, сложно

засечь время виброперемещения зерна сыпучей массы. Количество пластин в таблице 4.7 подобрано таким образом, чтобы значение $L_n > 0,5$ м.

Таблица 4.7

Количество наклонных пластин для выбранных L_{cm}

	L_{cm} , м.				
	0,0097	0,0127	0,0134	0,0157	0,0164
п пласт., шт.	60	50	45	40	40
	L_{cm} , м.				
	0,0194	0,0204	0,0234	0,0264	
п пласт., шт.	30	30	30	30	

На рис. 4.4 и 4.5, изображены образцы экспериментальных комплектов боковых держателей и наклонных граней. Было собрано 9 дек, каждая из которых имеет свой размер L_{cm} и может изменять угол α от 30 градусов и меньше. Четыре комплекта держателей рассчитаны на установку 30 наклонных пластин с $L_{cm} = 0,0194, 0,0204, 0,0234, 0,0264$ м, два на установку 40 пластин с $L_{cm} = 0,0157, 0,0164$ м, один на 45 пластин с $L_{cm} = 0,0134$ м, один на 50 пластин с $L_{cm} = 0,0127$ м, один на 60 пластин с $L_{cm} = 0,00927$ м. Количество изготовленных пластин длиной 0,2 м, согласно табл. 4.7. Размеры, при изготовлении контролировалась штангенциркулем (в отдельных случаях микрометром).

Специальная дека сконструирована таким образом, чтобы наклон рабочих граней ступеней мог плавно меняться и жестко фиксироваться под выставленным углом. Наклонные поверхности, входящие в соприкосновение с зернами сыпучей массы и расстояние между ними перекрывались подобранным материалом таким образом, чтобы ступень являлась правильным прямоугольником, как показано на рис. 4.6.

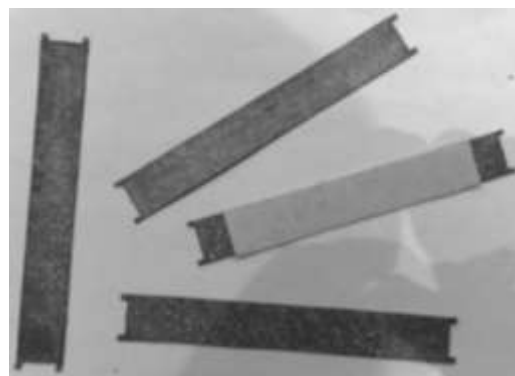


Рис. 4.4. Комплект боковых держателей.

Рис. 4.5. Наклонные пластины.

Материал для покрытия пластин подбирался по коэффициенту внешнего трения сыпучей массы по выбранному материалу так, чтобы $\mu \approx 0,35$, коэффициент трения определялся по методике, изложенной в подразделе 2.4.

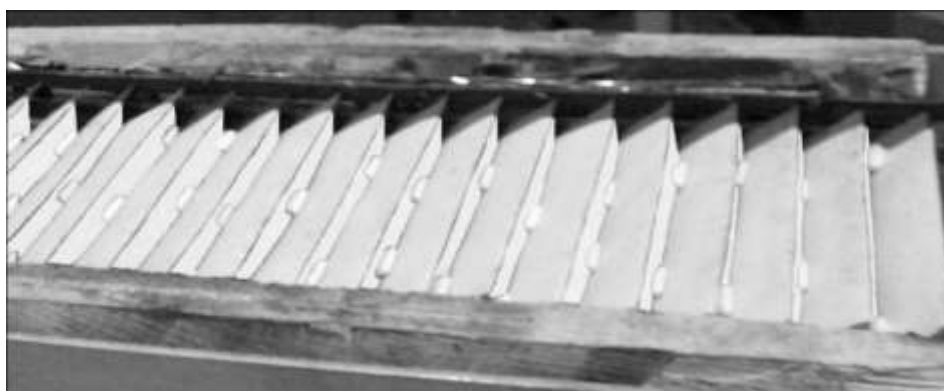


Рис. 4.6. Рабочая поверхность экспериментальной деки.

Аналогично было изготовлено деки для каждого значения L_{cm} (табл.4.7), каждая из которых имеет свой размер H_{cm} для определенного значения L_{cm} и может изменять угол α от 15 до 55 градусов. Комплекты держателей рассчитаны на образование 30 ступеней с $L_{cm} = 0,0194, 0,0204, 0,0234, 0,0264$ м, два на установку 40 ступеней с $L_{cm} = 0,0157, 0,0164$ м, один на 45 с $L_{cm} = 0,0134$ м, один на 50 ступеней с $L_{cm} = 0,0127$ м, один на 60 ступеней с $L_{cm} = 0,00927$ м. Количество полученных ступеней длиной 0,18м, согласно таблице 4.7. Размеры, при изготовлении контролировалась штангенциркулем.

4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЦИОНАЛЬНОСТИ ДЛИНЫ СТУПЕНЕЙ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО УГЛА ЕЕ НАКЛОНА

Каждый опыт проводился с трехразовым повтором, после чего рассчитывался средний арифметический результат. Зерна в количестве 10 штук одновременно сгружали на первую ступень колеблющейся деки, измерение времени прекращали в момент схода с последней ступени последнего из 10-ти зерен.

В качестве транспортируемой массы использовались отобранные зерна пшеницы по размеру V_{cm} из таблицы 4.6 для каждого угла α . Значения полученных результатов занесены в таблицы 4.8 – 4.10, а по приведенным значениям построены графические зависимости, изображенные на рис. 4.7-4.9.

Таблица 4.8

Скорость виброперемещения зерновой массы (м/с) в зависимости от угла наклона ступени α и длины наклонной поверхности L_{cm} , ($A=0,007$ м, $\nu=27,5$ Гц),
радиус частиц $R_q=0,0095$ м.

Длина отражающей наклонной поверхности L_{cm} , м	Угол наклона ступени к горизонту α , град.		
	22	24	26
0,0204	0,23	0,28	0,25
0,0234	0,29	0,30	0,28
0,0264	0,27	0,25	0,25

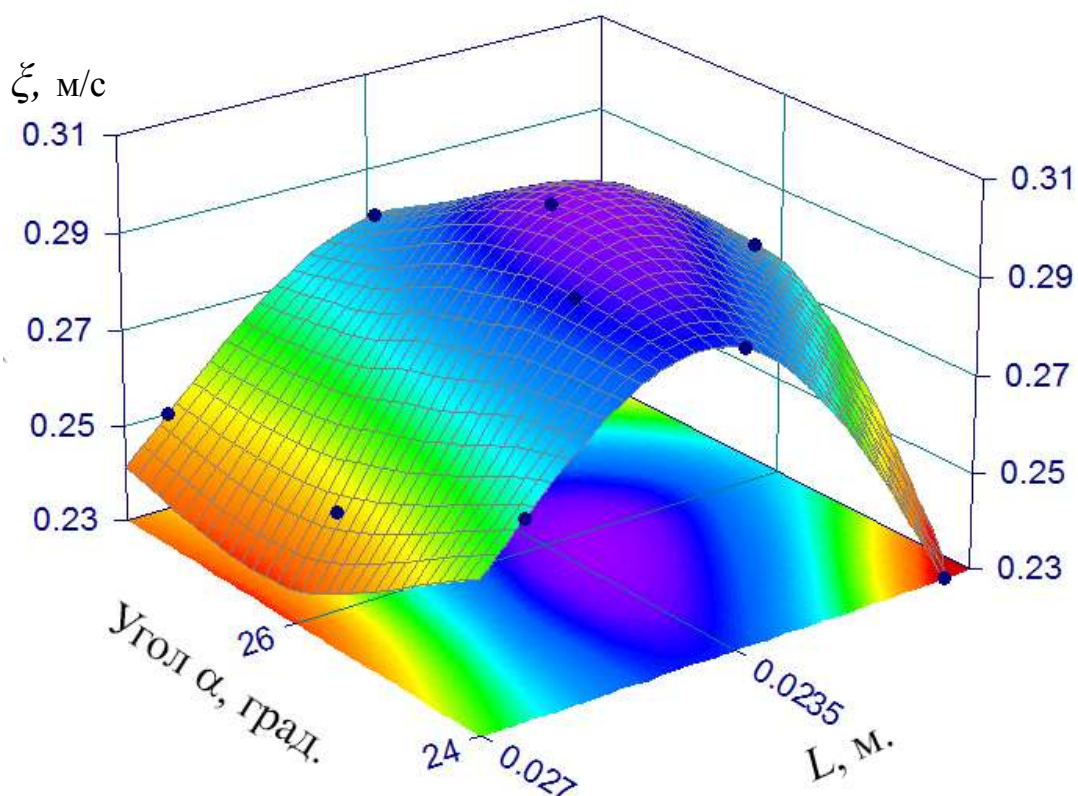


Рис. 4.7. Зависимость средней скорости виброперемещения зерновой массы от угла наклона и длины поверхности ступени L_{cm} ($R_q = 0,0095$ м).

Таблица 4.9

Скорость виброперемещения зерновой массы (м/с) в зависимости от угла наклона ступени α и длины наклонной поверхности L_{cm} , ($A=0,007$ м, $\nu=25$ Гц), радиус частиц $R_q=0,0072$ м.

Длина отражающей наклонной поверхности L_{cm} , м	Угол наклона ступени к горизонту α , град		
	24	26	28
0,0134	0,33	0,37	0,38
0,0164	0,35	0,42	0,34
0,0194	0,38	0,40	0,32

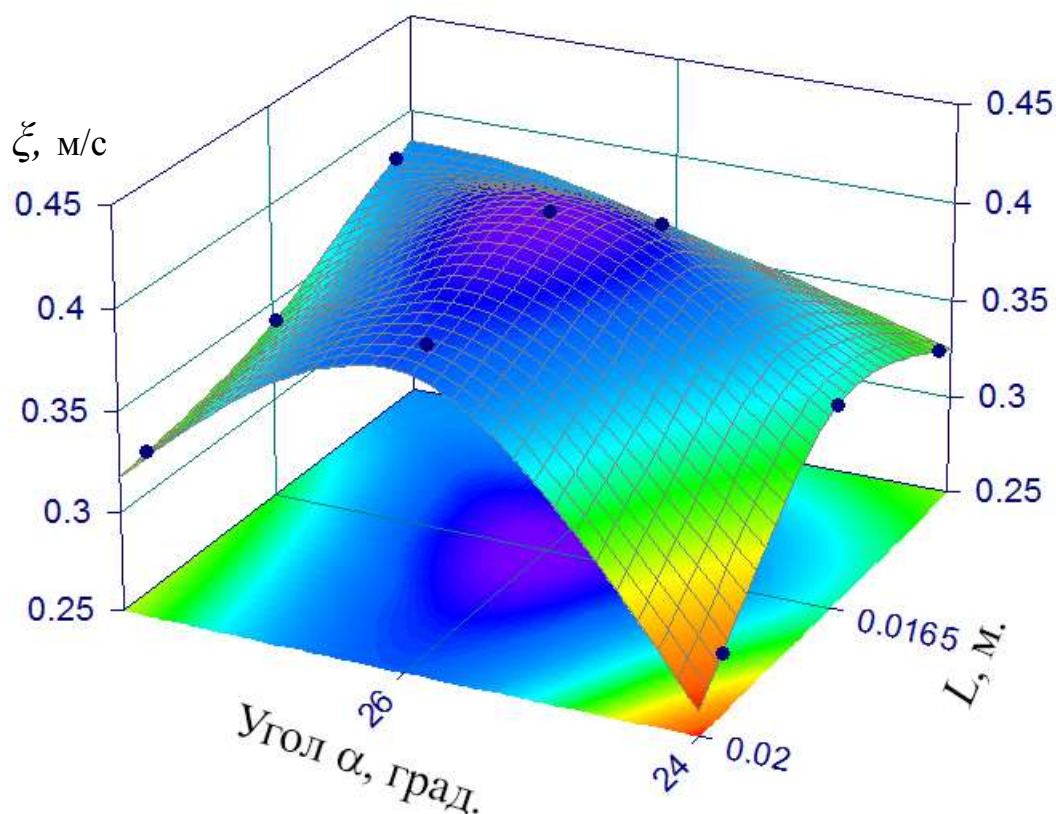


Рис. 4.8. Зависимость скорости виброперемещения зерновой массы от угла наклона и длины поверхности ступени L_{cm} , ($R_q = 0,0072$ м).

Таблица 4.10

Скорость виброперемещения зерновой массы в зависимости от угла наклона и длины наклонной поверхности ступени L_{cm} , ($A=0,007$ м, $\nu=22,5$ Гц), радиус частиц $R_q=0,006$ м.

Длина отражающей наклонной поверхности L_{cm} , м	Угол наклона ступени к горизонту α , град		
	26	28	30
0,0097	0,11	0,14	0,12
0,0127	0,11	0,16	0,14
0,0157	0,13	0,12	0,12

Если сравнить значения скоростей виброперемещения в таблицах 4.8 – 4.10 с соответствующими значениями в таблицах 2.2 – 2.4, то обнаружится, что

разница между ними невелика: 0,02-0,04 м/с, что является допустимой погрешностью при проведении эксперимента.

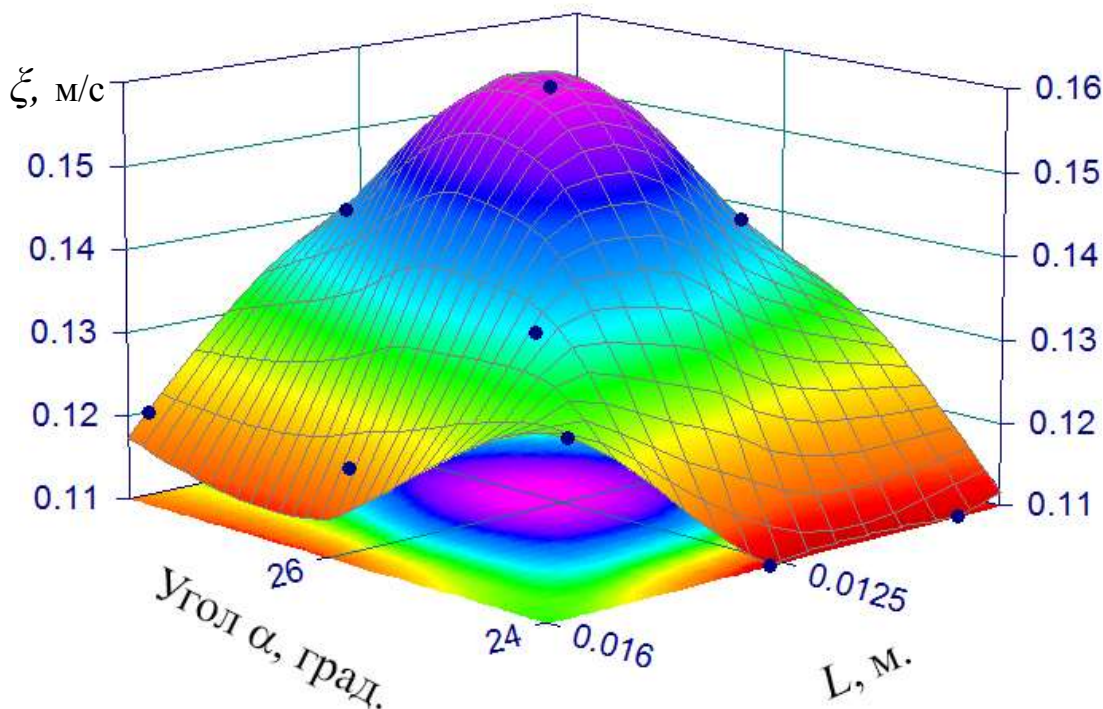


Рис. 4.9. Зависимость скорости виброперемещения зерновой массы от угла наклона и длины поверхности ступени L_{cm} , ($R_v=0,006$ м).

Следовательно, представленные на рисунках 4.7 – 4.9 значения скорости подтверждают не только оптимальность: L_{cm} , V_{cm} , α , при заданных кинематических параметрах, но и представленные в подразделах 3.32, 3.33 аналитические исследования определения скорости зерновой массы.

4.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕЙ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ МАССЫ

Экспериментальные исследования проводились с целью практической проверки выдвинутой в подразделе 3.4 теории. Для практического определения скорости перемещения зерновой массы было изготовлено 3 деки из листового текстолита, согласно геометрических параметров, определенными в подразделе 3.3, и представленными в таблице 4.11.

Таблица 4.11

Геометрические параметры текстолитовых ступеней дек

	$L_{ст}, \text{м.}$	$V_{ст}, \text{м.}$	$H_{ст}, \text{м.}$	$\alpha, \text{град.}$
Дека 1	0,0234	0,0095	0,0214	24
Дека 2	0,0164	0,0072	0,0147	26
Дека 3	0,0127	0,006	0,0112	28

Каждая дека была изготовлена из цельного листа текстолита, коэффициент внешнего трения сыпучей массы (зерен гороха) определен по методике, изложенной в разделе 1, $\mu=0,35$. Длина дек составляет 0,75 м, ширина 0,15 м.

Эксперименты проводились следующим образом. Порция зерен гороха подавалась на первую ступень деки, в момент прекращения загрузки начинался отсчет времени, который прекращался со сходом с текстолитовой поверхности последнего зерна. Результаты значений скорости виброперемещения зерновой массы на каждой деке занесены в таблицы 4.12 – 4.14 и представлены графическими зависимостями на рисунках 4.10, 4.11, 4.12.

Таблица 4.12

Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы (м/с)
на текстолитовой поверхности деки 1, $\alpha=24$ градуса

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
1	2	3	4	5	6
$\nu, \text{Гц}$	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0	0	0	0,01	0,03
17,5	0	0,01	0,02	0,06	0,1
20	0,01	0,02	0,07	0,12	0,19
22,5	0,01	0,06	0,12	0,13	0,19
25	0,03	0,11	0,13	0,2	0,29
27,5	0,08	0,1	0,18	0,28	0,3
30	0,06	0,1	0,2	0,29	0,33

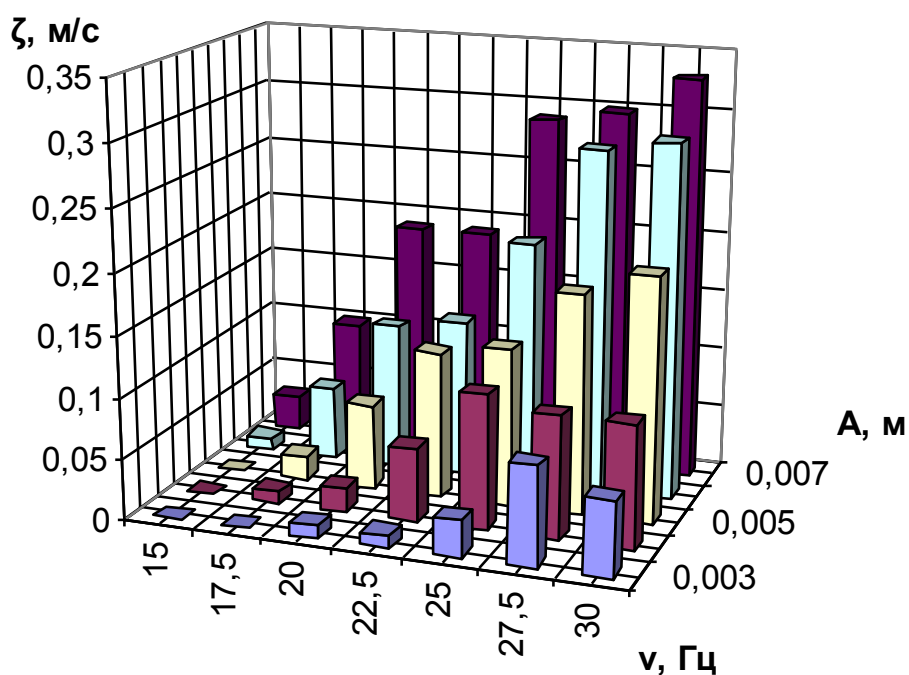


Рис. 4.10. Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы по текстолитовой поверхности в зависимости от кинематических параметров, при $\alpha=24$ град.

Таблица 4.13

Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы (м/с) на текстолитовой поверхности деки 2, $\alpha=26$ градусов

	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
ν , Гц	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0	0	0,06	0,12	0,1
17,5	0	0,07	0,07	0,12	0,18
20	0,06	0,07	0,14	0,21	0,3
22,5	0,05	0,11	0,21	0,32	0,28
25	0,09	0,18	0,31	0,34	0,42
27,5	0,13	0,25	0,28	0,41	0,42
30	0,12	0,204	0,25	0,39	0,4

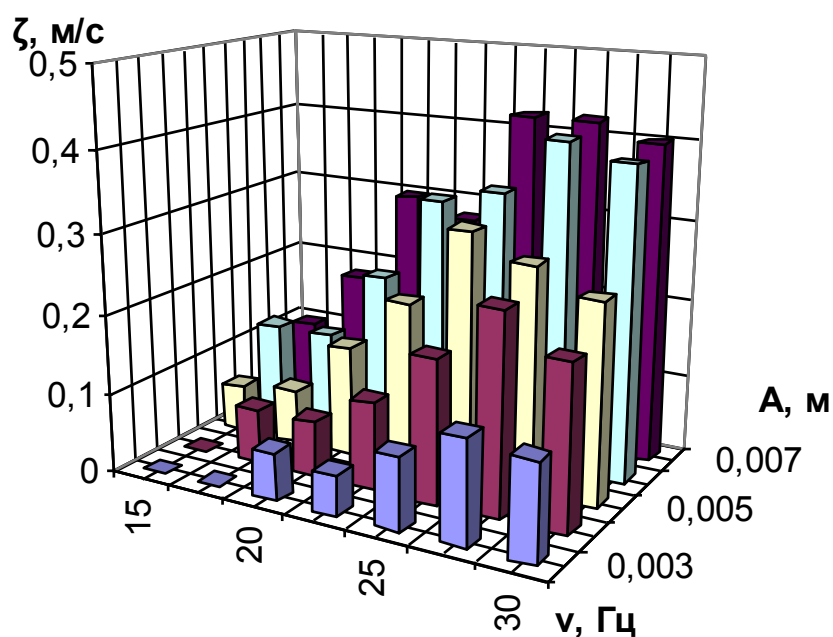


Рис. 4.11. Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы по текстолитовой поверхности в зависимости от кинематических параметров, при $\alpha=26$ град.

Таблица 4.14

Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы (м/с)
на текстолитовой поверхности деки 3, $\alpha=28$ градусов

ν , Гц	Амплитуда колебаний рабочего органа, м.				
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
15	0	0	0	0,01	0,02
17,5	0	0	0,01	0,03	0,08
20	0	0,01	0,05	0,08	0,15
22,5	0,01	0,04	0,09	0,09	0,18
25	0,02	0,08	0,1	0,17	0,25
27,5	0,05	0,08	0,15	0,24	0,26
30	0,03	0,08	0,22	0,22	0,2

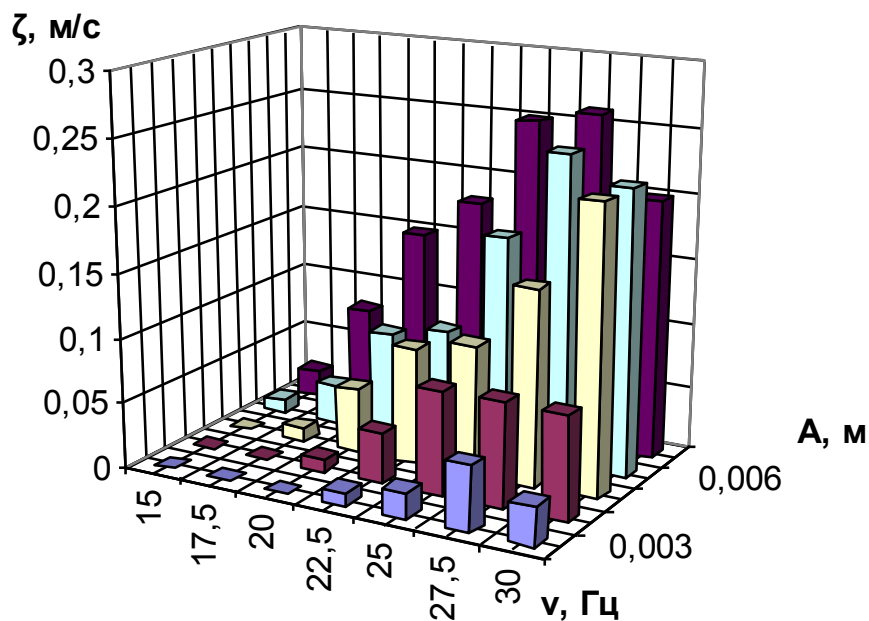


Рис. 4.12. Экспериментальная средняя скорость виброперемещения зерновой массы по текстолитовой поверхности в зависимости от кинематических параметров, при $\alpha=28$ град.

В качестве привода использовался описанный в подразделе 4.3 экспериментальный стенд ВЭДС – 10А, с электродинамическим вибровозбудителем. В качестве сыпучей массы использовались зерна пшеницы всех фракций.

Анализируя значения таблиц 4.12, 4.13, 4.14 и графические зависимости на рисунках 4.10, 4.11, 4.12, можно сделать следующие выводы:

1) экспериментальные данные соответствуют теоретическим в диапазонах по частоте колебаний $\nu=15\ldots 27,5$ Гц, по амплитуде колебаний $A=0,003\ldots 0,007$ м, при углах $\alpha=24, 26, 28$ град;

2) наиболее оптимальным для перемещения зерновой массы состоящего из множества фракций, является угол $\alpha=26$ град.

2) отличие экспериментальных значений от теоретических не превышает 9,31%;

3) разработанная теория перемещения зерновой массы по ступенчатой текстолитовой поверхности может с достаточной точностью использоваться для

расчета технологических параметров ступенчатого вибротранспортера при скоростях виброперемещения до 0,42 м/с (граница экспериментальной подтверждаемости теории).

Во второй главе найдено выражение (2.17), которое позволит рассчитать максимально возможную скорость столкновения частицы зернового слоя с рабочим органом. Имея все необходимые экспериментально подтвержденные данные четвертой главы, определим максимально возможную скорость соударений из рекомендуемого диапазона работы транспортера (амплитуда от 0,003 до 0,007 м и частота колебаний от 22,5 до 27,5 Гц):

$$V_{cc,max} = 0,007 \cdot 172,7 \cdot \cos 0 + 0,42 = 1,63, \text{ м/с} \quad (2.17)$$

Найденная максимально возможная скорость соударения зерен сыпучей массы с декой новой конструкции в рекомендуемом диапазоне значительно меньше значений, при которых начинается процесс разрушения всех зерновых культур (табл. 2.2).

Резюмируя вышеприведенные данные, можем утверждать, что в результате вибрационного транспортирования зерновой смеси по ступенчатому рабочему органу, совершающему колебательные движения в горизонтальной плоскости, по характеру приложения действующей силы, зерно претерпевает небольшую упругую деформацию, недостаточную для его разрушения.

Представленные научные исследования четвертой главы позволяют рассчитывать все необходимые параметры для создания вибрационных транспортеров для транспортировки зерновых масс с деками, имеющими ступенчатую поверхность. Экспериментальные исследования подтверждают зоны оптимальных параметров с погрешностью не более 9,31%.

Практическое осуществление перемещения зерновых масс по ступенчатой деке, расширит область применения процессов вибрационного перемещения сыпучих масс, так как изложенный принцип перемещения имеет преимущества.

Машины с горизонтальными колебаниями имеют меньшую массу, менее габаритны и менее материалоемки, легче уравниваются, более экономичны [82, 83, 85].

ВЫВОДЫ ПО 4 РАЗДЕЛУ

1. Получены зависимости геометрических параметров ступеней от кинематических параметров рабочего органа при различных углах наклона ступени α . Выбраны оптимальные параметры проведения процесса.

2. Создан экспериментальный стенд для практического исследования процесса вибротранспортирования зерновой массы на ступенчатой поверхности рабочего органа при его горизонтальных колебаниях.

3. Разработана и изготовлена экспериментальная конструкция рабочего органа с изменяемым углом наклона ступени, с возможностью жесткой фиксации выбранного значения угла.

4. Экспериментально определено рациональное соотношение размера частицы зерновой массы и геометрических параметров ступени рабочего органа при различных углах ее наклона α .

5. Получены зависимости средней экспериментальной скорости виброперемещения зерновой массы в зависимости от кинематических параметров рабочего органа при различных углах $\alpha=24....28$ градусов. Практические эксперименты подтверждают теоретические значения с погрешностью не более 9,31%.

6. Обосновано отсутствие возможности механических повреждений частиц зерновой массы при вибротранспортировании на ступенчатом рабочем органе с его горизонтально направленными колебаниями.

5. РАЗДЕЛ

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для успешной реализации новых образцов вибрационных транспортеров необходимо дать обоснование и определить направление поиска в совершенствовании данного оборудования, выявить особенности работы вибрационных транспортеров, которые позволят достичь высоких технико-экономических показателей.

5.1. ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТЕРОВ

Критический анализ существующих конструкторских разработок, приведенный в первом разделе, показал, что при своих многочисленных преимуществах вибрационные транспортеры имеют существенный недостаток – высокое энергопотребление.

Во втором разделе настоящей работы предложены зависимости, показывающие, какова требуется мощность для работы вибрационных транспортеров при различных углах направленности колебаний. По выражению (3.32) можно рассчитать во сколько раз мощность для работы новой конструкции вибротранспортера со ступенчатой декой меньше, чем для работы вибротранспортера по классической схеме.

Обоснование нового процесса виброперемещения зерновой массы по ступенчатой деке совершающей возвратно-поступательные движения в горизонтальной плоскости базируется на правиле, согласно которому угол падения равен углу отражения. Это действительно в случае если тело падает на ступенчатую поверхность рабочего органа по траектории, близкой к вертикали. Однако часть площади, которая прилегает к вертикальной стенке ступени, не будет полезной (назовем ее зоной многоразовых столкновений). При попадании зерна в эту зону происходит несколько столкновений его с вертикальной и

отражательной поверхностью ступени, до тех пока в результате скольжения по наклонной поверхности ступени, частица не попадет в полезную зону, после чего она имеет возможность перемещения на следующую ступень.

Опираясь на результаты экспериментов, теоретических исследований [123, 125-129], следует проводить для перемещаемых сыпучих масс, у которых центр частицы будет находиться близко к горизонтальному уровню верхней точки ступени, что фактически позволит избежать этапа многочисленных соударений между вертикальной и наклонной плоскостями ступени деки.

В третьем разделе разработана теория движения частицы по ступенчатой поверхности при продольных колебаниях рабочего органа, которая позволяет вычислить наибольшую высоту ее полета, относительно положения места начала полета. Это позволило сформулировать условие, при соблюдении которого будет обеспечена стабильность прохождения процесса виброперемещения, что гарантирует максимальное значение скорости виброперемещения в заданном направлении. А также представлена зависимость, по которой можно рассчитать среднюю скорость виброперемещения зернового слоя и теоретическую производительность вибрационного транспортера новой конструкции.

Кроме этого, представленные формулы позволяют рассчитать кинематические и геометрические параметры для зерновых продуктов с любыми размерами частиц, при которых будет обеспечена максимальная производительность транспортера.

С помощью экспериментальной установки практическим путем в четвертом разделе доказана адекватность методики расчетов технологических параметров и режимов работы вибрационного транспортера со ступенчатым рабочим органом.

Используя формулы, представленные во втором разделе и данные, рассчитанные аналитическим путем в третьем разделе, и подтвержденные экспериментами в четвертом разделе, определено, что новую конструкцию вибротранспортера со ступенчатой декой можно использовать для транспортирования всех зерновых культур, без разрушения зерен.

Таким образом, при разработке новых конструктивных решений вибрационного транспортера для достижения максимального значения скорости транспортирования слоя зерновой массы и энергопотребления необходимо учитывать направленность колебаний рабочего органа, а также вычислить в соответствии с методикой расчета, приведенной в четвертом разделе, оптимальные геометрические и кинематические параметры для различных по размеру зерен.

5.2. ОДНОМЕРНАЯ ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА ДЛЯ ОПИСАНИЯ КИНЕТИКИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА НА СТУПЕНЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Процессы движения зерновых частиц со случайными свойствами на вибрационном лотке, который сам является источником случайности, можно описать используя одномерную ячеечную модель теории цепей Маркова. Эта теория позволит два процесса: определяющий процесс вибрационных перемещений в целом, процесс перемещения верхнего слоя, находящегося на нижнем, который контактирует со ступенчатой поверхностью рабочего органа вибротранспортёра.

В слое зернового материала под действием вибрации друг относительно друга перемещаются частицы верхнего и нижнего слоя. Слой материала может быть разбит на m – ячеек конечного размера.

Вероятности S_i того, что в данный момент времени зерновая частичка окажется в i -й ячейке. Их полный набор образует вектор состояния $S = [S_1; S_2; \dots S_m]^T$, сумма всех элементов которого равна единице. Индекс T означает транспонирование вектора.

Сыпучий материал располагается на всей поверхности ступенчатого рабочего органа лотка.

Будем считать, что перемещение частиц по ступеням поверхности дискретным во времени и пространстве. Через малый промежуток времени Δt

возможен переход частиц зерна на i -й ячейке в соседнюю. Тогда время процесса рассматриваем как:

$$t_k = (k-1)\Delta t,$$

где $k=1,2..$ – номер перехода

Зерновой материал состоит практически из однородных частиц. При передаче силовых импульсов от ступенчатой поверхности.

Рассматриваемая система состоит из n – числа ступеней, на которых располагается зерновой сыпучий материал. Изменением состояния системы в момент времени $t=1, 2, 3...$ связано с переходом зерен из одной ступени на другую и падением в приемный бункер зерен, которые были на последней ступени.

Понятно, что такая система может принимать конечное число состояний, при этом она может менять своё состояние в определенные моменты времени $t=1$. При $t=0$ состояние системы характеризуется отсутствием зерен на поверхности ступенчатого рабочего органа.

Считаем, что состояние системы в некоторое t_i время зависит от состояния времени t_j .

Составим матрицу перехода частиц с первой ступени на вторую:

$$A^1 = \begin{Bmatrix} a_{i1}^1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot a_{in}^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1}^1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot a_{nn}^1 \end{Bmatrix}$$

Задача состоит в том, чтобы спрогнозировать состояние системы после прохождения 2х ступеней:

$$S^2 = \begin{cases} A_1^2 = \sum_i a_{i1}^2 \\ A_2^2 = \sum_i a_{i2}^2 \\ \dots\dots\dots \\ A_n^2 = \sum_i a_{in}^2 \end{cases}$$

Возведение матрицы P в квадрат можно получить матрицу P^2 прогнозируемых вероятностей, каждый элемент P_{ij} , который показывает вероятность перехода из состояния i ($t=0$) в состояние j ($t=2$).

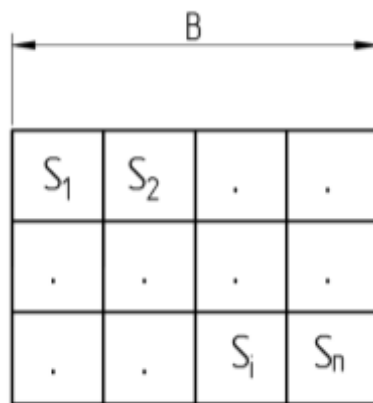
Полученную матрицу можно перевести в реальные значения помножив каждый элемент на соответствующее количество зерен на первой ступени в момент времени ($t=0$), где a_{ij} – это количество зерен продукта, которые были на i -й ступени для $t=0$ и попали на j -ю ступень в момент времени $t=1$ (т.е. после второй ступени). Соответственно матрица системы будет иметь вид:

$$S^1 = \begin{cases} A_1^1 = \sum_i a_{i1}^1 \\ A_2^1 = \sum_i a_{i2}^1 \\ \dots\dots\dots \\ A_n^1 = \sum_i a_{in}^1 \end{cases}$$

Аналогично можно составить для третьей ступени поверхности транспортера:

$$A^2 = \begin{pmatrix} a_{i1}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot a_{in}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot a_{nn}^2 \end{pmatrix}$$

где a_{ij} – это количество зерен, которые были на i -й ступени для $t=0$ и попали на j -ю ступень в момент $t=2$. Система примет вид:



5.3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ ОРГАНом СО СТУПЕНЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Полученные в настоящей главе результаты основаны на следующем:

Разработанная ячеечная модель процесса непрерывного перемещения зернового материала, основанная на теории цепей Маркова, позволяет эффективно моделировать кинетику процесса движения как верхнего, так и нижнего слоя продукта в сравнении с дисперсной системой. На основании разработанной модели и результатов проведенных подтверждающих экспериментов нами был разработан новый способ виброперемещения зерновых масс.

В основу разработки нового способа виброперемещения сыпучих пищевых масс [84] нами была поставлена задача достижения повышения производительности вибротранспортирования с применением более простых и дешевых горизонтальных колебаний, за счет изменения конструкции рабочей поверхности.

Решение поставленной задачи нами было достигнуто благодаря тому, что механические колебания в горизонтальной плоскости, которые совершает рабочий орган имеет ступенчатую поверхность. Частицы продукта сначала движутся вместе с рабочим органом, находясь между вертикальной и наклонной гранью, далее при движении рабочего органа в направлении угла между

наклонной пластиной и горизонтом частицы продукта перемещаются скольжением по наклонной пластине рабочего органа вверх, а после изменения направления движения рабочего органа, зерна продукта, под действием силы инерции, отрываются от верхней части наклонной поверхности и происходит перелет через следующую наклонную поверхность в соответствии с направлением последнего колебательного движения рабочего органа, причем процесс повторяется каждые два полных цикла колебаний. Наклонная поверхность в продольном разрезе рабочего органа является гипотенузой прямоугольного треугольника, причем её острый угол с горизонтом указывает направление перемещения частиц сыпучего продукта. Угол между наклонной прямоугольной поверхностью и горизонтальным катетом может быть от 20 до 45 градусов, согласно теоретическим и практическим исследованиям, причем способ имеет три основных этапа, первый - движение зерна продукта вместе с рабочим органом между вертикальной и наклоненной гранью, второй - скольжение зерна продукта по наклоненной пластине, третий - полет зерна продукта через следующую наклонную грань.

Исходя из последовательности фрагментов замедленного просмотра скоростной видеозаписи (фиг. 1, 2, 3, 4), видно весь процесс, который периодически повторяется за время двух полных периодов колебаний рабочего органа. Первый фрагмент, это нахождение зерна продукта внизу наклонной поверхности (фиг. 1). Второй фрагмент - это перемещение скольжением по наклонной поверхности вверх (фиг. 2), это происходит за счет силы инерции колебательного движения, направленного в данный момент времени вправо. Третий фрагмент (фиг. 3) - это начало полета частицы, ее отрыв от наклонной поверхности. Четвертый фрагмент (фиг. 4) - это завершение процесса полета, приземления зерна на следующей ступени.

Процесс можно разделить на три основных этапа: 1) движение зерна продукта вместе с колебательным рабочим органом между вертикальной и наклонной пластинами; 2) скольжение зерна продукта по наклоненной пластине; 3) полет зерна продукта. В предложенном нами способе, виброперемещение

полностью зависит от соотношений геометрических размеров частиц продукта и поверхностей, с которыми он сталкивается, а также от кинематических параметров механических колебаний деки.

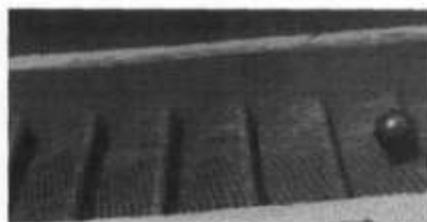


Fig. 2



Fig. 1



Fig. 4

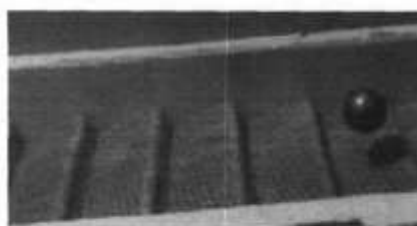


Fig. 3

Для реализации данного способа виброперемещения зерновых масс на ступенчатых поверхностях нами было разработано несколько конструкций оборудования, что было зафиксировано в патентах на полезные модели:

1. Вибрационный конвейер для транспортировки сыпучего пищевого сырья [82] – в основу этой разработки поставлена задача - создание вибрационного конвейера для транспортировки сыпучего сырья, имеющего простую конструкцию, удобную в обслуживании и настройке, работающего без применения точно направленных колебаний.

Поставленная задача нами была решена за счёт того, что вибрационный конвейер для транспортировки зернового сырья состоит из рамы, электродинамического вибратора и бункера, дека, по которой транспортируется продукт, имеет ступеньки, которые состоят из прямоугольных треугольников и совершает продольные колебания в горизонтальной плоскости.

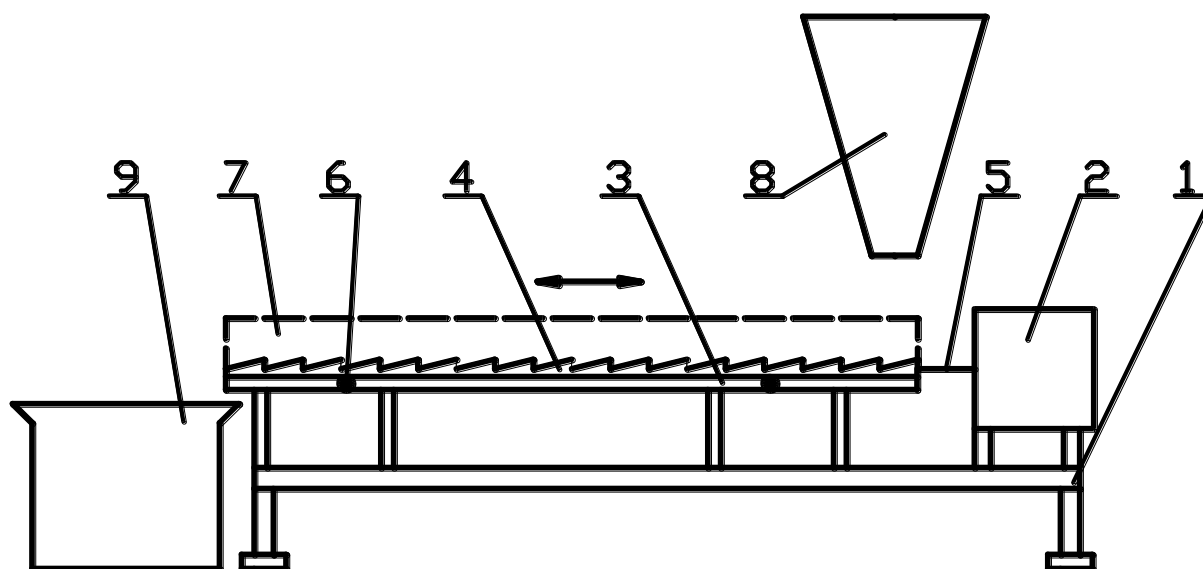


Рис. 1 – Вибрационный конвейер:

1 – рама; 2 – электродинамический вибратор; 3 – направляющие полозья; 4 – ступенчатый рабочий орган; 5 – шток; 6 – ролики; 7 – ограничивающие борта; 8 – загрузочный бункер; 9 – приёмный лоток.

Дека (рис. 2) состоит из рамы 1, в которой стальные прутки 2 диаметром 3 мм установлены в определенном порядке для того, чтобы натянуть между ними сетку с размером отверстий 2 х 2 мм. С обеих сторон дека установлена ограничивающие борта 7. Рабочая поверхность деки 4 при этом представляет собой ступенчатую поверхность, состоящую из прямоугольных треугольников изображенных на рисунке 3.

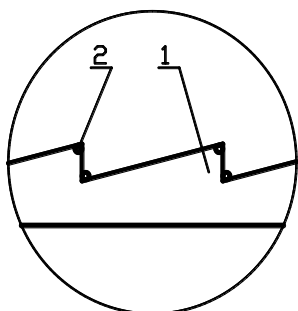


Рис. 2

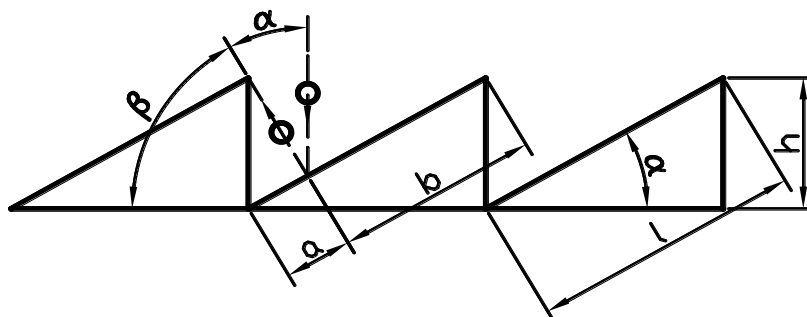


Рис. 3

Машина работает следующим образом: из загрузочного бункера зерна продукта попадают на рабочую поверхность деки 4 и отражаются наклоненной поверхностью ступенек в направлении бункера 9 (рис. 3).

Однако не вся площадь поверхности отражения является полезной, часть площади, которая прилегает к вертикальной стенке ступеньки будет зоной многократных столкновений. Если зерна попадают в эту зону, то они подвергаются ряду столкновений с наклоненной к горизонту и вертикальной стенкой ступеньки поверхности деки пока не попадут в полезную зону, после чего они приобретают правильное направление перемещения.

Разработанный вибрационный конвейер по сравнению с другими транспортерами [82] имеет следующие преимущества:

- 1) простота конструкции;
- 2) удобна для технического обслуживания и ремонта;
- 3) более высокая теоретическая производительность;
- 4) использование широко известных продольных колебаний;

2. Вибрационный конвейер-классификатор [83] В основу данного изобретения поставлена задача - создание вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки сыпучего сырья с повышенной влажностью, имеет простую конструкцию, удобную в обслуживании и настройке, работает без контроля за чистотой рабочего органа во время транспортировки сыпучих грузов с повышенной влажностью.

Конструктивно, поставленную задачу мы решили следующим образом: вибрационный конвейер-классификатор содержит раму, вибратор и бункер, несколько дек, которые состоят из наборных наклоненных под острым углом к горизонту пластин, и совершает продольные колебания в горизонтальной плоскости. Конвейер спроектирован таким образом, что расстояние между наклонными пластинами деки уменьшается на каждой следующей расположенной ниже. Фракции продукта, которые проходят сквозь первую деку попадают на низшую, и так далее, пофракционно. Таким образом происходит

транспортировка зерновой массы с заданными размерами и контролируется уровень продукта, который находится на каждой деке. Это препятствует процессу возникновения слоев продукта на рабочей поверхности. Отсутствие второго или третьего слоя на рабочей поверхности гарантирует перемещение с максимальной скоростью в один слой на каждой деке.

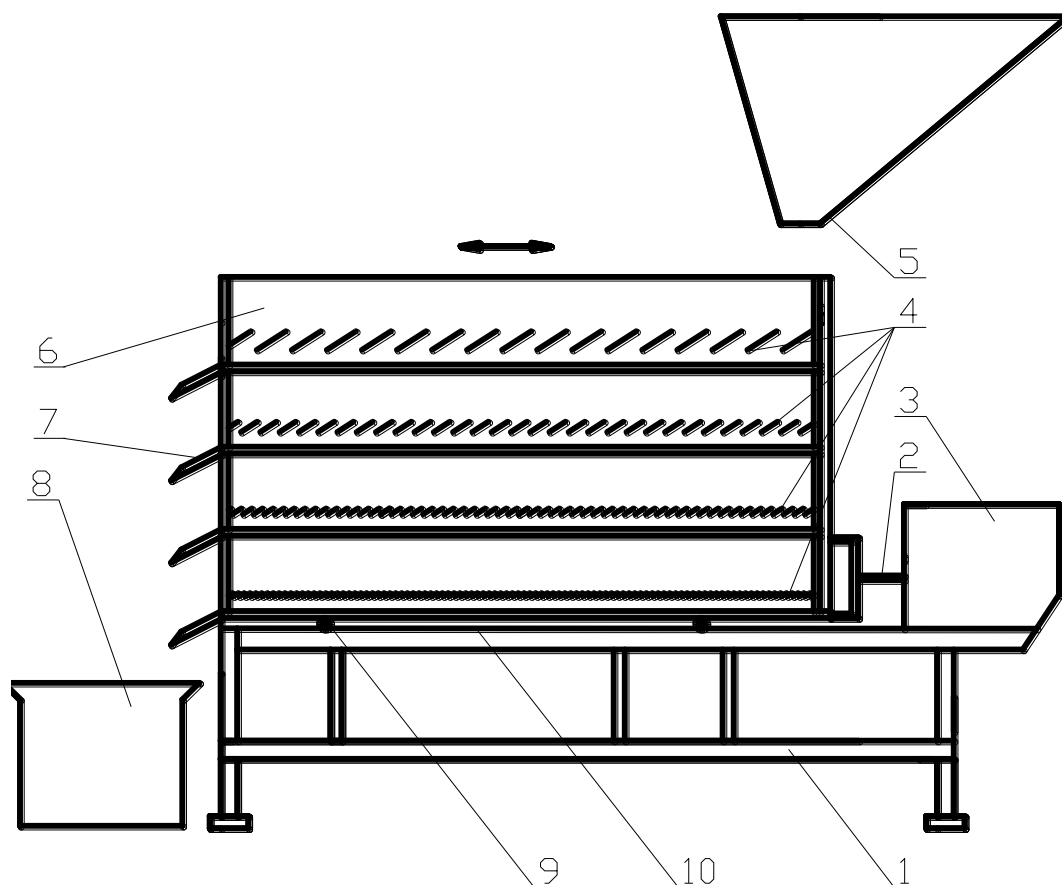


Рис. 1 – Вибрационный конвейер-классификатор:

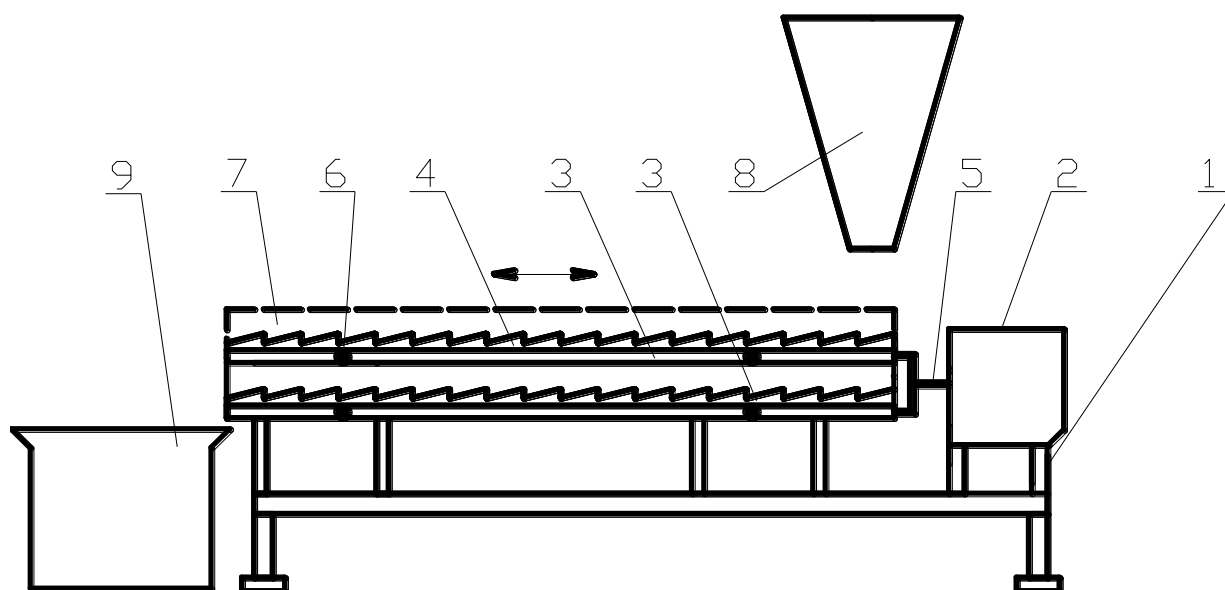
1 – рама; 2 – шток; 3 – электродинамический вибратор; 4 – ступенчатый рабочий орган; 5 – загрузочный бункер; 6 – ограничивающие борта; 7 – направляющие для продукта; 8 – приёмный лоток; 9 – ролики; 10 – направляющие полозья.

В данной модификации интенсификация процесса перемещения происходит за счет того, что зерновая масса, попадая на верхнюю деку, разделяется на четыре фракции: 1) от 7 до 10 и более миллиметров; 2) 4-7 мм; 3)

2-4 мм; 4) 1-2 мм. Каждая фракция транспортируется по своей деке, которая имеет необходимые размеры и обеспечивает наибольшую скорость виброперемещения каждой фракции.

3. Вибрационный конвейер для транспортировки сыпучего пищевого сырья с повышенной влажностью [85]: в качестве основной идеи при создании данного изобретения было создание вибрационного конвейера для транспортировки зерновых масс с повышенной влажностью, который бы имел простую, удобную в обслуживании и настройке конструкцию. А также, работающую без контроля чистоты рабочего органа.

Поставленная задача нами решена за счёт того, что вибрационный конвейер содержит раму, вибратор и бункер. А дека совершает продольные колебания в горизонтальной плоскости и состоит из наборных пластин, которые наклонены под острым углом к горизонту.



1 – рама; 2 – электродинамический вибратор; 3 – направляющие полозья; 4 – ступенчатый рабочий орган; 5 – шток; 6 – ролики; 7 – ограничивающие борта; 8 – загрузочный бункер; 9 – приёмный лоток.

Рис. 1 – Вибрационный конвейер для транспортировки сыпучего пищевого сырья с повышенной влажностью

В данной модификации рабочий орган (рис. 2) состоит из рамы 1, в которой пластины 2 установлены в определенном порядке. С обеих сторон деки установлены ограничивающие бортики 7. Рабочая поверхность деки 4 при этом представляет собой ступенчатую поверхность, которая образуется с помощью наборных пластин.

Однако не вся площадь поверхности отражения является полезной, часть площади, которая прилегает к вертикальной стенке ступеньки будет являться зоной многократных столкновений (рис.3). Если зерна попадают в эту зону, то они подвергаются ряду столкновений с наклоненной к горизонту и вертикальной стенкой ступени поверхности деки пока не попадут в полезную зону, после чего они приобретают правильное направление перемещения.

Теоретические основания для возможности осуществления данного процесса виброперемещения при горизонтальных прямолинейных синхронных синусоидальных колебаний заключаются в том физическом законе, что угол падения равен углу отражения. В нашем случае, если угол наклона поверхности равен α , то как видно из рисунка 3, угол падения на грань, отражающая и следовательно угол отражения от грани, можно принять β . Относительно горизонта, в этом случае, тело брошенное на поверхность отразится под углом α .

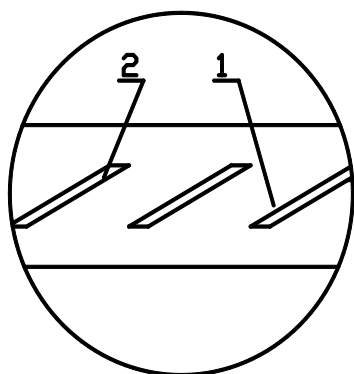


Рис. 2.

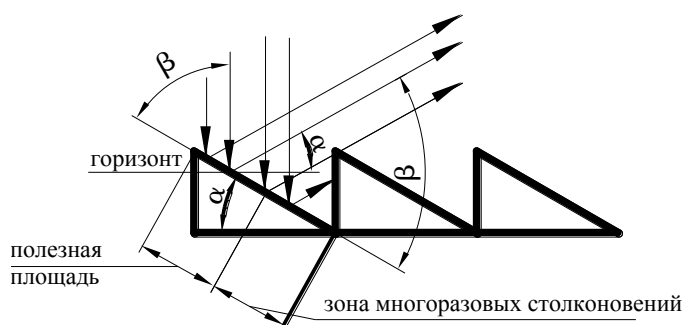


Рис. 3

Разработанный вибрационный конвейер по сравнению с имеющимися конструкциями [2, 8, 36, 89, 98-104, 114, 134, 152-154] имеет следующие преимущества:

- 1) простота конструкции;
- 2) удобна для технического обслуживания и ремонта;
- 3) более высокая теоретическая производительность;
- 4) значительно увеличилось время работы конвейера до момента залипания деки продуктом;

Для представленных выше конструкций вибрационных транспортеров нами разработаны четыре возможные типа ступенчатых рабочих органов для зерновых масс.

Рабочий орган первого типа совмещен с виброрамой и имеет ступенчатую поверхность с постоянными геометрическими параметрами ($\alpha=const$, $H_{cm}=const$, $L_{cm}=const$, $V_{cm}=const$) из пластика, без возможности регулировки (рис. 5.2). Вибрационные транспортеры с рабочими органами такого типа могут найти широкое применение при транспортировке зерновых масс с частицами определенного размера. Они просты в изготовлении и обслуживании, в процессе эксплуатации не требуют наладки и регулировки, надежны и энергоэффективны. Но при изменении транспортируемого продукта, размера его зерен и свойств невозможно будет обеспечить максимальную производительность и минимальное энергопотребление.

Рабочий орган второго типа (рис. 5.3) имеет раму 1 и съемную ступенчатую поверхность из пластика 2 с постоянными геометрическими параметрами ($\alpha=const$, $H_{cm}=const$, $L_{cm}=const$, $V_{cm}=const$). Такая конструкция не позволяет производить регулировку, однако в случае необходимости имеется возможность замены рабочей ступенчатой поверхности с заданными геометрическими параметрами, что было нами запатентовано [82].

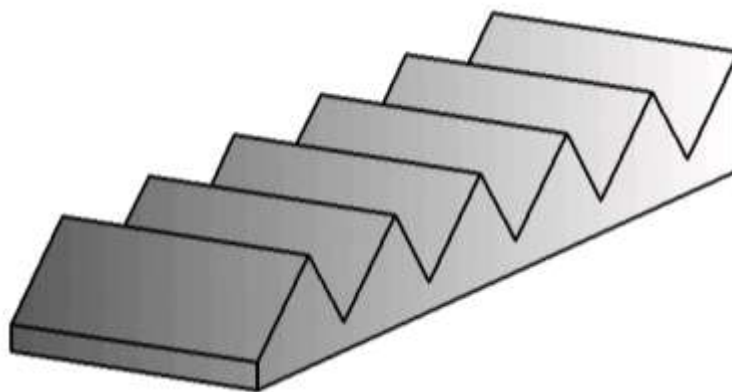


Рис. 5.2. Конструктивная схема рабочего органа с нерегулируемыми параметрами.

Вибрационные транспортеры с РО такого типа найдут широкое применение на предприятиях, также достаточно просты в изготовлении и обслуживании, в процессе эксплуатации не требуют наладки и регулировки, надежны и энергоэффективны. Однако при переходе на сыпучую зерновую массу с другими размерами зерен и свойств необходимо заменить ступенчатую поверхность на требуемую. Поэтому к каждой конструкции вибротранспортера необходимо иметь съемные рабочие ступенчатые поверхности к рабочему органу для каждого продукта.

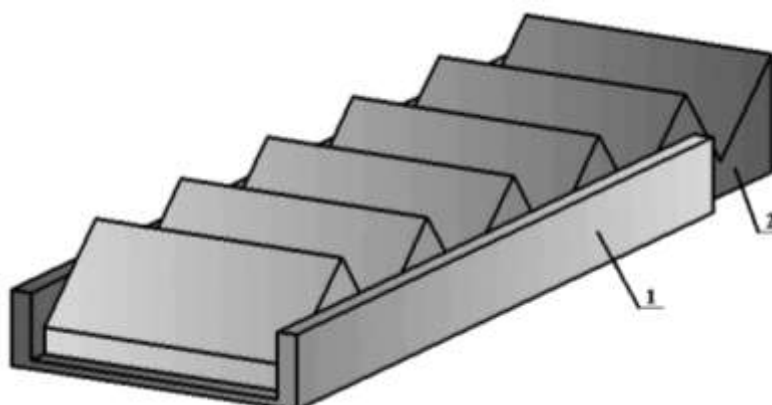


Рис. 5.3. Конструктивная схема рабочего органа со съемной ступенчатой поверхностью:

1 – рама; 2 – ступенчатая поверхность.

Ступенчатая поверхность рабочего органа третьего типа образуется из наборных металлических пластин как показано на рис. 5.4. В этой конструкции, прямоугольная пластина 2 имеет на всех четырех концах прямоугольные выступы, которые с натягом вставлены в отверстия четырех боковых держателей 1. Боковые держатели закреплены между собой жестко и неподвижно зафиксированы. Отверстия в боковых держателях, сделаны через одинаковые промежутки. При такой конструкции геометрические параметры деки всегда остаются постоянными ($\alpha=const$, $H_{cx}=const$, $L_{cx}=const$, $V_{cm}=const$).

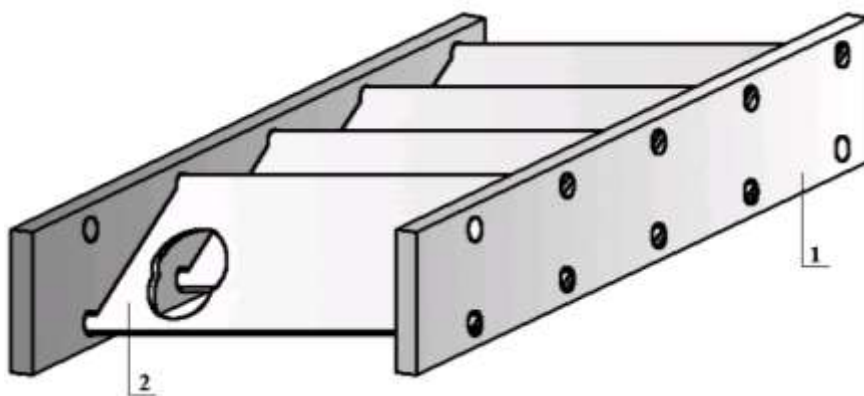


Рис. 5.4. Конструктивная схема деки со ступенчатой поверхностью из наборных пластин:

1 – боковой держатель; 2 – пластина.

Вибрационные транспортеры с РО такого типа найдут широкое применение при транспортировке зерновой массы с частицами определенного размера. Они достаточно просты в изготовлении и обслуживании, в процессе эксплуатации не требуют наладки и регулировки, надежны и энергоэффективны. На рабочем органе такой конструкции есть возможность транспортировки зерновых масс с повышенной влажностью, что было нами запатентовано [83, 85]. Но при изменении транспортируемого продукта, размера его зерен и свойств невозможно будет обеспечить максимальную производительность и минимально энергопотребление без замены сменного комплекта рабочего органа, состоящего из наборных металлических пластин.

Экономические расчеты внедрения на Днепропетровском пивоваренном заводе «ДНЕПР» двух вибрационных конвейеров-сепараторов для отделения зерна от ростков со ступенчатыми рабочими органами такого типа показали, что удельная экономическая эффективность составляет 46988 грн (Приложение В).

В четвертом случае ступенчатая поверхность рабочего органа сконструирована таким образом, чтобы наклон рабочих граней ступеней мог плавно меняться и жестко фиксироваться под необходимым углом, как показано на рис. 5.5. В этой конструкции, прямоугольная пластина 2 имеет на всех четырех концах прямоугольные выступы. Все выступы пластины, с натягом вставлены в отверстия четырех боковых держателей 1. Нижние боковые держатели закреплены между собой жестко и неподвижно, как и верхние. Но верхние боковые держатели, могут смещаться относительно нижних и жестко фиксироваться перемычкой 4 с помощью фиксатора 5 в любом смещенном положении. Угол наклона пластин α задается путем совмещения деления, нанесенного на перемычке 4 и проградуированной шкалы 3.

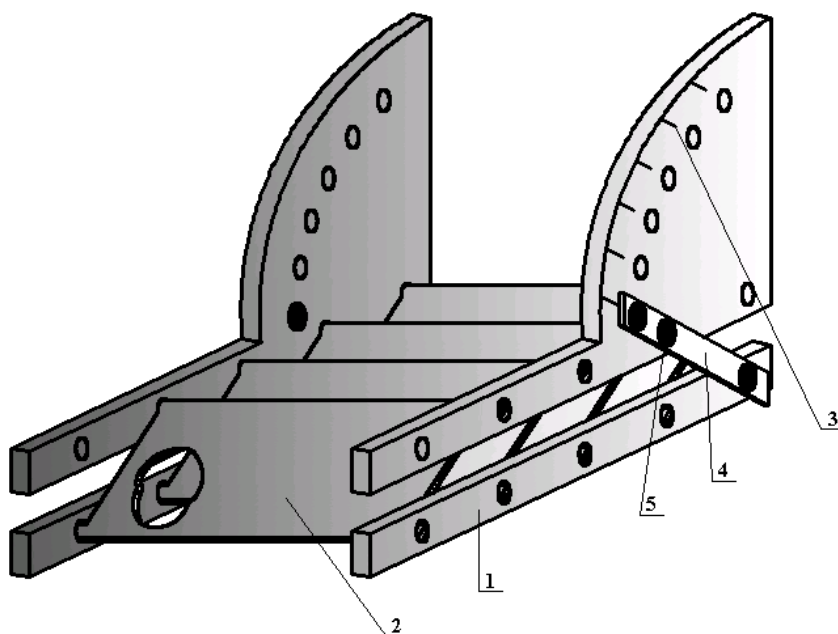


Рис. 5.5. Конструктивная схема рабочего органа с возможностью регулировки угла наклона α :

1 – боковой держатель; 2 – пластина; 3 – шкала;
4 – перемычка; 5 – фиксатор.

При такой конструкции высота ступеней, образованная пакетом наборных пластин меняется в зависимости от их угла наклона ($\alpha=var$, $V_{cm}=var$, $H_{cm}=const$, $L_{cm}=const$).

Вибрационные транспортеры с конструктивной схемой рабочего органа такого типа найдут широкое применение при транспортировке различных зерновых масс. Они достаточно просты в изготовлении и обслуживании, надежны, в процессе эксплуатации не требуют специальных навыков. Перед изменением транспортируемого продукта достаточно произвести несложную операцию по настройке рабочего органа (изменить угол наклона отражающих поверхностей). Кроме этого, на рабочих органах такой конструкции есть возможность транспортировки зерновых масс с повышенной влажностью [85].

Отличительной особенностью вибрационного транспортера (рис. 5.1) с универсальной конструкцией рабочего органа (рис. 5.5) является легкость настройки на оптимальный энергосберегающий режим работы для ведения процесса вибротранспортирования зерновых масс с различными геометрическими и физико-механическими параметрами зерен.

В процессе работы вибрационного оборудования со ступенчатым рабочим органом возможны случаи, когда зерна попадают на острый угол выступающей грани и тогда они летят в направлении, согласно движению рабочего органа в момент столкновения, однако если такой импульс перемещения не согласится с общим направлением движения зерен, то при одном из двух следующих столкновений с рабочим органом такие зерна изменят направление своего перемещения.

Испытания на ООО «ПК «МЛИН» конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов на запатентованных нами [83] ступенчатых рабочих органах такого типа, дали положительные рекомендации к внедрению на предприятиях пищевой промышленности. Экономические расчеты по результатам внедрения двух таких машин на ООО «ПК «МЛИН» показали, что удельная экономическая прибыль составит 27486 грн.

Экономические расчеты внедрения в крупяном цеху на ПТК «ШАХТЕР» двух вибрационных машин со ступенчатым рабочим органом такого типа показали, что удельная экономическая эффективность составит 7269,8 грн (Приложение В).

Во всех четырех разработках достигается основная цель работы: снижение энергопотребления при обеспечении технологической эффективности прохождения процесса перемещения на ступенчатой деке вибрационного транспортера за счет ее колебательных движений в горизонтальной плоскости.

5.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВИБРОТРАНСПОРТЕРОВ.

Технические решения, принимаемые на разных этапах жизненного цикла, имеют свои особенности [7]. Система показателей, характеризующих потребительские свойства технического объекта, отражают в своей совокупности систему показателей ее качества включающие следующие основные группы эксплуатационных показателей:

- показатели, отражающие технические возможности транспорта по своему назначению (производительность, мощность силового агрегата, точность, плавность работы);
- показатели надежности, долговечности, износоустойчивости;
- показатели, отражающие эргономические характеристики (шум, вибрация и т.п.);
- показатели, отражающие эстетические характеристики конструкции;
- показатели эксплуатационных затрат.

В качестве базового образца нами был принят вибропитатель (вибролоток) с направленными колебаниями [16].

Можно считать, что показатели надежности, долговечности, эргономичности и износостойкости в сравниваемых вариантах одинаковы. Показатели, характеризующие эксплуатационные затраты различны.

В работах профессора Хмары Л.А. [133] Пенчука В.А. [106] дана развернутая характеристика методологии сравнения вариантов технических решений, которые направлены на снижение энергоёмкости процессов.

Обобщенный показатель энергоёмкости, материалоемкости и производительности вибротранспортёра можно представить как:

$$\Pi_{N_G} = \frac{N_{y\partial}}{\Pi_{m_{y\partial}} \Pi}$$

где $N_{y\partial}$ – удельная энергоёмкость процесса транспортирования зерновой массы, производительности вибротранспортера;

$\Pi_{m_{y\partial}}$ – производительность установки на единицу массы.

Величину Π_{N_G} можно записать как:

$$\Pi_{N_G} = \frac{NG}{\Pi^2}$$

где G – масса установки;

N – мощность привода установки;

Π – эксплуатационная производительность.

Если принять во внимание результаты исследования, которые изложены в гл. 3, то можно утверждать, что при $\Pi^B = \Pi^H$ и $G^B = G^H$

$$\frac{N_{NG}^H}{N_{NG}^B} = \frac{N^H}{N^B} < 1$$

Соответственно предлагаемая установка, вернее техническое решение, энергоэффективно. Для наглядного представления сопоставительного анализа базового и нового вибрационного транспортера сводим в таблицу 5.1.

В качестве базового образца был принят вибропитатель (вибrolоток) [16].

Таблица 5.1.

Система показателей для оценки нового технического решения.

№ п/п	Наименование показателя	Общая форма записи	Условия рационализации и оптимизации
1	Себестоимость единицы транспортирования	$C_{y\partial} = \frac{C_{м.см}}{П}$	$C_{y\partial} \rightarrow \min$
2	Энергоёмкость	$N_{y\partial} = \frac{N}{П}$	$N_{y\partial} \rightarrow \min$
3	Материалоёмкость	$G_{y\partial} = \frac{G}{П}$	$G_{y\partial} \rightarrow \min$
4	Производительность	$П$	$П \rightarrow \max$
5	Обобщенный показатель энергоёмкости и материалоемкости	$N_{NG} = \frac{NG}{П^2}$	$N_{NG} \rightarrow \min$

ВЫВОДЫ ПО 5 РАЗДЕЛУ

1. Представлено обоснование основных направлений конструирования вибрационных транспортеров для зерновых масс со ступенчатыми рабочими органами, совершающими колебания в плоскости горизонта.

2. Опираясь на аналитические и экспериментальные исследования разделов 2, 3, 4, представлены четыре конструкции вибротранспортеров с рабочими органами новой конструкции для зерновых масс, учитывающие различные особенности производств.

3. Произведена технико-экономическая оценка предлагаемых новых технических решений вибротранспортеров.

4. Экономические расчеты показали, что внедрения проектируемых машин со ступенчатыми рабочими органами для вибротранспортирования зерновых масс, которые совершают возвратно-поступательные колебания в горизонтальной плоскости, позволят получить удельную экономическую эффективность 34755,8 грн (Приложение В).

ВЫВОДЫ

1. Системным анализом результатов исследований различных вибропитателей, вибротранспортеров и конвейеров установлено, что ступенчатые рабочие органы используются в некоторых конструкциях для сепарации зерновых масс, но исследования процессов целенаправленного перемещения зерновых масс вибрационным транспортером со ступенчатой рабочей поверхностью и горизонтальной возмущающей силой пока отсутствуют.

2. Впервые разработана математическая модель целенаправленного перемещения зерновых масс ступенчатым рабочим органом, который получает внешнее горизонтальное вибрационное воздействие, позволяющая оценивать влияние режимных параметров вибрационного воздействия, а также конструктивных параметров ступенчатого органа на виброскорость, мощность и производительность.

3. Полученные аналитические зависимости позволяют анализировать режимы работ вибрационного транспортера со ступенчатым рабочим органом при транспортировании различных зерновых масс (зерна, гороха, фасоли и др.).

4. Обоснована и реально доказана возможность использовать универсальный стенд ВЭДС-10А для исследования процессов перемещения зерновых масс на специальных моделях ступенчатых рабочих органов.

5. Разработанная методика экспериментальных исследований позволяет не только изменять параметры горизонтальных колебаний ступенчатого рабочего органа, но и изменять конструктивные параметры ступеней, материалы с различными коэффициентами трения, а также перемещаемые материалы.

6. На базе установленных закономерностей, рекомендованы следующие рациональные параметры вибрационных транспортеров со ступенчатым рабочим органом. Длина наклонной поверхности ступени $L_{cm} = 0,023$ м, угол ее наклона к горизонту $\alpha = 24^0$, при этом вибрационные характеристики должны быть $A = 0,007$ м; $\omega = 27,5$ Гц, а при $\alpha = 26^0$; $L_{cm} = 0,012$ м; $A = 0,007$; $\omega = 25$ Гц.

7. Разработанные с непосредственным участием автора конструкции вибротранспортеров со ступенчатым рабочим органом обладают новизной, защищены патентами. Производственные испытания конструкций вибротранспортеров со ступенчатым рабочим органом на Днепропетровском пивоваренном заводе «Днепр», на предприятиях ОО «ПК МЛИН» и ПТК «Шахтер» показали их работоспособность, высокую технологичность и энергоэффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский ; АН СССР, Науч. совет по комплекс. проблеме «Кибернетика», Секция «Математическая теория эксперимента». – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
2. Александров, М.П. Подъемно-транспортные машины : [учеб. для машиностроит. спец. вузов]. – 6-е изд., перераб. / М.П. Александров. – Москва : Высшая школа, 1985. – 514 с.
3. Аналітичне визначення фазового кута відрива часток харчових мас при дослідженні нового способу вібротранспортування / Ємеянов О.З., Наконечний О.Г., Фалько О.Л., Коваленко А.В. // Техніка та технологія харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 4. – С. 21–22. – (Технічна серія).
4. Аналітичне визначення початкового кута ковзання часток харчових мас при дослідженні нового способу вібротранспортування / Ємеянов О.З., Фоменко О.Л., Фалько О.Л., Коваленко А.В. // Техніка та технологія харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 4. – С. 22–24. – (Технічна серія).
5. Бабанин, А.Я. Совершенствование виброконвейера для транспортировки сыпучих грузов / Бабанин А.Я., Шамота В.П., Фалько О.Л. // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – Донецк, 2017. – Вып. № 46 – С.
6. Бакум, В.В. Обоснование параметров технологического процесса сепарации семенных смесей на фрикционных неперфорированных колеблющихся поверхностях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / Виктор Васильевич Бакум ; [место защиты : Харьк. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва]. –

Харьков, 1984. – 20 с.

7. Баловнев, В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин: учеб. пособие / В.И. Баловнев. – М.: МАДИ, 2014. – 148 с.

8. Барышев, А.И. Механизация погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ в пищевой промышленности : в 3 ч. : рекоменд. М-вом образования и науки Украины в качестве учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений, обучающихся по специальности 7.090221 «Оборудование перерабатывающих и пищевых производств» / А.И. Барышев ; М-во образования и науки Украины, Донец. гос. ун-т экономики и торговли. – Донецк : ДонГУЭТ, 2000. – ISBN 5-7763-1785-1. – Ч. 1 : Грузоподъемные устройства. – 160 с. ; Ч. 2 : Транспортирующие машины. – 145 с. ; Ч. 3 : Погрузочно-разгрузочные машины, склады и комплексная механизация и автоматизация ПРТС работ. – 165 с.

9. Бедин, Ф.П. Сохранность фруктов овощей и зерна. Теплофизические, физиологические и транспортные свойства : учеб. пособие / Ф.П. Бедин, Е.Ф. Балан, Н.И. Чумак. – Одесса : Холодильная техника и технология, 2000. – 450 с.

10. Бишоп, Р. Колебания : пер. с англ. / Р. Бишоп ; под ред. Я.Г. Пановко. – 3-е изд. – Москва : Наука, 1986. – 192 с.

11. Блехман, И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – Москва : Наука, 1964. – 412 с.

12. Блехман, И.И. Задача о движении частиц вверх по наклонной вибрирующей плоскости (предельный угол и его связь с коэффициентом восстановления и мгновенного трения) / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе // Вопросы динамики и динамической прочности. – Рига, 1963. – Вып. X. – С. 69–78.

13. Блехман, И.И. Синхронизация параметрически связанных вибраторов / И.И. Блехман, К.В. Фролов // Тезисы докладов конференции по колебаниям механических систем. – Киев, 1971. – С. 12.

14. Бутковский, В.А. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства / Бутковский В.А., Мерко А.И., Мельников Е.М. –

Москва : Интерграф сервис, 1999. – 464 с.

15. Вибрационный электродинамический стенд ВЭДС-10А : паспорт, техн. описание и инструкция по эксплуатации. – Ростов-на-Дону, 1970. – 43 с.

16. Вибропитатели тяжелые и легкие : сайт. – URL: <http://www.ekvipteh.com.ua/vibropitatel.html> (дата обращения: 22.02.2020). – Текст: электронный.

17. Бутковский, В.А. Мукомольное производство / В.А. Бутковский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 1993. – 351 с. – (Учебные и учебные пособия для техникумов системы Министерства заготовок СССР).

18. Бутковский, В.А. Технологии зерноперерабатывающих производств : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Сервис и техническая эксплуатация транспортных и технологических машин и оборудования в пищевой и перерабатывающей промышленности» и «Машины и аппараты пищевых производств» / В.А. Бутковский, А.И. Мерко, Е.М. Мельников. – Москва : Интеграф сервис, 1999. – 472 с. – (XXI век. Учебник).

19. Бутковский, В.А. Технологическое оборудование мукомольного производства / В.А. Бутковский, Г.Е. Птушкина. – Москва : ГП «Журнал Хлебопродукты», 1999. – 464 с.

20. Бутковский, В.А. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства / В.А. Бутковский, Е.М. Мельников. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 464 с. – (Учебники и учебные пособия для вузов).

21. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины / А.А. Вайнсон. – Москва : Машиностроение, 1975. – 431с.

22. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) и др. – Москва : Машиностроение, 1978–1981. – Т. 3 : Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. – 1980. – 544 с. ; Т. 4. : Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. –1981. – 509 с.

23. Воронков, И.М. Курс теоретической механики / И.М. Воронков. – 11-

е изд., стер. – Москва : Наука, 1964. – 596 с.

24. Галицкий, Р.Р. Оборудование зерноперерабатывающих предприятий : учеб. для сред. спец. учеб. заведений системы хлебопродуктов. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : Агропромиздат, 1990.— 270, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для учащихся техникумов).

25. Галицкий, Р.Р. Оборудование зерноперерабатывающих предприятий / Р.Р. Галицкий, Т.З. Рудай. – Москва : Колос, 1978. – 319 с.

26. Гончаревич, И.Ф. Вибрационные машины в строительстве / И.Ф. Гончаревич, П.А. Сергеев. – Москва : Машгиз, 1963. – 309 с.

27. Гончаренко, Г.М. Технологічне обладнання консервних та овочепереробних : довідник / Г.М. Гончаренко, В.В. Дуб, В.В. Гончаренко. –Київ : Центр учбової літератури, 2007. – 304 с.

28. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия : межгос. стандарт / Гос. комитет СССР по стандартам. – Дата введ. 1991.01.01. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 14 с.

29. ГОСТ 27896-88. Резины, полимерные эластичные материалы, прорезиненные ткани и ткани с полимерным эластичным покрытием. Методы определения топливопроницаемости : гос. стандарт Союза ССР / Гос. комитет СССР по стандартам. – Срок действия : с 1990.01.07 по 1995.01.07. – Москва, 1989. – 17, [1] с. – (Государственный комитет СССР по стандартам).

30. ГОСТ 2910-74. Текстолит электротехнический листовой. Технические условия : гос. стандарт союза ССР / Гос. комитет СССР по стандартам. – Дата введ. 1976.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 1998. – 9, [1] с.

31. ГОСТ 4403-91. Ткани для сит из шелковых и синтетических нитей. Общие технические условия : межгос. стандарт / Гос. комитет СССР по стандартам. – Дата введ. 1993.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 17, [1] с.

32. ГОСТ 5336-80. Сетки стальные плетеные одинарные. Технические условия : межгос. стандарт / Гос. комитет СССР по стандартам. – Дата введ. 1982.01.01. – Москва : Стандартиформ, 2007. – 7 с.

33. ГОСТ 8242-88. Детали профильные из древесины и древесных материалов для строительства. Технические условия : межгос. стандарт / Гос. комитет СССР по стандартам. – Дата введ. 1989.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 9, [1] с.

34. Григорьев, А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1972. – 184 с.

35. Гросул, Л.Г. Реологія зерна пшениці у зв'язку з розробкою мало-, міні- та мікрогабаритного крупорушального устаткування / Л.Г. Гросул // Наукові праці Одеської державної академії пищевих технологій. – Одеса, 1997. – Вип. 17. – С. 145–157.

36. Гросул, Л.Г. Устаткування для малих підприємств та цехів по виробництву крупи в фермерських господарствах / Л.Г. Гросул // Підприємства і цехи малої потужності для переробки сільськогосподарської сировини: ефективність і особливості організації : матеріали наук.-практ. конф. (27–28 листоп. 1998 р.) / Полтав. кооп. ін-т. – Полтава, 1988. – С. 205–214.

37. Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленой поверхности / Мачихин С.А., Рындин А.А., Васильев А.М., Стрелюхина А.Н. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 4. – С. 55–62.

38. Демский, А.Б. Оборудование для производства муки и крупы : справочник / А.Б. Демский [и др.]. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 349 с. – ISBN 5-10-000505-X.

39. Демский, А.Б. Оборудование для производства муки и крупы : справочник / А.Б. Демский и др. – Санкт-Петербург : Профессия, 2000. – 614, [9] с. – ISBN 5-93913-002-X.

40. Дьячков, В.К. Крутонаклонные и вертикальные конвейеры / В.К. Дьячков. – Москва : ЦНИИТЭИМтягмаш, 1985. – 44 с. – (Конструирование и

эксплуатация оборудования. Серия 6, Подъемно-транспортное оборудование : обзор. информ. / ЦНИИ информ. и техн.-экон. исслед. по тяжелому и трансп. машиностроению ; вып. 1).

41. Дьячков, В.К. Подвесные конвейеры / В.К. Дьячков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1976. – 320 с.

42. Егоров, Г.А. Технология и оборудование мукомольно-крупяного и комбикормового производства / Г.А. Егоров, Е.М. Мельников, В.Ф. Журавлев. – Москва : Колос, 1979. – 368 с. – (Учебники и учебные пособия для вузов).

43. Егоров, Г.А. Технология муки, крупы и комбикормов / Г.А. Егоров, Е.М. Мельников, Б.М. Максимчук. – Москва : Колос, 1984. – 376 с. – (Учебники и учебные пособия для вузов).

44. Ермолаева, Г.А. Технология и оборудование производства пива и безалкогольных напитков : учебник / Г.А. Ермолаева, Р.А. Колчева. – Москва : Academia, 2000. – 413, [1] с. – (Профессиональное образование : федер. комплект учеб. / М-во образования Рос. Федерации, Ин-т развития проф. образования). – ISBN 5-8222-0118-0.

45. Заплетніков, І.М. Дослідження кута підйому продукту в обертовому циліндричному ситі під впливом вібрації / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько // Обладнання та технології харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 22. – С. 59–66.

46. Заплетніков, І.М. Теоретичні дослідження вібропереміщення сипкої харчової сировини по ступінчатому робочому органу, що коливається у горизонтальній площині / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2007. – Вип. 17, т. 2. – С. 25–32.

47. Заплетніков, І.М. Теоретичне дослідження нового способу вібротранспортування харчових мас / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько, А.В.Коваленко, С.О. Певцова // Обладнання та технології харчових виробництв /

М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2008. – Вип. 18, т. 2. – С. 179–188.

48. Зенков, Р.Л. Конвейеры большой мощности / Р.Л. Зенков, М.М. Петров. – Москва : Машиностроение, 1964. – 428 с.

49. Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 301 с.

50. Зуев, Ф.Г. Механизация погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ / Ф.Г. Зуев, Н.А. Левачев, Н.А. Лотков. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 447 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов вузов). – ISBN 5-10-000111-9.

51. Иванов, М.Н. Детали машин : [учеб. для втузов] / М.Н. Иванов. – 5-е изд., перераб. – Москва : Высшая школа, 1991. – 399 с.

52. Иванченко, Ф.К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин : [учеб. для техн. вузов и фак.] / Ф.К. Иванченко. – Киев : Вища школа, 1983. – 351 с.

53. Иориш, Ю.И. Виброметрия: Измерение вибрации и ударов : общая теория, методы и приборы. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машгиз, 1963. – 771 с.

54. Казаков, Е.Д. Основные сведения о зерне / Е.Д. Казаков. – Москва : Зерновой союз, 1997. – 144 с.

55. Казаков, Е.Д. Методы оценки качества зерна : лаб. практикум / Е.Д. Казаков. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 215 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов вузов).

56. Канторович, З.Б. Машины химической промышленности / З.Б. Канторович. – Москва : Машиностроение, 1978. – 468 с.

57. Коваленко, А.В. Определение начального угла скольжения частицы сыпучей пищевой массы при исследовании нового способа вибротранспортирования / Коваленко А.В. // Образование, наука и молодёжь – 2017 : сб. избр. ст. участников Межвуз. науч.-практ. конф. / Федер. агентство по

рыболовству, Керч. гос. морской технолог. ун-т. – Керчь, 2017. – Ч. 2. – С. 217–223.

58. Коваленко, А.В. Исследование нового режима виброперемещения сыпучего сырья по ступенчатому рабочему органу виброконвейера / Коваленко А.В. // Молодёжный форум: технические и математические науки : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Воронеж. гос. ун-т инж. технологий. – Воронеж. – 2015. – № 8, ч. 2 (19-2). – С. 214–218.

59. Коваленко, А.В. Разработка механизма ступенчатой деки для транспортировки сыпучих продуктов с изменяющейся геометрией / А.В. Коваленко, Н.А. Миронова // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. работ / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2018. – Вып. 4 (37). – С. 10–15.

60. Коваленко, А.В. Экспериментальное определение коэффициента внешнего трения зерновой массы по различным поверхностям / Коваленко А.В., Соколов С.А. // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. работ / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2018. – Вып. 5 (38). – С. 58–63.

61. Коваленко, А.В. Визначення оптимальних геометричних параметрів робочого органа для транспортування сипких харчових продуктів / А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Святогірськ, 10–12 верес. 2009 р. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009.

62. Коваленко, А.В. Експериментальна конструкція механізму для визначення оптимальних геометричних параметрів східчастої деки / А.В. Коваленко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 3. – С. 146–151.

63. Коваленко, А.В. Экспериментальное определение оптимальной геометрии ступеней деки / Коваленко А.В., Громов С.В., Степанов Д.В. // Рибне господарство України : наук.-виробн. журн. – Керч, 2012. – Вип. 2 (79). – С. 33–36.

64. Конвейеры : справочник / под общ. ред. Ю.А. Пертена. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 367 с.

65. Колпаков, А.П. Проектирование и расчет механических передач : учеб. пособие для студентов вузов по агроинж. специальностям / А.П. Колпаков, И.Е. Карнаухов. – Москва : Колос, 2000. – 328 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

66. Корнійчук, В.Г. Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини із ступінчастим робочим органом / В.Г. Корнійчук, А.В. Коваленко, В.А. Черепов // Збірник тез доповідей студентів за підсумками науково-дослідної роботи за 2006 рік, 25 квіт. 2007 р. / Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2007. – Вип. 9, т. 1.

67. Кошевой, Е.П. Технологическое оборудование предприятий производства растительных масел : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Машины и аппараты пищевых производств» и «Пищевая инженерия малых предприятий», направления подгот. дипломиров. специалистов «Пищевая инженерия» и специальности «Технология жиров, эфирных масел и парфюмерно-косметических продуктов», направления подгот. дипломиров. специалистов «Производство продуктов питания из растительного сырья» / Е.П. Кошевой. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2001. – 363, [2] с. – (Учебники и учебные пособия). – ISBN 5-901065-44-1.

68. Кузьмин, А.В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин / А.В. Кузьмин, Ф.Л. Марон. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 351 с.

69. Лапкин, Ю.П. Перегрузочные устройства : справочник / Ю.П. Лапкин, А.Р. Малкович. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.

70. Ловчиков, А.П. Влияние механических микроповреждений зерна колосовых культур на выход продукции при помол: учеб. пособие / Ловчиков А. П., Ловчиков В.П. ; Южно-Урал. гос. аграр. ун-т. – Челябинск : Южно-Уральский ГАУ, 1999. – 61 с.

71. Лукьянов, П.И. Аппараты с движущимся зернистым слоем: теория и расчет / П.И. Лукьянов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 184 с.

72. Макаров Ю.И. Основы расчета процессов смещения сыпучих материалов: исследование и разработка смесительных аппаратов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 18.07.75 / Макаров Юрий Иванович ; Моск. ин-т хим. машиностроения. – Москва, 1975. – 35 с.

73. Машины и аппараты пищевых производств : учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломиров. специалистов «Пищевая инженерия» вузов : в 2 кн. / С.Т. Антипов [и др.] ; под ред. В.А. Панфилова. – Москва : Высшая школа, 2001. – (Учебник XXI века). – ISBN 5-06-004074-7. – Кн. 1. – 703 с. ; Кн. 2. – [2], 707–1384 с.

74. Машины, оборудование, приборы и средства автоматизации для перерабатывающих отраслей АПК : каталог : [в 4 т.] / Гос. комис. Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам, НИИ информ. и техн.-экон. исслед. по инж.-техн. обеспечению (АгроНИИТЭИИТО). – Москва : ВИНТИ, 1990. – Т. 4, ч. 2 : Мельнично-элеваторная, крупяная и комбикормовая промышленность. – 339 с.

75. Медведев, Г.М. Технология макаронного производства : учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Технология хлеба, кондитерских и макаронных изделий» / Г.М. Медведев. – 2-е изд., стер. – 270, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

76. Мельников, Е.М. Технология переработки продукции растениеводства / Е.М. Мельников, Н.А. Попов. – М. : Колос, 2000.

77. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – Москва : Наука, 1965. – 340 с. – (Физико-математическая библиотека инженера).

78. Назаренко, І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. для студентів вищ. навч. закладів / І.І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Слово, 2010. – 437 с. – ISBN 978-966-194-019-1.

79. Назаренко, І.І. Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв : навч. посіб. / І.І. Назаренко, І.М. Берник – Київ : Аграр Медіа Груп, 2013. – 544 с.

80. Оборудование предприятий общественного питания. В 3 т. Т.1. Механическое оборудование : учеб. пособие для студентов вузов / В.Д. Елхина, А.Д. Журин, М.К. Проничкина, М.К. Богачев. – Москва : Экономика, 1987. – 447 с.

81. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств : [учеб. пособие для механ. специальностей вузов пищевой промышленности] / под ред. А.Я. Соколова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1969 – 639 с.

82. Пат. 26133 Україна, МПК B65G 27/00. Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько, А.В. Коваленко ; заявник і власник Донецьк. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № u200702634 заявл. 12.03.2007 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14. – 4 с. : іл..

83. Пат. 40430 Україна, МПК B07B 1/12. Вібраційний конвеєр-класифікатор / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько, А.В. Коваленко ; заявник і власник Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № u200812452 ; заявл. 23.10.2008 ; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7. – 4 с. : іл.

84. Пат. 96293 Україна, МПК (2011) B65G 27/12, B65G 27/32, B06B 1/02, B65G 27/18, A01F 25/18, A01F 25/20. Спосіб вібропереміщення сипких харчових мас / Фалько О.Л., **Коваленко А.В.** ; заявник і власник Донец. нац. ун-т

економіці і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № а200813697 ; заявл. 27.11.2008 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. – 10 с. : іл.

85. Пат. 40740 Україна, ПМК В65G 27/00. Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю / І.М. Заплетніков, О.Л. Фалько, А.В. Коваленко ; заявник і власник Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № u200813003 ; заявл. 10.11.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. – 4 с. : іл.

86. Практикум по технологии муки, крупы и комбикормов / Г.А. Егоров [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 207, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для студентов вузов). – ISBN 5-10-000518-1.

87. Пановко, Я.Г. Введение в теорию механических колебаний : [учеб. пособие для вузов] / Я.Г. Пановко. – Москва : Наука, 1971. – 240 с.

88. Переработка продукции растительного и животного происхождения / под общ. ред. А.В. Богомолова, Ф.В. Перцевого. – Санкт-Петербург : ГИОРД. – 2001. – 335 с. – ISBN 5-901065- 31-X.

89. Подъемно-транспортные машины : учеб. по спец. «Механизация сельского хозяйства» / В.В. Красников [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 269, [3] с.

90. Потураев, В.Н. Вибрационные транспортирующие машины: основы теории и расчета / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, А.Г. Червоненко. – Москва : Машиностроение, 1964. – 270 с.

91. Проектирование и конструирование транспортных машин и комплексов : учеб. пособие для вузов по специальности «Горные машины и комплексы» / И.Г. Штокман [и др.] ; под ред. И.Г. Штокмана. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1986. – 391, [1] с. – (Высшее образование).

92. Проектирование и расчет подъемно-транспортных машин сельскохозяйственного назначения : учеб. для студентов вузов по агроинж. спец. / М.Н. Ерохин [и др.] ; под ред. М.Н. Ерохина, А.В. Карпа. – Москва : Колос, 1999. – 284, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

93. Пугачев, А.В. Контроль и автоматизация переработки сыпучих материалов / А. В. Пугачев. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. –152 с. – ISBN 5-283-03001-6.

94. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия : учеб. пособие для вузов / А.И. Барышев [и др.] ; под ред. В.П. Кондрахина ; Донец. нац. техн. ун-т. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Донецк : ДонНТУ, 2017. – 689 с.– ISBN 966-380-038-0.

95. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин : [учеб. пособие для техн. вузов] / Ф.К. Иванченко, В.С. Бондарев, Н.П. Колесник, В.Я. Барабанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища школа, 1978. – 576 с.

96. Саленко, Ю.С. Определение рациональных параметров вибрационного транспортера / Саленко Ю.С. // Збірник наукових праць Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава, 2015. – Вип. 2 (44). – С. 3–9.

97. Сепарация зерна многократным ударом / А.В. Богомолов, А.И. Черевко, Ю.И. Токолов, С.Н. Скофенко // Наука і освіта 2005 : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2005. – Т. 53. – С. 36–38.

98. Справочник по транспортирующим и погрузочно-разгрузочным машинам / Ф.Г. Зуев, Н.А. Лотков, А.И. Полухин, А.В. Тантлевский. – Москва : Колос, 1983. – 319 с.

99. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и обработке зерна / А.Я. Соколов. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – Москва : Колос, 1975. – 496 с. – (Учебники и учебные пособия для высших учебных заведений). С. 343–370.

100. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины : учеб. пособие для машиностроит. вузов / А.О. Спиваковский, В.Н. Дьячков. – 3-е изд., перераб. – Москва : Машиностроение, 1983. – 487 с.

101. Спиваковский, А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, М.А. Котов. – Москва : Недра, 1965. – 347 с.

102. Спиваковский, А.О. Вибрационные и волновые транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, И.В. Гончаревич. – Москва : Наука, 1983. – 288 с.

103. Спиваковский, А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А.О. Спиваковский, И.В. Гончаревич. – Москва : Машиностроение, 1972. – 214 с.

104. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – Москва : Машиностроение, 1983. – 487 с.

105. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств : учеб. пособие для вузов / В.А. Будишевский [и др.] ; под общ. ред. В.П. Кондрахина ; Донец. нац. техн. ун-т. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Донецк : [б. и.], 2017. – 216 с. – ISBN 966-7559-02-5.

106. Теория технических систем : учебное пособие / Р. Л. Саханов, В.А. Пенчук. –Казань: изд-во Казанск. гос. архитект. - строит. ун-та. – 2018. – 301 с.

107. Техника и технология погрузки, разгрузки, транспортирования в энергоемких производствах : рек. М-вом образования Украины как учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям «Электромеханика», «Горное дело», «Инженерная механика» / Донец. гос. техн. ун-т ; под ред. В.А. Будишевского, А.А. Сулимы. – Донецк : ДонНТУ, 2000. – 350с. – ISBN 966–7559–02–5.

108. Технология хранения зерна : учеб. для вузов / под ред. Е.М. Вобликова. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 448 с.

109. Технология переработки продукции растениеводства : учеб. для студентов вузов по агроном. специальностям / под ред. Н.М. Личко ; [Н.М. Личко и др.]. – Москва : Колос, 2000. – 548, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений). – ISBN 5-10-003282-0.

110. Технологія виробництва гречаних круп // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2002. – № 11. – С. 8–16.

111. Технологія виробництва круп з гороху // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2001. – № 3. – С.8–12.

112. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле. – 2-е изд. /

С.П. Тимошенко ; пер. Я.Г. Пановко с 3-го амер. изд., переработ. совмест. с Д.Х. Янгом. – Москва : Наука, 1967. – 444 с.

113. Тихомиров, В.П. Технология пивоваренного и безалкогольного производства / В.П. Тихомиров. – Москва : Колос, 1998. – 448 с. – (Учебники и учебные пособия для высших учебных заведений).

114. Транспортирующие и перегрузочные машины для комплексной механизации пищевых производств : [учеб. пособие для вузов пищевой промышленности] / под общ. ред. А.Я. Соколова. – Москва : Пищевая промышленность, 1964. – 759 с.

115. Трисвятский, Л.А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Л.А. Трисвятский, Б.В. Лесик, В.Н. Курдина. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 414, [1] с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений). – ISBN 5-10-001955-7.

116. Фалько, А.Л. Оптимизация режимов и параметров работы виброадгезионного сепаратора сыпучих пищевых продуктов : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.09 : защищ. 22.12.99 / Фалько Александр Леонидович ; Донец. гос. ун-т экономики и торговли. – Донецк, 1999. – 255 с.

117. Фалько, А.Л. Размерная классификация сыпучих пищевых продуктов : монография / А.Л. Фалько ; Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк : ДонНУЭТ, 2010. – 214 с. – ISBN 978-966-385-164-8.

118. Фалько, Л.Г. Генерация искусственных режимов виброперемещения / Л.Г. Фалько, А.Л. Фалько // Перспективы развития массового питания и торговли в условиях перехода к рыночной экономике : тез. докл. междунар. конф. (17–19 мая 1994 г.) / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харьков, 1994. – С. 269–270.

119. Фалько, Л. Г. Розрахунок потужності приводу легких одномасних технологічних вібротехнічних машин / Л.Г. Фалько, О.Л. Фалько, Ю.О. Калмиков // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-

Барановського. – Донецьк : ДонДУЕТ, 2003. – Вип. 8. – С. 104–109.

120. Фалько, Л.Г. Штучний режим вібропереміщення сипких подріблених продуктів нагору по нахилах горизонтальних коливних площин / Л.Г. Фалько, А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2006. – Вип. 15. – С. 247–252.

121. Фалько, Л.Г. Створення нового режиму вібропереміщення для транспортування сипких продуктів догори по нахонах ступінчастого робочого органу / Л.Г. Фалько, А.В. Коваленко, В.О. Черепов // Збірник тез доповідей студентів за підсумками науково-дослідної роботи за 2005 рік, 19 квіт. 2006 р. / М-во освіти і науки України, Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2006. – Вип. 8. – С. 14.

122. Фалько, О.Л. Визначення фазових кутів етапів руху для часток продукту на східчастій поверхні деки вібротранспортера / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 20. – С. 65–75.

123. Фалько, О.Л. Експериментальні дослідження вібропереміщення сипкої харчової сировини по ступінчастому робочому органу, який піддається продовжним коливанням у горизонтальній площині / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2007. – Вип. 16. – С. 127–133.

124. Фалько, О. Л. Наукове обґрунтування процесу фракціонування рослинної сировини: дис. на соиск. учен. степ. докт. тех. наук : спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Фалько Олександр Леонідович ; НУХТ. – К., 2014. – 361 с.

125. Фалько, О.Л. Теоретичне визначення оптимальних геометричних параметрів сходинок деки для частинок сипких мас різних розмірів / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Обладнання та технології харчових виробництв /

М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 22. – С. 301–307.

126. Фалько, О.Л. Дослідження нового способу вібротранспортування сипких харчових мас / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Рибне господарство України : наук.-виробн. журн. – Керч, 2009. – Спец. вип.: Морські технології: проблеми та рішення. – С. 42–45.

127. Фалько, О.Л. Створення і експериментальні дослідження нового режиму вібропереміщення сипкої харчової сировини по ступінчатому робочому органу / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко // Техника и технология пищевых производств : тез. докл. V Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 23–25 мая 2007 г., Могилев / Могилев. гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2008. – С. 21–23.

128. Фалько, О.Л. Аналітичне визначення оптимальних геометричних параметрів сходинок робочого органу / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко, О.З. Ємельянов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 1. – С. 107–113.

129. Фалько, О.Л. Теоретичне дослідження нового способу вібротранспортування харчових мас / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко, С.О. Певцова // Техніка та технологія харчових виробництв : зб. тез студент. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2008. – Вип. 2. – С. 21–23. – (Технічна серія).

130. Фалько, О.Л. Теоретичне дослідження нового способу вібротранспортування харчових мас / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко, С.О. Певцова // Інноваційні енерго- й ресурсозберігаючі технології та обладнання в хлібопекарській, кондитерській, макаронній, харчоконцентратній галузях харчової промисловості : міжнар. наук.-практ. конф., 3–6 черв. 2008 р. / Нац. ун-т харчових технологій. – Київ, 2008. – С. 23.

131. Фалько, О.Л. Енергозберігаюча схема роботи вібраційного транспортера з декою нової конструкції / Фалько О.Л., Коваленко А.В. //

Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку : тез доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 верес. 2011 р., Донецьк–Святогірськ / М-во освіти і науки, молоді та спорту України та [ін.]. – Донецьк, 2011. – С. 196–197.

132. Фалько, О.Л. Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини із ступінчатим робочим органом / О.Л. Фалько, А.В. Коваленко, В.А. Черепов // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : програма і матеріали 73-ї наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 23–24 квіт. 2007 р. / Нац. ун-т харчових технологій. – Київ, 2007. – Ч. 2. – С. 55.

133. Хмара, Л. А. Интенсификация рабочих процессов машин для земляных работ / Л. А. Хмара. – Днепропетровск : ДИСИ, 1989. – 329 с.

134. Цециновский, В.Н. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий : [учеб. пособие для Ин-та повышения квалификации руководящих работников и специалистов системы заготовок] / В.Н. Цециновский, Г.Е. Птушкин. – Москва : Колос, 1976. – 368 с. – (Повышение квалификации).

135. Шамота, В.П. Модернізація процесу завантаження залізничних платформ сипкими масами шляхом використання спрямованого вібраційного руху // Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли : материалы междунар. науч.-практ. конф. в рамках Междунар. науч. форума Донец. Нар. Респ. / Донец. ин-т железнодорож. транспорта. – Донецк, 2015. – С.

136. Шамота, В.П. Обоснование конструкции и режима работы, определение производительности виброконвейера со ступенчатым рабочим органом / Шамота В.П., Фалько О.Л. // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – Донецк, 2016. – № 41. – С. 45–51.

137. Шахмейстер, Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 393 с.

138. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики : учеб. для техн.

вузов / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – 7-е изд. стер. – Санкт-Петербург : Лань, 1999. – 768 с. – (Серия «Учебники для вузов. Специальная литература»).

139. Эксплуатационный расчет вибропитателей // HELPIKS.ORG = Хелпикс.Орг. – Электрон. текстовые дан. – [Б. м.], сор. 2014-2020. – Режим доступа: <https://helpiks.org/5-41327.html>. – Загл. с экрана.

140. Donald, M. E. Mechanisms in a horizontal drum mixer / M.E. Donald, B. Rozeman // Br. Cem. Eng. – 2003. – Vol. 7, № 10. – P. 748-753.

141. Dufty, James W. Hydrodynamic Modes for Granular Gases / James W. Dufty, J. Javier Brey // Cornell University. – Electronic text data. – Ithaca, New York, 2003 (10 Feb.) – Mode of access: arXiv:cond-mat/0302170v1. – Screen title. – Published: J. Phys. Rev E. 2003. N. 4.

142. Ernst, M.H. Granular Gases / Ernst M.H. and van Noije T.C.P. ; T. Poshel, S. Luding (eds.) // Lecture notes in Physics. – Berlin, 2001. – Vol. 564.

143. Mayer, F.W. Allgemeine Yrundlagen V – Kurven / F.W. Mayer // Aufbereitungs - Technik. – 1997. – Teil 1, № 8. – S. 429–440.

144. Mayer, F.W. Allgemeine Yrundlagen V – Kurven / F.W. Mayer // Aufbereitungs - Technik. – 1997. – Teil 21, N 12. – S. 673–678.

145. Mayer, F.W. Allgemeine Yrundlagen V – Kurven / F.W. Mayer // Aufbereitungs – Technik. – 1998. – Teil III, N 1. – S. 14–23.

146. Nagel, R. Klassifizierung der Wind Sichter / R. Nagel // Staub - Rein half Luft. – 1998. – Bd. 28. – N 6.

147. Research on the Influence of Dynamic Load on Suspended Monorail / V. Gutarevych [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 806. – P. 23–29.

148. Schofield, F.R. Rotary driers and collers for granular fertilirers / F.R. Schofield, P.C. Glikin // Trans. Inatn. Chem. Engrs. – 2003. – Vol. 21, N 1. – P. 183–190.

149. Элеваторы [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: www.atlant-ural.ru/ru/contact/elevator/. – Загл. с титул. экрана.

150. Строительные машины и их эксплуатация. Разд. 5.5. Установка пневматического транспорта : учебник / И.П. Барсов // Библиотекарь. Ру : интернет-библиотека. – Электрон. текстовые дан. – [Б. м.], сор. 2006–2019. – Режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-42/65.htm>. – Загл. с экрана.

151. Строительные машины и их эксплуатация. Разд. 5.6. Узлы пневмотранспортных установок : учебник / И.П. Барсов // Библиотекарь. Ру : интернет-библиотека. – Электрон. текстовые дан. – [Б. м.], сор. 2006–2019. – Режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-42/66.htm>. – Загл. с экрана.

152. Конвейер – definition // DicLib.com : словарь для переводчика онлайн. – Электрон. текстовые дан. – [Б. м., 20--?]. – Режим доступа: <http://diclib.com/cgi-bin/d1.cgi?base=bse&page=showid&id=33734#.XpTKivZuLIV>. – Загл. с экрана.

153. Каталог продукции // Полевской машиностроительный завод / ген. дир. Трошов Владимир Евгеньевич. – Электрон. дан. – Екатеринбург, сор. 2007. – Режим доступа: http://www.polmashz.ru/katalog_produkcii. – Загл. с экрана.

154. Транспортирующее оборудование // Тигрупп : станкостроит. компания / ООО ПК «Тигрупп». – Электрон. дан. – Тверь, сор. 2003–2019. – Режим доступа: <https://tigroup-stanki.ru/catalog/transportiruyushhee-oborudovanie>. – Загл. с экрана.

155. Ленточный конвейер // Завод Запорожмашпром. – Электрон. дан. – [Запорожье], сор. 2006–2020. – Режим доступа: http://zzmp.com.ua/lentochnyj_konvejer.html. – Загл. с экрана.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Определение кинематических и геометрических параметров процесса виброперемещения зерновой массы на ступенчатой поверхности деки, при ее горизонтальных колебаниях

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

$\nu := 55$ Гц, частота колебаний деки (РО)

$A := 0.01$ м, амплитуда колебаний деки (РО)

$\alpha_1 := 25$ градус., угол наклонной поверхности ступени к горизонту

$\mu := 0.65$ коэффициент трения слоя продукта о ситовую наклонную поверхность ступени

$g_{\text{ж}} := 9.87$ м/с², ускорение свободного падения

$B := 0.1$ м, ширина рабочего органа - ступенчатой деки

$\gamma := 3.5$ кг/м², удельная загрузка площади ступенчатой деки в процессе виброперемещения, определяется экспериментально как граничное условие процесса

$$\omega := 2\pi \nu$$

$$\alpha_{\text{ж}} := \frac{\alpha_1 \cdot \pi}{180} \quad \alpha = 0.4363 \text{ радиан} \quad \cos(\alpha) = 0.9063 \quad \omega = 345.5752 \text{ рад/с}$$

РАСЧЕТЫ:

Фазовый угол начала этапа скольжения продукта (МТ):

$$\phi_0 := \arcsin \left[\frac{g \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha))}{A \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha))} \right] \quad \phi_0 = 0.0132 \text{ радиан}$$

Фазовый угол отрыва и начала этапа полета продукта:

$$\phi_1 := \arcsin \left(\frac{g \cdot \cot(\alpha)}{A \cdot \omega^2} \right) + \pi \quad \phi_1 = 3.159 \text{ радиан} \quad \cos(\phi_1) = -0.9998 \text{ рад} \quad \sin(\phi_1) = -0.0177 \text{ рад}$$

Скорость в конце периода скольжения в момент ϕ_1 вдоль оси x:

$$x_1 := A \cdot \omega \cdot (\cos(\phi_1) - \cos(\phi_0)) \cdot (\mu \cdot \sin(\alpha) - \cos(\alpha)) - \frac{1}{\omega} \cdot g \cdot (\phi_1 - \phi_0) \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha)) \quad x_1 = 4.2739 \text{ м/с}$$

Перемещение за период скольжения до момента ϕ_1 вдоль оси x:

S - первая часть выражения

$$S_{\text{ж}} := A \cdot (\mu \cdot \sin(\alpha) - \cos(\alpha)) \cdot (\sin(\phi_1) - \sin(\phi_0)) + A \cdot \cos(\phi_0) \cdot (\phi_1 - \phi_0) \cdot (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha))$$

D - вторая часть выражения

$$D := g \cdot \phi_0 \cdot \frac{1}{\omega^2} \cdot (\phi_1 - \phi_0) \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) - \frac{1}{2 \cdot \omega^2} \cdot g \cdot [(\phi_1)^2 - (\phi_0)^2] \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha))$$

$$xx_1 := S + D$$

$$xx_1 = 0.0197 \text{ м}$$

Время полёта до максимальной высоты от момента отрыва ϕ_1 :

Полный период колебаний деки:

$$t_{121} := x_1 \cdot \frac{\sin(\alpha)}{g} \quad t_{121} = 0.183 \text{ с}$$

$$T_w := \frac{1}{\nu} \quad T = 0.018 \text{ с}$$

Максимальная высота полёта от момента отрыва ϕ_1 :

$$V_p := x_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot t_{121} - \frac{g \cdot (t_{121})^2}{2} \quad V_p = 0.1653 \text{ м}$$

Высота набранная скольжением на момент ϕ_1 : $V_{sk} := x_{x1} \cdot \sin(\alpha) \quad V_{sk} = 0.0083 \text{ м}$

Максимальная высота полета за два этапа перемещения: $V_{max} := V_p + V_{sk} \quad V_{max} = 0.1736 \text{ м}$

Время падения с максимальной высоты до 0 - впадины между пластинами, образующими ступень:

$$t_{pad} := \sqrt{2 \cdot \frac{V_{max}}{g}} \quad t_{pad} = 0.1875 \text{ с}$$

Полное время этапа полёта от момента отрыва ϕ_1 при принятом равенстве высот отрыва и падения:

$$t_{122} := t_{121} + t_{pad} \quad t_{122} = 0.3705 \text{ с} \quad \phi_0 = 0.0132 \quad \phi_1 = 3.159 \text{ рад}$$

Полное время и фазовый угол всего цикла: $t_2 := t_{122} + \frac{\phi_1}{\omega} \quad t_2 = 0.3797 \text{ с}$

$$\phi_2 := \omega \cdot t_2 \quad \phi_2 = 131.2107 \text{ радиан} \quad \sin(\phi_2) = -0.6715 \quad \cos(\phi_2) = 0.741$$

Число периодов колебаний деки за время обоих этапов перемещения:

$$j := \frac{\phi_2}{2 \cdot \pi} \quad j = 20.8828 \quad \cos(\phi_2) = 0.741 \quad \sin(\phi_2) = -0.6715$$

Смещение деки в условный момент падения в град от ПСР: $\text{ceil}(j) = 21 \quad \text{floor}(j) = 20$

$$180 \cdot \frac{j - \text{floor}(j)}{\pi} = 50.5822 \quad \phi_2 - 2 \cdot \pi \cdot \text{floor}(j) = 5.547 \quad \sin(\phi_2 - 2 \cdot \pi \cdot \text{floor}(j)) = -0.6715$$

Перемещение скольжением вдоль оси Н: $H_{01} := x_{x1} \cdot \cos(\alpha) \quad H_{01} = 0.0178 \text{ м}$

Перемещение вдоль оси ζ : $\zeta_{01} := H_{01} + A \cdot \sin(\phi_1) \quad \zeta_{01} = 0.0176 \text{ м}$

Перемещение в полете вдоль оси z: $\zeta_{12} := \frac{1}{\omega} \cdot (\phi_2 - \phi_1) \cdot \cos(\alpha) \cdot x_1 + A \cdot \cos(\phi_1) \cdot (\phi_2 - \phi_1) \quad \zeta_{12} = 0.155 \text{ м}$

$$A \cdot \cos(\phi_1) \cdot (\phi_2 - \phi_1) = -1.2803$$

Перемещение общее вдоль оси z за два этапа: $\zeta_{02} := \zeta_{01} + \zeta_{12} \quad \zeta_{02} = 0.1726 \text{ м}$

Смещение деки от ПСР в момент ϕ_2 : $\zeta_{sd} := A \cdot \sin(\phi_2) \quad \zeta_{sd} = -0.0067 \text{ м}$

Возможные наибольшие геометрические размеры ступени:

$$xx_1 = 0.0197 \text{ м}$$

$$V_{\max} = 0.1736 \text{ м}$$

$$L_{st} := \frac{|\zeta_{02} + \zeta_{sd}|}{\cos(\alpha)}$$

$L_{st} = 0.1831 \text{ м}$, длина наклонной поверхности ступени, которая должна превосходить перемещение скольжением

$$V_{st} := L_{st} \cdot \sin(\sigma_2)$$

$V_{st} = 0.0859 \text{ м}$, высоту ступени, которую должна превосходить максимальная высота полета за два этапа перемещения

$$\zeta_{smin} := \zeta_{02} \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot \text{ceil}(j)}$$

$\zeta_{smin} = 0.4521 \text{ м/с}$ средняя скорость виброперемещения продукта при $\phi_2 = \pi/2 \dots 2\pi$,

если $V_{st} > V_{\max}$, то следует помнить, что реальные тела, в отличие от мат. точки, имеют начальную высоту и гориз-ю координату движения

$$\zeta_{smax} := \zeta_{02} \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot \text{floor}(j)}$$

$\zeta_{smax} = 0.4747 \text{ м/с}$ средняя скорость виброперемещения при $\phi_2 = 0 \dots \pi/2$,

$$\frac{(\phi_2 - 2 \cdot \pi \cdot \text{floor}(j)) \cdot 180}{\pi} = 317.8176$$

при от 90 до 360 град
выбирать ζ_{smin}
при от 0 до 90 град
выбирать ζ_{smax}

Общая средняя скорость виброперемещения продукта: $\zeta_{\Delta} := \frac{\zeta_{smin} + \zeta_{smax}}{2}$ $\zeta_{\Delta} = 0.4634 \text{ м/с}$

Производительность $Q := 3600 |\zeta_{\Delta}| \cdot B \cdot \gamma$ $Q = 583.881 \text{ кг/ч}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 26133

**ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОЇ
ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10 вересня 2007 р.**

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій





УКРАЇНА

 (19) UA (11) 26133 (13) U
 (51) МПК (2006)
 B65G 27/00

 МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
 І НАУКИ УКРАЇНИ

 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

 видається під
 відповідальність
 власника
 патенту

(54) ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОЇ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

1

(21) u200702634

(22) 12.03.2007

(24) 10.09.2007

(46) 10.09.2007, Бюл. № 14, 2007 р.

 (72) Коваленко Артем Володимирович, Фалько
 Олександр Леонідович, Заплетніков Ігор Микола-
 йович

2

 (73) ДОНЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ ІМ. М.ТУГАН-
 БАРАНОВСЬКОГО

 (57) Вібраційний конвеєр для транспортування
 сипкої харчової сировини, що містить раму, деку і
 бункер, який відрізняється тим, що дека здійснює
 подовжні коливання у горизонтальній площині та
 складається із сходинок у формі прямокутних три-
 кутників.

Корисна модель відноситься до переробної галузі харчової промисловості, зокрема, до обладнання для транспортування сипкої харчової сировини. Це обладнання використовується для транспортування продуктів виробництва у межах своєї території і усередині цехів на сучасних виробництвах.

Аналог [1] складається з рами, бункера, деки, вібратора та електродвигуна.

Прототипом [2] корисної моделі є вібраційний конвеєр, який являє собою раму на якій знаходиться бункер, вантажонесучий вільно підвішений елемент (деку), який отримує направлені коливання від ексцентрикового вібратора. Для забезпечення переміщення вантажів в заданому напрямку вібратор встановлюють таким чином, щоб лінія дії направленої сили проходила через центр інерції і розташовувалась під кутом напрямку коливань до подовжній вісі конвеєру.

Недоліками вібраційних транспортерів є:

1) складна конструкція транспортера вимагає постійного контролю і правильного налаштування;

2) необхідність контролю горизонтального положення робочого органу;

3) необхідність підтримання стабільності спрямованих коливань.

В основу корисної моделі поставлена задача - створення вібраційного конвеєра для транспортування сипкої сировини, що має просту конструкцію, зручну в обслуговуванні і налаштуванні, працює без застосування точно напрямлених коливань.

Поставлена задача вирішується тим, що вібраційний конвеєр для транспортування сипкої хар-

чової сировини складається з рами, електродинамічного вібратора і бункера, згідно корисної моделі, дека, по якій транспортується продукт має сходинок, які складаються із прямокутних трикутників і здійснює подовжні коливання у горизонтальній площині.

Механізми, з коливаннями такого типу, мають велике розповсюдження в різних галузях промисловості, вони прості і зрозумілі, а саме головне, на будь-яких промислових харчових підприємствах є досвід роботи з такого роду механізмами.

Відповідно до корисної моделі, переміщення сипкої сировини здійснюється за рахунок відбиття нахиленою під кутом до обрію поверхнею східчастої конструкції деки, у відмінності від прототипу [2], де продукт переміщується за рахунок спрямованих коливань деки, які здійснює гладкий робочий орган.

На Фіг.1 зображено вібраційний конвеєр, на Фіг.2 - зображена дека, на Фіг.3 зображена схема відбиття зерен від сходинок деки.

Випробуваний зразок такого вібраційного конвеєра (Фіг.1) складається з рами (1), на якій установлені електродинамічний вібратор (2) і направляючі полозки (3) для робочого органу (4). Східчаста дека (4) жорстко з'єднана з якорем вібратора (2) штоком (5) та встановлена на чотирьох роликах (6), з осями яких жорстко зв'язана. Ролики (6) знаходяться в пазах полозок (3), які обмежують рух роликів нагору і вниз забезпечуючи подовжні коливання робочого органу у горизонтальній площині.

Дека (Фіг.2) складається з рами (1'), у якій сталеві прутки (2') діаметром 3мм встановлені у ви-

(13) U

(11) 26133

(19) UA

значеному порядку для того, щоб натягнути між ними сітку з розміром отворів 2×2 мм. З обох боків деки встановлені обмежуючі бортики (7). Робоча поверхня деки (4) при цьому являє собою східчасту поверхню, яка складається із прямокутних трикутників зображених на Фіг.3.

Машина працює таким чином: із завантажуючого бункера (8) зерна продукту потрапляють на робочу поверхню деки (4) та відбиваються нахиленою поверхнею сходинки у напрямку бункера (9) (Фіг.3). Однак не вся площа поверхні відбиття є корисною, частина площі, яка прилягає до вертикальної стінки сходинки буде зоною багаторазових зіткнень. Якщо зерна потрапляють у цю зону, то вони піддаються ряду зіткнень із нахиленою до обрію та вертикальною стінкою сходинки поверхні деки доки не потраплять у корисну зону, після чого вони здобувають правильний напрямок переміщення.

Фіксуються випадки коли зерна потрапляють на гострий кут виступаючої грані і тоді вони летять у напрямку, відповідно до руху робочого органу в момент зіткнення, однак якщо такий імпульс переміщення не погодиться з загальним напрямком руху зерен, то при одному з двох наступних зіткнень з робочим органом такі зерна змінять напрямок свого переміщення. Теоретичні підстави для можливості здійснення даного процесу вібропереміщення при горизонтальних прямолінійних синусоїдальних синхронних коливань полягають у тому фізичному законі, що кут падіння дорівнює куту відбиття. У нашому випадку, якщо кут нахилу поверхні дорівнює α , то як видно з Фіг.3, кут падіння

на грань, що відбиває, і отже кут відбиття від грані, можна прийняти β . Щодо обрію, у цьому випадку, тіло кинуте на поверхню відіб'ється під кутом α .

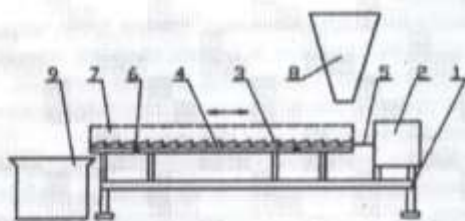
Геометричні параметри робочої поверхні деки експериментального зразка: $\alpha = 30$ градусів до обрію, висота сходинки 15 мм, довжина нахиленої грані сходинки 30 мм, були обрані виходячи з практичного минулого досвіду [3] і геометричних розмірів зерен продукту який досліджувався.

Розроблений вібраційний конвеєр в порівнянні з прототипом [2] має наступні переваги:

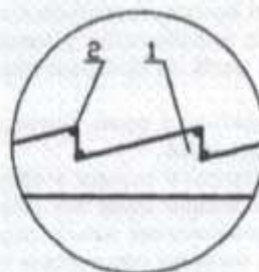
- 1) простота конструкції;
- 2) зручна для технічного обслуговування і ремонту;
- 3) більш висока теоретична продуктивність;
- 4) використання широко відомих подовжніх коливань;

Список використаних джерел.

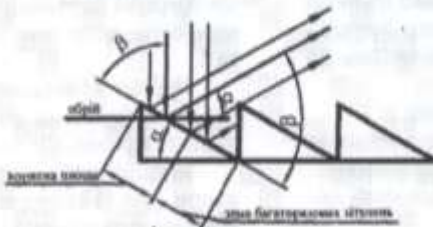
1. Спываковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. - М.: Машиностроение, 1972. 214с.
2. Баришев А.И., Стебляко В.Г., Хомичук В.А. Механизация ПРТС работ. Курсовое и дипломное проектирование транспортирующих машин: Учебное пособие / Под общей редакцией А.И. Барышева - Донецк: ДонГУЭТ, 2003 - 471с., ил. (прототип).
3. Фалько Л.Г., Коваленко А.В. Штучний режим вібропереміщення сипких подрібнених продуктів нагору по нахилам горизонтально коливних площин / Обладнання та технології харчових виробництв. Тематичний збірник наукових праць. Випуск 14, Донецьк 2006р.



Фіг.1



Фіг.2



Фіг.3

(11) **26133**(19) **UA**(51) МПК (2006)
B65G 27/00(21) Номер заявки: **u 2007 02634**(22) Дата подання заявки: **12.03.2007**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **10.09.2007**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **10.09.2007,
Бюл. № 14**

(72) Винахідники:

**Коваленко Артем
Володимирович (UA),
Фалько Олександр Леонідович
(UA),
Заплетніков Ігор Миколайович
(UA)**

(73) Власник:

**Донецький державний
університет економіки і торгівлі
ім. М.Туган-Барановського,
вул. Щорса, 31, м. Донецьк, 83050,
Україна, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОЇ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

(57) Формула корисної моделі:

Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини, що містить раму, деку і бункер, який відрізняється тим, що дека здійснює позовжні коливання у горизонтальній площині та складається із сходінок у формі прямокутних трикутників.

(11) 26133

AU (m)

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою
2 арк.
10.09.2007



Уповноважена особа

(підпис)

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 40740

**ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ
СИПКОЇ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ З ПІДВИЩЕНОЮ
ВОЛОГІСТЮ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.04.2009.**

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій





УКРАЇНА

(19) UA (11) 40740 (13) U
(51) МПК (2009)
B65G 27/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОЇ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ З ПІДВИЩЕНОЮ ВОЛОГІСТЮ

1

(21) u200813003

(22) 10.11.2008

(24) 27.04.2009

(46) 27.04.2009, Бюл. № 8, 2009 р.

(72) КОВАЛЕНКО АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA,
ФАЛЬКО ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ, UA, ЗАПЛЕ-
ТНІКОВ ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ, UA

(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-
БАРАНОВСЬКОГО, UA

2

(57) Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю, що складається з рами, електродинамічного вібратора, деки і бункера, який відрізняється тим, що дека, по якій транспортується продукт, складається із паралельних пластин, що розташовуються під кутом до горизонту, і здійснює подовжні коливання у горизонтальній площині.

Корисна модель відноситься до переробної галузі харчової промисловості, зокрема, до обладнання для транспортування сипкої харчової сировини. Це обладнання використовується для транспортування продуктів виробництва у межах своєї території і усередині цехів на сучасних виробництвах.

Аналог [1] складається з рами, бункера, деки, вібратора та електродвигуна.

Прототипом [2] корисної моделі є вібраційний конвеєр, який складається з рами, на якій встановлені електродинамічний вібратор і направляючі полозки для робочого органу. Східчаста дека жорстко з'єднана з якорем вібратора штоком та встановлена на чотирьох роликах, з осями яких жорстко зв'язана. Ролики знаходяться в пазах полозок, які обмежують рух роликів нагору і вниз забезпечуючи подовжні коливання робочого органу у горизонтальній площині.

Недоліками вібраційних транспортерів є:

- 1) складна конструкція транспортера вимагає постійного контролю і правильного настроювання;
- 2) необхідність неодноразового очищення робочого органу під час транспортування сипких вантажів з підвищеною вологістю.

В основу корисної моделі поставлена задача - створення вібраційного конвеєра для транспортування сипкої сировини з підвищеною вологістю, що має просту конструкцію, зручну в обслуговуванні і настроюванні, працює без контролю за чистотою робочого органу під час транспортування сипких вантажів з підвищеною вологістю.

Поставлена задача вирішується тим, що вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю складається з рами, електродинамічного вібратора і бункера, згідно корисної моделі, дека, по якій транспортується продукт складається із паралельних пластин, що розташовуються під кутом до обрію і здійснює подовжні коливання у горизонтальній площині.

Механізми, з коливаннями такого типу, мають велике розповсюдження в різних галузях промисловості, вони прості і зрозумілі, а саме головне, на будь-яких промислових харчових підприємствах є досвід роботи з такого роду механізмами.

Відповідно до корисної моделі, переміщення сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю здійснюється без залипання за рахунок зменшення площі поверхні контакту продукту із декою. Це забезпечується конструкцією деки, яка складається із паралельних пластин, що розташовуються під кутом до обрію. У відмінності від прототипу [2], де продукт переміщується по деці, поверхня якої складається із прямокутних трикутників.

На Фіг.1 зображено вібраційний конвеєр, на Фіг.2 - зображена дека, на Фіг.3 зображена схема відбиття зерен від сходинок деки.

Випробуваний зразок такого вібраційного конвеєра (Фіг.1) складається з рами (1), на якій встановлені електродинамічний вібратор (2) і направляючі полозки (3) для робочого органу (4). Гребінчаста дека (4) жорстко з'єднана з якорем вібратора (2) штоком (5) та встановлена на чоти-

(13) U

(11) 40740

(19) UA

рьох роликах (6), з осями яких жорстко зв'язана. Ролики (6) знаходяться в пазах полозків (3), які обмежують рух роликів нагору і вниз забезпечуючи подовжні коливання робочого органу у горизонтальній площині.

Дека (Fig.2) складається з рами (1), у якій сталеві пластини (2) встановлені у визначеному порядку під кутом до обрію, тобто робоча поверхня деки (4) при цьому являє собою гребінчасту поверхню. З обох боків деки встановлені обмежуючі бортики (7).

Машина працює таким чином: із завантажуючого бункера (8) зерна продукту потрапляють на робочу поверхню деки (4) та відбиваються нахиленою поверхнею сходинок у напрямку бункера (9) (Fig.3).

Фіксуються випадки коли зерна потрапляють на ребро пластин і тоді вони летять у напрямку, відповідно до руху робочого органу в момент зіткнення, однак якщо такий імпульс переміщення не погодиться з загальним напрямком руху зерен, то при одному з двох наступних зіткнень з робочим органом такі зерна змінять напрямок свого переміщення. Теоретичні підстави для можливості здійснення даного процесу вібропереміщення при горизонтальних прямолінійних синусоїдальних синхронних коливань полягають у тому фізичному законі, що кут падіння дорівнює куту відбиття. У нашому випадку, якщо кут нахилу поверхні дорівнює α , то як видно з рисунку 3, кут падіння на грань, що відбиває, і отже кут відбиття від грані,

можна прийняти β . Щодо обрію, у цьому випадку, тіло кинуте на поверхню відіб'ється під кутом α .

Геометричні параметри робочої поверхні деки експериментального зразка: $\alpha=30$ градусів до обрію, висота сходинок 15мм, довжина нахиленої грані сходинок 30мм, були обрані виходячи з практичного минулого досвіду [3] і геометричних розмірів зерен продукту, який досліджувався.

Розроблений вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю в порівнянні з прототипом [2] має наступні переваги:

1) не відбувається залипання деки під час транспортування сипкої сировини з підвищеною вологістю;

2) менша матеріалоемність;

3) більш висока продуктивність;

Список використаних джерел.

1. Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. - М.: Машиностроение, 1972. 214с.

2. Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини, №26133, Коваленко А.В., Фалько О.Л., Заплетніков І.М. Бюл. №14.10.2007р (прототип).

3. Фалько Л.Г., Коваленко А.В. Штучний режим вібропереміщення сипких подрібнених продуктів нагору по нахилам горизонтально коливних площин / Обладнання та технології харчових виробництв. Тематичний збірник наукових праць. Випуск 14, Донецьк 2006р.

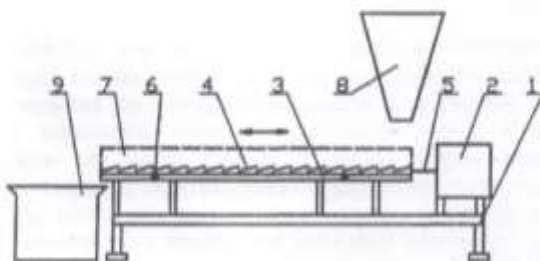


Fig.1



Fig.2

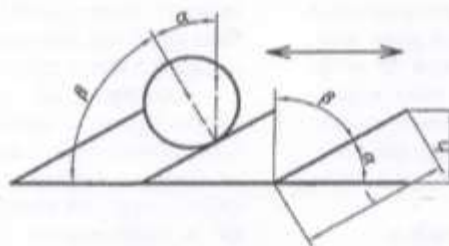


Fig.3

(11) **40740**(19) **UA**(51) МПК (2009)
B65G 27/00(21) Номер заявки: **u 2008 13003**(22) Дата подання заявки: **10.11.2008**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **27.04.2009**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **27.04.2009,
Бюл. № 8**(72) Винахідники:
**Коваленко Артем
Володимирович (UA),
Фалько Олександр
Леонідович (UA),
Заплетніков Ігор
Миколайович (UA)**(73) Власник:
**ДОНЕЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І
ТОРГІВЛІ ІМЕНІ МИХАЙЛА
ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО,
вул.Щорса, 31, м.Донецьк,
83050**

(54) Назва корисної моделі:

**ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОЇ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ З
ПІДВИЩЕНОЮ ВОЛОГІСТЮ**

(57) Формула корисної моделі:

Вібраційний конвеєр для транспортування сипкої харчової сировини з підвищеною вологістю, що складається з рами, електродинамічного вібратора, деки і бункера, який відрізняється тим, що дека, по якій транспортується продукт, складається із паралельних пластин, що розташовуються під кутом до горизонту, і здійснює подовжні коливання у горизонтальній площині.

(11) 40740

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою
2 арк.
27.04.2009



Уповноважена особа

(підпис)

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 40430

ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР-КЛАСИФІКАТОР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.04.2009.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій





УКРАЇНА

(19) UA (11) 40430 (13) U
(51) МПК (2009)
B07B 1/12

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР-КЛАСИФІКАТОР

1

(21) u200812452

(22) 23.10.2008

(24) 10.04.2009

(46) 10.04.2009, Бюл. № 7, 2009 р.

(72) КОВАЛЕНКО АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA,
ФАЛЬКО ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ, UA, ЗАПЛЕ-
ТНІКОВ ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ, UA

2

(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ ІМ. МИХАЙЛА ТУГАН-
БАРАНОВСЬКОГО, UA

(57) Вібраційний конвеєр-класифікатор, що містить
раму, деку, вібратор і бункер, який відрізняється
тим, що містить кілька дек, які розташовані одна
під одною та здійснюють подовжні коливання у
горизонтальній площині і складаються із нахиле-
них під гострим кутом до горизонту пластин.

Корисна модель відноситься до переробної галузі харчової промисловості, зокрема, до обладнання для транспортування чи класифікації сипкої харчової сировини. Це обладнання використовується для транспортування продуктів виробництва у межах своєї території і усередині цехів на сучасних виробництвах.

Аналог [1] складається з рами, бункера, деки, вібратора та електродвигуна.

Прототипом [2] корисні моделі є вібраційний конвеєр, який складається з рами, на якій установлені вібратор і направляючі полозки для робочого органу. Дека жорстко з'єднана штоком з вібратором та встановлена на чотирьох роликах, з осями яких жорстко зв'язана. Ролики знаходяться в пазах полозок, які обмежують рух роликів нагору і вниз забезпечуючи подовжні коливання робочого органу у горизонтальній площині.

Недоліками вібраційних транспортерів є:

1) складна конструкція транспортера вимагає постійного контролю і правильного налаштування;
2) необхідність контролю горизонтального положення робочого органу;

3) необхідність підтримання стабільності спрямованих коливань.

В основу корисної моделі поставлена задача - створення вібраційного конвеєра-класифікатора для транспортування сипкої сировини з підвищеною вологістю, що має просту конструкцію, зручну в обслуговуванні і налаштуванні, працює без контролю за чистотою робочого органу під час транспортування сипких вантажів з підвищеною вологістю.

Поставлена задача вирішується тим, що вібраційний конвеєр-класифікатор який містить ра-

му, вібратор, деку і бункер, згідно корисні моделі, містить кілька дек, які складаються із наборних пластин, що нахилені під гострим кутом до обрію і здійснює подовжні коливання у горизонтальній площині. Конвеєр спроектовано таким чином, що відстань між похилими пластинами деки зменшується на кожній наступній нижче розташованій. Фракції продукту, які проходять крізь першу деку потрапляють на нижчу, і так далі, пофракційно. Таким чином, відбувається транспортування сипкої сировини з заданими розмірами і контролюється рівень продукту, який знаходиться на кожній деці. Це перешкоджає процесу виникнення шарів продукту на робочій поверхні. Відсутність другого чи третього шару на робочій поверхні гарантує переміщення з максимальною швидкістю в один шар на кожній деці.

Механізми, з коливаннями такого типу, мають велике розповсюдження в різних галузях промисловості, вони прості і зрозумілі, а саме головне, на будь-яких промислових харчових підприємствах є досвід роботи з такого роду механізмами.

Відповідно до корисні моделі, переміщення сипкої сировини здійснюється за рахунок відбиття нахилених під кутом до обрію поверхнею пластин конструкції деки, у відмінності від прототипу [2], де продукт переміщується за рахунок спрямованих коливань деки, які здійснює робочий орган із гладкою поверхнею. Інтенсифікація процесу переміщення відбувається за рахунок того, що сипка харчова сировина, потрапляючи на верхню деку, розділяється на чотири фракції: 1) від 7 до 10, та більш міліметрів; 2) 4-7 мм; 3) 2-4 мм; 4) 1-2 мм. Кожна фракція транспортується по своїй деці, яка

(13) U

(11) 40430

(19) UA

має оптимальні розміри та забезпечує найшвидше транспортування.

На Фіг. 1 зображено вібраційний конвейєр-класифікатор, на Фіг. 2 зображена дека, на Фіг. 3 зображена схема відбиття зерен від сходинки деки, на Фіг. 4 зображена схема сил діючих на частку в момент знаходження її на коливній деці.

Випробуваний зразок такого вібраційного конвейєра-класифікатора (Фіг. 1) складається з рами (1), на якій встановлені електродинамічний вібратор (3) і направляючі полозки (10) для робочого органу (4). Наборна дека (4) жорстко з'єднана з якорем вібратора (3) штоком (2) та встановлена на чотирьох роликах (9), з осями яких жорстко зв'язана. Ролики (9) знаходяться в пазах полозок (10), які обмежують рух роликів нагору і вниз забезпечуючи подовжні коливання робочого органу у горизонтальній площині.

Дека (Фіг. 2) складається з рами (1), у якій пластини (2) встановлені у визначеному порядку. З обох боків деки встановлені обмежуючі бортики (6). Робоча поверхня деки (4) при цьому являє собою гребінчасту поверхню, яка утворюється за допомогою пластин зображених на Фіг. 2.

Машина працює таким чином: із завантажуючого бункера (5) зерна продукту потрапляють на робочу поверхню першої деки (4) та відбиваються нахилоною поверхнею гребінки у напрямку бункера (8). Якщо зерна продукту мають не оптимальні (менші) розміри, то вони просипаються на деку, яка розташовується нижче.

При проведенні експериментів фіксуються випадки коли зерна потрапляють на гострий кут виступаючої грані і тоді вони летять у напрямку, відповідно до руху робочого органу в момент зіткнення, однак якщо такий імпульс переміщення

не погодиться з загальним напрямком руху зерен, то при одному з двох наступних зіткнень з робочим органом такі зерна змінять напрямок свого переміщення.

Згідно результатів практичних експериментальних досліджень, маємо наступні стадії процесу вібропереміщення: 1) початкове положення між гранями сходинки; 2) переміщення ковзанням по похилій пластині сходинки; 3) початок польоту, відривши від похилої поверхні сходинки; 4) завершення польоту, приземлення в початкове положення.

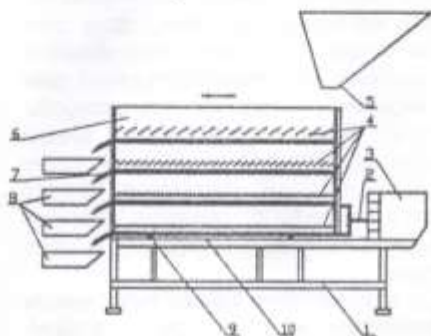
У зв'язку з малою відстанню польоту і досить великою щільністю вантажу, що транспортується, приймаємо допущення про те, що опір повітря не робить істотного впливу на процес польоту частки і у нашій випадку їм можна зневажити.

Розроблений вібраційний конвейєр в порівнянні з прототипом [2] має наступні переваги:

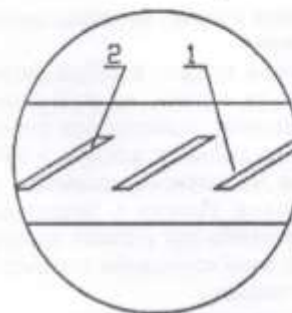
- 1) простота конструкції;
- 2) зручна для технічного обслуговування і ремонту;
- 3) більш висока теоретична продуктивність;
- 4) значно підвищився час роботи конвейєру до моменту залипання деки продуктом;

Список використаних джерел:

1. Сливаковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. - М.: Машиностроение, 1972. 214с.
2. Баришев А. И., Стеблянский В. Г., Хомичук В. А. Механизация ПРТС работ. Курсовое и дипломное проектирование транспортирующих машин: Учебное пособие/ Под общей редакцией А. И. Баришева - Донецк: ДонГУЭТ, 2003 - 471с, ил. (прототип).



Фіг. 1



Фіг. 2

(11) **40430**(19) **UA**(51) МПК (2009)
B07B 1/12(21) Номер заявки: **u 2008 12452**(22) Дата подання заявки: **23.10.2008**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **10.04.2009**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **10.04.2009,
Бюл. № 7**(72) Винахідники:
**Коваленко Артем
Володимирович (UA),
Фалько Олександр
Леонідович (UA),
Заплетніков Ігор
Миколайович (UA)**(73) Власник:
**ДОНЕЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І
ТОРГІВЛІ ІМ. МИХАЙЛА
ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО,
вул.Щорса,31, м.Донецьк,
83050, Україна**

(54) Назва корисної моделі:

ВІБРАЦІЙНИЙ КОНВЕЄР-КЛАСИФІКАТОР

(57) Формула корисної моделі:

Вібраційний конвеєр-класифікатор, що містить раму, деку, вібратор і бункер, який відрізняється тим, що містить кілька дек, які розташовані одна під одною та здійснюють подовжні коливання у горизонтальній площині і складаються із нахилених під гострим кутом до горизонту пластин.

(11) 40430

AU (m)

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою
2 арк.

10.04.2009



Уповноважена особа

(підпис)

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 96293

СПОСІБ ВІБРОПЕРЕМІЩЕННЯ СИПКИХ ХАРЧОВИХ МАС

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
25.10.2011.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Паладій





УКРАЇНА

(19) UA (11) 96293 (13) C2

(51) МПК

B65G 27/12 (2006.01)

B65G 27/32 (2006.01)

B06B 1/02 (2006.01)

B65G 27/18 (2006.01)

A01F 25/18 (2006.01)

A01F 25/20 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ВІБРОПЕРЕМІЩЕННЯ СИПКИХ ХАРЧОВИХ МАС

1

2

(21) а200813697

(22) 27.11.2008

(24) 25.10.2011

(46) 25.10.2011, Бюл.№ 20, 2011 р.

(72) ФАЛЬКО ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ, КОВАЛЕНКО АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ

(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ ІМ. МИХАЙЛА ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО

(56) UA 26133 U, 10.09.2007

JP 2007119171 A, 17.05.2007

SU 971737 A, 07.11.1982

SU 1794816 A1, 15.02.1993

Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры питатели и вспомогательные устройства. М., "Машиностроение", 1972, С.109-124

(57) Спосіб вібропереміщення сипких харчових мас під дією механічних коливань шляхом переміщення сипких мас по робочій поверхні, який **від-різняється** тим, що здійснюють механічні коли-

вання у горизонтальній площині за допомогою робочого органу, який складений з похило встановлених у прямокутному жолобі пластин прямокутної форми, які встановлені одна за одною під кутом до горизонту і жорстко зв'язані між собою по довжині за допомогою вертикально встановлених у жолобі прямокутних пластин-перемичок, при цьому частки продукту, що знаходяться між вертикальною перемичкою і нахиленою пластиною, спочатку рухаються разом з робочим органом, далі при русі робочого органу в напрямку кута між похилою пластиною і горизонтом частки продукту переміщують ковзанням по нахилений пластині робочого органу уверх, а після зміни напрямку руху робочого органу, під дією сили інерції забезпечують від-рив часток продукту від верхньої частини похилої поверхні і їх переліт через наступну похилу поверхню згідно з напрямком останнього коливного руху робочого органу, причому процес повторюють кожні два повних цикли коливань.

Винахід належить до харчової промисловості і може бути використаний на підприємствах харчових виробництв і масового харчування з метою транспортування, розвантаження та завантаження сипких харчових мас на виробничих площах підприємства. Наприклад, зернових мас різних сільськогосподарських культур.

На сьогодні вібропереміщення здійснюється на віброконвеєрах різного типу [1]. Головний недолік такого способу це перш за все - необхідність конструктивних вузлів для досягнення спрямованих коливань робочого органу, спрямовані коливання вимагають точного настроювання, рівної довжини ресор чи пружин, які повинні мати рівну жорсткість. При найменшому порушенні однієї з цих умов вібропереміщення припиняється чи уповільнюється. Продуктивність існуючого способу, на теперішній час інтенсивного виробництва, є відносно невисокою.

Найбільш близьким до цього винаходу по технічній суті, це спосіб, здійснюваний на вібраційному конвеєрі ВКМ-3 [2]. Де вібропереміщення відбувається за рахунок спрямованих під гострим кутом до горизонту коливань робочого органу, який має плоску неперфоровану поверхню. Спосіб вібропереміщення продукту відбувається стрибками по неперфорованій поверхні угору під кутом, який задається напрямком коливального процесу.

Недоліками такого способу є: використання більш складних і дорожчих спрямованих коливань і низька швидкість вібротранспортування.

В основу цього винаходу поставлена задача досягнення підвищення продуктивності вібротранспортування із застосуванням більш простих і дешевих горизонтальних коливань, за рахунок зміни конструкції робочої поверхні.

Поставлена задача досягається завдяки тому, що механічні коливання у горизонтальній площині,

(13) C2

(11) 96293

(19) UA

що виконує робочий орган, складений з похило встановлених у прямокутному жолобі пластин прямокутної форми, які встановлені одна за одною під кутом до горизонту і жорстко зв'язані між собою по довжині за допомогою вертикально встановлених у жолобі прямокутних пластин-перемичок, а частки продукту спочатку рухаються разом з робочим органом, знаходячись між вертикальною перемичкою і нахиленою пластиною, далі при русі робочого органу в напрямку кута між похилою пластиною і горизонтом частки продукту переміщуються ковзанням по нахиленій пластині робочого органу уверх, а після зміни напрямку руху робочого органу, частки продукту, під дією сили інерції, відриваються від верхньої частини похилої поверхні і відбувається переліт через наступну похилу поверхню згідно з напрямком останнього коливного руху робочого органу, причому процес повторюється кожні два повних циклу коливань.

Похила прямокутна поверхня у подовжньому розрізі робочого органу є гіпотенузою прямокутного трикутника, причому її гострий кут з горизонтом вказує напрямок переміщення часток сипкого продукту, на етапі польоту його часток над поверхнею робочого органу. Кут між похилою прямокутною поверхнею і горизонтальним катетом може бути від 20 до 45 градусів, згідно з теоретичними і практичними дослідженнями, причому спосіб має три основні етапи, перший - рух частки продукту разом з робочим органом між вертикальною і нахиленою пластинами, другий - ковзання частки продукту по нахиленій пластині, третій - політ частки продукту через наступну нахилу пластину.

Виходячи з послідовності фрагментів уповільненого перегляду швидкісного відеозапису (фіг. 1, 2, 3, 4), видно весь процес, який періодично повторюється за час двох повних періодів коливань робочого органу. Перший фрагмент, це знаходження частки продукту внизу похилої поверхні (фіг. 1). Другий фрагмент - це переміщення ковзанням по похилій поверхні уверх (фіг. 2), це відбувається за рахунок сили інерції коливного руху, спрямованого у даний момент часу вправо. Третій фрагмент (фіг. 3) - це початок польоту частинки, її відрив від похилої поверхні. Четвертий фрагмент (фіг. 4) - це завершення процесу польоту, приземлення частки у впадині іншої похилої поверхні.

Процес можна поділити на три основні етапи: 1) рух частки продукту разом з коливним робочим органом між вертикальною і нахиленою пластинами; 2) ковзання частки продукту по нахиленій пластині; 3) політ частки продукту.

У запропонованому способі вібропереміщення цілком залежне від співвідношень геометричних розмірів часток продукту і поверхонь, з якими він стикається, а також від кінематичних параметрів механічних коливань.

Для аналітичного розгляду всіх стадій процесу, приймемо пов'язану з декою систему координат XOY (фіг. 5), у якій будемо розглядати рух часток продукту масою m аналогічно роботі [3], приймаємо частку масою m за матеріальну точку,

на яку діє сила ваги, mg (g - прискорення вільного падіння), нормальна реакція N , сила інерції I , сила тертя $F_{\text{тр}}$, $V_{\text{пл}}$ - висота похилої пластини m , L - довжина похилої поверхні m .

У зв'язку з малою відстанню польоту й досить великою щільністю вантажу, що транспортується, приймаємо допущення про те, що опір повітря не робить істотного впливу на процес польоту частки і у нашому випадку ним можна знехтувати.

Складемо рівняння сил, що діють на частку по осях OX і OY:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cos \alpha \sin \omega t - F_{\text{тр}} - mg \sin \alpha \\ m\ddot{y} = N - mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \alpha \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

де A - амплітуда коливань робочого органу m , ω - циклічна частота коливань робочого органу s^{-1} , α - кут нахилу пластини, град., t - поточний час s .

Оскільки удар частки при зіткненні з поверхнею деки в достатньому ступені не пружний (власність поверхні матеріалу, з якого виконана дека і низька висота падіння), то приймемо допущення згідно з [3], що частка ковзає по поверхні уздовж осі OX без підскакування, тобто рух уздовж осі OY не відбувається, тобто можемо прийняти наступні умови: $y = 0$, $\dot{y} = 0$, $\ddot{y} = 0$. Тоді із другого рівняння системи (1) одержуємо значення N :

$$N = mg \cos \alpha + mA\omega^2 \sin \alpha \sin \omega t \quad (2)$$

Підставивши рівняння (2) у перше рівняння системи (1) і розділивши обидві його частини на m , одержимо диференціальне рівняння руху частки уздовж OX:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cos \alpha \sin \omega t - \mu(g \cos \alpha + A\omega^2 \sin \alpha \sin \omega t) - g \sin \alpha \quad (3)$$

де $\mu = \tan \rho$ - коефіцієнт тертя між часткою й похилою поверхнею, ρ - кут тертя ковзання (визначається експериментально).

Інтегруючи по dt диференціальне рівняння (3) одержимо закон зміни швидкості частки:

$$\dot{x} = A\omega(\cos \alpha \cos \omega t - \cos \alpha_0)(\mu \sin \alpha - \cos \alpha) - g(t - t_0)(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + x_0, \quad (4)$$

де t_0 - момент початку ковзання, який визначає фазовий кут початку ковзання $\varphi_0 = \omega t_0$, $\dot{x}_0$ - початкова швидкість ковзання.

Інтегруючи рівняння (4) одержимо закон руху частки уздовж OX на етапі ковзання:

$$x = A(\mu \sin \alpha - \cos \alpha)(\sin \omega t - \sin \omega t_0) + A\omega \cos \alpha_0(t - t_0)(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + g t_0(t - t_0)(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) - \frac{1}{2} g(t^2 - t_0^2)(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) + x_0(t - t_0) + x_0 \quad (5)$$

де x_0 - початкова координата на етапі ковзання.

На підставі вищевикладеного приймаємо, що спочатку етапу ковзання $x_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$ і на всьому етапі ковзання $y_0 = 0$, $\dot{y}_0 = 0$ до моменту відриву t_1 і початку польоту (від t_0 до t_1). Фазовий кут відриву:

$$\varphi_1 = \omega t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{\varphi_1}{\omega}$$

Для знаходження t_0 перше рівняння системи (1) дорівнюємо до нуля при $(t = t_0)$ і одержимо:

$$\varphi_0 = \omega t_0 = \arcsin \left[\frac{\mu g \cos \alpha + g \sin \alpha}{\Lambda \omega^2 \cos \alpha - \mu \Lambda \omega^2 \sin \alpha} \right] = \arcsin \left[\frac{g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{\Lambda \omega^2 (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)} \right] \quad (6)$$

Для визначення t_1 складемо рівняння сил, по осі ОУ, діючих на частку, у момент коли робочий орган рухається від середнього до крайнього лівого положення при $N = 0$ (момент відриву).

$$m \Lambda \omega^2 \sin \alpha \sin \omega t_1 - mg \cos \alpha = 0 \quad (7)$$

звідки:

$$\varphi_1 = \omega t_1 = \arcsin \left[\frac{g}{\Lambda \omega^2} \operatorname{ctg} \alpha \right] \quad (8)$$

Тут $\varphi_1 < 0$, що вказує на рух деки від середнього положення вліво, протилежно обраному позитивному фазовому куту, що відповідає руху деки вправо.

Визначивши t_0 з виразу (6) і t_1 з виразу (8), підставивши ці значення в рівняння (5) при $(t=t_1)$, визначимо переміщення x_1 уздовж осі ОХ за етап ковзання. Це ж значення переміщення уздовж горизонту буде дорівнювати $x_1 \cos \alpha$, якщо це значення позитивно, то вібропереміщення частки відбувається вправо, якщо негативно - вліво, згідно з фіг. 5.

Необхідно визначити переміщення за етап польоту x_2 і переміщення за етап ковзання x_1 . Визначивши x_2 і x_1 ми зможемо визначити середню швидкість вібропереміщення частки.

Момент падіння t_2 визначається фазовим кутом $\varphi_2 = \omega t_2$ і залежить від початкової швидкості польоту $\dot{x}_1$ в момент відриву t_1 .

Так, як вібропереміщення (як і коливання робочого органа) здійснюється уздовж горизонту, то етап польоту доцільно розглядати в системі координат НОУ з вертикальною й горизонтальною віссю, повернутими на кут α відносно системи ХОУ (фіг. 6).

З моменту t_1 політ вібротранспортуючого тіла уздовж осі ОХ здійснюється з початковою швидкістю $\dot{x}_1$, яку можна визначити з виразу (4), підставивши туди значення t_0 з виразу (6) і t_1 з виразу (8) у момент, коли $t=t_1$.

Розглядаючи схему на фіг. 6, можемо записати в проекції на вісь ОН, початкову швидкість польоту:

$$\dot{N}_1 = \dot{x}_1 \cos \alpha. \quad (9)$$

У нерухливій системі координат $\xi O_1 \eta$ фіг. 6 рух частки буде описано з урахуванням горизонтальної швидкості похилої пластини в момент початку польоту:

$$\dot{\xi} = \dot{N}_1 + \Lambda \omega \cos \omega t_1. \quad (10)$$

Швидкість у польоті уздовж осі ОУ можна описати як:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 - g t_n = \dot{x}_1 \sin \alpha - g t_n. \quad (11)$$

Де $\dot{V}_1$ - початкова швидкість польоту, t_n - поточний час польоту, час співвіднесений з початком

коливального процесу $t = t_1 + t_n \Rightarrow t_n = t - t_1$. Повний час польоту $t_n^{\max} = t_2 - t_1$.

Щодо нерухливої осі $O_1 \eta$ можемо записати:

$$\dot{\eta} = \dot{V}_1 = \dot{x}_1 \sin \alpha - g t_n. \quad (12)$$

Дорівнявши вираз (12) до нуля, визначимо момент часу досягнення максимальної висоти $t_n = t_n^{\max}$ по осі ОУ. Тоді:

$$t_n^{\max} = \frac{\dot{x}_1 \sin \alpha}{g}. \quad (13)$$

Найбільша висота, щодо положення похилої пластини ступеня у момент t_i відповідно визначиться як:

$$V_{\max} = \dot{V}_1 t_n^{\max} - \frac{g (t_n^{\max})^2}{2} = \dot{x}_1 \sin \alpha t_n^{\max} - \frac{g (t_n^{\max})^2}{2}. \quad (14)$$

$V_{\max}$ - повинна значно перевищувати висоту верхньої точки похилої пластини деки $V_{\text{пл}}$, для того, щоб частка перескакувала на наступну похилу пластину, з урахуванням того, що положення верхньої точки похилої поверхні змінюється уздовж горизонту за законом $A \sin \omega t$.

Знаходження моменту падіння t_2 є складним завданням, тому що форма коливної поверхні специфічна.

Однак для знаходження середньої швидкості вібропереміщення, у даному випадку, немає необхідності визначати t_2 , важливо щоб повний час польоту гарантував необхідну висоту й довжину польоту. Виходить, умови вібропереміщення мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} V_{\max} > V_{\text{пл}} = L \operatorname{tg} \alpha \\ H_{\max} > L \end{cases} \quad (15)$$

Де $V_{\text{пл}}$ - висота похилої пластини робочого органу m , L - довжина проекції похилої пластини m (фіг. 5).

Якщо зробити припущення, що при виконанні умови (15) транспортується матеріал, що буде перескакувати через похилу пластину, через один період коливань, причому кожний другий період коливань буде необхідний для того, щоб після моменту t_2 падіння на наступну похилу пластину частка займала вихідну позицію (фіг. 5) до початку третього періоду коливань (при перегляді вповільненого відеозапису спостерігався такий режим), то середня швидкість вібропереміщення складе:

$$\bar{V} = \frac{L}{2T} = \frac{L \omega}{2\pi}. \quad (16)$$

Де T - час періоду коливань.

Приклад конкретного виконання. Експериментальні випробування діючої моделі для вібропереміщення, де механічні коливання у горизонтальній площині виконує робочий орган. Він складений з похило встановлених у прямокутному жолобі пластин прямокутної форми, які встановлені одна за одною під кутом до горизонту і жорстко зв'язані між собою по довжині за допомогою вертикально встановлених у жолобі прямокутних пластин-

перемичок. Продукт подається зверху на робочий орган і спочатку рухається разом з робочим органом, знаходячись між вертикальною перемичкою і нахиленою пластиною, далі при русі робочого органу в напрямку кута між похилою пластиною і горизонтом, частки продукту переміщуються ковзанням по нахиленій пластині робочого органу у верх, а після зміни напрямку руху робочого органу, частки продукту, під дією сили інерції, відриваються від верхньої частини похилої поверхні і відбувається переліт через наступну похилу поверхню згідно напрямку останнього коливного руху робочого органу. Процес переміщення повторюється кожні два повних цикли коливань робочого органу. Для зернових культур, цей спосіб дозволяє переміщувати зерна квасолі з швидкістю 0,467 м/с при амплітуді 6 мм і частоті коливань робочого органу 25 Гц, насіння ячменя з швидкістю 0,525 м/с при амплітуді 5 мм і частоті коливань робочого органу 25 Гц, крупи гречки з швидкістю 0,494 м/с при амплітуді 5 мм і частоті коливань робочого органу 25 Гц. Геометричні параметри робочої поверхні деки: $\alpha = 30$ градусів до горизонту $a = 25,98$ мм - довжина похилої пластини, $b = 15$ мм - вертикальна грань, були вибрані, виходячи з розрахункових даних. Експериментально підтверджена можливість вібропереміщення зернових культур з кутом нахилу похилої поверхні $\alpha = 20 \div 45$ градусів до горизонту.

Висновки: 1) На підставі практичних експериментів теоретично обґрунтовані конструкція й фі-

зичні принципи процесу вібропереміщення сипких харчових мас на робочому органі з похилих прямокутних пластин при поздовжніх коливаннях робочого органу в горизонтальній площині. Визначені чотири основні стадії процесу.

2) Для сипких мас певного фракційного складу проведені базові аналітичні дослідження процесу на етапах польоту й ковзання. Визначено необхідні фазові кути й граничні умови протікання існуючого процесу.

3) Аналітично визначена середня швидкість вібропереміщення сипких харчових продуктів певного фракційного складу розглянутим способом.

4) Враховуючи формулу (16), можна стверджувати, що швидкість вібропереміщення часток продукту буде більша в порівнянні з будь-яким відомим вібротранспортером в декілька разів, а це означає, що теоретична продуктивність запропонованого транспортера також в двічі більша.

Список використаних джерел.

1. Потураев, В.Н. Вибрационные транспортирующие машины [Текст]: Основы теории и расчета / В.Н. Потураев В.П. Франчук, А.Г. Червоненко; изд. -М.: Машиностроение, 1964. -272 с.

2. Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры питатели и вспомогательные устройства. М., Машиностроение, 1972, с. 109-124, [прототип]

3. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. - М.: Наука, 1964. - 412с.



Fig. 1

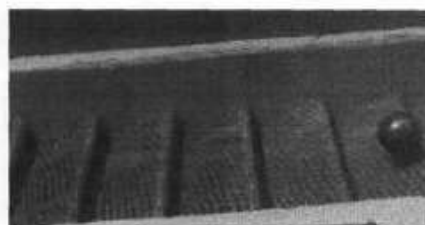


Fig. 2

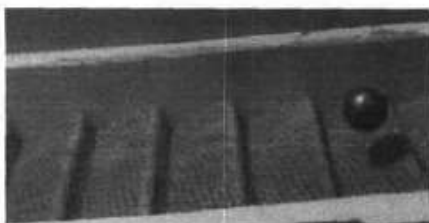
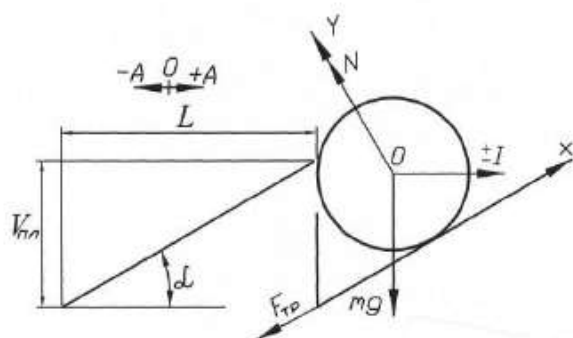


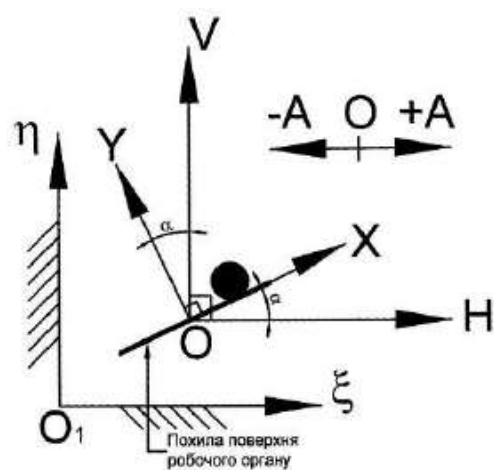
Fig. 3



Fig. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

ПРИЛОЖЕНИЕ В

СОГЛАСОВАНО

Ректор (проректор) ДонГУЭТ

А.А. Садеков

«14» февраля 2007г.

М.П.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель организации

С.В. Супрунов

«14» февраля 2007г.

М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в высших учебных заведениях

Заказчик

Директор С.В. Супрунов

наименование организации

Ф.И.О. руководителя организации

настоящим актом подтверждается, что результаты работы по НИР Д2002-4 «Интенсификация рабочих процессов и улучшение эксплуатационных характеристик оборудования пищевых производств и общественного питания»

наименование темы, № гос. регистрации

выполненной
стоимость

Донецким государственным университетом экономики и торговли

Нет

тыс. грн.

выполняемой

цифрами и прописью

2001-2006гг.

сроки выполнения

внедрены

ПТК «ШАХТЕР» в «Крупяном» цеху

наименование предприятия, где осуществлялось внедрение

1. Вид внедренных результатов

Запуск в эксплуатацию крупноочистителя универсального, для очистки
эксплуатация изделий, работы, технологии

круп от примесей

производство изделий работы, технологии, функционирование (систем)

2. Характеристика масштаба внедрения

единичное

уникальное, единичное, партии, массовое, серийное

3. Форма внедрения

Практическая эксплуатация универсальной крупноочистительной машины

Методика (метод)

Разработка конструкторской документации, монтаж оборудования

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ

Модернизация процесса очистки круп

на универсальной крупноочистительной машине.

пионерские, принципиально новое, качественно новые, модификации,

модернизации старых разработок

5. Опытно-промышленная проверка

Акт испытаний №14 от 05.02.2007г.

указать номер и дату актов испытания,

ПТК «ШАХТЕР» Производственно-торговый комплекс, февраль 2007г.

6. Внедрены:

наименование предприятия, период

- в промышленное производство

Универсальной крупноочистительной машины в цех «Крупяной»

- в проектные работы

участок, цех, процесс

7. Годовой экономический эффект

-ожидаемый

61,210

тыс. грн.

от внедрения в проект

-фактический

78,560 тыс. грн. (семьдесят восемь тыс. пятьсот шестьдесят грн.)

тыс. грн.

в том числе долевое участие

ДонГУЭТ – 80% – 48,968 тыс. грн. (сорок во-

тыс. грн.

семь тыс. девятьсот шестьдесят восемь грн.); ПТК «ШАХТЕР» – 20% – 12,242 тыс. грн. (двенадцать тыс. двести сорок две грн.)

%, цифрами и прописью

8. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов

6121,0

грн.

9. Объем внедрения

1 машина

что составляет

% от объема внедрения, положенного в основу

расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

(Эгар.= тыс грн.)

10. Социальный и научно-технический эффект

Увеличение производительности расфасовочных ро-

бот по крупам, высвобождение рабочих мест обслуживающего персонала, экономия производственных площадей.

охрана окружающей среды, недр, улучшение и оздоровление условий труда, совершенствование структуры управления и т.д.

От ДонГУЭТ

Нач. НИСа

Романько Т.Н.

Руководитель НИР

Заплетников И.Н.

Отв. исполнитель

Коваленко А.В.

От предприятия

Нач. планового отдела

Гл. бухгалтер

Ответственный за внедрение

Котелков К.Л.

Сахно Г.В.

Ерко А.М.

СОГЛАСОВАНО

Ректор (проректор) ДонНУЭТ

А.А. Садеков

«21» января 2009г.

М.П.



УТВЕРЖДАЮ

Директор (проректор) ДонНУЭТ

М.Г. Стоцкий

«21» января 2009г.

М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в высших учебных заведениях

Днепропетровский пивоваренный завод «ДНЕПР»

наименование организации

Заказчик Директор М.Г. Стоцкий

Ф.И.О. руководителя организации

настоящим актом подтверждается, что результаты работы по НИР хозяйственная тема №376/2008

«Разработка проекта вибрационного конвейера для транспортировки сыпучих и иных грузов»

наименование темы, № гос. регистрации

Донецким национальным университетом экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского

стоимость Нет тыс. грн.

цифрами и прописью

выполняемой 2008 г.

сроки выполнения

внедрены Днепропетровский пивоваренный завод «ДНЕПР» на производственном участке

наименование предприятия, где осуществлялось внедрение

1. Вид внедренных результатов Запуск в эксплуатацию вибрационного конвейера-сепаратора для
отделения зерна от ростков

эксплуатация изделий, работы, технологии

от ростков (после процесса проращивания).

производство изделий работы, технологии, функционирование (систем)

2. Характеристика масштаба внедрения единичное

уникальное, единичное, партии, массовое, серийное

3. Форма внедрения Практическая эксплуатация вибрационного конвейера-сепаратора

Методика (метод)

Разработка конструкторской документации, монтаж оборудования

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ Модификация нового вида вибрационного
конвейера-сепаратора для отделения зерна от ростков.

пионерские, принципиально новое, качественно новые, модификации,

модернизации старых разработок

5. Опытно-промышленная проверка Акт испытаний №2 от 14.01.2009г.

указать номер и дату актов испытаний,

Днепропетровский пивоваренный завод «ДНЕПР», январь 2009г.

6. Внедрены: наименование предприятия, период

- в промышленное производство Вибрационного конвейера-сепаратора на производственном участке

- в проектные работы участок, цех, процесс

7. Годовой экономический эффект

-ожидаемый 234,940 тыс. грн.

от внедрения в проект

-фактический 234,940 тыс. грн. (двести тридцать четыре тыс. девятьсот сорок грн.) тыс. грн.

в том числе долевое участие ДонНУЭТ – 80% – 187,952 тыс. грн. (сто тыс. грн.

восемьдесят семь тыс. девятьсот пятьдесят две грн.); Днепропетровский пивоваренный завод «ДНЕПР» –

20% - 46,988 тыс. грн. (сорок шесть тыс. девятьсот восемьдесят восемь грн.)

%, цифрами и прописью

8. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов 46988 грн.

9. Объем внедрения 2 машины

что составляет % от объема внедрения, положенного в основу

расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

(Эгар.= тыс грн.)

10. Социальный и научно-технический эффект Увеличение производительности по очистке зерна

пшеницы от ростков, экономия электроэнергии, высвобождение производственных площадей и рабочих

мест обслуживающего персонала.

охрана окружающей среды, недр, улучшение и оздоровление условий труда, совершенствование структуры управления и т.д.

От ДонНУЭТ

Нач. НИСА

Руководитель НИР

Отв. исполнитель

Романько Т.Н.

Фалько А.Л.

Коваленко А.В.

От предприятия

Нач. планового отдела

Гл. бухгалтер

Ответственный за внедрение

Утверждаю
 Директор ООО «ПК «Млин»
 _____ В.Х. Юрьев
 «06» _____ мая 2009 г.



ПРОТОКОЛ

предварительных испытаний опытного образца вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов.

Комиссия в составе: председателя Пасичнюка Н.Т. – главного инженера ООО «ПК «Млин».

Самсонова Э.Г. – главного технолога ООО «ПК «Млин».

Царана А.А. – механика ООО «ПК «Млин».

Якимовой Н.А. – главного бухгалтера ООО «ПК «Млин».

Коваленко А.В. – аспиранта ДонНУЭТ,

провела предварительные испытания опытного образца вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов на ступенчатых поверхностях дек в соответствии с программой и методикой испытаний, разработанной в ДонНУЭТ.

Цель испытаний. Проверка работоспособности опытного образца вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов, в основу которого положены патент Украины №40430 и научные разработки аспиранта Коваленко А.В.

Условия испытаний.

Исходный материал – продукты размола зерна пшеницы после размольных систем.

Технологический процесс - деление на три фракции: сорные примеси, крупа и дробленые частицы с мукой, согласно производственным требованиям.

Вибратор конвейера-классификатора:

Напряжение, В – 220.

Мощность электродвигателя, кВт – 0,75.

Количество рабочих органов (дек), шт – 2.

Количество ступеней верхней деки, шт – 160.

Количество ступеней нижней деки, шт – 205.

Ведение процесса. Процесс классификации осуществляется непрерывно. Исходный продукт загружается в верхнюю часть – бункер, под действием гравитационных сил попадает на верхнюю ступенчатую деку. В процессе

виброперемещения сыпучей смеси крупа и дробленые частицы с мукой просыпаются на нижнюю деку, а сорные примеси сходят в сборник. На второй деке аналогичным образом происходит разделение крупы и муки. В результате с двух, установленных одна под другой, ступенчатых дек получается три фракции (сорные примеси, крупа и дробленые частицы с мукой).

Результаты измерений и лабораторных анализов.

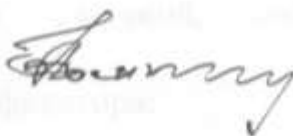
Характеристики опытного образца:

Производительность, т/час	1,7
Количество получаемых фракций, шт	3
Габариты, мм	470x850x1780
Вес, кг	62,4
Параметры линейных колебаний:	
Амплитуда колебаний дек, м	$5 \cdot 10^{-3}$
Частота колебаний дек, Гц	17
Контроль полученного продукта:	
Количество примесей с иных фракций в проверяемой, %	не более 1,5

Результаты испытаний. Получен продукт – крупа и мука. Весь материал соответствует предъявляемым к нему техническим и гигиеническим требованиям после классификации. Измерение влажности материала в пределах от 13,9 до 14,2 % не оказывает заметного влияния на удельную производительность и технологическую эффективность процесса.

Вывод. Опытный образец вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов, в основу которого положено патент Украины №40430 и научные разработки аспиранта Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского Коваленко А.В., рекомендуется к внедрению на предприятиях пищевой промышленности в цехах по переработке сыпучих пищевых продуктов.

Председатель комиссии:



Н.Т.Пасичнюк

Члены комиссии:



Э.Г. Самсонова

А.А. Царан

Н.А. Якимова

А.В. Коваленко



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в высших учебных заведениях

ООО «ПК «Млин»

Директор В.Х. Юрьев

наименование организации

Ф.И.О. руководителя организации

указанным актом подтверждается, что результаты работы по НИР Д2009-3 «Научно-технические исследования усовершенствования конструкции оборудования пищевых производств с целью улучшения их эксплуатационных характеристик», №0108U011130

наименование темы, № гос. регистрации

выполненной **Донецким национальным университетом экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского**

стоимость **Нет** тыс. грн.

выполняемой **01.01.2009-31.12.2010 г.г.**

внедрены **ООО «ПК «Млин» на в мельничном цеху**

наименование предприятия, где осуществлялось внедрение

1. Вид внедренных результатов **Запуск в эксплуатацию вибрационного конвейера-классификатора**
эксплуатация изделий, работы, технологии

от ростков (после процесса проращивания), производство изделий работы, технологии, функционирование (систем)

2. Характеристика масштаба внедрения **единичное**

уникальное, единичное, партии, массовое, серийное

3. Форма внедрения **Практическая эксплуатация вибрационного конвейера-классификатора**

Методика (метод) **Разработка конструкторской документации, монтаж оборудования**

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ **Модификация нового вида вибрационного конвейера-классификатора непрерывного действия со ступенчатыми рабочими органами для сортировки исходного продукта на сорные примеси, крупу и дробленые частицы с мукой.**

пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификации,

модернизации старых разработок

5. Опытно-промышленная проверка **Акт испытаний № 3 от 06.05.2009.**

указать номер и дату актов испытания,

ООО «ПК «Млин», май 2009г.

6. Внедрены: **наименование предприятия, период**

- в промышленное производство **Вибрационного конвейера-классификатора в мельничном цеху**

- в проектные работы **участок, цех, процесс**

7. Годовой экономический эффект

-ожидаемый **137,430** тыс. грн.

от внедрения в проект

-фактический **137,430 тыс.грн. (сто тридцать семь тыс. четыреста тридцать грн.)** тыс. грн.

в том числе долевое участие **ДонНУЭТ – 80% – 109,944 тыс. грн. (сто** тыс. грн.

десять тыс. девятьсот сорок четыре грн.); ООО «ПК «Млин» – 20% - 27,486 тыс. грн. (двадцать сем тыс. четыреста семьдесят шесть грн.)

%, цифрами и прописью

8. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов **27486** грн.

9. Объем внедрения **2 машины**

что составляет **% от объема внедрения, положенного в основу**

расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

(Эгар.= тыс грн.)

10. Социальный и научно-технический эффект **Увеличение производительности линии классификации продуктов размола зерна, экономия электроэнергии, высвобождение производственных площадей и рабочих мест обслуживающего персонала.**

охрана окружающей среды, недр, улучшение и оздоровление условий труда, совершенствование структуры управления и т.д.

От ДонНУЭТ

Нач. НИСа **Романько Т.Н.**

Руководитель НИР **Заплетников И.Н.**

Отв. исполнитель **Коваленко А.В.**

От предприятия

Гл. инженер

Гл. бухгалтер

Ответственный за внедрение

Пасичнюк Н.Т.

Якимова Н.А.

Царан А.А.

Утверждаю

Директор ООО «ПК «Млин»

В. Х. Юрьев

«06»



2009 г.

АКТ

О внедрении опытного образца вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов.

Комиссия в составе: председателя Пасичнюка Н.Т. – главного инженера ООО «ПК «Млин»

Самсонова Э.Г. – главного технолога ООО «ПК «Млин»

Царана А.А. – механика ООО «ПК «Млин»

Якимовой Н.А. – главного бухгалтера ООО «ПК «Млин»

Коваленко А.В. – аспиранта ДонНУЭТ,

составила настоящий акт в том, что опытный образец вибрационного конвейера-классификатора для транспортировки и классификации сыпучих продуктов на ступенчатых поверхностях дек, в основу которого положены научные разработки аспиранта Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского Коваленко А.В. (в том числе и патент Украины №40430), установлен и испытан в производственных условиях мельничного цеха ООО «ПК «Млин». Получены положительные результаты, на основании которых подсчитан ориентировочный экономический эффект от замены крупосортировочной машины А1-БКГ-1 при сортировке исходного продукта на сорные примеси, крупу и дробленые частицы с мукой на разработанный вибрационный конвейер-классификатор в размере 137,43 тыс.грн. в год.

Председатель комиссии:

Н.Т.Пасичнюк

Члены комиссии:

Э.Г. Самсонова

А.А. Царан

Н.А. Якимова

А.В. Коваленко

СОГЛАСОВАНО

Ректор (проректор) ДонГУЭТ

А.А. Садеков

«30» января 2007г.

М.П.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель организации

С.В. Супрунов

«30» января 2007г.

М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в высших учебных заведениях

ПТК «ШАХТЕР»

Заказчик

Директор С.В. Супрунов

наименование организации

Ф.И.О. руководителя организации

настоящим актом подтверждается, что результаты работы по НИР Д2002-4 «Интенсификация рабочих процессов и улучшение эксплуатационных характеристик оборудования пищевых производств и общественного питания»

наименование темы, № гос. регистрации

выполненной

Донецким государственным университетом экономики и торговли

стоимость

Нет

тыс. грн.

выполняемой

цифрами и прописью

2001-2006гг.

внедрены

сроки выполнения

ПТК «ШАХТЕР» в «Крупяном» цеху

наименование предприятия, где осуществлялось внедрение

1. Вид внедренных результатов Запуск в эксплуатацию вибрационного сепаратора для отделения гречи-
хи от шелухи (после процесса шелушения).

производство изделий работы, технологии, функционирование (систем)

2. Характеристика масштаба внедрения

единичное

уникальное, единичное, партии, массовое, серийное

3. Форма внедрения

Практическая эксплуатация вибрационного сепаратора для очистки гречихи

Методика (метод)

Разработка конструкторской документации, монтаж оборудования

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ

Модификация нового вида вибрационного

сепаратора для очистки гречневой крупы от шелухи.

пионерские, принципиально новое, качественно новые, модификации,

модернизации старых разработок

5. Опытно-промышленная проверка

Акт испытаний №13 от 12.02.2007 г.

указать номер и дату актов испытания,

ПТК «ШАХТЕР» Производственно-торговый комплекс, январь 2007г.

6. Внедрены:

наименование предприятия, период

- в промышленное производство

Вибрационного сепаратора в цех «Крупяной» участок №3

- в проектные работы

участок, цех, процесс

7. Годовой экономический эффект

-ожидаемый

114,880

тыс. грн.

от внедрения в проект

-фактический

78,560 тыс. грн. (семьдесят восемь тыс. пятьсот шестьдесят грн.)

тыс. грн.

в том числе долевое участие

ДонГУЭТ – 80% – 91,904 тыс. грн. (девятьсот

тыс. грн.

одна тыс. девятьсот четыре грн.); ПТК «ШАХТЕР» – 20% – 22,976 тыс. грн. (двадцать две тыс. девятьсот семьдесят шесть грн.)

%, цифрами и прописью

8. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов

1148,80

грн.

9. Объем внедрения

1 машина

что составляет

% от объема внедрения, положенного в основу

расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

(Эгар.= тыс грн.)

10. Социальный и научно-технический эффект

Увеличение производительности линии по расфосовке

гречихи, экономия электроэнергии, высвобождение производственных площадей и рабочих мест обслуживающего персонала.

охрана окружающей среды, недр, улучшение и оздоровление условий труда, совершенствование структуры управления и т.д.

От ДонГУЭТ

Нач. НИСа

Руководитель НИР

Отв. исполнитель

Романько Т.Н.

Заплетников И.Н.

Коваленко А.В.

От предприятия

Нач. планового отдела

Гл. бухгалтер

Ответственный за внедрение

Котелков К.Л.

Сахно Г.В.

Рыжов П.К.

СПРАВКА о ВНЕДРЕНИИ в УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС



**Министерство образования и науки
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»**

ул. Щорса 31, г. Донецк, 283050 Тел.: 342-90-40 Факс: (062)304-83-16 Эл. почта: info@donnuet.education

25.02.2020 № 08.14/265 Диссертационный совет Д 01.025.02 на
на № _____ от _____ базе ГО ВПО «Донецкий национальный
Г _____ университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Коваленко А.В. на тему «Процесс вибротранспортирования зерновых масс и
предложения по его технической реализации», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 –
Процессы и аппараты пищевых производств

Результаты исследований, которые представлены в диссертационной работе Коваленко А.В. «Процесс вибротранспортирования зерновых масс и предложения по его технической реализации», используются в учебном процессе при изложении дисциплин «Механизация ПРТС работ в отрасли», «Процессы и аппараты пищевых производств», а также «Технологическое оборудование пищевых производств в отрасли» для студентов технических специальностей.

Использование в учебном процессе результатов диссертационной работы Коваленко А.В. является целесообразным для повышения уровня подготовки студентов в направлении более углубленного овладения материала по вибротранспортированию сыпучих продуктов.

Первый проректор,
д.э.н., профессор

Л.А. Омелянович