

---

*На правах рукописи*

**Варламов Александр Васильевич**



**ДИНАМИКА МЕХАНИЗМОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ  
СВОДОБРАЗОВАНИЙ В БУНКЕРАХ ХРАНЕНИЯ И ВЫПУСКА  
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора  
технических наук

---

Орел – 2012

---

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет путей сообщения» и ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Мулюкин Олег Петрович**

Официальные оппоненты: **Белоусов Анатолий Иванович**  
доктор технических наук, профессор СГАУ

**Ешуткин Дмитрий Инкинович**  
доктор технических наук, профессор,  
зав.кафедрой Госуниверситета - УНПК

**Желтков Владимир Иванович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор ТулГУ

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Самарский государственный  
технический университет»

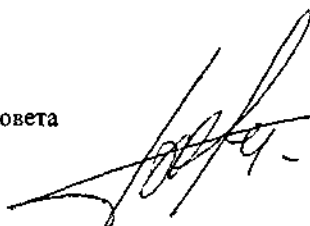
Защита состоится «25» мая 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.182.03 при ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на сайте ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации: <http://vak.ed.gov.ru>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Автореферат разослан «14» апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



М.И. Борзенков

2012A  
10541

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ежегодная переработка грузов в виде сыпучих материалов (СМ), временно хранящихся в бункерных устройствах различного назначения на промышленных предприятиях, в строительстве, в агропромышленном комплексе, в порошковой металлургии и в других отечественных отраслях, исчисляется 70...100 миллиардами тонн. Превалирующей причиной нарушения бесперебойного выпуска СМ из бункерных устройств в транспортировочные емкости мобильных транспортных средств является возникновение в бункерах сводов СМ, для устранения которых используется широкий спектр различных по физической природе сводообрушающих механизмов (механические, вибрационного действия, аэрирующие устройства и др.).

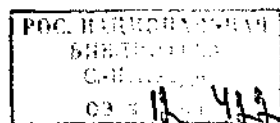
Из анализа текущего состояния и направлений совершенствования способов и механизмов предотвращения и устранения сводообразований СМ следует, что до настоящего времени:

- недостаточно полно с энергетической точки зрения исследованы и систематизированы закономерности динамики образования и разрушения сводов СМ в бункерах, что негативно сказывается на точности динамических расчетов и, соответственно, качестве проектирования сводообрушающих механизмов под заданные эксплуатационные требования;

- не разработана математическая модель динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», позволяющая проведение количественной оценки влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и физико-механических свойств СМ на процесс и параметры сводообразования в бункере для рационального назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации потребных энергозатрат на устранение сводов СМ;

- отсутствуют иерархически выстроенные классификационные схемы способов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерах и разнообразных по конструктивному исполнению сводообрушающих механизмов различной физической природы, ориентированных на повышение динамического качества сводообрушающих механизмов, снижение энергозатрат на их эксплуатацию и повышение функциональной надежности таких механизмов в реальном спектре механических и климатических нагрузок, воздействующих на бункерные устройства с СМ в эксплуатации.

Актуальность темы обусловлена ее нацеленностью на устранение вышеохарактеризованных недостатков в расчете динамики и оценке качества проектирования сводообрушающих механизмов бункерных устройств, а также ее



---

выполнением в рамках разделов «Энергосбережение», «Разработки по повышению эффективности терминально-складской деятельности» и «Транспортная техника и технологии с использованием новых технических решений» программы «Основные направления научных исследований СамГУПС на 2009-2013 гг.» и в соответствии с координационным планом федеральной «Программы энергосбережения на железнодорожном транспорте в 1998-2000, 2005 годах (Постановление Правительства Российской Федерации № 262 пр у от 04.07.1998 г.).

Работа выполнена в проблемной НИЛ СамГУПС «Динамическая прочность и виброзащита транспортных систем» в рамках договоров № 1-06 на 2006-2010 гг. и № 20-10 на 2011-2015 гг. «О научно-техническом и педагогическом сотрудничестве федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК») и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГУПС)».

**Цель работы** - создание научных основ и инструментальных средств проектирования высокоэффективных механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерных устройствах и разработка практических рекомендаций по их использованию на базе научно обоснованного выбора величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации потребных энергозатрат на устранение сводов СМ фиксированной массы с конкретными геометрическими и динамическими параметрами.

**Задачи исследования:**

1. Проведение критического анализа результатов известных научных исследований по выявлению приоритетных направлений повышения динамического качества и функциональной надежности разнотипных по физической природе и конструктивно-технологическому исполнению способов и механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерах их хранения и выпуска в транспортировочные емкости мобильных транспортных средств (железнодорожный, автомобильный, речной и морской транспорт).

2. Разработка математической модели динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», повышающей достоверность исследования физических процессов сводообразования СМ и точность расчета динамических параметров комплекса путем учета влияния параметров сводообразования СМ и сопутствующей последнему силы схватывания отдельных частиц и слоев СМ фиксированной массы в бункере на энерговооруженность сводообрушающего механизма.

3. Разработка научно и методически обоснованных расчетных соотношений и рекомендаций по количественной оценке влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и физико-механических свойств СМ на процесс и параметры сводообразования фиксированной массы СМ для рационального назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат на устранение сводов СМ.

4. Проведение и сопоставление результатов натурального и вычислительного экспериментов по исследованию динамического качества и функциональной надежности динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», созданного на базе разработанной математической модели такого рода комплексов, а также научно и методически обоснованных рекомендаций по расчету параметров сводообразований фиксированной массы СМ и потребных для их устранения энергозатрат.

5. Разработка принципов оценки эффективности конструкторско-технологических и технико-эксплуатационных характеристик сводообрушающих устройств с энергетической и эргономической точек зрения.

6. Систематизация сводных и детализированных классификационных схем и насыщение базиса способов и механизмов предупреждения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска СМ с учетом современных достижений науки и техники для создания высокоэффективных по функциональной надежности, патентоохранных технических решений в данной области.

**Объект исследования** - механизмы предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерах их хранения и выпуска, которые рассматриваются в составе комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», обладающего определенными динамическими свойствами.

**Предмет исследования** - процессы формирования и трансформирования механизмами предупреждения и устранения сводообразований СМ дополнительных компенсационных воздействий, которые определяют динамические свойства бункерных устройств и позволяют стабилизировать их выходные параметры при интенсификации неблагоприятных внешних воздействий на СМ, изменяющих его физико-механические свойства в процессе хранения и выпуска и приводящих к возникновению сводообразований СМ.

**Методы исследования.** Все исследования осуществлялись на основе принципов системного подхода. В теоретических исследованиях использовались методы параметрического и математического моделирования технических систем, численные методы решения задач и методы инженерной реологии. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с анализом и обработкой полученных математико-

---

статистическими методами данных на современной измерительной аппаратуре и вычислительной технике.

**Научная новизна:**

1. На базе выявленных приоритетных направлений повышения динамического качества и функциональной надежности механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерных устройствах предложена четырехпараметрическая модель СМ, учитывающая влияние силы схватывания отдельных частиц и слоев материала на процесс и параметры сводообразования в бункере с фиксированной массой СМ, при назначении энерговооруженности сводообрушающего механизма.

2. Разработана математическая модель динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», повышающая достоверность исследования физических процессов сводообразования СМ и точность расчета динамических параметров комплекса путем учета влияния параметров сводообразования СМ фиксированной массы на энерговооруженность сводообрушающего механизма.

3. Разработаны научно и методически обоснованные рекомендации и расчетные соотношения по количественной оценке влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и свойств СМ на процесс и параметры сводообразования для назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат на устранение сводов СМ.

4. В ходе натурного и вычислительного экспериментов по исследованию динамического качества комплекса «Бункер сыпучего материала – сводообрушающий механизм» получены новые результаты, учитывающие особенности процесса формирования и параметры сводов СМ в бункере, обуславливающие потребные энергозатраты на их устранение. В частности, получены расчетные соотношения для оценки геометрических и динамических параметров бункерного устройства и сводообразования, определено время сводообразования для конкретных типов СМ под прогнозируемый режим работы сводообрушителя.

5. Предложены показатели оценки конструкторско-технологических и технико-эксплуатационных возможностей сводообрушающих механизмов с энергетической и эргономической точек зрения, составляющие основу разработанных:

- энергетической модели выпуска СМ из бункера при периодическом заборе из него фиксированных по массе порций СМ с математическим обоснованием условий бесперебойного истечения и условий возникновения сводов СМ;

- методики расчёта энергоёмкости выпуска СМ из бункера в ёмкости мобильных транспортных средств с учётом остановок на технологические перерывы для устранения возникших сводообразований;

- методики оценки пропускной способности бункера в условиях многофакторного эксперимента на примере расчёта реального бункера с механическим сводообрушителем;

- методики оценки технического уровня разнотипных конструкций переносных механических сводообрушителей для рационального выбора конкретной конструкции под реальный бункер с заданными вместимостью и параметрами СМ на примере рычажно - «ёлочного» сводообрушителя.

6. Разработаны сводная и детализированные классификационные схемы различных по физической природе способов и механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ, построенные на базе иерархического подхода с учетом оригинальных авторских технических решений.

**Достоверность результатов** обеспечивается: корректностью постановки задач исследования; сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных автором и другими исследователями; обоснованностью используемых теоретических построений, допущений и ограничений; применением апробированных аналитических и численных методов расчета и современной измерительной аппаратуры, вычислительной техники и программного обеспечения.

**Научную значимость работы** составляют результаты теоретических и экспериментальных исследований и разработанные на их основе практические рекомендации по повышению динамического качества и функциональной надежности механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ фиксированной массы в бункерных устройствах, предопределяющие рациональный выбор величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат на устранение сводов СМ с конкретными геометрическими и динамическими параметрами.

**Практическую ценность работы** составляют: результаты систематизации сводообрушителей различной физической природы, включая авторские конструктивные решения, защищенные патентами России, методики расчета энерговооруженности и технического уровня механизмов подобного рода и их составных звеньев, снижающие стоимость и сроки проектирования конструкций сводообрушающих механизмов с улучшенными выходными характеристиками.

**Результаты исследований** использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по улучшению эксплуатационных характеристик и повышению функциональной надежности механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска СМ:

1. Теоретико-экспериментальные результаты работы используются в учебном процессе СамГУПС на кафедрах «Управление эксплуатационной, грузовой и коммерческой работой», «Железнодорожные станции и узлы».

2. Ряд представленных в работе запатентованных сводообрушающих комплексов и механизмов используется на Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД», в ОАО «Волжско-Уральская транспортная компания», ООО «Агролюкс» ОП «Самарский комбикормовый завод».

3. Основные материалы диссертации легли в основу личной и двух изданных при участии автора монографий для научных и инженерно-технических работников, предприятий транспортно-складского комплекса России, а также преподавателей, аспирантов и студентов технических специальностей.

**Апробация результатов работы.** Результаты исследований и основные материалы диссертационной работы докладывались на межвузовской научно-практической конференции «Опыт взаимодействия ВУЗов и железных дорог в научно-техническом прогрессе и подготовке специалистов», г. Самара, СамИИТ, 1998 г.; научной конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников и аспирантов факультета механизации сельского хозяйства Самарской ГСХА, г. Кинель, 1999 г.; научной конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников и аспирантов по итогам научно-исследовательской работы, г. Саратов, СГАУим. Н.И. Вавилова, 1999 г.; 2-ой международной отраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта и роль молодых ученых в их решении», г. Ростов-на-Дону, РГУПС, 2000 г.; 3-ей международной научно-практической конференции «Безопасность транспортных систем», г. Самара, МАНЭБ, 2002 г.; региональной научно-практической конференции «Новейшие достижения науки и техники на железнодорожном транспорте», г. Челябинск, ЮУЖД, 2004 г.; IV международной научной студенческой конференции «Trans – Mech – Art - Chem», г. Москва, МИИТ, 2006 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт – 2006», г. Ростов-на-Дону, РГУПС, 2006 г.; международной научно-технической конференции «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России», г. Екатеринбург, УрГУПС, 2006 г.; международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения», г. Самара, СамГУПС, ОрелГТУ, 2007 г.; IV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса», г. Самара, СамГУПС, 2008 г.; Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти проф. Л.И. Кошкина «Перспективные инновации в науке и образовании», г. Самара, СамГПУ, 2008 г.; международной научной конференции



---

«Современные проблемы математики, механики, информатики», г. Тула, ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2008 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса», г. Самара, СамГУПС, 2009г.; международной научно-практической конференции «Наука и образование – транспорту», г. Самара, СамГУПС, 2009 г.; VI Всероссийской дистанционной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса», г. Самара, СамГУПС, 2010 г.; II Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту», г. Самара, СамГУПС, 2010г.; региональной научно-практической конференции «Образование, наука, транспорт в XXI веке: опыт, перспективы, инновации», г. Оренбург, ОрИПС, 2010г.; III Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 130-летию транспортного образования в Пензенской области «Наука и образование транспорту», г. Пенза, ПТЖТ– филиал СамГУПС, 2010 г.; международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г., г. Саратов, СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2011 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 75 научных работ, из них 3 монографии (2 в соавторстве), 39 статей в научных журналах и сборниках, 24 статьи в трудах конференций, 8 патентов России на изобретения, 1 патент на полезную модель.

**На защиту выносятся:**

1. Созданная на базе предложенной четырехпараметрической модели СМ математическая модель динамического комплекса «Бункер сыпучего материала – сводообрушающий механизм», функционально связывающая энерговооружённость сводообрушителя с силой схватывания отдельных частиц и слоёв в сводообразовании СМ фиксированной массы.

2. Научно и методически обоснованные рекомендации и расчетные соотношения по количественной оценке влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и свойств СМ на процесс и параметры сводообразования для назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат на устранение сводов СМ.

3. Результаты натурного и вычислительного экспериментов по исследованию динамического качества комплекса «Бункер сыпучего материала – сводообрушающий механизм» с учетом особенностей процесса формирования сводов СМ в бункере, обуславливающих потребные энергозатраты на их устранение.

4. Систематизированные и дополненные показатели оценки конструкторско-технологических и технико-эксплуатационных возможностей сводообрушающих устройств с энергетической и эргономической точек зрения.

5. Сводная и детализированные классификационные схемы различных по физической природе способов и механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерах, построенные на принципах иерархического подхода.

6. Разработанные технические способы и конструктивные решения высокоэффективных, патентозащищённых сводообрушающих механизмов различной физической природы для устранения сводообразований СМ в бункерах хранения и выпуска СМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы из 247 наименований. Основной текст изложен на 285 страницах и содержит 93 рисунка, 13 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана краткая характеристика диссертационной работы, отмечена научная новизна и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ по исследованию функциональных свойств динамических комплексов, систем и механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерах. Основной акцент в обзоре сделан на критический анализ динамического качества и функциональной надежности вышеуказанных устройств в условиях варьирования внешних воздействующих факторов.

Отмечен значительный творческий вклад ведущих ученых в области исследования динамики истечения сыпучих сред из емкостей, борьбы со сводообразованием и разработки сводообрушающего оборудования К.В. Алферова, А.И. Белоусова, И.И. Блехмана, В.А. Богомягких, В.С. Горюшинского, И.В. Горюшинского, Л.В. Гячева, Э.В. Дженике, Д.Н. Ешуткина, В.И. Желткова, Р.Л. Зенкова, Р. Квапила, Б.Г. Кеглина, В.С. Кунакова, О.Г. Локтионовой, О.П. Мулюкина, В.Ф. Семёнова, В.В. Соколовского, Г.М. Третьякова, Л.С. Ушакова, С.Ф. Яцуна и др. Рассмотрены основные характеристики и физико-механические свойства СМ, в той или иной степени влияющих на процесс сводообразования. Отражены общие направления исследований в области бесперебойного функционирования бункерных устройств и совершенствования сводообрушающего оборудования для сыпучих грузов с широким спектром физико-механических свойств.

На основании проведенного обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава освещает результаты аналитического исследования созданного при участии автора динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм» (рисунок 1), задачей которого являлась разработка математической модели данного комплекса, позволяющей минимизировать энергозатраты на разрушение сводообразований СМ в бункере путём назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма по результатам количественной оценки влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и физико-механических свойств СМ на процесс формирования и параметры сводообразования СМ фиксированной массы.

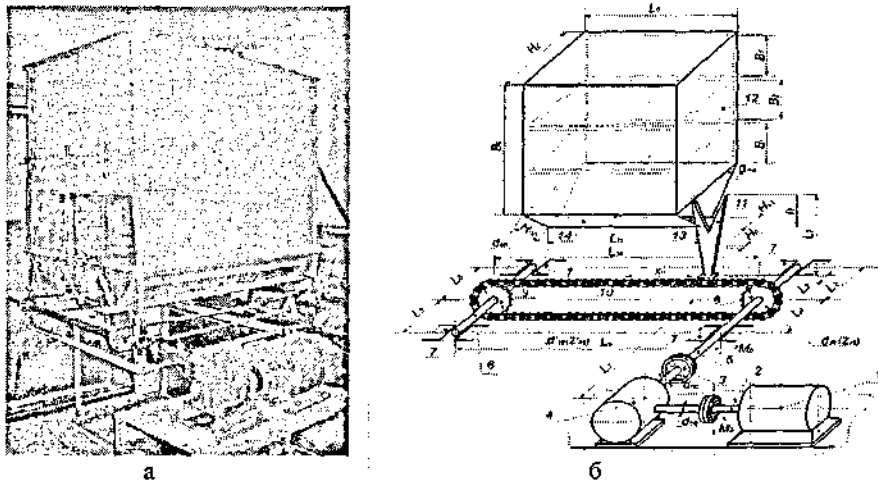


Рисунок 1 – Общий вид (а) и расчётно-конструктивная схема (б) динамического комплекса «Бункер сыпучих материалов - сводообрушающий механизм» (патент России №2145303)

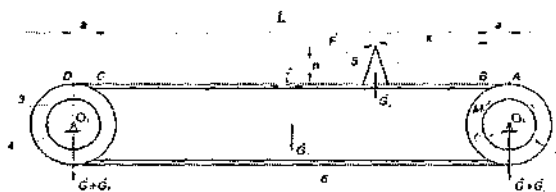
1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – выходной вал электродвигателя; 3 – жесткая соединительная муфта; 4 – редуктор; 5 – ведущий вал редуктора; 6 – ведомый вал; 7 – подшипник качения; 8, 9 – ведущая и ведомая звездочки, соответственно; 10 – зубчатая цепь; 11 – сводообрушающий орган; 12 – бункер; 13 – шелевое выпускное отверстие; 14 – пластина днища;  $M_a$ ,  $M_p$  – крутящий момент электродвигателя и редуктора, соответственно;  $d_{ад}$ ,  $d_{ар}$  – диаметр выходного вала электродвигателя и редуктора, соответственно;  $d_{2a}$ ,  $d'_{2a}$  – диаметр ведущей и ведомой звездочек, соответственно;  $Z_{2a}$ ,  $Z'_{2a}$  – число зубьев ведущей и ведомой звездочек;  $L_{2a} = L_a$  – расстояние между центрами звездочек 8 и 9 и осями валов 5 и 6;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$ ,  $L_6$ ,  $L_7$  – конструктивные размеры валов, подшипников и сводообрушающего органа;  $h$  – фактическая величина вхождения рабочего органа 11 в полость бункера 12;  $M_p$  – толщина рабочего органа;  $L_s$ ,  $H_s$ ,  $B_s$  – длина, ширина и высота бункера ( $B_1$ ,  $B_2$ , ...,  $B_i$  – высота слоев СМ, соответствующая числу выпусков  $i$  СМ из бункера);  $L_{ш}$ ,  $H_{ш}$  – длина и ширина шелевого выпускного отверстия, соответственно;  $H_{пл}$ ,  $a_{пл}$  – ширина пластины днища 14 и угол ее наклона, соответственно;  $X_{ш}$  – направление перемещения сводообрушающего органа (на рисунке 1, б не приведены: механизм регулирования углового положения пластины 14; механизм регулирования высоты подъема сводообрушающего органа 11 и механизм натяжения цепи 10)

Исследование проводилось в два этапа:

1. Математическое описание данного динамического комплекса.

2. Определение силы схватывания отдельных частиц и слоев СМ фиксированной массы в бункере для выбора минимально необходимой силы рабочего органа сводообрушающего механизма, расчётное соотношение для которой затем вводилось в уравнение движения исследуемого комплекса, полученное на первом этапе.

При выводе уравнения движения динамического комплекса для упрощения его решения использован классический способ решения такого рода систем с одной степенью свободы путем исследования динамики звена приведения (рисунок 2), за которое принята ведущая звездочка 8 зубчатой цепи 10, испытывающей противонаправленные силы от крутящего момента  $M$ , редуктора 4 и от силы схватывания  $F_w$  в сводообразовании  $i$ -го слоя СМ (слои  $B_1, B_2, \dots, B_i$ , где  $i$  в общем случае соответствует числу выпусков из полностью загруженного бункера равномассных порций СМ до полного опорожнения бункера, - см. рисунок 1).



Выбор протяженности участков АВ, ВС и CD рабочего хода сводообрушающего органа 5 на рисунке 2 согласован с

Рисунок 2 – Конструктивно-расчетная схема динамического комплекса на базе звена приведения  
 1, 3 – соответственно, ведущая и ведомая звездочки, каждая массой  $m_1$  и радиусом  $r_1$  ( $\overline{G}_1, \overline{G}_3$ );  
 2, 4 – соответственно, ведущий и ведомый валы, каждый массой  $m_2$  и радиусом  $r_2$  ( $\overline{G}_2, \overline{G}_4$ );  
 5 – сводообрушающий орган массой  $m_5$  ( $\overline{G}_5$ ); 6 – зубчатая цепь массой  $m_6$  ( $\overline{G}_6$ );  $\bar{x}, \dot{\bar{x}}$  – соответственно, перемещение и скорость органа 5 при возвратно - поступательном движении;  $L$  – полный рабочий ход органа 5, равный длине выпускного отверстия бункера  $L_w$  (см. рисунок 1);  $a$  – участки цепи 6, вынесенные из зоны бункера с СМ;  $\bar{F} = f(F_w)$  – сила противодействия движению органа 5 со стороны сводообразования СМ, формируемого силой схватывания  $F_w$  отдельных частиц и слоев в фиксированных массах сыпучего материала с высотой слоев  $B_1, B_2, \dots, B_i$  (см. рисунок 1); АВ, ВС, CD – соответственно, участки разгона, равномерного движения и торможения сводообрушающего органа 5 при полном цикле работы сводообрушающего механизма, - от момента пуска до момента останова

временем их прохождения  $\tau_{AB}, \tau_{BC}, \tau_{CD}$  на циклограмме работы электродвигателя постоянного тока, совмещенной с его механической характеристикой в двухкоординатном отображении по оси X (рисунок 3).

Размещение участка АВ (включение электродвигателя и выход на заданный момент  $M_a^{BC}$  для создания максимально потребной силы разрушения

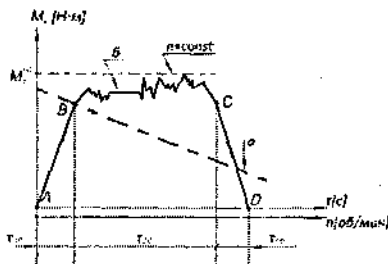


Рисунок 3 – Циклограмма работы электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

а – механическая характеристика:  $M_d = f(n)$ ;

б – изменение момента  $M_d$  на участках АВ, ВС, CD:

$$M_d = f(\tau)$$

сводообразования СМ на участке ВС) и участка CD (выключение электродвигателя по завершении процесса сводоразрушения

на участке ВС) вне зоны выпускного отверстия  $L_w$  (см. рисунок 1) позволило исключить из математического описания оценку влияния инерционности и флуктуации подвижных элементов электродвигателя на динамику сводообрушающего механизма.

Взаимосвязь между крутящим моментом  $M_d^{BC}$  [Н·м] электродвигателя с развиваемым числом оборотов  $n$  [об/мин] с создаваемой мощностью  $N$  [кВт] может быть оценена с помощью известного соотношения:

$$N = \frac{M_d^{BC} \cdot n}{9549}$$

При редуцировании оборотов двигателя с передаточным соотношением  $i$  имеем (см. рисунок 2):

$$N = \frac{M_p \cdot n}{9549 \cdot i} = \frac{F \cdot r_1 \cdot n_0}{9549} \quad (1)$$

где  $n_0$  - число оборотов звездочки I.

$$\text{Здесь } i = \frac{n}{n_0} = \frac{M_p}{M_d^{BC}}; \quad M_p = F \cdot r_1 \quad (\text{см. рисунок 2}).$$

Потребную мощность  $N$  двигателя как функцию от силы  $\bar{F}(\bar{x})$  и скорости  $\bar{x}$  сводообрушающего органа можно определить по формуле  $N = (\bar{F}, \bar{x})$ , где  $\bar{x}$  - скорость точки приложения силы. В скалярном виде для прямого или обратного хода сводообрушающего механизма мгновенная мощность  $N_w = \frac{\partial A}{\partial \tau}$ , где  $\partial A = F(x)dx$  или  $N_w = F(x)\bar{x}$ .

Также очевидно, что плотность  $\mu$ , как следствие, твердость СМ в бункере при прохождении рабочим органом II (см. рисунок 1) хода ВС =  $L_w$  (см. рисунок 2) различны, что предопределяет количественное изменение силы  $F$  на определенном ходе ВС (прямом или обратном) для процесса сводоразрушения СМ (см. рисунок 4).

Очевидно, что распределение твердости (флуктуации) СМ в зоне сводообразования на участке ВС ( $L_w$ ) носит случайный характер и, следовательно,

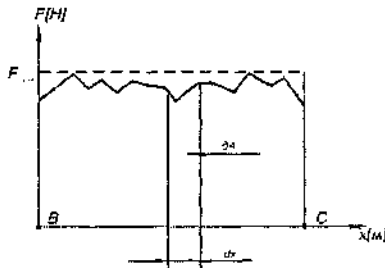


Рисунок 4 – Характерный вид распределения силы сводообрушения на участке BC в бункере (dA – элементарная работа, совершаемая сводообрушающим органом при перемещении на малую величину dx)

сила сводообрушения  $F$  также носит случайный характер, который можно установить лишь на базе многочисленных

экспериментальных данных для конкретных бункеров и типов СМ.

При математическом описании динамики исследуемого комплекса (см. рисунок 1) можно не учитывать динамический процесс флуктуации подвижных звеньев редуктора 4, цепи 10, звездочек 8 и 9, валов 5 и 6. Это обусловлено тем, что колебания, создаваемые указанными элементами, эффективно и в полной мере гасятся на участке BC, где рабочий орган 11 (см. рисунок 1) находится в контакте с сыпучей средой в полости бункера 12, являющейся по своей физической сути мощнейшим демпфером сухого трения.

При непостоянстве параметров  $F(x)$  и  $N(x)$  в расчеты довольно часто вводят среднюю мощность  $N_{cp}$  за конечный промежуток времени, в данном случае  $\tau_{BC}$ , в течение которого сила  $F(x)$  совершает работу  $A_{BC}$ :

$$\left. \begin{aligned} A_{BC} &= \int_0^{l_{BC}} F(x) dx = \int_0^{\tau_{BC}} F[x(\tau)] \dot{x} d\tau \\ N_{cp} &= \frac{A_{BC}}{\tau_{BC}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При этом следует отметить, что неизвестность закона случайного распределения  $F(x)$  не позволяет воспользоваться методами статистической механики, причем принятие наиболее употребительных законов распределения случайных величин (Гаусса, Релея и др.) не обеспечивает стопроцентной точности расчетов, так же как и применение в них среднего значения  $N_{cp}$  из (2). Также нецелесообразно управление мощностью, развиваемой электродвигателем в процессе обрушения свода, по причинам производственного и экономического характера.

В исследуемом комплексе с одной степенью свободы в качестве обобщенных координат и скорости принят угол поворота  $\varphi$  и угловая скорость  $\dot{\varphi}$  ведущей звездочки I. Тогда для этой системы уравнение Лагранжа II рода принимает вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q, \quad (3)$$

где  $T$  – кинетическая энергия;  $Q$  – обобщенная сила.

Кинетическая энергия всего комплекса представлена в виде суммы кинетических энергий ведущей звездочки 1 с валом 2 ( $T_{1,2}$ ), ведомой звездочки 3 с валом 4 ( $T_{3,4} = T_{1,2}$ ), органа 5 ( $T_5$ ) и цепи 6 с массой  $\gamma$  одного погонного метра ( $T_6$ ):

$$T = T_{1,2} + T_{3,4} + T_5 + T_6.$$

Здесь:  $T_{1,2} = T_{3,4} = \frac{J_{01} \cdot \dot{\phi}^2}{2}$ , где  $J_{01} = \frac{(m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2)}{2}$  - моменты инерции ведущей звездочки 1 относительно оси вращения  $O_1$  (ведомой звездочки 3 относительно оси вращения  $O_2$ ).

Или: 
$$T_{1,2} = T_{3,4} = \frac{1}{4} (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \cdot \dot{\phi}^2; \quad T_5 = \frac{m_5 \cdot \dot{x}^2}{2}.$$

При расчете  $T_6$  учитывается, что часть цепи  $O_1 O_2$  движется поступательно ( $T_{6a}$ ), а часть цепи длиной  $2\pi$  вращается вокруг оси, проходящей через центр условного кольца, образуемого полукольцами цепи 6, расположенными за центрами  $O_1$  и  $O_2$  ( $T_{6b}$ ), то есть:

$$T_6 = T_{6a} + T_{6b}.$$

Тогда с учетом: 
$$m_{6a} = 2\gamma(L + 2a);$$

$$m_{6b} = 2\gamma \cdot \pi \cdot r_1; \quad T_{6a} = \gamma(L + 2a) \cdot \dot{x}^2; \quad T_{6b} = \gamma \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \dot{\phi}^2,$$

получим кинетическую энергию всей цепи 6:

$$T_6 = \gamma[(L + 2a) \cdot \dot{x}^2 + \pi \cdot r_1^2 \cdot \dot{\phi}^2].$$

Суммирование найденных ранее кинетических энергий отдельных звеньев комплекса приведено к виду:

$$T = \frac{1}{2} (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{m_5 \dot{x}^2}{2} + \gamma[(L + 2a) \cdot \dot{x}^2 + \pi \cdot r_1^2 \cdot \dot{\phi}^2].$$

Или с учетом  $\dot{x} = \dot{\phi} \cdot r_1$ :

$$T = \frac{\dot{\phi}^2}{2} [m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_5 r_1^2 + \gamma \cdot r_1^2 (L + 2a + \pi \cdot r_1)].$$

Введя обозначение приведенного момента  $J_{np}$ :

$$J_{np} = r_1^2 \left[ m_1 + m_5 + m_2 \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \gamma(L + 2a + \pi \cdot r_1) \right]$$

с приведенной массой системы  $m_{np}$ :

$$m_{np} = m_1 + m_5 + m_2 \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \gamma(L + 2a + \pi \cdot r_1),$$

получим:

$$T = \frac{J_{np} \cdot \dot{\phi}^2}{2}. \tag{4}$$

Дифференцируя (4) по  $\phi$  и  $\dot{\phi}$ , получим частные производные в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} = J_{np} \cdot \dot{\phi}. \tag{5}$$

Рассмотрим движение сводообрушающего органа 5 комплекса на отдельных участках полного пути AD (рисунок 2):

Участок АВ, – участок набора органом 5 под действием момента  $M_p$ , скорости от нуля до  $\dot{x}$  до момента  $t_1$ , когда орган 5 вступает в контакт со сводообразованием СМ в бункере. Так как единственным силовым фактором, способным совершить работу, является момент  $M_p$ , то обобщенная сила  $Q_{AB}$  на участке АВ равна:

$$Q_{AB} = M_p. \quad (6)$$

После подстановки (5) и (6) в (3) дифференциальное уравнение движения комплекса на участке АВ запишется в виде:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_p.$$

Проведение в данном уравнении ряда преобразований: разделение переменных, интегрирование с учётом начальных условий:

$$t_0 = 0, \varphi(t_0) = 0, \dot{\varphi}(t_0) = 0, \quad (7)$$

позволяет описать движение исследуемого комплекса на участке АВ:

$$\varphi = \frac{M_p}{2J_{np}} \cdot t^2, \quad (8)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{M_p}{J_{np}} \cdot t. \quad (9)$$

В момент  $t_1$ , когда сводообрушающий орган вступает в контакт со сводом СМ, выполняются условия:

$$t = t_1, \varphi(t_1) = \frac{a}{r_1}, \dot{\varphi}(t_1) = \frac{\dot{x}}{r_1}, \quad (10)$$

а необходимый вращательный момент редуктора  $M_p$  определяется из соотношения:

$$M_p = \frac{\dot{x}^2 \cdot J_{np}}{2r_1 \cdot a}. \quad (11)$$

Участок ВС, - участок равномерного движения органа 5 со скоростью  $\dot{x}$  в течение времени  $t_2$  в условиях противодействия этому движению силы  $F_w$  со стороны сводообразования СМ.

При равномерном и прямолинейном движении сводообрушающего органа на участке ВС в момент  $t_2$  (точка С) выполняются условия:

$$t = t_2; x(t_2) = L; \dot{x}(t_2) = \dot{x} = const. \quad (12)$$

На участке ВС, также как и на участке АВ, силы  $\vec{G}_1, \vec{G}_2, \dots, \vec{G}_6$  не совершают работы вследствие их перпендикулярной направленности движению органа 5.

Несложно показать, что обобщенная сила  $Q_{BC}$  на участке ВС равна:



$$Q_{BC} = M_p - F \cdot (r_1 + h).$$

В точке С пути АД контакт органа 5 со сводом СМ прекращается, начинается торможение, а управляющий момент  $M_p$  меняет знак на противоположный, то есть сменяется моментом сопротивления  $M_c$ .

Следовательно, в точке С обобщенная сила  $Q_c$  равна:

$$Q_c = M_c. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение движения исследуемого комплекса на участке ВС имеет вид:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_p - F(r_1 + h). \quad (14)$$

С учётом этого при заданных конструктивно  $h$ ,  $r_1$ , а требуемая скорость на участке ВС равна:

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{2r_1 a}{J_{np}} \cdot F(r_1 + h)}. \quad (15)$$

При наличии фиксированной скорости  $\dot{x}$  из решения (15) несложно определить требуемые для этого параметры  $h$  и  $r_1$ :

$$h = \frac{M_p}{F} - r_1; \quad r_1 = \frac{h}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2\dot{x}^2 \cdot J_{np}}{F \cdot a \cdot h^2}} - 1 \right).$$

Участок CD. - участок снижения скорости органа 5 в течение времени  $t_3$  до нуля вследствие изменения в точке С момента  $M_p$  на противоположный.

На участке CD движение органа 5 от точки Д к точке С происходит с набором скорости от нуля до  $\bar{x}$ . Причем далее процесс движения повторяется полностью (как в ранее рассмотренном движении органа 5 от точки В к точке С), но в обратном направлении: движение органа 5 от точки С до точки В – есть равномерное движение со скоростью  $\bar{x}$ , а от точки В до точки А – происходит процесс торможения.

С учетом изложенного дифференциальное уравнение движения комплекса на участке CD представимо в виде:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_c. \quad (16)$$

Интегрируя (16) методом разделения переменных, получим решение в виде:

$$\varphi = \frac{M_c}{2J_{np}} \cdot t^2 + C_3 t + C_4, \quad (17)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{M_c}{J_{np}} \cdot t + C_3. \quad (18)$$

Произвольные постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$  найдены из начальных условий, являющихся конечными на участке ВС:

$$t_0 = 0; \varphi(t_0) = 0, \dot{\varphi}(t_0) = \frac{\dot{x}}{r_1}. \quad (19)$$

В момент  $t = t_3$  (точка D) выполняются условия:

$$t = t_3; \varphi(t_3) = \frac{\alpha}{r_1}; \dot{\varphi}(t_3) = 0. \quad (20)$$

Последующие преобразования позволяют представить момент инерции  $M_c$  в следующем виде:

$$M_c = -\frac{\dot{x} \cdot J_{np}}{2r_1 \cdot \alpha}. \quad (21)$$

Из сравнения (21) и (11) следует, что моменты, приложенные к ведомому звену 3, на участках АВ и CD отличаются только знаками. Следовательно, в точке С направление момента  $M_c$  надо изменить на противоположное. В точке D скорость органа 5 становится равной нулю, а затем растет и в точке С становится равной  $\dot{x}$ . С этой скоростью сводообрушающий орган 5 движется до точки В. Здесь направление момента  $M_c$  следует изменить на противоположное, и в точке А скорость органа 5 становится снова равной нулю. Далее процесс повторяется в обратном направлении.

В представленных далее математических выкладках исследуемого комплекса для назначения величины силы  $\bar{F}$  рабочего органа сводообрушающего механизма используются соотношения и рекомендации, изложенные ниже в рамках разработанной четырехпараметрической модели гравитационного истечения СМ из бункера (рисунок 5).

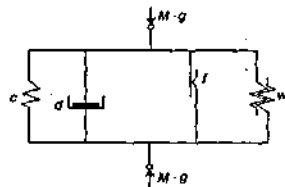


Рисунок 5 – Гравитационная модель сыпучего материала замкнутого объема

$M$  – масса сыпучего материала замкнутого объема;  $g$  – ускорение свободного падения;  $c$  – жёсткость;  $d$  – демпфирование;  $f$  – трение;  $w$  – схватывание

Причем наличие в предложенной модели параметра  $w$  (в отличие от трехпараметрической модели) позволяет более точно воспроизвести реальное поведение сыпучего материала в бункере его хранения и выпуска в транспортировочную емкость.

Расчет коэффициентов  $f$ ,  $d$ ,  $c$  производится по известным методикам, предложенным Л.В. Гячевым, а особенности расчета коэффициента  $w$  освещены ниже.

Применительно к модели на рисунке 5 упрощенное уравнение расхода СМ из бункера при допущении постоянства гравитационной силы  $M \cdot g$ , (случай непрерывного пополнения бункера сыпучим материалом при периодических его

отборах в раздаточную емкость, - бункер «неограниченного объема»), - может быть записано в виде:

$$M \cdot g + F_c + F_d - F_f - F_w = 0,$$

где  $F_c$ ,  $F_d$ ,  $F_f$ ,  $F_w$  - соответственно, обобщенные силы упругости, демпфирования, трения и схватывания отдельных частиц или слоев истекающего СМ.

Впервые для характеристики величины силы схватывания  $F_w$  проведен анализ изменения параметров СМ в бункерном устройстве на базе уравнения Аррениуса и получена эмпирическая зависимость, характеризующая изменение контактного давления  $p_k$  между отдельными частицами (слоями и массивами) СМ в зависимости от времени эксплуатации  $\tau$ :

$$\left. \begin{aligned} p_k &= p_{k_0} \cdot e^{-w\tau} \\ w &= k_w \cdot e^{\frac{U_a}{k_w T}} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где  $p_{k_0}$  - исходное давление в массиве СМ фиксированной массы  $M$  на момент заполнения бункера, Н/м<sup>2</sup>;  $e=2,71$  - число Эйлера;  $k_w = 1,0 \dots 3,0$  - масштабный коэффициент составляющих СМ частиц в гранулированном ( $k_w = 1,0 \dots 1,2$ ) или пылеобразном ( $k_w = 2,5 \dots 3,0$ ) состояниях;  $w$  - коэффициент схватывания или константа скорости слипания или старения, характеризуемая уменьшением упругих свойств отдельных частиц или слоев СМ;  $k_w$  - обобщенный коэффициент работы, совершаемой при самоуплотнении частиц и слоев СМ  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right]$ ;  $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$  - осредненная температура окружающей бункер атмосферной среды с предельными нижним  $T_1$  и верхним  $T_2$  ее значениями в период эксплуатации бункера [К];  $U_a$  - энергия активации слипания частиц и слоев СМ [ккал/моль], - для гранул на базе полимерных материалов эта энергия равна 0,5 ... 5 ккал/моль, для гранул на базе синтетических каучуков порядка 14...20 ккал/моль;  $\tau = \frac{t_{\text{факт}}}{t_0}$ , здесь  $t_0$  - регламентированное ГОСТ, ОСТ или другим нормативным документом время нахождения СМ в бункере до начала выпуска;  $t_{\text{факт}}$  - фактическое время нахождения СМ в бункере до начала выпуска.

Предложена зависимость для ориентировочной оценки обобщенной силы схватывания  $F_w$ :

$$F_w = p_k \cdot S_{\text{св}} = p_{k_0} \cdot e^{-w\tau} \cdot S_{\text{св}}, \quad (23)$$

где  $S_{\text{св}}$  - площадь поверхности свода, м<sup>2</sup> (см. рисунок 6).

Исходное контактное давление  $p_{k_0}$  определяется из соотношения:

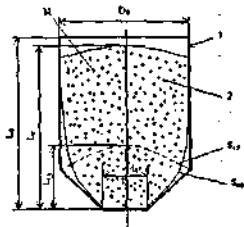


Рисунок 6 – Расчетная схема бункера с эквивалентными параметрами

1 – бункер; 2 – сыпучий материал массой  $M$ ;  $S_{сп}$  – приведенная площадь поверхности распределения СМ в бункере [ $m^2$ ];  $S_{св}$  – площадь поверхности свода СМ со стороны выпускного отверстия бункера [ $m^2$ ];  $L_{св}$ ,  $D_{св}$ ,  $d_{св}$  – эквивалентные размеры бункера;  $L_{св}$  – характерная высота свода СМ;  $L_T$  – текущая высота СМ в бункере

$$P_{к0} = \frac{M \cdot g}{S_{сп}} \quad (24)$$

Автором предложено выражение для определения обобщенного коэффициента работы  $k_0$  [Дж/К]:

$$k_0 = \frac{S_{св} \cdot 0,6A \cdot \varphi_{min}}{S_{сп} \cdot \Delta T \cdot \varphi_{max}} \quad (25)$$

где  $\Delta T = T_1 - T_2$  – перепад температуры окружающей бункер атмосферной среды в эксплуатации [К];  $\varphi_{max}$ ,  $\varphi_{min}$  – соответственно, величины максимальной и минимальной относительной влажности окружающей атмосферной среды при граничных значениях ( $T_1$ ,  $T_2$ ) температурного диапазона эксплуатации бункера с сыпучим материалом [%];  $A$  [Дж] – работа, затрачиваемая на самоуплотнение частиц и слоев массива СМ массой  $M$  на величину  $\Delta y$  [м] под действием гравитационной нагрузки  $F_T$  [Н] при заданном перепаде  $\Delta T$  [К] температуры окружающей атмосферной среды при эксплуатации бункера:

$$A = F_T \cdot \Delta y \quad (26)$$

где  $F_T = M^* \cdot g$ ; здесь  $M^* = \frac{L_{св}}{L_T} \cdot M$ ;  $\Delta y = (L_T - y \cdot L_T)$ ;  $y = \rho_{сп} / \rho_{св}$  – уплотняемость СМ, здесь  $\rho_{сп}$ ,  $\rho_{св}$  – насыпная плотность СМ, соответственно в рыхлом и уплотненном состояниях [ $kg/m^3$ ] (см. рисунок 6).

С учетом представленных выше соотношений для параметров  $F_T$ ,  $M^*$  и  $\Delta y$  выражение (26) примет вид:

$$A = \frac{L_{св}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T) \quad (27)$$

Подстановка (27) в (25) дает конечное выражение для  $k_0$ :

$$k_0 = \frac{S_{св}}{S_{сп}} \cdot \frac{0,6 \cdot \frac{L_{св}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T)}{\Delta T} \cdot \frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}} \quad (28)$$

Подстановка (22), (24) – (27) в (23) позволяет получить конечное выражение

для  $F_w$ :

$$F_w = p_k \cdot S_{св} = p_{к0} \cdot e^{p_k} \cdot S_{св} = M \cdot g \cdot \frac{S_{св}}{S_{сп}} \cdot e^{\left( k_0 \cdot \frac{S_{св}}{S_{сп}} \right)} \quad (29)$$

или

$$F_w = M \cdot g \cdot \frac{S_{CB}}{S_{np}} \cdot e^{k \cdot \left[ \frac{L_{CB}}{L_T} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{max}} \right]} \quad (30)$$

При последующем расчете текущих значений составляющих членов выражения (29) или (30) и собственно текущего значения силы  $F_w$  используем геометрические размеры реального бункера с эпюрой распределения полей давления конкретного сыпучего материала, а также ряд справочных данных из литературных источников.

Анализ выражения (30) показывает, что на величину силы  $F_w$  влияют 8 параметров, из них 3 взаимосвязанных через массу  $M$  сыпучего материала в бункере (рисунок 7):  $\frac{S_{CB}}{S_{np}}$ ,  $\frac{L_{CB}}{L_T}$ ,  $L_T$  и 5 независимых:  $M$ ,  $T$ ,  $\Delta T$ ,  $\frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}}$ ,  $\tau$ , непосредственно влияющих на величину параметра  $F_w$  (рисунок 8).

Из рассмотрения исключены параметры  $U_a, k_m, \gamma$ , которые являются постоянными величинами для каждого в отдельности взятого типа СМ.

Для оценки влияния выделенных 5 независимых параметров на величину силы  $F_w$  воспользуемся классическим планом вычислительного эксперимента, при котором все независимые, кроме одной, фиксировались (принимались постоянными), а варьируемая величина подвергалась изменению в пределах варьирования эксплуатационных показателей бункера с СМ. Расчет проводился в программе Excel MS Office.

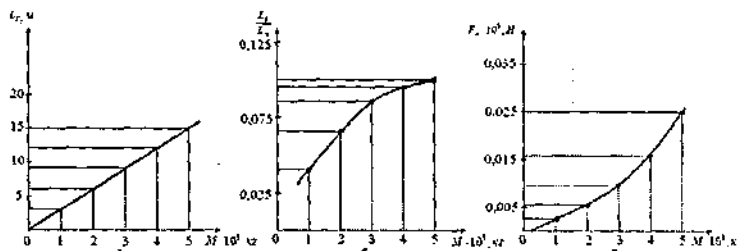


Рисунок 7 – Синтерполированные с учетом данных метода экспертных оценок характеристики взаимосвязанных параметров реального бункера с рабочей средой в виде гранулированного комбикорма по ГОСТ. 204-71 (масса СМ в бункере  $M=5000$  кг; текущая высота СМ в бункере  $L_T=15$  м; отношение характерной высоты свода СМ к текущей высоте СМ  $\frac{L_{CB}}{L_T}=0,1$ ; отношение площади поверхности свода СМ со стороны выпускного отверстия бункера к приведенной площади поверхности распределения СМ  $\frac{S_{CB}}{S_{np}}=0,025$ )

а – зависимость  $L_T = f(M)$ ; б – зависимость  $\frac{L_{CB}}{L_T} = f(M)$ ; в – зависимость  $\frac{S_{CB}}{S_{np}} = f(M)$

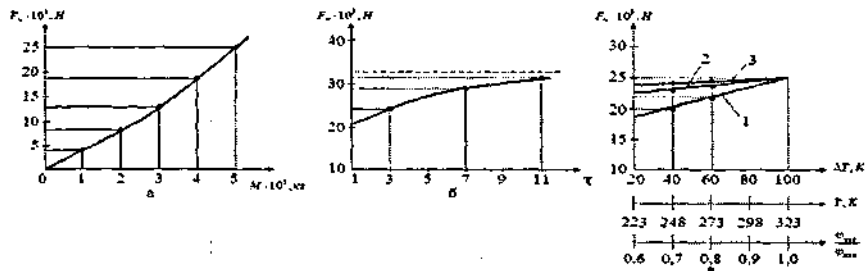


Рисунок 8 – Сплетерполированные с учетом данных метода экспертных оценок характеристики независимых параметров реального бункера с рабочей средой в виде гранулированного комбикорма по ГОСТ 204-71 (средняя температура окружающей атмосферной среды  $T=328$  К; температурный перепад окружающей атмосферной среды  $\Delta T=100$  К; отношение величин минимальной и максимальной относительной влажности окружающей атмосферной среды при граничных значениях температурного диапазона эксплуатации бункера  $\frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}} = 0,95$ ; отношение фактического времени нахождения СМ в бункере до начала его выпуска к регламентируемому времени допустимого нахождения СМ в бункере  $\tau=1$ )

а - зависимость  $F_v = f(M)$ ; б - зависимость  $F_v = f(\tau)$ ; в - зависимости 1)  $F_v = f(\Delta T)$ ; 2)  $F_v = f(T)$  и 3)  $F_v = f\left(\frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}}\right)$

С учетом представленных выше положений выбор силы  $F_{po}$ , развиваемой рабочим органом сводообрушающего механизма, может быть произведен из совместного решения соотношений:

$$F_{po} > F_v \frac{\sum_{i=1}^m S_{po}}{S_{ce}}, \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^m S_{po} = k_{об} S_{ce}, \quad (32)$$

где  $S_{po}$  – площадь режущей поверхности рабочего органа сводообрушающего механизма, вводимой в контакт со сводообразованием СМ;  $m$  – число потребных рабочих ходов рабочего органа сводообрушающего механизма для разрушения сводообразования СМ;  $k_{об}$  – коэффициент обрушения свода, определяющий часть площади свода  $S_{ce}$ , при разрушении которой происходит саморазрушение всего свода.

Из практики эксплуатации оцениваемого в настоящей работе бункера с СМ следует:

$$\left. \begin{aligned} k_{об} &= 0,2 \\ m &= 5 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

С учетом (33) выражения (31, 32) приобретают вид:

$$F_{po} > 0,04F_w. \quad (34)$$

На практике силу  $F_{po}$  принимают, как правило, на 10 ... 20% большей произведения  $0,04F_w$ , и если это увеличение взять равным 15%, то выражение (34) трансформируется в равенство:

$$F_{po} = 0,046 \cdot F_w. \quad (35)$$

Выражение (35) с учетом (29) и (28) представимо в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_{po} &= 0,046 \cdot M \cdot g \cdot \frac{S_{св}}{S_{np}} \cdot e^{(k_0 \cdot \frac{x_0}{L_T})} \\ k_0 &= \frac{S_{св}}{S_{np}} \cdot \frac{0,6 \cdot \frac{L_{св}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T)}{\Delta T} \cdot \frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Использование (36) для определения величины силы  $F_{po}$  рабочего органа сводообрушающего механизма при решении дифференциального уравнения его движения позволяет подобрать для этого механизма конкретный тип привода с необходимыми энергетическими характеристиками (развиваемый крутящий момент, потребляемая мощность и др.), обеспечивающими качественное разрушение свода образования СМ с минимальными энергозатратами.

Результаты выполненного аналитического исследования в алгоритмизированном виде представлены на рисунке 9.

Третья глава характеризует результаты исследований, нацеленных на решение обратной задачи динамики, заключающейся в определении сил, действующих на сводообрушающий орган со стороны разрушаемого свода СМ (рисунок 10) с учетом ранее охарактеризованных особенностей построения четырехпараметрической модели сыпучего материала.

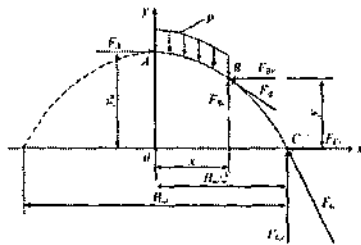


Рисунок 10 – Схема к расчету формы свода СМ в бункере

Указанные результаты включают аналитически полученные зависимости в виде:

$$\text{- уравнения кривой свода: } y = y_0 - \frac{x^2}{2(1+2f^2)},$$

где  $f$  – коэффициент внутреннего трения СМ;

- ширины  $H_{щ}$  щелевого сводообразующего отверстия в зависимости от начального сопротивления сдвигу  $\tau_0$  загруженного в бункер материала [Па], угла внутреннего трения

материала  $\varphi$  и насыпной плотности  $\rho$  см [кг/м<sup>3</sup>]:  $H_m = \frac{2\tau_0(1+\sin\varphi)}{\rho g}$ ,

- стрелы свода  $y_0$ :  $y_0 = \frac{H_m^2}{8(1+2f^2)}$ .

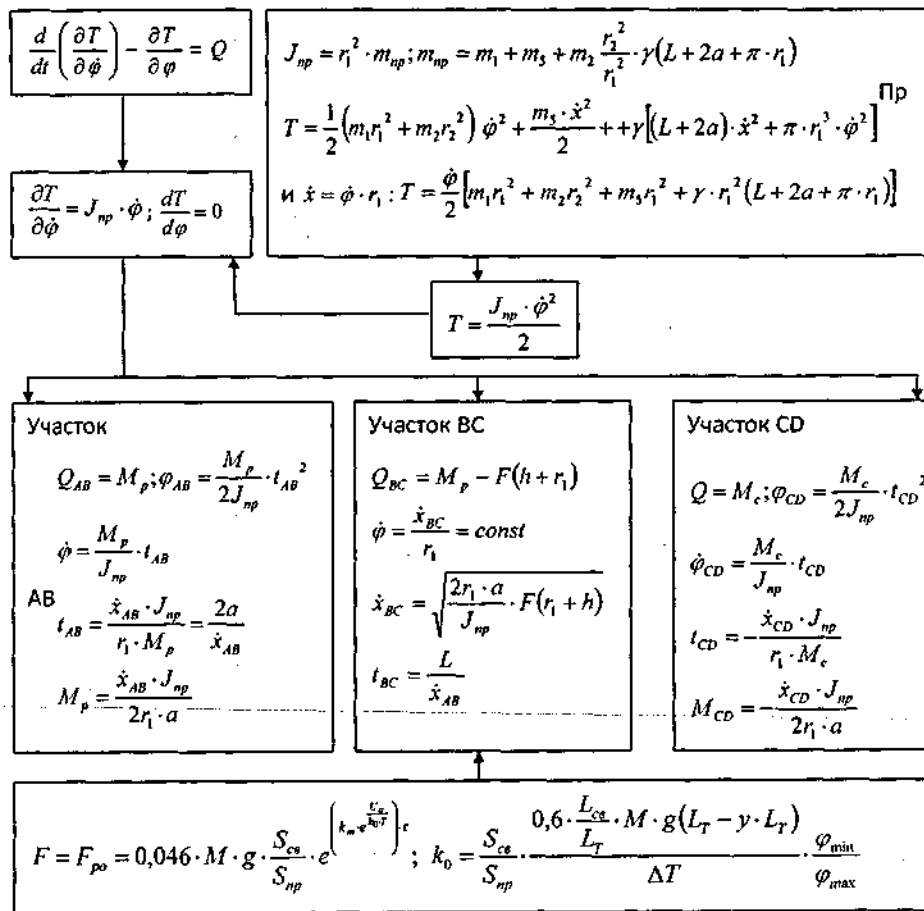


Рисунок 9 – Алгоритм вывода уравнения движения исследуемого динамического комплекса

Если рассматривать другое распределение давления, действующего на поверхность свода, то форма кривой свода будет другой. Например, при учете бокового давления  $p_0$ , равномерно распределенного (также как и вертикальное давление  $p$  (см. рисунок 10)) по ширине свода, кривая свода получается в виде части



эллипса, симметричной относительно середины щели.

Предложена энергетическая модель исследуемого динамического комплекса (рисунок 1) с учетом возможности возникновения в нем свода СМ (рисунок 11).

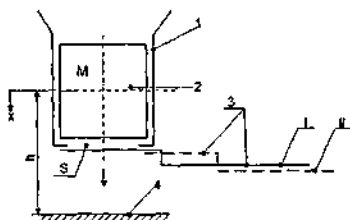


Рисунок 11 – Расчетно-структурная схема бункера хранения и выпуска сыпучего материала в транспортировочную емкость: 1 – бункерное устройство с площадью  $S$  выпускного отверстия; 2 – сыпучий материал с приведенной массой  $M$  и перемещением  $x$ ; 3 – заслонка для перекрытия (положение I) и открытия (положение II) выпускного отверстия бункерного устройства; 4 – поддон транспортировочной емкости для сыпучего материала, опущенный на высоту  $h$  относительно бункерного устройства

Опуская промежуточные выкладки, с учетом приравнивания текущих значений потенциальной  $E_p$  и кинетической энергий  $E_{ки}$ , получены идеализированные уравнения, характеризующие трансформацию этих энергий в процессе  $i$ -выпусков СМ из бункерного устройства:

$$E_{ки} = \left[ \left( M - \sum_{i=1}^n M_i \right) \cdot \frac{\dot{x}_i^2}{2} \cdot A_{E_D} \right] \quad (37)$$

$$\left( M - \sum_{i=1}^n M_i \right) \cdot \left[ g \cdot \left( h - \sum_{i=1}^n x_i \right) - \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_i^2 \cdot A_{E_D} \right] = 0. \quad (38)$$

Здесь  $A_{E_D} = f(E_D)$  – предложенный автором коэффициент диссипации, обуславливающий изменение скорости перемещения выпускаемого из БУ сыпучего материала при росте энергии  $E_D$ , определяемой совокупностью противодействующих сил, характеризуемых коэффициентами трения  $f$ , демпфирования  $d$  и схватывания  $w$ .

Уравнение (38) возможно представить в виде:

$$\dot{x}_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \left( M - \sum_{i=1}^n M_i \right) \cdot g \cdot \left( h - \sum_{i=1}^n x_i \right)}{\left( M - \sum_{i=1}^n M_i \right) \cdot A_{E_D}}}. \quad (39)$$

Значения отдельных составляющих суммы масс  $\sum_{i=1}^n M_i$  в уравнениях (37, 38) можно выразить через сумму произведений отдельных массовых расходов  $Q_i$  на времена  $\tau_i$ , в течение которых производился последовательный выпуск СМ из бункерного устройства:

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot \tau_i) \quad (40)$$

С учетом (40) уравнение (39) примет вид:

$$\dot{x}_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \left( M - \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot \tau_i) \right) \cdot g \cdot \left( h - \sum_{i=1}^n x_i \right)}{\left( M - \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot \tau_i) \right) \cdot A_{E_0}}} \quad (41)$$

Уравнение (41) связывает три важнейших параметра: время  $\tau$ , каждого выпуска дозы СМ, скорость  $\dot{x}$ , истечения дозы СМ при выпуске ее из бункера и массовый расход  $Q$ , СМ в конкретный момент времени  $\tau$ , выпуска дозы СМ из бункера, причем, как отмечалось ранее, решение дифференциального уравнения (41) осуществляется методами численного интегрирования.

Четвертая глава освещает результаты экспериментальных исследований бункера с механическим сводообрушителем селективного действия (рисунок 1), используемые при решении обратной задачи динамики исследуемого бункера (см. главу 3) для определения и варьирования величины сил, действующих на сводообрушающий орган со стороны свода СМ. Отдельные результаты данных исследований представлены на рисунках 12, 13.

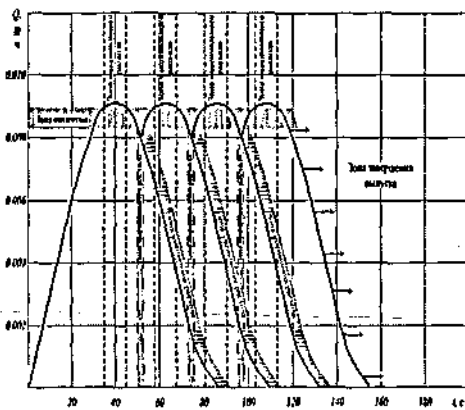


Рисунок 12 – Прогнозируемый режим работы сводообрушителя при ширине щели  $H_{щ} = 0,03$  м (на примере отрубей)

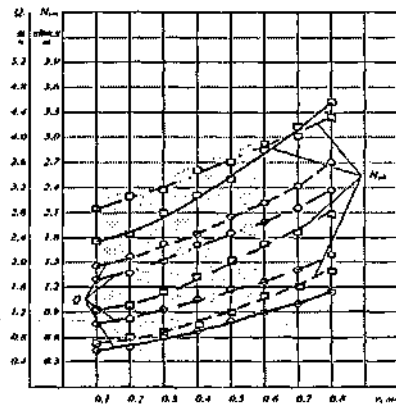


Рисунок 13 – Зависимости производительности  $Q$  и энергоёмкости  $N_{Э}$  от скорости перемещения рабочего органа  $v_{рo}$  при ширине щели  $H_{щ} = 0,01$  м, высоте засыпки  $H_3 = 1$  м; — отруби; - - - комбикорм; ····· мясо-костная мука; ····· мел

Из экспериментов следует, что при заданных конструктивных и эксплуатационных параметрах бункера расчетно-определенные геометрические и динамические параметры его сводообрушающего механизма позволили полностью механизировать процесс выгрузки из него дозированных масс сыпучего материала с допустимыми в эксплуатации равномерностью и точностью при минимальных

энергозатратах на устранение сводов СМ за счет периодического включения в работу сводообрушителя на прогнозируемых (определенных экспериментально) временных интервалах начала зарождения сводов СМ в процессе его хранения и выпуска из бункера.

В пятой главе охарактеризована предложенная методика проведения энергетической оценки выпуска СМ из бункера в емкости мобильных транспортных средств (МТС) с учетом последствий устранения возникших сводообразований. В общем виде энергоёмкость  $Q_{вып}$  выпуска СМ с учётом эпизодических остановок бункерного устройства на период времени, необходимый для устранения возникшего в нём сводообразования, можно представить в виде суммы:

$$Q_{вып} = q_{вз} + q_{мв} + q_{пр} \quad (42)$$

Ниже предлагается ряд соотношений для расчета энергетических слагаемых данного выражения:

1. Материально-энергетические затраты  $q_{вз}$  на бункер с входящими в его состав механизмами и устройствами:

$$q_{вз} = \frac{1}{W_j \left(1 - \frac{\tau_{пр}}{\tau}\right)} \cdot \sum_i M_{БВj} \cdot \frac{(\alpha_i + r_i)}{100 \cdot T_{нi}} \quad (43)$$

где  $W_j$  – производительность  $j$ -го бункерного устройства, т/ч;  $M_{БВj}$  – масса незагруженного бункера с входящими в его состав механизмами и устройствами, т;  $\alpha_i, r_i$  – соответственно, годовые нормативные отчисления по составляющим звеньям бункерного устройства на реновацию и ремонт, %;  $T_{нi}$  – годовая нормативная загрузка бункерного устройства, ч;  $\tau$  – нормативное время бесперебойной выдачи СМ из бункера, ч;  $\tau_{пр}$  – время простоя БУ с момента возникновения до момента устранения сводообразования, ч.

2. Затраты  $q_{мв}$  на МТС, осуществляющие перевозку СМ от места загрузки к потребителю:

$$q_{мв} = \frac{h_j \cdot L_j \cdot \left( M_{БВj} \cdot \Delta M_{БВj}^{пр} \right)}{G_j \cdot \beta_j} \cdot \sum_i M_{Сi} \cdot \frac{(\alpha_i + r_i)}{100} \left. \vphantom{\frac{h_j \cdot L_j \cdot \left( M_{БВj} \cdot \Delta M_{БВj}^{пр} \right)}}{\Delta M_{БВj}^{пр} = W_j \cdot \tau_{пр}} \right\} \quad (44)$$

где  $h_j$  – плечо перевозки груза или отношение максимального перемещения МТС к максимальной массе загруженного СМ при движении МТС без дозаправки топливом, км/т;  $L_j$  – пробег МТС от места погрузки до потребителя, км;  $M_{БВj}$  – масса СМ в полностью загруженном бункерном устройстве, т;  $G_j$  – масса груза (СМ), перевозимого МТС за один рейс, т;  $\beta_j$  – коэффициент использования пробега;  $M_{Сi}$  –

масса незагруженного МТС с входящими в него механизмами и агрегатами, т;  $\alpha'_i$  и  $r'_i$  – соответственно, годовые нормативные отчисления на реновацию и ремонт по составляющим звеньям МТС, %;  $\Delta M_{БС}^{пр}$  – условное приращение массы СМ в бункере (потерянная производственная мощность бункерного устройства) за время его простоя  $t_{пр}$ .

3. Расчет затрат  $q_{жт}$  живого труда может быть осуществлен по зависимости:

$$q_{жт} = \sum_{i=1}^{i_{пр}} \frac{(N_{jt} \cdot W_{jt} + N_{пр} \cdot W_{пр})}{W_j}, \quad (45)$$

где  $N_{jt}$  – число работников, занятых на  $t$  – категории работ;  $W_{jt}$  – производительность труда отдельно взятого работника на каждой из  $t$  – категории работ, т/ч;  $t$ ,  $N_{jt}$  – соответственно, категории работ и нормативное количество работников при бесперебойном функционировании бункерного устройства с запланированной производительностью труда  $W_{jt}$  при нормативной величине параметра  $W_j$ ;  $t_{пр}$ ,  $N_{пр}$  – соответственно, дополнительно потребные категории работ и количество работников с прогнозируемой производительностью труда  $W_{пр}$ , потребные в период времени  $t_{пр}$  простоя бункерного устройства для устранения в нем возникшего сводообразования и возобновления его бесперебойной работы.

С учетом соотношений (43), (44) и (45) соотношение (42) примет вид:

$$Q_{жт} = \frac{1}{W_j \left(1 - \frac{t_{пр}}{T}\right)} \cdot \sum_i M_{БС} \cdot \frac{(\alpha_i + r_i) \cdot h_j \cdot L_j \cdot (M_{БС} + W_j \cdot t_{пр})}{100 T_{жт}} \cdot \sum_i M_{С} \cdot \frac{(\alpha'_i + r'_i)}{100} + \sum_{i=1}^{i_{пр}} \frac{(N_{jt} \cdot W_{jt} + N_{пр} \cdot W_{пр})}{W_j}. \quad (46)$$

Охарактеризованные соотношения позволяют определить энергозатраты на обеспечение заданных режимов функционирования бункерных устройств, включая технологические перерывы в их работе для устранения возникших сводообразований СМ с конкретными физико-механическими свойствами.

Разработана методика оценки технического уровня вышеуказанных устройств на примере авторской разработки переносного механического сводообрушителя с первичным и вторичным сводообрушающими элементами (рисунок 14), где для оценки технического уровня данной конструкции предложен коэффициент  $K_{вт}$ :

$$K_{вт} = 1 - \frac{D_{ПСЭ} \cdot \zeta_{ПСЭ}}{D_{ВСЭ} \cdot \zeta_{ВСЭ}}, \quad (47)$$

где  $D_{ПСЭ}$ ,  $\zeta_{ПСЭ}$  – соответственно, наружный диаметр и коэффициент подобия линейно-объемных параметров первичного сводообрушающего элемента;  $D_{ВСЭ}$ ,  $\zeta_{ВСЭ}$  – соответственно, наружный максимальный диаметр и коэффициент подобия линейно-объемных параметров вторичного сводообрушающего элемента.

Математические преобразования позволяют получить окончательное выражение для  $K_{BM}$  (при соотношении объема слежавшегося СМ в возникшем сводообразовании  $V_{свод}$  к полезному объему бункера  $V_{B\Gamma}$ , полностью загруженного СМ как  $V_{свод} \leq 0,1 \cdot V_{B\Gamma}$ ):

$$K_{BM} = 1 - \frac{D_{BCЭ}^3 \cdot L_{мин(BCЭ)}}{(D_{BCЭ}^{мин})^3 \cdot L_{мин(BCЭ)}} \quad (48)$$

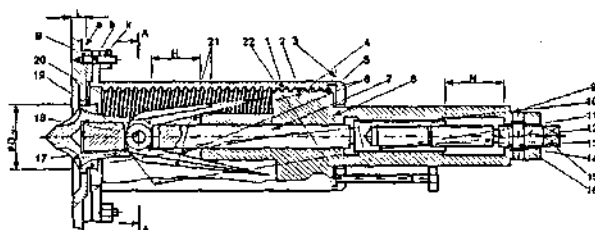


Рисунок 14 – Ръльавно-«елочный» переносной сводообрушитель СМ в бункере: (патент России № 2420363)

1 – корпус; 2 – внутренняя трапециевидная резьба в корпусе 1; 3 – упорная поверхность в корпусе 1; 4 – приводной механизм вращательного действия на базе трапециевидальной резьбы 5; 6 – осевой паз; 7, 8 – упорные поверхности в приводе 4; 9 – место под ключ для вращения привода 4; 10 – двусторонние лопасти привода 4, образующие первичный сводообрушительный элемент; 11 – упорная поверхность паза 6; 12 – шлицевой шток; 13 – внутренняя резьба штока 12; 14 – регулирующий шток с квадратной головкой 15 под ключ; 16 – ось вращения штока 14 в виде цилиндрического штифта; 17 – осевой паз в штоке 12; 18 – цилиндрический штифт (штифт); 19, 20 – рычажные звенья, образующие вторичный сводообрушительный элемент; 21 – лезвие подобия поверхности зенки; 19, 20; 22 – резьбовой фиксатор ограничения рабочего хода привода 4 вправо В – фиксация бункерного устройства с упорным торцом а, стыкуемый с корпусом 1 по штифтам в гайках к

В шестой главе охарактеризованы предложенные сводная и детализированные классификационные схемы способов и механизмов разрушения сводов СМ, включающие более 30 оригинальных авторских научных идей и патентозащищенных конструктивных решений высокоэффективных по функциональной надежности и динамическому качеству механизмов предупреждения и устранения сводообразований в бункерных устройствах различной физической природы, ряд из которых представлен на рисунках 15-20.

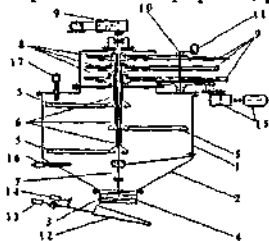


Рисунок 15 - Бункерный дозатор для сыпучих грузов (Патент России № 2282158)

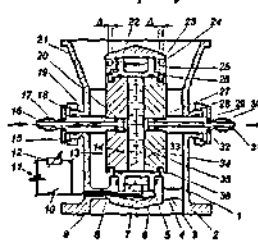


Рисунок 16 – Структурная схема магнитожидкостного сводообрушителя, размещаемого по центру бункера (Патент России № 2407689)

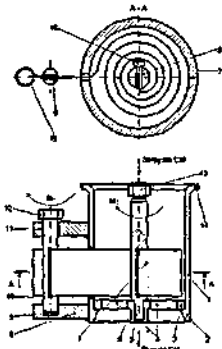


Рисунок 17 – Ручной спиралевидный обрушитель сводообразований сыпучих материалов в бункере (Патент на полезную модель № 87147)

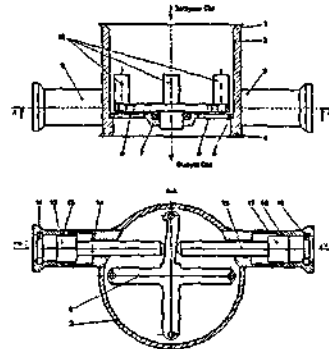


Рисунок 18 – «Пальчиковый» разрушитель сводообразований сыпучего материала в бункерном устройстве с пневмоуправлением (Патент России №2402473)

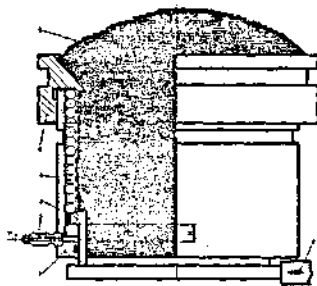


Рисунок 19 – Пружинно-поршневой механизм устранения сводообразований сыпучих материалов в бункере (Патент России № 2409508)

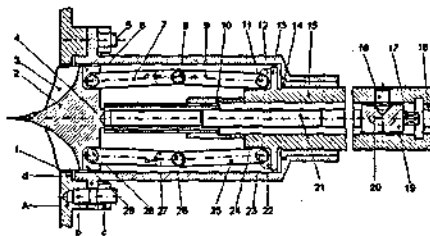


Рисунок 20 – Рычажно-«зонтиковый» переносной сводообрушитель слежавшегося сыпучего материала в бункерном устройстве (Патент России № 2404866)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена научная проблема развития научных основ и создания инструментальных средств проектирования высокоэффективных по функциональной надежности и динамическому качеству механизмов предупреждения и устранения сводообразований в бункерных устройствах для обеспечения бесперебойного выпуска из них сыпучего материала фиксированной массы в транспортировочные емкости мобильных транспортных средств, имеющая важное хозяйственное значение для качественного функционирования терминально-складских комплексов России.

В ходе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. На базе выявленных приоритетных направлений повышения динамического качества и функциональной надежности механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ в бункерных устройствах предложена четырехпараметрическая модель СМ, учитывающая влияние силы схватывания отдельных частиц и слоёв материала на процесс и параметры сводообразования в бункере с фиксированной массой СМ, при назначении энерговооруженности сводообрушающего механизма.

2. Разработана математическая модель динамического комплекса «Бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм», повышающая достоверность исследования физических процессов сводообразования СМ и точность расчета динамических параметров комплекса путем учета влияния параметров сводообразования СМ фиксированной массы на энерговооруженность сводообрушающего механизма.

3. Разработаны научно и методически обоснованные рекомендации и расчётные соотношения по количественной оценке влияния пределов изменения эксплуатационных параметров бункера и свойств СМ на процесс сводообразования для назначения величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат на устранение сводов СМ.

4. В ходе натурного и вычислительного экспериментов по исследованию динамического качества комплекса «Бункер сыпучего материала – сводообрушающий механизм» получены новые результаты, учитывающие процесс формирования и параметры сводов СМ в бункере, обуславливающие потребные энергозатраты на их устранение.

5. Предложены показатели оценки конструкторско-технологических и технико-эксплуатационных возможностей сводообрушающих устройств с энергетической и эргономической точек зрения, составляющие основу разработанных:

- энергетической модели выпуска СМ из бункера при периодическом заборе из него фиксированных по массе порций СМ с математическим обоснованием условий бесперебойного истечения и условий возникновения сводов СМ;

- методики расчёта энергоёмкости выпуска СМ из бункера в ёмкости мобильных транспортных средств с учётом остановок на технологические перерывы для устранения возникших сводообразований;

- методики оценки пропускной способности бункера в условиях многофакторного эксперимента на примере расчёта реального бункера с механическим сводообрушителем;

- методики оценки технического уровня разнотипных конструкций переносных механических сводообрушителей для рационального выбора

конкретной конструкции под реальный бункер с заданными вместимостью и параметрами СМ на примере рычажно - «елочного» сводообрушителя.

6. Разработаны сводная и детализированные классификационные схемы различных по физической природе способов и механизмов предупреждения и устранения сводообразований СМ, построенные на базе иерархического подхода с учетом оригинальных авторских технических решений.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рецензируемых научных изданиях, определенных Перечнем ВАК РОССИИ:

1. Варламов, А.В. К вопросу использования нового щелевого бункера-разгрузчика для трудносъёмных материалов [Текст] / А.В. Варламов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук: Специальный выпуск «Транспортно-технологические системы». – Самара: СНИЦ РАН, 2005. – С. 92 – 101.

2. Варламов, А.В. Проблемы хранения и выпуска трудносъёмных грузов из прирельсовых бункерных складов [Текст] / А.В. Варламов, В.В. Головин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук: Специальный выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». – Самара: СНИЦ РАН, 2007. – С. 182 – 185.

3. Варламов, А.В. Переносной механический сводообрушитель сыпучего материала в бункере с параллельно переставляемой осью вращения рабочего органа [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, вып. 1, 2009. – С. 87 – 90.

4. Варламов, А.В. Конструкция и критериальная оценка технического уровня рычажно – «елочного» переносного сводообрушителя сыпучего материала в бункерном устройстве [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, вып. 1, 2009. – С. 91 – 97.

5. Варламов, А.В. Энергетическая оценка технологии выпуска сыпучего материала из бункерного устройства в емкости мобильных транспортных средств с учетом последствий сводообразования [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, Л.С. Ушаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ, № 5, 2009. – С. 3 – 6.

6. Варламов, А.В. Использование магнитожидкостных механизмов для предупреждения и разрушения сводообразований в бункерах хранения и выпуска плохосъёмных материалов [Текст] / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова, О.П. Мулюкин и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ, № 6, 2009. – С. 3 – 9.

7. Варламов, А.В. Исходные предпосылки к составлению динамической модели «сводообразование сыпучего материала бункерного устройства - сводообрушитель» [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, вып. 5 (17), том 1, 2009. – С. 118 - 120.

8. Варламов, А.В. Исследование динамических процессов истечения сыпучих материалов из бункерных устройств на базе их реологических моделей [Текст] / А.В. Варламов // Вестник



Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара : СамГУПС, вып. 6 (18), том 2, 2009. – С. 129-132.

9. Варламов, А.В. Четырёхпараметрическая динамическая модель твердой породы и сводообразования сыпучего материала при дроблении ударно-скалывающим исполнительным механизмом [Текст] / Л.С. Ушаков, О.П. Мулюкин, А.В. Варламов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: СНЦ РАН, т. 13, № 4, 2011. – С. 225-230.

10. Варламов, А.В. Приложение принципов консолидации порошковой металлургии к процессам сводообразования сыпучих материалов и их разрушения. [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, № 4, 2010. – С. 166–172.

11. Варламов, А.В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «бункерное устройство с сыпучим материалом-сводообразование-механизм разрушения сводообразования» [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, № 2(12), 2011. – С. 79–89.

12. Варламов, А.В. Исходные предпосылки и особенности составления уравнения динамики вращательного действия электромеханического разрушителя сводообразования с рабочим органом в виде лопастного ножа [Текст] / О.П. Мулюкин, А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, № 3(13), 2011. – С. 78–86.

13. Варламов, А.В. Разработка обобщенной математической модели динамической системы «бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование – механизм разрушения сводообразования» [Текст] / О.П. Мулюкин, А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, № 3(13), 2011. – С. 86–91.

14. Варламов, А.В. Усовершенствование и систематизация методов расчёта технико-экономических показателей сводообразующих, питающих и других механизмов перемещения сыпучих материалов в бункерных устройствах [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Самара: СамГУПС, № 4(14), 2011. – С. 42–51.

15. Варламов, А.В. Методика расчета и варьирования пределов показателей динамического качества системы «бункер сыпучего материала - сводообразующий механизм» [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет – УНПК, №1 (291), 2012. – С. 10–17.

16. Варламов, А.В. Ориентировочный расчет силы схватывания отдельных частиц и слоев фиксированной массы сыпучего материала в бункере для выбора усилия сводообразующего механизма [Текст] / А.В. Варламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет – УНПК, № 2(292), 2012. – С. 7–15.

#### Другие издания:

17. Варламов, А.В. Теория и практика применения шелевых бункеров на железнодорожном транспорте и в агропромышленном комплексе: Монография [Текст] / В.И. Варгунин, В.С. Горюшинский, А.В. Варламов и др. // Самарский научный центр РАН; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара: СНЦ РАН, СамГУПС, 2007. – 107 с.

18. Варламов, А.В. Бестружбинная предохранительно регулирующая пневмогидроарматура с магнитными твердотельными жидкостными исполнительными органами: Монография [Текст] / О.Е. Лаврусь, О.П. Мулюкин, А.В. Варламов // Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара: СамГУПС, 2008. – 91 с.

19. Варламов, А.В. Конструкция и динамика механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: Монография [Текст] / А.В. Варламов // Самарский научный центр РАН ; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара: СНЦ РАН, СамГУПС, 2010. – 231 с.

20. Варламов, А.В. К методике определения уплотнения сыпучих грузов в бункерах [Текст] / Г.М. Третьяков, И.В. Горюшинский, А.В. Варламов / Межвузовский сборник научных трудов «Взаимодействие института и предприятий транспорта в области подготовки специалистов и научных исследований». – Самара: СамИИТ, вып. 12, 1997. – С. 25 – 26.

21. Варламов, А.В. Классификация и анализ устройств для разрушения сводов сыпучих материалов в бункерных устройствах [Текст] / А.В. Варламов / Межвузовский сборник научных трудов «Механизация и автоматизация технологических процессов на транспорте и в агропромышленном комплексе». – Самара: СамИИТ, вып. 16, 1998. – С. 97 – 104.

22. Варламов, А.В. К вопросу сводообразования и методах борьбы с ним [Текст] / А.В. Варламов / Материалы межвузовской научно-практической конференции, посвященной 25-летию института. – Самара: СамИИТ, 1998. – С. 150 – 151.

23. Варламов, А.В. Исследование бункера с донным щелевым отверстием на выпуске компонентов комбикорма [Текст] / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, А.В. Варламов и др. // Хранение и переработка сельхозсырья, № 6. – М., 1999. – С. 33 – 37.

24. Варламов, А.В. К расчету времени сводообразования и скорости истечения [Текст] / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова / Межвузовский сборник научных трудов «Вопросы научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте и в агропромышленном комплексе». – Самара: СамИИТ, ОАО «Промжелдортранс», СГАУ им. Н.И. Вавилова, вып. 18, ч. 2, 1999. – С. 10 – 13.

25. Варламов, А.В. Бункер с донными щелевыми отверстиями для зернохранилищ [Текст] / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, А.В. Варламов / Сборник научных трудов «Совершенствование конструкций и технологии использования сельскохозяйственной техники». – Самара: СГСХА, 1999. – С. 133 – 136.

26. Варламов, А.В. К расчету пропускной способности бункера с донным щелевым отверстием и энергоемкости механического сводообразующего устройства. [Текст] / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова / Сборник научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых СамИИТа, вып. 2. – Самара: СамИИТ, 1999. – С. 21 – 22.

27. Варламов, А.В. Повышение эффективности переработки зерновых грузов [Текст] / В.И. Варгузин, В.С. Горюшинский, А.В. Варламов // Железнодорожный транспорт, № 11. – М., 2000. – С. 47 – 50.

28. Варламов, А.В. Повышение эффективности погрузочно-разгрузочных работ с зерновыми грузами [Текст] / А.В. Варламов, И.В. Горюшинский, Н.Х. Варламова / Труды II Международной отраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития

железнодорожного транспорта и роль молодых ученых в их решении» – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2000. – С. 115–117.

29. Варламов, А.В. Бункер-разгрузчик для трудносыпучих компонентов комбикорма [Текст] / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшпнский, А.В. Варламов и др. // Хранение и переработка сельхозсырья, №4. - М.: 2000. – С 45 – 47.

30. Варламов, А.В. Проблемы выпуска сыпучих грузов из прирельсовых бункеров как фактор экологической безопасности [Текст] / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова / Труды III международной научно-практической конференции «Безопасность транспортных систем». – Самара: МАНЭБ, 2002. – С. 69 – 70.

31. Варламов, А.В. Параметрическая модель функционирования емкостей прирельсовых складов бункерного типа для зерновых грузов [Текст] / А.В. Варламов, Н.Н. Мазыко / Материалы международной научно-технической конференции «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России». – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 300 – 301.

32. Варламов, А.В. К вопросу борьбы с сегрегацией многокомпонентных сыпучих смесей перед отпуском в подвижной состав [Текст] / А.В. Варламов, В.В. Головин / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2006». – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2006. – С. 173 – 175.

33. Варламов, А.В. Определение характеристик сыпучего материала в бункерах с донными целевыми отверстиями [Текст] / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова / Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения». – Самара: СамГУПС, ОрелГТУ, 2007. – С. 12 – 14.

34. Варламов, А.В. Магнитокаждостный механизм предотвращения и разрушения сводообразований в бункерах хранения и выпуска трудносыпучих материалов [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, О.Е. Лаврусъ / Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти проф. Л.И. Кошкина «Перспективные инновации в науке и образовании». – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 19 – 23.

35. Варламов, А.В. Пружинно-поршневой механизм устранения сводообразований сыпучих материалов в бункере [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин / Материалы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». – Тула: ТПУ им. Л.Н. Толстого, 2008. – С. 141 – 145.

36. Варламов, А.В. Перспективные конструкции бункерных сводообрушителей для сыпучих материалов на базе сильфонно-пневматического приводного устройства [Текст] / А.В. Варламов / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 352 – 354.

37. Варламов, А.В. Устранение сводообразований сыпучего материала перепрофилированием специально организованных участков бункера с минимальной площадью проходного сечения [Текст] / А.В. Варламов / Материалы Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту». – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 233-234.

38. Варламов, А.В. Устранение сводообразований сыпучего материала перемещением части его объема в дополнительную раздаточную емкость бункера [Текст] / О.П. Мулюкин, А.В.

2012 г.  
10541 12 - 10541

Варламов, Н.Х. Варламова / Сборник научных трудов Института управления и экономики «Управление. Логистика. Экономика», 4-й выпуск – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 181 – 184.

39. Варламов, А.В. Ориентировочный расчет производительности подачи сыпучего материала шнековым механизмом сводообрушителя бункерного устройства во внебункерную емкость [Текст] / А.В. Варламов / Сборник научных трудов Института управления и экономики «Управление. Логистика. Экономика», 4-й выпуск – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 186 – 188.

40. Варламов, А.В. Зоны возникновения зависаний и сводообразований сыпучих материалов в бункерных устройствах и подходы к их устранению [Текст] / А.В. Варламов / Материалы VI Всероссийской дистанционной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара: СамГУПС, 2010. – С. 82 – 85.

41. Варламов, А.В. «Пальчиковый» разрушитель сводообразований сыпучих материалов в бункерном устройстве с пневмоприводом [Текст] / А.В. Варламов / Материалы VI Всероссийской дистанционной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса». – Самара: СамГУПС, 2010. – С. 150 – 151.

42. Патент 2145303 России МКИ В 65 G 3/04, В65 D 88/54 / Бункер для сыпучих материалов. Горюшкинский В.С., Варгуниа В.И., Варламов А.В. и др. // Заявлено 10.01.98, опубл. 10.02.00. Бюл. №4.

43. Патент 2769688 России МКИ В65 D88/64/Бункер для сыпучих материалов. Третьяков Г.М. Горюшкинский В.С., Варламов А.В. и др. // Заявлено 18.04.00, опубл. 27.06.01. Бюл. №18.

44. Патент 2282158 России. Бункерный дозатор для сыпучих грузов / В.С. Горюшкинский, А.В. Варламов, В.В. Головин // Б.И. – 2006. – № 23.

45. Патент на полезную модель №87147. Бункер для сыпучих материалов / О.П. Мулюкин, А.В. Варламов, И.Р. Андрианова // Заявлено 27.01.2009, опубл. 27.09.2009. Бюл. №27.

46. Патент 2402473 России. Сводоразрушитель-очиститель бункера насыпных грузов / А.В. Варламов, В.И. Варгуниа, В.В. Головин, Н.Х. Варламова // Заявлено 03.08.2009, опубл. 27.10.10. Бюл. №30.

47. Патент 2407689 России. Бункерное устройство / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, И.Р. Андрианова, Н.Х. Варламова // Заявлено 02.11.2010, опубл. 27.12.2010, Бюл. № 35.

48. Патент 2404866 России. Переносной сводоразрушитель-очиститель / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, Н.Н. Мазько // Заявлено 12.08.2009, опубл. 27.11.2010 г. Бюл. № 33.

49. Патент 2409508 России. Бункер для сыпучих материалов / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, И.Р. Андрианова // Заявлено 22.06.2009, опубл. 20.01.2011. Бюл. №2.

50. Патент 2420363 России. Переносной сводоразрушитель-очиститель / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин, Н.Н. Мазько, Н.Х. Варламова // Заявлено 09.11.2009, опубл. 10.06.2011 г. Бюл. № 16.

Подписано к печати 5 апреля 2012 г. Формат 60× 84/16

Объем 2.0 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1059

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.