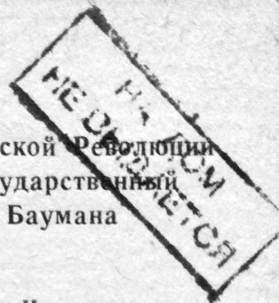


М 85499



Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

УДК 621.86.063.2:621.869.76

СЛЮСАРЕВ Анатолий Сидорович

**РАЗРАБОТКА ОСНОВ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН,
ПОДВЕРГАЮЩИХ СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ
ОБЪЕМНОМУ СЖАТИЮ**

Специальности: 05.05.05 — подъемно-транспортные машины
05.05.04 — дорожные и строительные машины

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва

1991

58.51.39

Работа выполнена в Нижегородском институте инженеров
водного транспорта.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Брауде В. И.,

доктор технических наук, профессор Зенков Р. Л.,

доктор технических наук, профессор Недорезов И. А.

Ведущее предприятие — научно-производственное объедине-
ние «Речпорт».

Защита состоится
на заседании специ
Государственном те
мана по адресу: 107

час.

С диссертацией м
ситета.

Отзывы в 2-х э
выслать по указан

Автореферат ра

Ученый сек
специализирован
кандидат техн
доцен

МР5499



1085499

Слюсарев А.С. Разработка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сыпучие материалы широко используются в сельском хозяйстве, строительной, химической, пищевой, металлургической и энергетической промышленности. Количество сыпучих грузов составляет более 60% всех грузов, перемещаемых в стране. Только речной транспорт Российской Федерации ежегодно перемещает около 500 миллионов тонн сыпучих материалов. На территории Советского Союза существуют сформировавшиеся, постоянно действующие грузопотоки сыпучих материалов, стабильность которых обеспечивается безперебойной работой транспорта и подъемно-транспортных машин (ПТМ).

66798W

Работоспособность ПТМ зависит, в первую очередь, от надежности рабочих органов, осуществляющих захват и перемещение материала. Для теоретического анализа и расчетов проектируемых рабочих органов в настоящее время применяют основные положения и математический аппарат теории предельного равновесия сыпучих материалов. Теория, наиболее полно представленная в работах отечественных ученых В.В.Соколовского, Г.А.Гениева, А.Ю.Ишлинского, Р.С.Григоряна, В.Г.Березанцева, С.С.Голушкевича, Н.А.Цитовича, Р.Л.Зенкова, Г.Н.Клейна, рассматривает сыпучий материал, как сплошное тело, которое при достижении сжимающих напряжений предельного значения начинает деформироваться - сдвигаться монолитными призмами или "телами выпирания" по плоскостям скольжения, совпадающими с максимальными касательными напряжениями. При этом физико-механические характеристики тела (насыпная плотность, угол естественного откоса, коэффициенты внутреннего и внешнего трения и т.д.) остаются постоянными величинами.

О несоответствии положений теории предельного равновесия сыпучих материалов реальным процессам, происходящим в рабочих органах и питателях, указывал Э.В.Дженике (1963 г.): "Свойства сыпучего материала зависят от физико-механических характеристик, меняющихся под действием уплотняющего давления, которому подвергается сыпучий материал, соприкасаясь с поверхностями питателей (шнекового, тарельчатого и т.д.). При этом создаются большие нормальные силы трения в питателях, от которых, в

первую очередь, зависит расход энергии и износ последнего". Даже незначительное увеличение плотности сыпучих материалов от 0,55 до 0,67 (зерновые) ведет к резкому увеличению коэффициента внутреннего трения от 0,404 до 1,070.

Деформации сыпучего материала в грейфере описываются Б.А. Таубером как "процессы со сложными объемными деформациями. Два потока материала, движущихся навстречу друг другу, взаимодействуют и, по мере смыкания челюстей, сжимаются, перемещаясь по оси грейфера в вертикальном направлении. Это перемещение вызывает дополнительное уплотнение нижних слоев материала и движение вниз к днищу, а также падение давления в верхних слоях материала и перемещение их вверх". Несоответствие между физическими процессами деформирования в рабочих органах ПТМ и применяемыми методами расчета привело к необходимости введения поправочного коэффициента уплотнения $-k_y$ (Р.Л. Зенков, 1964 г.). В настоящее время коэффициент уплотнения введен в ГОСТ 24599-81 "Грейферы канатные для навалочных грузов" для I40 грузов и меняется от 1,10 до 1,35.

Глубокий анализ объемно-напряженного состояния сыпучего материала с целью определения распределенных нагрузок на металлоконструкцию, формирование свободной поверхности груза в рабочем органе, деформации сыпучего материала в особых случаях (смерзшийся или частично смерзшийся, а также водонасыщенный сыпучий материал) с позиции теории предельного равновесия невозможен.

Ц е л ь ю р а б о т ы является создание теории деформации сыпучего материала в рабочих органах ПТМ, подвергающих материал объемному сжатию, позволяющей для исследуемого материала указать комплекс характеристик, однозначно определяющих объемно-напряженное состояние материала в процессе его деформирования. Определение зависимости данных характеристик от физического состояния материала: плотности, гранулометрического состава, влажности, температуры. Разработка теории расчета рабочих органов ПТМ для определения действующих нагрузок и энергетических затрат, а также методов воздействия на структуру сыпучего материала с целью уменьшения этих затрат.

М е т о д о л о г и я и с с л е д о в а н и я. В работе использованы аналитические методы исследования физических

и математических моделей дискретных сред, механики объемной реологии дисперсных структур и их физического и математического моделирования. Теоретические исследования рабочих органов выполнены на базе математических моделей, описывающих деформирование материала в рабочих органах при различных технологических условиях нагружения.

Экспериментальные исследования проводились в эксплуатационных, полевых и лабораторных условиях с использованием специально разработанных установок, приборов и методов исследования на натурных образцах машин, рабочих органах и на моделях. Использовались методы планирования эксперимента, физического моделирования, статистической обработки результатов.

Научная идея работы заключается в аналитическом методе определения нагрузок, как реакций от перемещения рабочих органов в среде с переменной плотностью. При этом поля давлений определяются переходными функциями по известным безразмерным характеристикам сыпучего материала: модулю уплотняемости и коэффициенту бокового давления. Физический смысл безразмерных характеристик отражает явления в контактах элементов дискретной среды (сыпучего материала) при ее деформировании. Модуль уплотняемости — упругое и пластическое деформирование в контакте; коэффициент бокового давления — структурные изменения дискретной среды.

Научная новизна. В работе разработан ряд принципиально новых теоретических положений:

дискретная физическая модель, адекватно отражающая физические свойства сыпучего материала, гранулометрию, структурное образование и физические свойства дискретного элемента материала;

контактная теория уплотнения сыпучих материалов, раскрывающая физический смысл модуля уплотняемости и коэффициента бокового давления;

определение объемно-напряженного состояния сыпучего материала в рабочих органах ПТМ при помощи безразмерных характеристик: модуля уплотняемости, коэффициента бокового давления и коэффициента трения, зависящих от физических аргументов сыпучего материала;

теоретическое обоснование изменения безразмерных характеристик сыпучего материала при вибродействии, приводящее к уменьшению энергозатрат в определенном диапазоне критерия Струхала;

теория уплотнения водонасыщенных материалов и реологическая модель для исследования релаксационных процессов при уплотнении сыпучего материала в жесткой матрице;

теория силового расчета рейферных механизмов, позволяющая определить действующие сопротивления зачерпыванию, их "вес", индикаторный к.п.д., эффективность применения вибрации и разработать конструкции рейферов для особых случаев (смерзшийся сыпучий материал, водонасыщенный сыпучий материал);

теория силового расчета винтовых уплотняющих питателей при различном конструктивном исполнении, позволяющая оценить эффективность различных методов воздействия на пластическое деформирование (вибровоздействие, тепловоздействие) и разработать метод автоматического регулирования процесса.

Новизна технических решений и методов исследования защищена 16 авторскими свидетельствами на изобретения, внедренными в экспериментальной технике и подъемно-транспортном машиностроении.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь. Использование полученных в диссертации результатов дает возможность:

провести на стадии проектирования полный анализ нагружения металлоконструкции рабочих органов ПТМ при различных технологических условиях (род груза, влажность, температура), что в итоге приведет к повышению надежности и снижению металлоемкости;

применить для особых условий перегрузки сыпучих материалов (смерзшийся и слежавшийся материалы) принципиально новые рейферы г-ной конструкции с аккумулятором энергии, имеющие повышенную работоспособность и надежность;

применять для зачерпывания сыпучих материалов под водой специальные рейферы, исключаящие явления "присоса", с автоматическим управлением и регулированием в системе "привод - рейфер", уменьшающим пиковые нагрузки и повышающим надежность привода ПТМ;

применять специальные "герметичные" рейферы, исключаящие

пылевые выбросы при зачерпывании пылящих сыпучих материалов, применение которых совместно с устройством "грейфер - бункер" сокращают потери груза до 90%, что обеспечивает экологическую защиту при перегрузочных процессах;

применять винтовые питатели, повышающие плотность сыпучих материалов при загрузке в транспорт и уменьшающие пылевые выбросы при работе с пылящими материалами.

Внедрение и реализация. Разработанная теория расчета рабочих органов ПТМ внедрена в РТМ 212.0133-85 "Трейферы двухчелюстные канатные общего назначения для портовых кранов. Методы расчета при проектировании". Экономический годовой эффект от внедрения РТМ в ЦКБ МРФ составил 60,5 тыс.руб. РТМ передана в 30 организаций Росречфлота.

Грейферы-рыхлители для перегрузки смерзшихся сыпучих материалов внедрены в речных портах Российской Федерации. Экономический годовой эффект от внедрения одного грейфера-рыхлителя составил 8,8 тыс.руб. Ежегодная потребность Росречфлота в грейферах для смерзшихся материалов - 400 штук.

Герметичные грейферы для перегрузки пылящих сыпучих грузов серийно выпускаются заводом ЦКБ МРФ. Годовой экономический эффект от внедрения одного грейфера в Красноярском порту составил 52 тыс.руб. Экономический эффект от внедрения герметичного грейфера с пылеподавляющим устройством "грейфер-бункер" составил 160 тыс.руб. при грузообороте 260 тыс.т комовой серы в год. Годовой экономический эффект от внедрения в Астраханском порту перегрузочного комплекса для апатита составил 324 тыс.руб.

Новые конструкции грейферов и методы повышения их работоспособности защищены авторскими свидетельствами и отражены в НИР кафедры ПТМ и РТ ГИИВТ. "Исследовать надежность грейферов и разработать методы ее повышения" (1978...1986 гг.). Суммарный экономический эффект от внедрения результатов работ составил один миллион рублей.

Винтовые питатели с переменным шагом внедрены в рабочих проектах грейферно-бункерных установок для перегрузки апатита в Астраханском и Пермском портах.

Разработана серия уплотняющих снегопогрузочных машин с

двухвинтовым уплотняющим питателем и системой автоматического регулирования (СУБМ-ГПИ-73А; СУБМ-ГПИ-73В; СУБМ-ГПИ-73Б; СУБМ-ГПИ-97В). Машины внедрены в Горьковском и Московском коммунальных хозяйствах. Экономический эффект от внедрения одной машины составил 3,422 тыс. руб.

Экспериментальные стенды, датчики давления и устройство для определения коэффициентов внешнего трения сыпучих материалов при переменных давлениях и плотности материала внедрены в Нижегородском политехническом институте, Нижегородском институте водного транспорта в учебных пособиях по специальности 05.05.05 "Лабораторные работы по курсу основы научных исследований".

Мембранные датчики давления с широким диапазоном регистрации внедрены в дизелестроительной промышленности (завод им. С.М.Кирова) для исследования газодинамических процессов.

Серия герметичных грейферов и машин для перегрузки пылящих взрывоопасных материалов награждена серебряной медалью ВДНХ СССР.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Основные положения работы доложены и обсуждены: на научных конференциях ГИИВТА (1975...1987 гг.); Всесоюзной конференции "Новое в подъемно-транспортной технике" (Горький, 1980 г.); IV Всесоюзной конференции "Комплексная механизация и автоматизация переместительных операций в лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности" (Москва, 1984 г.); Всесоюзной конференции "Новое в подъемно-транспортной технике", посвященной 60-летию кафедры ПТМ МВТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1985 г.); НТС Ленгипроречтранс (Ленинград, 1982 г.); НТС МРФ РСФСР (Москва, 1984 г.) и НТС МРФ РСФСР (Москва, 1986 г.). Работа докладывалась в ведущих проектных организациях НПО "Речпорт" Ленгипроречтранс, Гипроречтранс и ЦКБ МРФ.

Работа докладывалась и получила одобрение на кафедрах ПТМ МВТУ (1986 г.), СДМ ГПИ (1989 г.), ТКМ МЛТИ (1990 г.) и СДМ МИСИ (1991 г.).

Основные научные результаты опубликованы в 41 печатной работе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В области механики сыпучих тел – дискретная физическая модель сыпучего материала, адекватно отражающая процесс деформации материала в рабочих органах ПТМ. Контактная теория уплотнения, определяющая объемно-напряженное состояние сыпучего материала в жесткой матрице посредством комплекса безразмерных характеристик и зависимости данных характеристик от физических аргументов (гранулометрии, плотности и температуры). Закономерности изменения безразмерных характеристик и энергетики процесса уплотнения при вибровоздействии и изменении фазности сыпучего материала (наличие капиллярной воды). Реологическая модель для условий деформации сыпучего материала.

2. В области теории расчета рабочих органов ПТМ, подвергающих сыпучие материалы объемному сжатию, метод определения распределенных нагрузок на рабочие органы, как следствие их перемещения в среде с переменной плотностью.

3. В области теории грейферных механизмов, раскрытие физической сущности деформации сыпучего материала в грейфере и, как следствие этого, построение математической модели нагружения челюстей грейфера. Теория взаимодействия челюстей грейфера со смерзшимся сыпучим материалом, при вибровоздействии и зачерпывании водонасыщенного сыпучего материала.

4. Теория расчета винтовых уплотняющих питателей при их различном конструктивном исполнении.

5. В области научно-технических разработок – принципиально новые конструкции грейферных механизмов и их приводов, позволяющих получить новое качество при работе в особых условиях (смерзшийся материал, пылящий материал и водонасыщенный материал). Винтовые уплотняющие питатели с автоматическими системами управления, камерами уплотнения.

6. В области научно-методических разработок: аппаратура и метод определения физико-механических и реологических свойств сыпучих материалов при различных технологических условиях уплотнения.

Объем и структура работ. Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение и выводы, прило-

жение, 85 рисунков, 35 таблиц, изложена на 300 страницах, список литературы содержит 151 наименование.

Первая, вторая и третья главы посвящены разработке физической дискретной модели сыпучего материала, контактной теории уплотнения сыпучего материала, теории виброуплотнения, уплотнения водонасыщенных материалов и экспериментальным исследованиям.

В четвертой главе на основании контактной теории уплотнения разработаны метод силового расчета рабочих органов, теория расчета грейфера, особенности расчета и конструирования грейферов для смерзшихся и водонасыщенных материалов, исследованы вибровоздействия на процессе зачерпывания.

В пятой главе разработана теория силового расчета винтовых питателей, даны рекомендации по их конструированию.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Физическая модель сыпучего материала

Основная идея, заложенная в теорию деформирования сыпучих материалов и рабочих органах ПТМ заключается в определении объемно-напряженного состояния материала при помощи безразмерных характеристик: ξ — модуля уплотняемости, ζ — коэффициента бокового давления и μ — коэффициента внешнего трения. Данные физико-механические характеристики являются для сыпучего материала показателями, отображающими физический процесс пластического деформирования в жесткой матрице. Поэтому для любого рабочего органа, подвергающего сыпучий материал объемному сжатию, можно указать направление обобщенных координат, относительно которых определится тензор

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \xi \sigma & \mu \xi \sigma & 0 \\ \mu \xi \sigma & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} r \\ x \\ \varphi \end{matrix}, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент бокового давления;

μ — коэффициент трения сыпучего материала по матрице;

r, x, φ — обобщенные (цилиндрические) координаты.

Между напряжением в сыпучем материале σ или давлением

ρ , что для дискретных сред более справедливо, и переменной плотностью существует зависимость

$$\rho = \rho_0 \exp[(k_0 - k)/\psi], \quad (2)$$

где ψ - модуль уплотняемости;
 ρ_0 - начальное давление пластических деформаций;
 k_0 и k - начальный и текущий коэффициенты уплотнения.

При пластическом деформировании, т.е. при переходе частиц сыпучего материала из "рыхлой" в более "плотную" упаковку модуль уплотняемости ψ отражает напряжения, возникающие в контакте частиц; коэффициент бокового давления ξ - структурное взаиморасположение частиц; коэффициент внешнего трения μ - граничные условия матрицы. Поэтому их исследования необходимо проводить на уровне контактных явлений между частицами материала.

В работе проанализированы однокомпонентные и многокомпонентные дискретные модели сыпучих материалов, разработанные И.И.Кандауровым, Б.И.Дидуком, Г.Дересевичем, Н.В.Науменко, Л.В.Гячевым, Б.А.Богомятким, В.Ф.Семеновым, А.Ф.Тотом, А.Г.Иммерманом, С.Хачава, Н.Э.Аэровым, О.Н.Тодесом, З.Р.Горбисом. Иллюстративно процесс уплотнения наиболее хорошо отражает модель Л.В.Гячева, но из-за жесткой идеализации (абсолютно жесткие шары одинакового размера) она не соответствует физическим процессам пластического деформирования сыпучих материалов. В результате анализа существующих моделей, корректировки размеров элементов, их структуры, характера и количества связей, была сформулирована физическая модель сыпучего материала, адекватно отражающая пластическое деформирование сыпучих материалов.

Физическая модель сыпучего материала

1. Дисперсное изотропное двухфазное тело, состоящее из шаров различных эквивалентных диаметров, распределенных по нормальному закону относительно среднего значения согласно гранулометрическому составу сыпучего материала.

2. Распределение разновеликих шаров по объему сыпучего тела равномерно. В начальный момент шары находятся в "рых-

лой" упаковке с пластичностью, соответствующей критической плотности исследуемого сыпучего материала.

3. Шары имеют в точках контакта связи, характер которых определяется физическими свойствами исследуемого сыпучего материала. Прочность связей много меньше прочности шаров.

4. При деформации сжатия в начальном этапе в физической модели возникают упругие деформации.

5. При разрушении связей покоя перемещение шаров из "рыхлой" упаковки в "плотную" происходит без вращения. В точках контакта действуют связи, обусловленные поверхностным трением. Количество связей растет пропорционально увеличивающейся плотности физической модели. Пластические деформации развиваются в физической модели до критической плотности, за которой дальнейшая переукомпоновка шаров невозможна. В точках контакта действуют остаточные упругие и касательные напряжения, возникают вторичные связи покоя.

Границы существования физической модели сыпучего материала

1. Физическая модель двухфазна: "твердое тело - газ" или "твердое тело - жидкость".

2. Уплотнение происходит только до критической плотности, элементы модели - шары не раздавливаются.

3. Инерционными силами и сопротивлением выходящего воздуха в рассматриваемом диапазоне скоростей деформации пренебрегаем.

Определяющим параметром, относительно которого проводятся теоретические и экспериментальные исследования процесса уплотнения, является текущая плотность сыпучего тела или в безразмерных единицах - коэффициент уплотнения.

Теория уплотнения сыпучих материалов

Рассматривая упругое деформирование элементов физической модели и применяя решение Г.Герца, можно определить давление сыпучего материала на деформатор

$$P_0 = (FK) / A, \quad (3)$$

где K - число шаров в объеме;
 A - сечение матрицы;
 F - сдвливающая сила на элемент модели.

$$F = [4(2R'h)^{3/2} / (3\cos\gamma_1)] (E_1 / R') \cos\gamma_1, \quad (4)$$

где R' - приведенная кривизна шаров в точке контакта;
 h - деформаци. шаров;
 E_1 - модуль упругости;
 γ_1 - угол трения покоя;
 n - количество контактов;
 $\gamma = \begin{cases} \alpha - \gamma_1 & \text{при } \alpha > \gamma_1; \\ \gamma_1 - \alpha & \text{при } \alpha < \gamma_1; \end{cases}$
 α - угол наклона площадок контакта.

Экспериментальные работы А.Н. Динника (1952 г.) по деформации шаров из металла и кварцита подтвердили выводы Г.Герца для упругих деформаций, в области пластического деформирования эти решения имеют значительную ошибку.

Пластическое деформирование рассматривалось из условия достижения в контакте элементов модели напряжений предела прочности. Сдвливающая сила в данном случае определялась как сумма напряжений, которые при пластическом деформировании оставались постоянными. Число контактов на элемент модели при этом экспоненциально увеличивалось.

$$P = (F_n K) / A, \quad (5)$$

$$\text{где } F_n = \pi (E_n / \cos\gamma_2) R' h \cos\gamma_2 e^{k/(k-1)}, \quad (6)$$

где γ_2 - угол трения в движении для частиц;
 E_n - модуль упругого деформирования.

Из (3) и (5) определялся модуль уплотняемости

$$\psi = (k_p - k) / [1/B - (1/(k-1))], \quad (7)$$

где $B = 0,832(E_n/E_1)(R'/h)(1/n)(\cos \gamma_1 / \cos \gamma_2)$. (8)

Анализ выражений (7) и (8) показал, что величина модуля уплотняемости зависит, в основном, от соотношения механических характеристик частиц материала и, в меньшей степени, градиентометрии.

Теоретическое значение коэффициента бокового давления определялось при проектировании сдавливающей силы на горизонтальную ось

$$\xi = K_m \operatorname{tg} \gamma, \quad (9)$$

где K_m — коэффициент структуры модели.

Коэффициент K_m зависит от структуры физической модели и координационного числа, при увеличении которого $K_m \rightarrow 1$.

Виброуплотнение сыпучих материалов

Контактное взаимодействие между элементами сыпучего материала изменяется при вибровоздействии, следовательно, должны измениться безразмерные характеристики материала ψ, ξ, μ , т.е. его объемно-напряженное состояние. При исследовании влияния вибрации на процесс уплотнения сыпучих материалов были проанализированы работы Г.И.Покровского, Д.Д.Баркана, И.И.Блехмана, Г.Ю.Джанелидзе, И.А.Савченко, М.П.Зубанова, Ф.И.Азимова, Р.В.Амбарцумяна, в которых в первую очередь отмечалось уменьшение под воздействием вибрации внутреннего трения материала.

Теоретическое выражение для давления вибрации определялось

$$p_b = 0,5(1 - \cos \omega t) \left\{ (c/Sh) + b p_0 \exp[(k_p - k)/\psi] - (d/Sh) \right\}, \quad (10)$$

где d, c и b — коэффициенты, зависящие от типа сыпучего материала;

Sh — критерий Струхала.

Модуль уплотняемости при виброуплотнении зависит от критерия Струхала и коэффициента уплотнения

$$\psi_0 = (k_p - k) / \ln \left\{ 0,5(1 - \cos \omega t) [(c/\rho_0 Sh) + b \exp((k_p - k)/\psi - (d/Sh))] \right\}. \quad (11)$$

Эффективность виброуплотнения оценивается уменьшением давления уплотнения

$$\mathcal{E}_p = [\rho_0 \exp((k_p - k)/\psi)] / \{ (c/Sh) + \rho_0(1+b) \exp[(k_p - k)/\psi - (d/Sh)] \}, \quad (12)$$

и уменьшением удельной работы уплотнения

$$\mathcal{E}_w = \left\{ \rho_0 h_k \psi [\exp((k_p - 1)/\psi) - 1] \right\} / \left\{ (0,5/Sh)(h_0 - h_k) + (1 + 0,5b) \times \right. \\ \left. \times \rho_0 h_k \psi \exp(-(d/Sh)) [\exp((k_p - 1)/\psi) - 1] \right\}. \quad (13)$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что эффективность виброуплотнения, оцениваемая критериями $\mathcal{E}_p$ и $\mathcal{E}_w$, достигается в определенном диапазоне критерия Струхала Sh_{min} , зависящим от материала и его температуры.

В данном диапазоне вибраций при приближении материала к состоянию "тяжелой жидкости" коэффициент межчастичного трения $tg \varphi_2 \rightarrow 0$, а среднестатистический угол контакта частиц сыпучего материала $\beta \rightarrow 45^\circ$, следовательно, $\gamma \rightarrow 1$.

Коэффициент внешнего трения в этом же диапазоне уменьшается на 70...75%.

Уплотнение водонасыщенных сыпучих материалов

Для исследования данного процесса была принята, на основании значений критерия Рейнольдса, внутренняя задача - течение жидкости по капиллярам без учета сил инерции. Особенностью исследуемого процесса являлась фильтрация жидкости через полидисперсный слой зернистого материала при уменьшении его пористости. Решение уравнения Козени-Кармана для данных условий определило давление фильтрации как функцию пористости (коэффициента уплотнения)

$$\rho_{\varphi} = [(36\eta v_{\varphi}) / d_s^2] \{ (1 - (\epsilon_0/k))^2 / (\epsilon_0/k)^2 \} \exp[b_{\varphi}(1 - (1/k)) + a_{\varphi}], \quad (14)$$

где δ_{φ} и α_{φ} — коэффициенты, зависящие от типа сыпучего материала;

v_{φ} — скорость фильтрации;

ε_0 — начальная пористость;

η — коэффициент динамической вязкости.

Полное давление при уплотнении водонасыщенных сыпучих материалов равно:

$$p = p_0 \exp((k_p - k)/\psi) + p_0^{\varphi} \exp[\delta_{\varphi}(1 - (1/k)) + \alpha_{\varphi}], \quad (15)$$

где $p_0^{\varphi} = [(36\eta v_{\varphi})/\alpha_{\varphi}^2] \{ [1 - (\varepsilon_0/k)]^2 / (\varepsilon_0/k)^3 \}$ — начальное давление фильтрации.

При уплотнении водонасыщенных сыпучих материалов коэффициент бокового давления приближается к 1, а коэффициент внешнего трения падает на 50...60%.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований уплотнения сыпучего материала были созданы экспериментальные установки ЭПС-01 для статического уплотнения, ЭПС-02 для динамического уплотнения, размеры и объем камер уплотнения которых были назначены из условий репрезентативного объема и влияния краевых условий. Были созданы также мембранные датчики давления (а.с. 428237) и устройство для определения коэффициентов трения сыпучего материала (а.с. 573165).

Эксперименты, проведенные по разработанной методике, позволили решить следующие задачи:

проверить допущение по "идеализации" процесса уплотнения сыпучего материала в жесткой матрице, отсутствие влияния инерционных сил и сопротивления фильтрации воздуха;

подтвердить теоретическую экспоненциальную зависимость между давлением на деформатор и деформацией;

проверить теоретические значения модуля уплотняемости и начального давления и их зависимости от физико-механических показателей сыпучего материала (гранулометрии, модуля упругости и предела прочности материала частиц, контактного трения);

определить значения модуля уплотняемости для различных

сыпучих материалов;

проверить теоретические зависимости коэффициента бокового давления от плотности сыпучего материала;

определить значения коэффициента внешнего трения для различных сыпучих материалов при их различной температуре и плотности;

исследовать реологические свойства сыпучих материалов;

определить закономерности изменения давления виброуплотнения для различных сыпучих материалов в зависимости от параметров вибрации;

определить эффективность виброуплотнения сыпучих материалов в зависимости от критерия Струхала;

определить безразмерные характеристики для различных сыпучих материалов в диапазоне оптимальных значений критерия Струхала;

исследовать реологические свойства сыпучих материалов при виброуплотнении;

определить закономерности изменения давления фильтрации в зависимости от коэффициента уплотнения и скорости фильтрации;

определить значения коэффициентов бокового давления и внешнего трения в зависимости от скорости фильтрации;

исследовать реологические свойства водонасыщенного материала при уплотнении.

Реологические свойства сыпучих материалов при уплотнении описываются зависимостью

$$p = p_{\text{рел}} + (p_{\text{кр}} - p_{\text{рел}}) \exp(-t/T), \quad (16)$$

где $p_{\text{рел}}$ — давление, до которого происходит релаксация;
 $p_{\text{кр}}$ — максимальное давление уплотнения;
 T — время релаксации;
 t — время.

Для данной математической модели релаксационного процесса разработана механическая модель, представляющая модифицированную модель Максвелла.

Для уменьшения упругих напряжений в уплотнении сыпучем материале необходимо уменьшать время релаксации и критическое давление, что достигается за счет вибровоздействия в диапазо-

не критерия - Sh_{min} . Данные исследования использованы при конструировании уплотняющих питателей, в которых эффект "раз-уплотняющего" последствие является вредным.

Теория силового расчета рабочих органов ПТМ, подвергающих сыпучий материал объемному сжатию

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования уплотнения сыпучих материалов, полученные значения безразмерных характеристик и методов воздействия на процесс уплотнения в целях уменьшения его энергетике, позволили разработать алгоритм силового расчета, представленный в табл. I, 2 и 3.

Методика расчета состоит из следующих операций:
 определение обобщенных координат;
 определение в обобщенных координатах функции плотности;
 переход от функции плотности к функции давлений;
 реализация тензора (I);
 определение энергозатрат;
 анализ эффективности применения вибровоздействия.

В операциях алгоритма расчета ссылки на табличные значения физико-механических характеристик приведены согласно диссертационной работе.

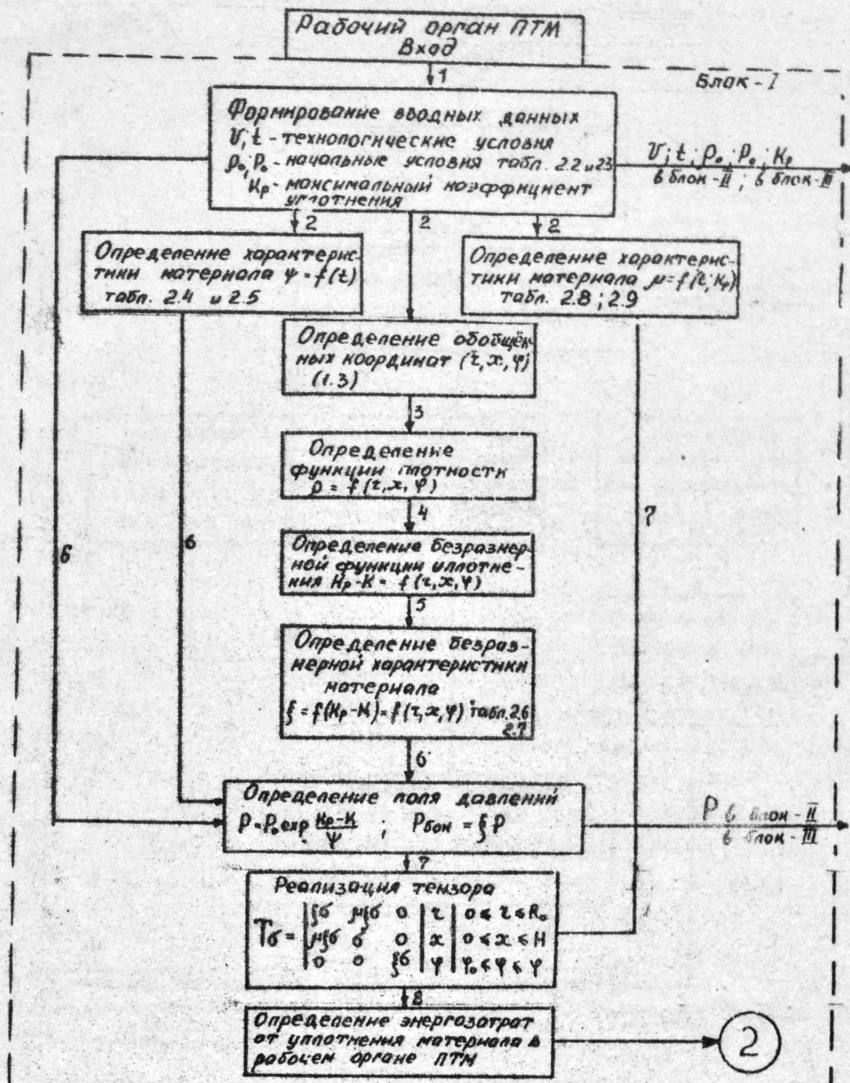
Методика расчета рабочих органов ПТМ, представленная на табл. I, обладает следующими качествами:

позволяет рассчитать рабочие органы в различном конструктивном исполнении еще на стадии проектирования за счет определения объемно-напряженного состояния сыпучего материала в органе по известным безразмерным характеристикам материала;

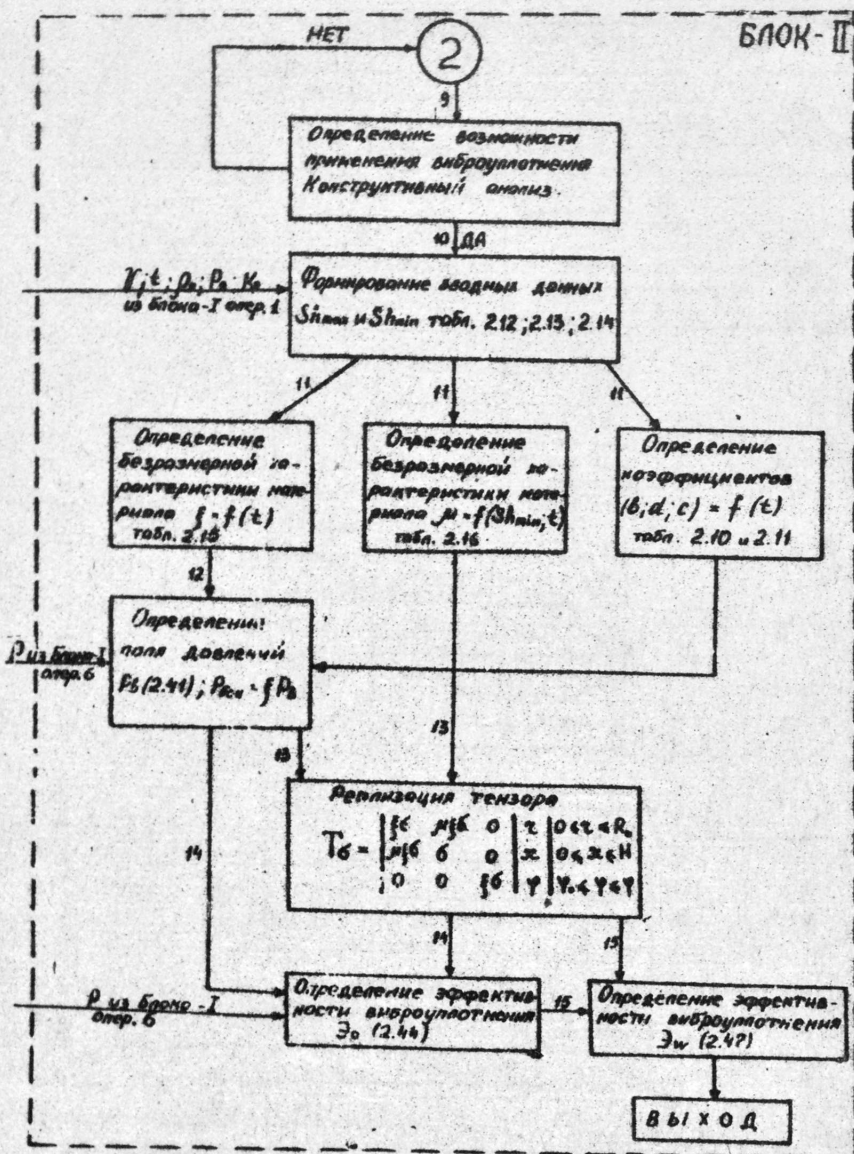
позволяет проанализировать изменение нагрузок на элементы рабочего органа при изменении технологических условий (скорости деформирования, температуры воздуха, различных типов груза);

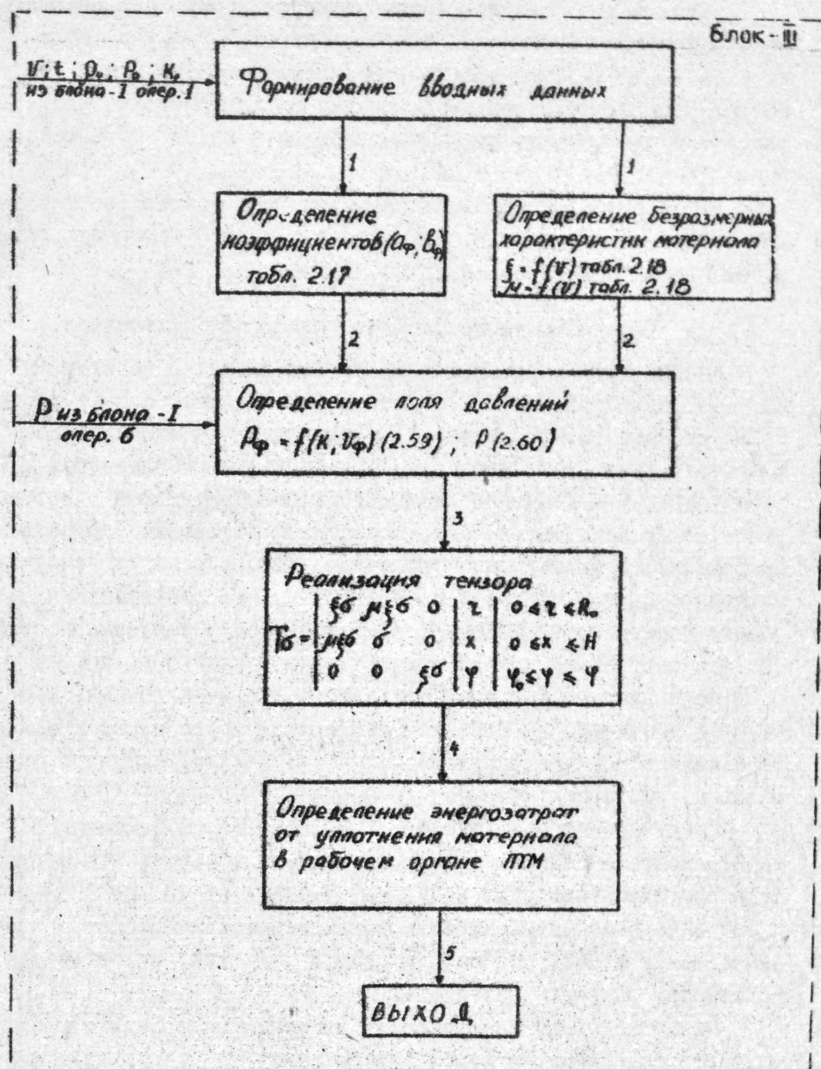
позволяет на стадии проектирования определить эффективность применения вибровоздействия по сравнению со статическим уплотнением сыпучего груза в рабочем органе;

поскольку расчет ведется по распределенным нагрузкам, метод свободен от ошибок, обусловленных определением точек при-



Блок - схема алгоритма силового расчета рабочих органов ПТМ





Алгоритм силового расчета рабочих органов ПТМ
при уплотнении водонасыщенных сыпучих материалов

ложения векторов равнодействующих сил и их направлением;

по методике расчета задача сводится к движению элементов рабочего органа (челюстей, винта, лопаток и т.д.) в среде с переменной плотностью или давлением. Данная методика более готова к применению машинного счета, а также метода конечных элементов для расчета элементов рабочих органов (челюстей, винта и т.д.);

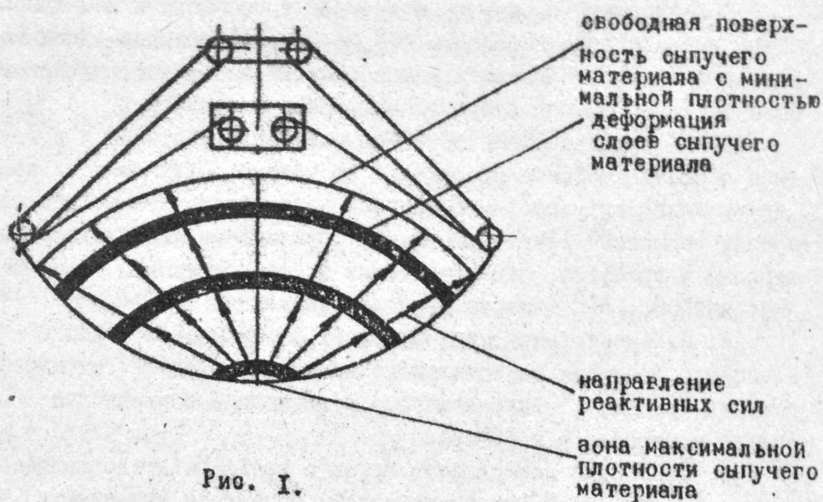
метод позволяет проанализировать "гес" своих составляющих общего сопротивления перемещения сыпучего материала в рабочем органе и наметить пути его изменения.

Теория силового расчета грейферных механизмов

Анализ основных работ в грейферостроении советских ученых А.И.Дукельского, Р.Л.Зенкова, Б.А.Таубера, Н.И.Ерофеева, Б.Л.Румянцева, Л.И.Малева, А.Б.Филякова, А.М.Ясиновского, Б.К.Стрекалова, Д.К.Глебко, А.И.Ильченко, В.Г.Соловьева, Г.Г. Каракулина, Н.А.Шевченко показывает принципиальное противоречие между методом расчета, основанном на теории предельных напряжений, и физическими процессами деформирования сыпучего материала внутри челюстей грейфера. Отличие формирования свободной поверхности материала в грейфере от закономерностей статистики сыпучей среды экспериментально доказано в работах Г.Г.Каракулина, Н.А.Шевченко и автора. Наличие линейно возрастающей плотности по глубине грейфера доказано автором экспериментально при ультразвуковом "просвечивании" сыпучего материала в грейфере в конце зачерпывания.

Анализ работ Б.А.Таубера, А.Б.Филякова, Н.А.Шевченко и экспериментальные исследования автора показывают, что в грейфере при изменении угла внедрения челюсти от 40° до 0° в процессе зачерпывания происходит взаимодействие массивов материала между собой, стенками и дном челюстей, что приводит к уплотнению сыпучего материала.

Пенетрационные исследования движения материала в грейфере, представленные на рис. I, представили данные деформации как энергетически оптимальные, т.к. при формировании свободной поверхности в грейфере частицы движутся из зоны высокого давления в зону с минимальным давлением, т.е. вверх по кратчайшему пути.



Деформация слоев сыпучего материала в грейфере

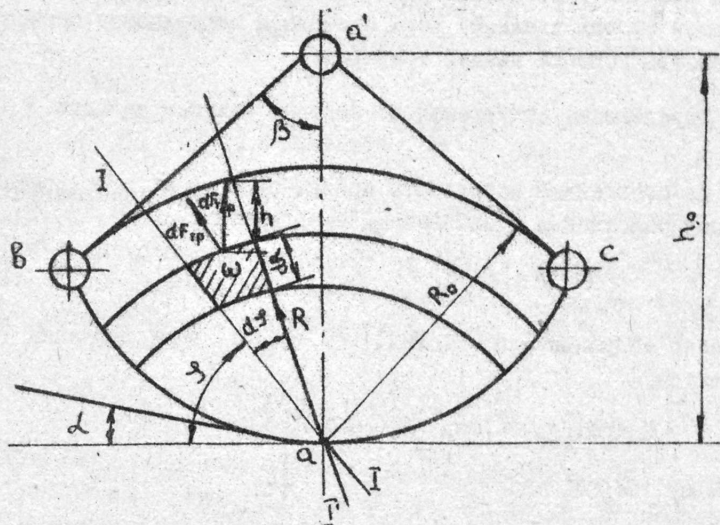


Рис. 2.

Схема для определения сил трения по боковым стенкам челюсти грейфера

Исследования плотности материала в грейфере и пенетрационные исследования позволили сформулировать исходные положения, позволяющие применить разработанный метод теоретического анализа к деформации сыпучего материала в грейферах.

1. Деформация слоев сыпучего материала у стенок и в глубине челюсти грейфера происходит по кривым, близким к концентрическим окружностям с центром в точке схождения режущих кромок челюстей. Такая деформация обусловлена уплотнением материала в грейфере, что происходит после достижения углом α значений $50 \dots 40^\circ$ (вторая фаза зачерпывания).

2. Плотность материала изменяется линейно по глубине грейфера, достигая максимального значения в точке схождения режущих кромок, а минимального — у свободной поверхности сыпучего материала в грейфере.

3. Свободная поверхность груза в грейфере представляется дугообразной кривой (цилиндрической) с центром кривизны в точке касания режущих шин челюстей. Для высокопластичных материалов (уголь влажный) верх свободной поверхности ограничен плоскостью коробки нижней траверсы.

Определение сил трения по боковым стенкам челюсти грейфера

За обобщенные координаты принимаются R, φ и x (рис. 2).
Функция уплотнения в обобщенных координатах:

$$k = 1 + [R(k_p - 1)/R_0]. \quad (17)$$

Согласно операции 5 блок-схемы (см. табл. I) поле давлений определится

$$\rho = \rho_0 \exp[(R_0 - R)(k_p - 1)/(\varphi R_0)] \Big|_R^R \quad (18)$$

$$\rho_{бок} = \xi \rho \quad \Big|_x^x$$

Момент относительно точки α' (точка поворота челюстей) от сил трения по элементу ω , обусловленных приращением плотности материала

$$dM_{\beta}'' = \xi \rho_0 \exp[(\mu R_0 - R \mu k_p - 1)/(\psi R_0)] \mu R dR d\varphi h_0 \sin(\pi/2 - \varphi). \quad (19)$$

Полный момент определится (для 2-х челюстей)

$$M_{\beta}'' = 4 \xi \mu \rho_0 h_0 \int_0^{R_0} \exp[(\mu R_0 - R \mu k_p - 1)/(\psi R_0)] R dR \int_0^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi. \quad (20)$$

Аналогично определится момент относительно α' от сил трения по стенкам 2-х челюстей, обусловленных весом материала в грейфере

$$M_{\delta}' = 4 \rho_0 g h_0 \mu \xi \int_0^{\pi/2 R_0} \int_0^{\pi/2} (R \cos \varphi \sqrt{R_0^2 - R^2 \cos^2 \varphi} - R^2 \sin \varphi \cos \varphi) dR d\varphi. \quad (21)$$

В формуле (20) для пластических материалов (уголь, сера) коэффициент бокового давления будет величиной переменной

$$\xi = Y \rho_0 - Z + Y [\rho_0 (k_p - 1) / R_0] R. \quad (22)$$

Определения сил трения по днищу челюсти и грейфера

Расчетная схема представлена на рис.3. Днище принято полукруглым. Направление деформации совпадает с радиус-вектором $R = \tilde{h}_0$. Поле давлений определится согласно блок-схемы

$$\rho = \rho_0 \exp[(h_0 \beta (k_p - 1) + (1 - k_p) h_0 \varphi) / (\psi h_0 \beta)]. \quad (23)$$

Определяя силу трения по элементу ω , обусловленную приращением плотности, интегрируя по φ от 0 до β и определяя момент относительно α'

$$M_{\alpha}'' = 2 B \mu \rho_0 h_0^2 \int_0^{\beta} \exp[(\beta (k_p - 1) + (1 - k_p) \varphi) / (\psi \beta)] d\varphi. \quad (24)$$

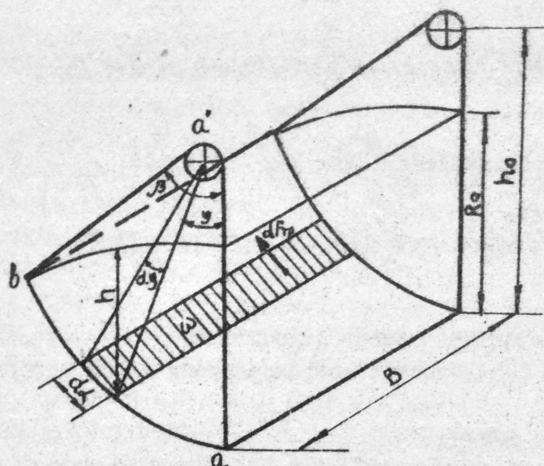


Рис. 3.

Схема для определения сил трения по дну
грейфера

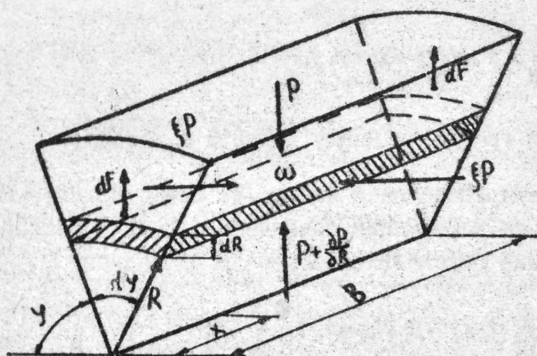


Рис. 4.

Схема для определения сил сопротивления
взачерпыванию от приращения давления при уплотнении
сыпучего материала

Момент относительно α' от сил трения материала по дну, обусловленных его весом

$$M'_d = 2 \cdot 10^3 \rho g \mu h_0^2 B \left[\int_0^{\beta} \sqrt{R_0^2 - h_0^2 \sin^2 \psi} d\psi - h_0 (\beta - \sin \beta) \right]. \quad (25)$$

Определение сил, обусловленных приращением плотности сыпучего материала внутри грейфера

Приращение давления по площадке элемента ω определится (рис. 4)

$$\partial p / \partial R = (\partial p / \partial R) R B d\psi. \quad (26)$$

Решая (26) и интегрируя по объему материала в грейфере, определяем момент относительно точки α'

$$M_n = 2 \left[(p_0 B h_0 (1 - k_p)) / (\psi R_0) \right] \int_0^{R_0} \exp \left[(R_0 (k_p + 1) + (1 - k_p)) / (\psi R_0) \right] \times \\ \times R dR \int_{\alpha}^{\pi/2} \cos \psi d\psi. \quad (27)$$

Определение сил сопротивления резанию режущими поясами челюстей грейфера и момента сил M_p относительно α' проводится по известным зависимостям и экспериментальным значениям удельного сопротивления резанию сыпучих материалов челюстью грейфера, полученных автором.

Силы трения по наружным боковым стенкам челюсти грейфера определяются как сила пассивного давления. Момент относительно α' — M_n .

Определение усилия в замыкающих канатах и мощности, необходимой для зачерпывания, определится из рассмотрения равновесия челюсти грейфера.

Соотношение сил сопротивления зачерпыванию

Поскольку суммарный реактивный момент от сил сопротив-

ления зачерпыванию относительно определится

$$M = M'_\sigma + M''_\sigma + M'_d + M''_d + M_n + M_h + M_p. \quad (28)$$

Можно определить "вес" каждой составляющей общего сопротивления зачерпыванию.

Расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1035 для всех групп грузов Л...СЗ. Максимальная из всех составляющих сил сопротивления зачерпыванию является сила трения материала по днищу грейфера (59% - для песка и 54% - для угля от общей суммы сил сопротивления). На сжатие и уплотнение материала в грейфере приходится 24% (для песка и угля). Сила резания материала составляет 12% для песка и 20% для угля. На трение по боковым плоскостям расходуется от 3 до 4% (для песка и угля). На трение по наружным поверхностям приходится менее 0,5%.

Индикаторный коэффициент полезного действия грейфера.

Эпюры давлений

Расчет, произведенный для грейферов различных параметров и сыпучих материалов со значительно отличающимися коэффициентами уплотнения (1,05 для песка и 1,17 для угля) показал, что сопротивления, обусловленные сжатием материала, составляют одинаковую величину - 24%. Это является закономерным для грейферов, имеющих оптимальную конструкцию. Подтверждением этому служат величины индикаторного коэффициента полезного действия, рассчитанные для данных грейферов, которые составили для угля - 0,5 и для песка - 0,53. Индикаторный к.п.д. является мерой количества энергии, рассеянной внутри грейфера за счет сжатия материала.

$$\eta_i = (M_p + M_n + M'_\sigma + M'_d) / M. \quad (29)$$

Индикаторный к.п.д., равный единице, имел бы грейфер, не уплотняющий сыпучий материал, однако все современные грейферы подвергают груз уплотнению, что отражено в ГОСТе 24599-81 "Грейферы канатные для навалочных грузов". Уменьшение к.п.д. грейферов, менее 0,5, свидетельствуют о несовершенстве конст-

рукции грейфера и переуплотнении материала в челюстях. Полученные функции давлений сыпучего материала на стенки грейфера позволяют построить эпюры давлений на челюсти грейфера и выделить наиболее нагруженные зоны металлоконструкции.

Из анализа эпюр давления видно, что наиболее нагруженными зонами челюсти являются углы перехода боковых стенок в днище и режущая кромка в среднем сечении. Практика эксплуатации грейферов подтверждает это, поскольку 80% отказов, связанных с поломкой челюстей, составляют разрывы углов челюстей и прогиб режущей кромки.

Особенности расчета грейферов для смерзшихся материалов

При переработке сыпучих материалов на их поверхности при отрицательных температурах образуется корка, достигающая толщины от 0,8 метра (уголь) до 1,2 метра (песок). Средний ресурс обычных грейферов до очередного отказа в этих условиях сокращается в 10...20 раз.

Если режущая кромка челюстей при зачерпывании внедряется в корку смерзшегося груза, ее можно представить как жестко защемленную челюстями грейфера балку. Учитывая, что в раскрытом положении кинематическое передаточное число грейфера максимальное — 2,5 для грейферов, перегружающих песок, ПГС, распорные усилия при захвате смерзшейся корки увеличиваются в 5...6 раз по отношению к полностью закрытому грейферу.

Процесс зачерпывания после внедрения челюстей в смерзшийся материал протекает нормально, если корка раскалывается на отдельные куски. Спровоцировать разрушение корки можно установкой на режущих кромках с определенным шагом специальных клыков, применением вибровоздействия, а также аккумуляторов энергии. Торсионный аккумулятор накапливает энергию при раскрытии грейфера за счет закручивания торсиона и отдает ее в наиболее неблагоприятный момент — разрушения смерзшейся корки груза.

Перечисленные технические решения внедрены в грейферах-рыхлителях (а.с. 1364596), имеющих рамную конструкцию, что повышает их средний ресурс в 8...10 раз по отношению к обыч-

ным грейферам при отрицательных температурах.

Уменьшение энергоемкости процесса зачерпывания за счет вибровоздействия особенно эффективно при разработке смерзшегося материала. Вибровоздействие влечет изменение комплекса безразмерных характеристик ψ , ξ и μ , что уменьшает силы сопротивления зачерпыванию, включая сопротивление внедрению в смерзшийся материал.

Давление на боковые стенки челюстей и днище при вибровоздействии определится

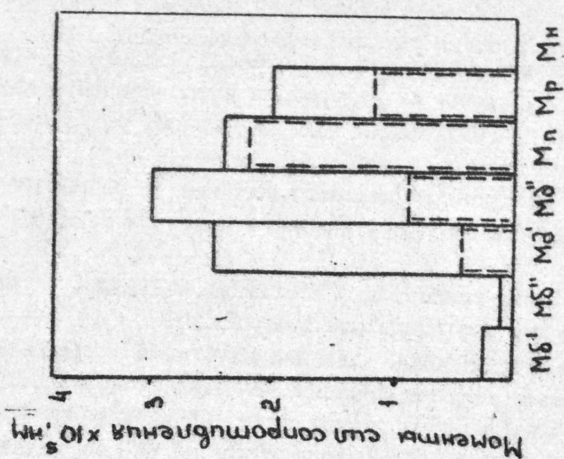
$$P_{бок} = (\xi_0 c / Sh) + b \xi_0 P_0 \exp[(1/R_0 - R_k k_p - 1) / (\psi R_0)] - (\alpha / Sh)]. \quad (29)$$

$$P_d = (c / Sh) + b P_0 \exp[(1/k_p - 1) \beta + (1 - k_p) \psi] / (\psi \beta)]. \quad (30)$$

Результаты расчета по разработанной методике сил сопротивления при вибровоздействии в сравнении с обычным зачерпыванием представлены на рис.5 и 6.

Значительное уменьшение сил трения материала по днищу грейфера до 70% связано с уменьшением давления уплотнения при вибровоздействии. Коэффициенты эффективности вибровоздействия, рассчитанные по (18), (29), (30), составили $\mathcal{E}_p = 2,39$ для угля и $\mathcal{E}_p = 1,8$ для песка.

Для малопластичных материалов при вибровоздействии растет сопротивление, связанное с приращением плотности до 30%, поскольку вибровоздействие вовлекает в колебательный процесс частицы материала. Это приводит к увеличению уплотнения материала в грейфере и увеличению зачерпнутой массы материала на 3...4%. Увеличение плотности пластических материалов при их зачерпывании (уголь, сера) с применением вибрации до значений $k_p = 1,2$ приводит к значительному изменению их физических свойств. Так, у пылящего, пожароопасного материала — комовой газовой серы — способность к пылевыведению уменьшается в 10 раз. Данный эффект был реализован в специальных уплотняющих грейферах для пылящих материалов (комовая сера) по а.с.1165625 и 3449122. Грейферы внедрены в Красноярском речном порту при перегрузке комовой серы совместно с бункерным устройством "грейфер-бункер".



— зачерпывание без вибровоздействия
 - - зачерпывание с вибровоздействием

Рис. 5.

Соотношение сил сопротивления зачерпыванию песка
 грейфером проекта 2872В, при вибровоздействии

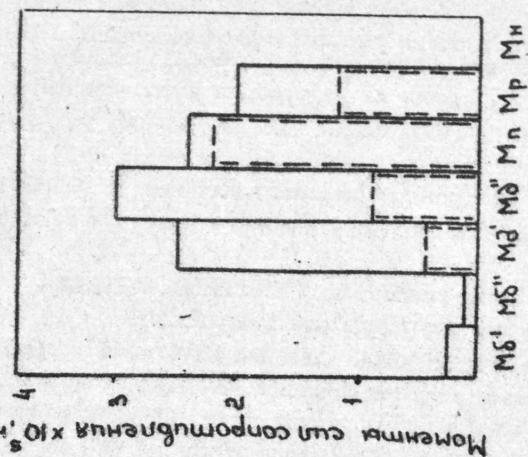


Рис. 6.

Соотношение сил сопротивления зачерпыванию
 угла грейфером проекта 2871В
 при вибровоздействии

Особенности силового расчета грейферов для зачерпывания водонасыщенных сыпучих материалов

Расчеты грейферных механизмов, работающих под водой (при добыче песка, ПГС), основаны на деформации вязко-пластических тел, объемно-напряженное состояние которых зависит от скорости деформации с учетом фильтрации жидкости через поры сыпучих материалов при их сжатии. Поскольку глубина разработок незначительная, влиянием гидростатического давления можно пренебречь.

Проведенный расчет грейферов, работающих под водой, по разработанной методике дал следующие результаты.

При зачерпывании под водой давление на стенки грейфера в зависимости от скорости зачерпывания увеличивается в 1,5... 2,5 раза по сравнению с зачерпыванием "сухого" материала. Сопротивление, обусловленное приращением давления из-за фильтрационных процессов, увеличивается до 40...45%. Мощность, необходимая на зачерпывание, растет на 30...40% в диапазоне скоростей зачерпывания 0,04...0,07 м/с, что ограничивает практически скорость зачерпывания величиной 0,01 м/с.

При зачерпывании илистых материалов наблюдается явление "присоса" из-за разности гидростатического давления на материал в грейфере и его днище, а также затруднение фильтрации воды под днище при отрыве грейфера.

Поскольку "присос" связан с фильтрацией, его величина меняется с уменьшением скорости, замыкающей и поддерживающей лебедок крана в момент отрыва.

Уменьшение "присоса" достигается изменением конструкции днища челюсти, в котором выполняются специальные каналы с отверстиями, позволяющие сообщать полость под грейфером с полостью повышенного давления над грейфером. Данное устройство реализовано в а.с. 798243.

Уменьшение пиковых нагрузок в приводе плавучих кранов достигается также автоматическим регулированием передаточного числа привода в процессе зачерпывания. Для этого рекомендована установка в приводе гидротрансформаторов. Комплекс технических мероприятий по увеличению надежности работы плавучих

установок, добывающих рудные материалы грейферами большей емкости (10 м^3) с больших глубин до 100 м, реализован в а.с. 825777.

Теория силового расчета винтовых уплотняющих питателей

Из уплотняющих питателей, барабанных, шиберных, пластинчатых, лопастных и т.д. наибольшее применение получили винтовые из-за их высокой надежности и простоты. Материал уплотняют для увеличения плотности при его загрузке в транспорт (снег, торф), для уменьшения пыления или предотвращения прорыва сжатого воздуха через питатель при совместной работе с пневмотранспортной нагнетающей установкой. В объеме работы проведены теоретические и экспериментальные исследования серии машин, в создании которых принимал участие автор, предназначенных для уплотнения снега при погрузке в автотранспорт.

Машины СУБМ-ГПИ-73 выполнены на базе снегопогрузчика имели двухвинтовой конический питатель и изготавливались в модификациях: СУБМ-ГПИ-73А с теплогенератором в зоне погрузки снега; СУБМ-ГПИ-73В, в которой уплотняющий орган выполнен с вибро-приставкой; СУБМ-ГПИ-73Б с разъемной камерой уплотнения и системой его автоматического управления.

Также анализировались винтовые питатели для апатитового концентрата с переменным шагом лопасти винта, работающие совместно с грейферно-бункерной установкой и с пневмотранспортной установкой.

Теоретические исследования и расчеты были проведены по разработанной методике с помощью комплекса безразмерных характеристик, которые позволили определить величины и зависимости давлений материала в камерах уплотнения питателей.

Функция давления для винтового питателя с переменным диаметром корпуса

$$p = p_0 \exp(A\varphi - B\varphi^2), \quad (31)$$

где $A = (R_0 \operatorname{tg} \beta S) / \psi (R_K^2 - r_B^2) \pi$;

$$B = (t g^2 \beta S^2) / \psi (R_K^2 - r_B^2) 4 \pi^2,$$

- R_0 и R_k - начальный и конечный радиус винта;
 r_b - радиус вала;
 β - угол конусности корпуса;
 S - шаг винта;
 φ - угол поворота винта.

Функция давления для винтового питателя с переменным шагом винта

$$p = p_0 \exp[(k_p - 1)\varphi / (2\pi n \varphi)], \quad (32)$$

где k_p - отношения входного и выходного сечения желоба винта;

n - число уплотняющих витков винта.

Анализ теоретических зависимостей показал, что винтовые питатели при изменении агрегатного состояния материала (температуры, влажности) подвергаются значительным пиковым нагрузкам из-за высоких степеней уплотнения и экспоненциальной зависимости давления от модуль - φ . Такие режимы сопровождались заклиниванием винта питателя. Этот недостаток был устранен за счет автоматических систем управления (а.с. 442266), осуществляющих обратную связь между давлением и приводом управления камеры уплотнения.

Теоретические выражения для осевой нагрузки и крутящего момента на валу винта сложны из-за геометрии рабочего органа и экспоненциальных зависимостей. Реализация их на ЭВМ ЕС-1030 позволила дать следующие рекомендации. Наиболее устойчивая работа машин типа СУБМ соответствует режиму $k_p = 1,7 \dots 2,0$ при температуре $(-10 \dots -20)^\circ\text{C}$. Релаксационные процессы уменьшали плотность материала (снега) на 15%, при повышении температуры до 0°C время релаксации уменьшалось и "разуплотнение" исчезло.

Применение вибровоздействия уменьшает расход энергии до 30%, но питатель начинает работать в режиме брикетообразования.

Исследование питателей переменного шага винта в широком диапазоне частот вращения винта 34...1000 об/мин соответствовало крайним значениям исследованных скоростей деформации материала в жесткой матрице 0,02...0,5 м/с. Составляющие сил

сопротивления соотносились: силы трения по валу винта 4...5%; силы трения по лопастям винта 9...10%; силы трения по корпусу питателя 48...49% и сопротивление, обусловленное сжатием материала, 26...27%. Во всем диапазоне скоростей деформации наблюдалась хорошая сходимость результатов теоретического расчета и экспериментальных исследований.

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

1. Процесс уплотнения сыпучего материала в рабочих органах ПТМ адекватен сжатию в жесткой матрице физической модели, представленной шарообразными элементами с механическими характеристиками, соответствующими материалу частиц, их гранулометрии и структуре.

2. Условием начала пластического деформирования сыпучего материала является достижение напряжений на контактных площадках предела прочности материала частиц. Зависимость контактных напряжений от размера частиц (т.е. их гранулометрии) приводит к развитию пластического деформирования сыпучего материала во времени по закону нормального распределения.

3. Объемно-напряженное состояние материала при пластическом деформировании определяется комплексом безразмерных характеристик: ψ — модулем уплотняемости, γ — коэффициентом бокового давления, μ — коэффициентом внешнего трения. Модуль уплотняемости является механической характеристикой, коэффициент бокового давления — структурной (кинематической) и коэффициенты внешнего трения — граничной.

4. Значения начального давления пластического деформирования близки к значениям начального сопротивления сыпучих материалов сдвигу. Зависимость коэффициента бокового давления от контактного угла взаимодействия частиц материала и межчастичного трения определяет его линейную зависимость от плотности сыпучего материала в процессе уплотнения.

5. Уменьшение энергоемкости и давления уплотнения сыпучего материала происходит при вибровоздействии в определенном диапазоне критерия Струхала $Sh_{max} \dots Sh_{min}$. При изменении параметров виброуплотнения от Sh_{max} до Sh_{min} происходит увеличение коэффициента бокового давления — приближение к

I, и уменьшение коэффициента внешнего трения на 70...75%.

6. При уплотнении водонасыщенных материалов давление уплотнения состоит из давления деформации твердой фазы материала и давления фильтрации жидкой фазы. Давление фильтрации экспоненциально зависит от переменной пористости (плотности) сыпучего материала. Коэффициент бокового давления приближается к единице, а коэффициент внешнего трения падает на 50...60%.

7. Характеристиками релаксационных процессов, происходящих в уплотненных материалах, являются: критическое давление, давление релаксации и время релаксации, описываемые модифицированной моделью Максвелла. Для уменьшения "упругого последействия" необходимо уменьшать критическое давление и время релаксации за счет вибровоздействия. При виброуплотнении критическое давление уменьшается на 20...50%.

8. Контактная теория уплотнения сыпучих материалов легла в основу теории силового расчета рабочих органов ПТМ. Разработанный метод позволяет определить действующие силы, как реакции от перемещения рабочих органов в среде с переменной плотностью, при этом поля давлений и сил трения определяются с помощью безразмерных характеристик: модуля уплотняемости, коэффициента бокового давления и коэффициента трения. Метод позволяет проанализировать изменение нагрузок на элементы рабочих органов при изменении технологических условий и определить эффективность применения вибровоздействия по сравнению со статическим уплотнением, позволяет определить нагрузки в особых случаях (водонасыщенный материал, смерзшийся материал). Метод лег в основу РТМ 212.0133-85. Грейферы двухчелюстные канатные общего назначения для портовых кранов. Методы расчета при проектировании.

9. При зачерпывании грейфером сыпучего материала уплотнение происходит во второй фазе зачерпывания при значении угла внедрения 40° , при этом плотность изменяется линейно от максимальной в точке схождения режущих кромок челюстей до минимальной у свободной поверхности. Свободная поверхность материала в грейфере не соответствует призме с углом откоса при основании (ГОСТ 24599-81), а представляет цилиндрическую поверхность, образуемую при выпирании из грейфера уплотненного

материала.

10. В грейферах во второй фазе зачерпывания движение материала происходит радиально из зоны высокого в зону минимального давления, что является энергетически оптимальным. Количество рассеянной энергии оценивается индикаторным коэффициентом полезного действия, который для грейферов оптимальной конструкции равен 0,5.

11. При зачерпывании сыпучего материала грейфером сила сопротивления трению по дну составляет 54...59%, сопротивление уплотнению материала 24%, сила резания материала 12...20% и трение по боковым плоскостям 3...4%. Уменьшение сил сопротивления достигается профилированием дна челюсти с значением заднего угла 10° и уменьшением заглубления челюстей грейфера и применением вибровоздействия. Энергоемкость процесса зачерпывания сыпучего материала грейфером при вибровоздействии уменьшается в два раза.

12. Анализ эпюр давлений, построенных по разработанной методике показал, что наиболее нагруженными зонами челюстей являются середина и углы режущих кромок. При зачерпывании смерзшегося материала нагрузки в начальный момент заглубления превышают номинальные в 5 раз. Внедрение специальных грейферов-рыхлителей рамной конструкции с рыхлящими клыками и аккумулятором энергии позволило увеличить работоспособность на смерзшихся грузах в 7...10 раз.

13. При зачерпывании сыпучего материала под водой возникают пиковые нагрузки из-за давления фильтрации воды (до 70%) и явления "присоса". Рекомендовано применять специальные конструкции челюстей грейфера, исключаящие "присос", и гидротрансформаторы в приводе крановых лебедок.

14. В винтовых уплотняющих питателях с конусным корпусом давление сыпучего материала на стенки корпуса нарастает по экспоненциальному закону. Изменение агрегатного состояния сыпучего материала, связанное с уменьшением модуля уплотняемости, приводит к пиковым нагрузкам в уплотняющем корпусе, вызывающим заклинивание винтов. Разработанная система автоматического регулирования выходного сечения уплотняющей камеры с обратной связью по давлению позволяет получить устойчивый процесс уплотнения.

15. Коэффициент уплотнения винтовых питателей машин типа СУБ-ПМ-73 зависит от "времени релаксации" сыпучего материала. Применение вибровоздействия уменьшает "время релаксации" и энергоемкость процесса уплотнения.

16. Существующие методы расчета винтовых питателей с допущением о линейном нарастании давления по длине уплотняющей камеры и постоянстве коэффициента бокового давления дают ошибку до 25% в сторону уменьшения определяемых энергозатрат. Для винтовых питателей с конусной камерой уплотнения разработан метод силового расчета по безразмерным характеристикам сыпучего материала с применением ЭВМ и упрощенный метод силового расчета с допущением о линейной функции давления. Рекомендованы технологические режимы уплотнения сыпучего материала.

17. Разработан метод силового расчета для винтовых питателей с переменным шагом с диапазоном скоростей деформации 0,02...0,5 м/с. Рекомендовано применять для перегрузки порошкообразных пылящих грузов винтовые питатели с переменным шагом для уменьшения пылеобразования в зоне перегрузки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Николаев А.Ф., Кулепов А.Ф., Слюсарев А.С. О влиянии навесной фрезерной установки на устойчивость движения машины с РВД // Механизация строительства.- 1972.- № 10.- С.13-14.

2. Слюсарев А.С. Расчет транспортирующей зоны снегоуплотняющей установки // Научные труды /Горьковский политехнический ин-т, 1972.- Вып.12.- Т.ХХУШ.- С.45-49.

3. Николаев А.Ф., Слюсарев А.С. К вопросу эффективности снегоуборки в городах // Сб.научн.тр. Академии коммунального хоз. - М., 1973.- Вып.5.- С.

4. Слюсарев А.С., Киричек А.А. Силовой расчет двухшнекового транспортирующего устройства для связанных дисперсных тел при коэффициенте заполнения, равном единице // Труды IV Всесоюз.научн.-техн.конф. мол. спец. ВНИИТМАШ (ДСП).- М., 1974.- С.

5. Слюсарев А.С. Расчет зоны прессования шнековой снегоуплотняющей приставки // Научн. труды Горьковский политехнический ин-т, 1974. - Вып. 5. - Т. XX. - С. 87-96.

6. Слюсарев А.С. Силовой расчет шнековых уплотняющих транспортеров // Труды IV Всесоюз. научн.-техн. конф. мол. спец. ВНИИТМАШ (ДСП). - М., 1974. - С.

7. Слюсарев А.С., Киричек А.А., Кулепов А.Ф. Анализ эффективности виброуплотнения снега // Труды ГПИ им. Жданова. - Горький, 1975. - Вып. 8. - Т. 31. - С. 54-57.

8. Слюсарев А.С., Каракулин Г.Г. Экспериментальное исследование процесса зачерпывания груза грейфером // Материалы XIX научно-техн. конференции: Горьк. ин-т инж. водн. т-та, 1976. - Ч. I. - С. 155-157.

9. Слюсарев А.С., Киричек А.А. Экспериментальные исследования коэффициентов трения дисперсных тел // Материалы X научн.-техн. конференции: Горьк. ин-т инж. водн. т-та. Горький, 1976. - Ч. I. - С. 28-31.

10. Каракулин Г.Г., Слюсарев А.С. Определение вместимости грейферов // Речной транспорт. - 1978. - № II. - С. 12-13.

11. Слюсарев А.С. Исследование процесса формирования "шапки" груза в грейфере при зачерпывании // Материалы XXI научн.-техн. конференции. - Горький: Горьков. ин-т инж. водн. т-та, 1978. - С. 113-115.

12. Слюсарев А.С., Каракулин Г.Г., Журавлев Ю.М. Исследование энергоемкости перегрузки технической немолотой соли // Вопросы совершенствования работы флота и портов: сб. научн. тр. - Горький: Горьков. ин-т инж. водн. т-та, 1979. - Вып. 166. - Ч. I. - С. 50-51.

13. Слюсарев А.С., Каракулин Г.Г. Некоторые результаты исследования процесса зачерпывания песка грейфером // Научные труды Горьк. ин-т инж. водн. т-та, 1979. - Вып. 163. - С. 120-126.

14. Слюсарев А.С. Силовой расчет рабочих органов ПТМ для сыпучих грузов // Материалы Всесоюзной научно-техн. конференции. Новое в подъемно-транспортной технике. - Горький, 1980. - С. 144-146.

15. Слюсарев А.С. Физическая модель сыпучих грузов для расчета рабочих органов ПТМ // Материалы Всесоюзной научно-техн. конференции. Новое в подъемно-транспортной технике. -

Горький, 1980. - С.42-44.

16. Слюсарев А.С. Физическая и техническая модели сыпучих тел // Проблемы повышения надежности и долговечности ПТМ: Материалы юбилейной всесоюз. научно-техн. конф. МВТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 1981. - С.

17. Слюсарев А.С. Теоретические основы расчета рабочих органов ПТМ для перегрузки сыпучих и волокнистых материалов // Комплексная механизация и автоматизация переместительных операций в лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности: Материалы IV Всесоюзной научно-техн. конф. - М.: Московский лесотехнический ин-т, 1984. - С.

18. Слюсарев А.С. К вопросу определения коэффициента полезного действия грейферов // Новое в подъемно-транспортной технике: Материалы Всесоюзной научно-техн. конференции, посвященной 60-летию каф. ПТМ МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1985. - С.12.

19. Слюсарев А.С., Отделкин Н.С. Результаты исследований и разработка комплексного метода пылеподавления при перегрузке подъемно-транспортными машинами пылящих грузов: Материалы Всесоюзной научно-техн. конференции, посвященной 60-летию каф. ПТМ МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1985. - С.34.

20. Слюсарев А.С. Теоретические основы расчета рабочих органов ПТМ, перерабатывающих сыпучие грузы // Конструирование и эксплуатация подъемно-транспортных машин: Межвуз. сб. научн. тр. - Тула, 1985. - С.73-78.

21. Слюсарев А.С., Отделкин Н.С., Леканов В.Г. Применение комплексного метода пылеподавления при перегрузке пылящих пожароопасных грузов грейферными кранами по варианту судно - вагон // Совершенствование эксплуатации плавучих кранов и технологии перегрузочных работ: сб. научн. тр. - Горький: Горьков. ин-т инж. водн. т-та, 1985. - Вып.15. - С.83-101.

22. Слюсарев А.С., Журавлев Ю.М., Севастьянов В.А. Грейферы двухчелостные канатные общего назначения для портовых кранов // Методы расчета при проектировании /Руководящий технический материал РТМ 212.0133-85 введ. в действ. 01.06.85. - Горький, . - 55 с.

23. Слюсарев А.С. Исследование физико-механических свойств сыпучих грузов // Методическое пособие к лабораторным

работам. - Горький: Горьковский ин-т инж.водн.т-та, 1986. - 21 с.

24. Слюсарев А.С., Отделкин Н.С. Исследование пыли комовой серы и разработка методов ее уменьшения //Химическая промышленность.- 1987.- № 9.- С.31-32.

25. Слюсарев А.С. Контактная теория уплотнения сыпучих материалов при исследовании дискретных моделей // Оптимизация элементов перегрузочного процесса и конструкции грузоподъемных машин: Сб.научн.тр. - Горький: Горьков.ин-т инж.водн.т-та, 1989.- Вып.241.- С.149-165.

26. А.с. 442266 СССР, М.Кл.Е 01 4/00. Снегоуплотняющее устройство / Николаев А.Ф., Ссколов А.А., Слюсарев А.С., Губанцев А.Б. (СССР).- № 1800261/29-14; заявлено 23.06.72; опубл. 05.09.74, бюл. № 33, 1974.

27. А.с. 448237 СССР, М.Кл. 01 7/08, 01 9/04. Датчик давления / Слюсарев А.С. (СССР).- № 1790861/18-10; заявлено 31.05.72; опубл. 15.05.74, бюл. № 18, 1974.

28. А.с. 499372 СССР, М.Кл. 01 5/00. Устройство для уплотнения снега / Слюсарев А.С., Николаев А.Ф., Белов П.А., Кулепов В.Ф., Киричек А.А. - № 2014104/27-11; заявлено 05.04.74; опубл. 15.01.76, бюл. № 2, 1977.

29. А.с. 573165 СССР, М.Кл.² А63 11/00, 01 19/02. Устройство для определения силы трения / Слюсарев А.С., Киричек А.А., Кулепов В.Ф. (СССР). - № 2094678/12; заявлено 06.01.75; опубл. 25.09.77, бюл. № 35, 1977.

30. А.с. 802445 СССР, М.Кл.³ 01 7/00. Устройство для уплотнения снега / Слюсарев А.С., Николаев А.Ф., Киричек А.А., Кулепов В.Ф. (СССР). - № 1976830/29-11; заявлено 14.12.73; опубл. 07.02.81, бюл. № 5, 1981.

31. А.с. 798243 СССР, М.Кл.³ Е 3/44. Грейфер /Слюсарев А.С., Зубов Д.Н. (СССР). - № 2682216/29-03; заявлено 03.11.78; опубл. 23.01.81, бюл. № 3, 1980.

32. А.с. 783191 СССР, М.Кл.³ В66 1/66. Захватное устройство / Слюсарев А.С., Минин А.А. (СССР).- № 2667244/29-11; заявлено 27.09.78; опубл. 30.11.80, бюл. № 44, 1980.

33. А.с. 751781 СССР, М.Кл.³ 66 3/02. Челюсть грейфера для захвата сыпучих материалов / Каракулин Г.Г., Слюсарев А.С. (СССР).- № 2698563/29-11; заявлено 18.12.78, опубл.

30.07.80, бюл. № 28, 1980.

34. А.с. 825777 СССР, М.Кл.³.Е 02 3/14. Устройство для подводной добычи рудных материалов /Каракулин Г.Г., Слюсарев А.С. (СССР).- № 2703885/29-03; заявлено 27.12.78; опубл. 30.04.81, бюл. № 16, 1981.

35. А.с. 1062157 СССР, В 65 69/18. Устройство для перегрузки сыпучих материалов / Слюсарев А.С., Алешин В.Н., Исупов В.Ю., Розин Г.И. (СССР). - № 3449122/27-11; заявлено 03.06.82; опубл. 23.12.83; бюл. № 47, 1983.

36. А.с. 1129453 СССР, 16 7/14; 16 11/06. Устройство для смазки шарниров грейфера /Слюсарев А.С., Сутырин С.В. (СССР).- 3266343/25-27; заявлено 30.03.81; опубл. 15.12.84. Бюл. № 46, 1984.

37. А.с. 1155544 СССР, В 65 65/32. Устройство для перегрузки сыпучих материалов / Слюсарев А.С., Исупов В.Ю., Леканов В.Г. (СССР).- 3701148/27-11; заявлено 14.02.84; опубл. 15.05.85. Бюл. № 18, 1985.

38. А.с. 1165625 СССР, В 65 69/18. Устройство для перегрузки сыпучих материалов / Слюсарев А.С., Исупов В.Ю. (СССР).- № 3592870/27-11; заявлено 19.05.83; опубл. 07.07.85. Бюл. № 25, 1985.

39. А.с. 1364596 СССР, В 66 3/12. Грейфер / Слюсарев А.С., Севастьянов В.А. (СССР).- № 3908466/27-11; заявлено 11.06.85; опубл. 07.01.88. Бюл. № 1, 1987.

40. А.с. 1461730 СССР, В 65 67/04/В 65/32. Устройство для загрузки сыпучих материалов / Слюсарев А.С., Отделкин Н.С., Исупов В.Ю. (СССР).- 4170400/27-11; заявлено 29.12.86; опубл. 28.02.89. Бюл. № 8, 1989.

41. А.с. 1562822 СССР, 01 25/54. Устройство для определения свойств пыли / Слюсарев А.С., Отделкин Н.С. (СССР).- № 4322464/27-25; заявлено 27.10.87; опубл. 07.05.90. - Бюл. № 17, 1990.

Ромайор. Тип. ГИИВТа, 1991 г., заказ № 165. Тираж 150 экз., объем 2 п.л.

Слюсарев