

На правах рукописи



Вильмис Александр Леонидович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОВОДНОГО
ГИДРОПОДЪЕМА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ
ЗАГРУЗОЧНЫМИ АППАРАТАМИ С МИНИМАЛЬНЫМ
НЕГАТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**Специальность 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

г. Москва 2021 г.

Работа выполнена на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ).

Научный консультант: **Дробаденко Валерий Павлович**
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Официальные оппоненты: **Вержанский Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор, Ассоциация «Некоммерческое партнерство «Горнопромышленники России», генеральный директор.

Александров Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», профессор кафедры «Транспортно-технологических процессов и машин».

Кириченко Юрий Васильевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Горный институт, профессор кафедры «Геологии и маркшейдерского дела».

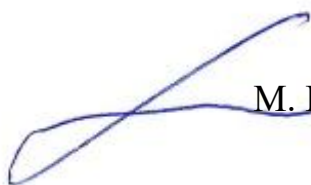
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «27» апреля 2021г. в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 212.121.09 на базе Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23 в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Dissertation_Vilmis%20AL.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2021г.

Ученый секретарь диссертационного совета
докт. техн. наук, профессор


М. В. Меркулов

Актуальность работы.

Обеспечение прав Российской Федерации на изучение и освоение минеральных ресурсов глубоководных районов дна Мирового океана за пределами юрисдикции прибрежных государств, гарантируется Международным органом по морскому дну ООН на основе 15-летних контрактов на: освоение железомарганцевых конкреций (ЖМК) между МОМД – ГНЦ ФГУП «Южморгеология» – 29 марта 2001 года, по глубоководным полиметаллическим сульфидам (ГПС) между МОМД и Минприроды России – 29 октября 2012 года и по кобальтоносным железомарганцевым коркам (КМК) между МОМД и Минприроды России – 10 марта 2015 года.

Основными условиями контракта являются изыскание и анализ залежей полезных ископаемых в выделенном районе на исключительных правах.

Перспективными месторождениями полезных ископаемых глубоководных районов Мирового океана, которые МОМД выделил России, наряду с другими ведущими странами, являются железомарганцевые конкреции (ЖМК) в средней части Тихого океана в зоне Кларион-Клиппертон площадью 75 тыс. км² на глубинах 4500-5000 м. В районе содержание ценных компонентов довольно высокое: Ni – 1,4%, Co – 0,24%, Mn – 29,4%, Cu – 1,1%, а в целом минерально-сырьевой потенциал сопоставим с ресурсами уникального Норильского горнопромышленного района.

Необходимо отметить обширные геологические изыскания, проводимые ФГБУ «ВНИИОкеангеология», АО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ», ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», ФГБУ ВИМС, ОАО «Дальморгеология» и другие.

Геологоразведочные работы на Российских участках ЖМК в поле Кларион-Клиппертон находятся в завершающей стадии разведки, значительная их площадь изучена в масштабе 1:50000, параллельно с ними проводятся инженерно-геологические и экологические исследования. Однако технико-технологическое обеспечение опытных, а затем и промышленных добычных работ значительно отстает от геологоразведочных. Ранее, проводившиеся исследования судового и горно-добычного комплексов для будущего освоения ЖМК были прекращены в начале 90-х годов.

Согласно концепции, разработанной в 2007 г. во ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга и ЦНИГРИ, возможные сроки начала эксплуатационных работ 2021-2022 гг. Таким образом, можно полагать, что современный уровень технологических и технических средств для освоения месторождений дна морей и океанов с точки зрения развития научно-технического прогресса с учетом сложной экосистемы океана, отстает от мирового уровня и представляет актуальную научную проблему.

Цель.

Обоснование освоения месторождений железомарганцевых конкреций на основе разработки энергосберегающей и экологически безопасной технологии глубоководного гидроподъема грузочными аппаратами вихревого

пульпоприготовления с укладкой шламовых фракций в выработанное пространство.

Идея работы.

Методико-аналитическое обоснование применения полифункционального комплекса с использованием кинетической энергии коаксиально - закрученных струй, формирующих высоконасыщенную гидросмесь с подачей ее в вертикальный пульповод на поверхность и сепарацией шламовой части в придонное пространство.

Задачи исследований.

1. Анализ минерально-сырьевых ресурсов глубоководных месторождений и перспектива их освоения.
2. Анализ различных конструкций загрузочных аппаратов по гидродинамическим условиям формирования и разгрузки гидросмеси, их систематизация.
3. Аналитические исследования результатов опытно-промышленных испытаний загрузочных аппаратов с формированием высоконасыщенной гидросмеси кольцевыми закрученными струями в различных горнотехнических условиях.
4. Выявление гидродинамики возникновения псевдоожиженного слоя в камере загрузочного аппарата.
5. Проведение экспериментальных исследований по установлению влияния угла раскрытия кольцевой закрученной струи на формирование высоконасыщенной гидросмеси.
6. Обоснование концепции научного подхода к расчетам конструктивных и технологических параметров загрузочных аппаратов.
7. Аналитическое обоснование расходно-напорных характеристик загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления.
8. Разработка методологических аспектов для расчета технологических параметров аппаратов вихревого пульпоприготовления.
9. Разработка экологосберегающей технологии гидроподъема высоконасыщенной гидросмеси с сепарацией твердой составляющей гидросмеси и укладка тонких фракций в выработанное пространство.

Научные методы исследований.

Для решения поставленных задач были использованы аналитический и комплексный методы исследований, включающие анализ отечественной и зарубежной научно-технической информации по освоению глубоководных месторождений, а также теории и практики применения закрученных струй при интенсификации массообменных процессов в загрузочных аппаратах вихревого пульпоприготовления, лабораторные исследования, обобщение и обработка результатов опытно-промышленных исследований и практического опыта, полученных аналитическими, расчетными и экспериментальными путями, установление функциональных зависимостей.

Научная новизна:

1. Установлена методологическая концепция обоснования расчетных параметров аппаратов вихревого пульпоприготовления на основе теории центробежной насадки Абрамовича Г.Н., в отличие от которой ожижающим агентом для

формирования и подачи двухфазной смеси являются не прямоточные, а коаксиально-закрученные струи.

2. Выявлено, что при тангенциальной подачи напорной жидкости в соосные патрубки аппарата образуются кольцевые закрученные потоки, которые генерируют в зоне размещения узла разгрузки гидросмеси образование псевдооживленного слоя, насыщенного твердыми частицами, концентрация которых регулируется скоростными потоками.
3. Показано, что коаксиально закрученные струи формируют различные крупномасштабные вихри, которые создают гидродинамические условия образования псевдооживления и перемешивания взвешенных слоев, интенсифицирующих массообменные процессы в камере аппарата.
4. Установлено, что угол раскрытия коаксиальной закрученной струи составляет более 90° и зависит от скоростей истечения из соосных патрубков аппарата, превышая прямоточные ($\sim 25-27^{\circ}$) и формирует стабильную высоконасыщенную гидросмесь в зоне узла разгрузки в транспортный пульповод.
5. Выявлено, что введенный геометрический параметр центробежной насадки, определяемый соотношением площадей поперечного сечения транспортного пульповода и водовода (входного патрубка), реально оценивает сущность процесса формирования псевдооживленного демпфирующего слоя с учетом необходимых расходно-напорных параметров.
6. Установлено, что при определенном значении коэффициента заполнения (сжатия) сечения центробежной насадки коэффициент расхода жидкости через нее имеет максимум, с минимальными потерями при формировании кольцевого потока в насадке (соосных патрубках), т. е. имеет место оптимальный режим ее работы при определенных геометрических параметрах.
7. Разработана патентночистая технология глубоководного гидроподъема высоконасыщенной двухфазной смеси с сепарацией и укладкой шламовых фракций в выработанное пространство океанического дна, что значительно снижает негативное экологическое воздействие на загрязнение поверхностных и придонных океанических водных толщ.

Личный вклад автора.

Проведена систематизация технических средств и способов гидравлического подъема железомарганцевых конкреций в зависимости от применяемого технологического оборудования; проведен анализ конструктивных особенностей и оценка гидродинамических условий формирования и разгрузки гидросмеси в напорный трубопровод загрузочных аппаратов гравитационного, струйного, фильтрационного типов, с использованием закрученных потоков жидкости и их систематизация; проведены экспериментальные исследования по определению плотности формируемой гидросмеси в зависимости от угла раскрытия коаксиальных закрученных струй, и на их основе получены расчетные уравнения; обосновано применение коаксиально закрученных струй в загрузочных аппаратах для получения высоконасыщенной гидросмеси; на основе аналитических исследований установлен максимальный расход жидкости через центробежную насадку; разработаны методологические аспекты расчета

расходно-напорных характеристик геометрических параметров массообменно-транспортного аппарата; установлена технологическая структура предлагаемой системы гидроподъема железомарганцевых конкреций с минимальным воздействием на окружающую среду.

Научное значение работы.

Дано методико-аналитическое обоснование применения патентночистого массообменно-транспортного аппарата вихревого пульпоприготовления для гидроподъема высоконасыщенной гидросмеси при освоении железомарганцевых конкреций со дна морей и океанов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Практическая значимость работы

заключается в разработке методологических положений расчетно-напорных параметров аппаратов вихревого пульпоприготовления для формирования высоконасыщенных гидросмесей при проектировании технологических комплексов гидроподъема железомарганцевых конкреций со дна морей и океанов для их эффективного освоения.

Реализация выводов и рекомендаций.

Результаты выполненных научных исследований и технических решений используются при модернизации основных узлов и модулей уникальной стендовой установки «Полифункциональная установка на основе использования кольцевых закрученных потоков (эффекта искусственного смерча) для гидротранспорта высоконасыщенных смесей на дальние расстояния, а также интенсификации массообменных процессов при извлечении ценных компонентов в гидрометаллургическом переделе (рег. № 4-73)» в научно-учебной лаборатории «Инжинирингового центра МГРИ» - «Новые Гидротехнологии». Результаты работы реализуются в учебном процессе при освоении студентами общеобразовательных программ специальностей 21.05.04 «Горное дело» и 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ, а также в учебных программах для подготовки кадров высшей квалификации.

Апробация работы.

Основные положения диссертации и результаты проведенных исследований докладывались на международных конференциях: «Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012 July 1-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil OMAE 2012-8»; «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2018г.); «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ 2017, 2015, 2013, 2011, 2019 гг.); VII Международной научно-практической конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2012, 2010 гг.); «Современные методы и средства океанологических исследований» (ИО РАН 25-27 ноября 2009 г.); «1-й СОВЕТСКО–Югославский симпозиум по проблеме скважинной гидравлической

технологии» (Москва, МГРИ, 1991г.), а также на научно-практической конференции «Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития гражданского и промышленного комплексов города Москвы» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2008г.); научной конференции «Физико-химическая геотехнология» (Москва, МГГУ, 2013 г.); V съезде гидромеханизаторов России (Москва, МГУ, 2009 г.); VI съезде гидромеханизаторов России (Москва, МГУ, 2012 г.); VII съезде гидромеханизаторов России (Москва, НИТУ «МИСиС», 2015 г.).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 49 работах, в том числе 20 статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации (ВАК при Минобрнауки России). По тематике исследований получено 3 патента на изобретения РФ и 2 авторских свидетельства SU.

Объем и структура работы.

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, определена цель, идея, задачи исследований, изложены защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе

на основе работ специалистов, заложивших теоретические и практические основы освоения месторождений твердых полезных ископаемых дна морей и океанов: Александрова В.И., Андреева С.Н. Бруякина Н.А., Бубиса Ю.В., Вержанского А.П., Голевой Р.В., Глумова И.Ф., Грамберга И.С., Дробаденко В.П., Добрецова В.Б., Истошина С.Ю, Кириченко Ю. В., Кислякова В.Е., Контарь Е.А., Малухина Н.Г., Мирчинка И.М., Мурдмаа И.О., Нурока Г.А., Смолдырева А.Е., Черкашева Г.А., Ширяева Б.К., Ялтанца И.М. и других, проведен анализ минерально-сырьевого потенциала твердых полезных ископаемых (ТПИ) океанического дна, дана краткая геологическая характеристика основных рудных областей распространения железомарганцевых конкреций (ЖМК), в том числе условий залегания ЖМК глубоководного месторождения в поле Кларион-Клиппертон (Тихий океан) и их физико-механических свойств. Проанализированы конструкции технологических комплексов, дан краткий анализ способов и технических средств для освоения глубоководных океанических и морских месторождений. Проведена систематизация технических средств и способов глубоководного гидроподъема железомарганцевых конкреций (рис.1). Отмечены основные технические проблемы при освоении глубоководных месторождений ЖМК.

Во второй главе

с учетом проведенных исследований способов гидроподъема ЖМК сделан вывод о необходимости совершенствования технологии трубопроводного гидроподъема с использованием загрузочных аппаратов (питателей).

На основе работ Акрамова А.А., Бочкарева В.Г., Борисенко Л.Д., Брюховецкого О.С., Малухина Н.Г., Гребенюк В.К., Гейера В.Г., Груба В.Н., Дмитриева Г.П., Дробаденко В.П., Заря А.В., Коржаева С.А., Конаднева Д.Г., Колодова О.М., Лахтина В.П., Решетнева Е.К., Смолдырева А.Е., Фролова А.Г. и других,

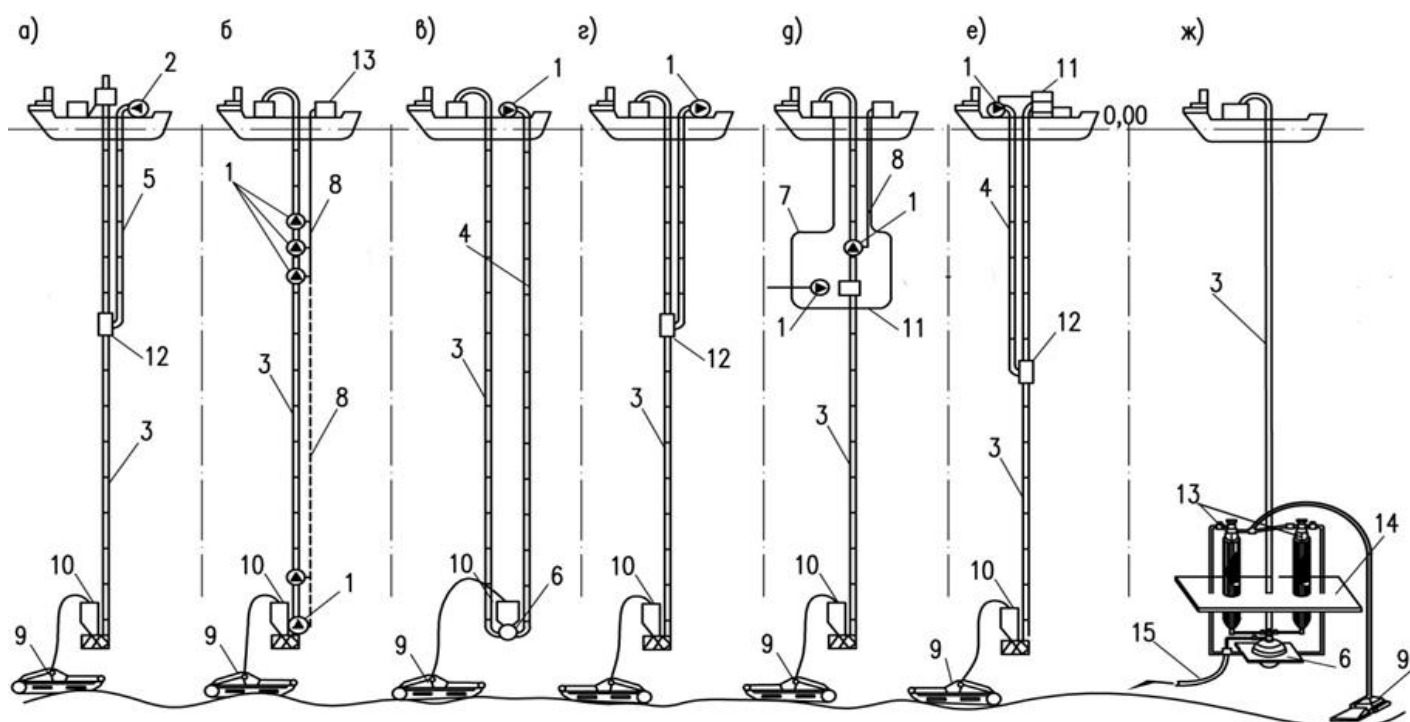


Рис. 1. Систематизация технических средств и способов глубоководного гидравлического подъема железомарганцевых конкреций: а) – эрлифтный; б) – погружной-грунтонососный; в) – с загрузочными аппаратами; г) – с твердыми элементами плавучести; д) – с вертикальными пустотелыми камерами УППК; е) – с использованием жидких углеводородов, плотность которых меньше плотности морской воды; ж) – с загрузочными аппаратами и аппаратом колонного типа, позволяющими разделять донные осадки непосредственно на месте производства работ. 1 – электронасосный агрегат; 2 – компрессор; 3 – транспортный трубопровод; 4 – трубопроводы подачи рабочей жидкости; 5 – воздухопровод; 6 – загрузочный аппарат; 7 – камера; 8 – электрокабель силовой; 9 – агрегат сбора; 10 – бункер-питатель низконапорный; 11 – сепаратор; 12 – смеситель; 13 – аппарат колонного типа; 14 – погружная платформа; 15 – слив илистой фракции из колонного аппарата

систематизированы и проанализированы различные типы загрузочных аппаратов в зависимости от условий гидродинамической разгрузки (рис.2) (гравитационный, струйный, фильтрационный, с использованием закрученного потока жидкости, с использованием коаксиальных закрученных потоков (эффект искусственного смерча)) твердого в напорный трубопровод и проведена их аналитическая оценка. Установлено, что для интенсификации процесса гидротранспортирования и стабильной подачи гидросмеси, необходимо применять загрузочные аппараты вихревого пульпоприготовления, основанные на использовании кинетической энергии коаксиально-закрученных струй жидкости.

В третьей главе

обосновывается применение коаксиально закрученных струй жидкости (эффекта искусственного смерча) в загрузочных аппаратах для формирования высоконасыщенной твердым гидросмеси. Приводятся результаты опытно-промышленных испытаний патентночистых конструкций аппаратов, разработанных в МГРИ-РГГРУ, на горнообогатительных предприятиях и в морских условиях на Черном море в акватории г. Новороссийска (рис.3).

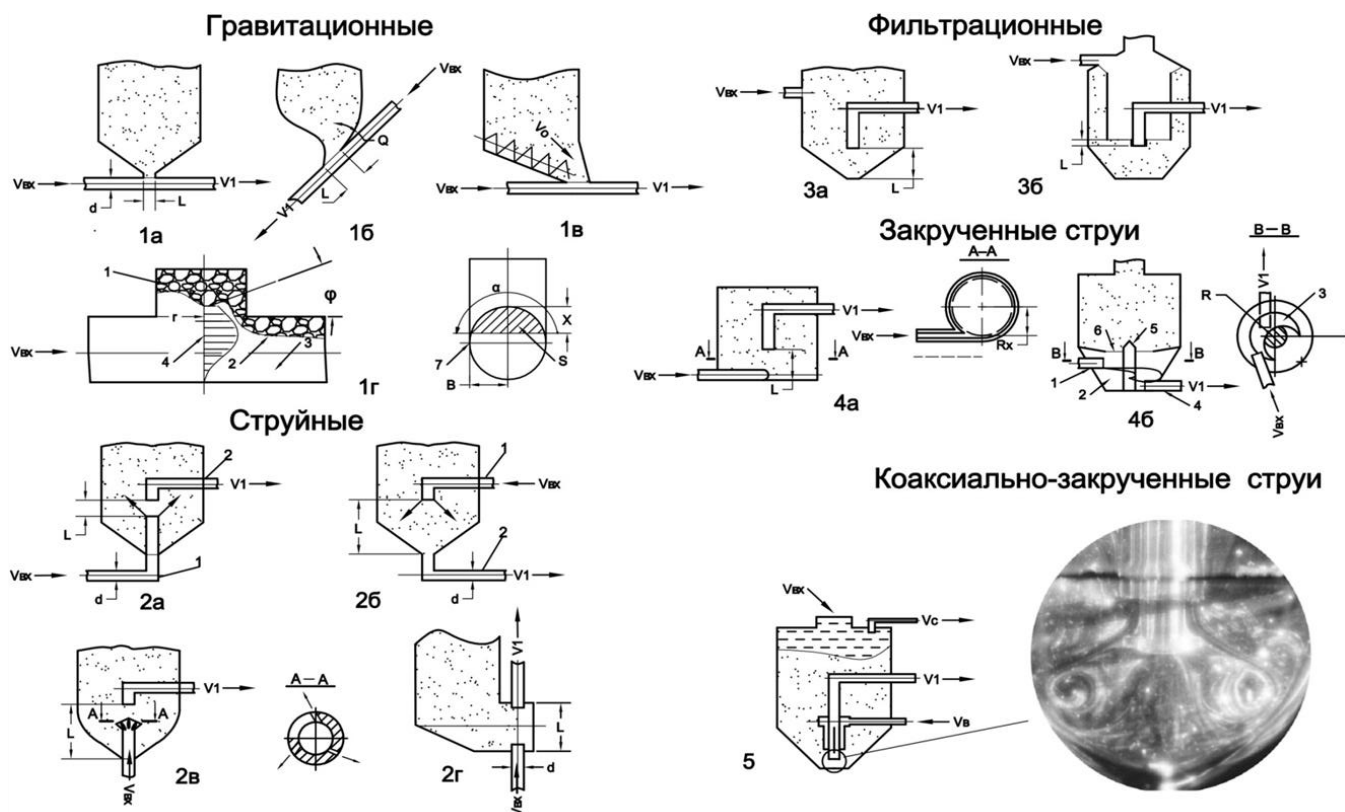


Рис. 2. Систематизация загрузочных аппаратов по гидродинамическим условиям формирования гидросмеси.

1. Гравитационный: а) непосредственно в напорный трубопровод; б) через смесительную камеру; в) при помощи механических побудителей; г) гидродинамика гравитационной разгрузки. 2. Струйный: а) в восходящем и б) в нисходящем потоках; в) с распылением жидкости через коническую насадку; г) с расположением патрубков в нише шлюзовой камеры. 3. Фильтрационный: а) фильтрационный с ограждающей трубой; б) с телескопическим всасом. 4. С использованием закрученного потока жидкости: а) за счет тангенциального подвода у плоского дна камеры; б) за счет тангенциального подвода и винтовой перегородки. 5. С использованием коаксиальных закрученных потоков (эффект искусственного смерча).

Анализируются данные экспериментальных исследований, полученные сотрудниками МГРИ-РГГРУ в натурных условиях промышленных испытаний гидротранспортных установок вихревого пульпоприготовления.

Установлены особенности гидродинамики процесса гидровзвешивания твердого с устойчивой зоной пульпообразования и стабилизированной величиной плотности гидросмеси в зоне разгрузки гидротранспортного аппарата. Разработаны методологические аспекты расчета процесса псевдооживления слоя твердого в объеме загрузочно-транспортного аппарата. Рассматриваются данные анализа лабораторных экспериментов с визуализацией гидродинамических условий формирования закрученных потоков методом лазерного светового ножа (ЛНС).

Приводятся результаты сравнительных исследований по влиянию угла раскрытия коаксиально-закрученных и прямоточных струй на величину объемной плотности, формируемой гидросмеси, полученные на уникальной стендовой установке (УСУ), разработанной на кафедре геотехнологических

способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ, зарегистрированной в Минобрнауке под № 4-73.



Рис.3. Морские испытания загрузочных аппаратов с использованием энергии закрученных струй на НИС «Полигон» на акватории Черного моря (г. Новороссийск): а – палубная загрузочно-обменная емкость торообразной формы; б – донная загрузочно-обменная емкость.

В четвертой главе

дано научное обоснование процессов принудительного вытеснения двухфазной смеси в камере загрузочного аппарата, обосновано взаимодействие зернистого материала и рабочего жидкостного потока под действием гравитационно-центробежных сил, а также перепада давления в области вытеснения загрузочно-транспортных аппаратов.

Приведены методические основы расчета напорно-расходной характеристики затопленных струй в зоне разгрузки камеры загрузочного аппарата, в том числе определен максимальный расход жидкости через кольцевую насадку. Дана методология расчета расходно-напорных характеристик и геометрических параметров массообменно-гидротранспортного аппарата.

В пятой главе

на основе аналитических исследований научно-технической литературы определены технологические операции, определяющие структуру промышленного добычного комплекса для освоения глубоководных месторождений ЖМК. Анализируются основные технологические факторы, влияющие на загрязнение поверхности и придонного слоя океана. Предлагаются принципиальные схемы гидроподъема полезных ископаемых со дна морей и океанов с помощью загрузочных аппаратов, а также определена структура предполагаемой системы гидроподъемной установки. Анализируются экспериментальные исследования различных авторов по характеру выноса твердых частиц в процессе разгрузки камер загрузочного аппарата в зависимости

от содержания в гидросмеси глинистых фракций. Рассматривается совместная работа загрузочного аппарата с пульсационной колонной (представляющая собой вертикальный гидравлический классификатор с импульсным восходящим потоком промывной жидкости), образующих полифункциональный массообменно-гидротранспортный комплекс, новизна которого подтверждена патентом РФ.

В заключении

излагаются общие выводы и практические рекомендации.

Первое защищаемое научное положение.

Гидродинамика формирования гидросмеси коаксиально закрученными струями, генерирующими крупномасштабные вихри (эффект искусственного смерча), при определенных скоростях (гидравлической крупности) образуют возле узла разгрузки локальную зону, насыщенную твердыми частицами, и характеризуются типичными кривыми псевдооживления, представляющими собой переходное состояние между взвешенным слоем и процессом гидротранспортирования, который осуществляется при достижении критических скоростей при разгрузке гидросмеси в пульповод.

Анализируя конструктивные и гидродинамические особенности основных типов загрузочных аппаратов, приведенных нами в систематизации на (рис.2), необходимо отметить следующее: гидродинамическое несовершенство большинства из них приводит к зависанию твердого, сводообразованию, неравномерности подачи, большой энергоемкости (особенно при закрутке потока у дна камеры) и другие.

В большинстве своем они имеют сложную и громоздкую конструкцию, предназначены в основном для стационарных, долгодействующих на одном месте аппаратов.

Для условий глубоководного подъема необходим специальный тип загрузочного аппарата, отвечающий следующим требованиям: компактная и простая конструкция, допускающая быструю и нетрудоемкую переустановку; износостойкость элементов его конструкции; отсутствие переизмельчения материала; эффективность подъема крупных фракций; простые схемы регулирования и управления; стабильность подачи гидросмеси на переработку с минимальными потерями полезного компонента и низкой экологической нагрузкой на окружающую среду.

Эти недостатки сведены к минимуму, когда рабочим агентом для образования и транспортирования высоконасыщенной гидросмеси является коаксиально закрученный поток воды, формируемый в специальной камере за счет соосного расположения внутреннего (разгрузочного) патрубка и внешнего (водяного), к которому тангенциально подводится напорная вода от насоса. Коаксиально-закрученные струи при выходе из кольцевого зазора генерируют крупномасштабные вихри (эффект искусственного смерча) (рис.4). Опытные и опытно-промышленные испытания нескольких конструктивных вариантов аппарата проводились сотрудниками кафедры при гидротранспортировании

различных твердых полезных ископаемых на горнодобывающих предприятиях (ВерхнеДнепровском ГМК, Иршинском ГОКе, прииске «Отрожный» и др.),

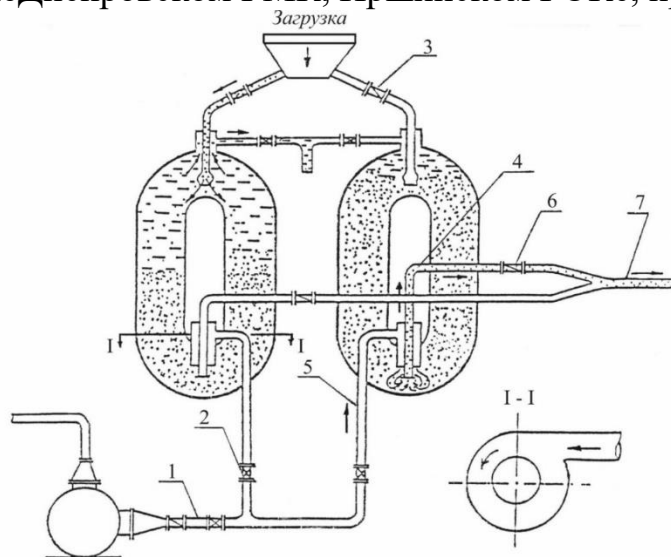


Рис.4.

Принципиальная схема загрузочного аппарата:
1 – трубопровод напорной воды; 2 – задвижка; 3 и 6 – обратные клапаны; 4 – внутренний трубопровод (пульповод); 5 – трубопровод с тангенциальным подводом к коаксиальным патрубкам; 7 – магистральный пульповод.

в том числе на акватории Черного моря (г. Новороссийск) сотрудниками МГРИ-РГГРУ совместно с ЦКБ «Океангеотехника» и Черноморской опытно-геодезической экспедицией. Результаты испытаний подтвердили их надежную работоспособность и эффективность. Для проведения эксперимента были использованы железомарганцевые конкреции, собранные экспедициями «Южморгеологии» в центральной части Тихого океана. С борта НИС «Полигон» осуществлялся непрерывный процесс гидроподъема до 100 м (рис.3).

Основными технологическими показателями, проведенных испытаний в различных горнотехнических условиях являлись:

- формирование высоконасыщенной пульпы (30-40% по объему), т.е. сокращение удельного расхода воды на транспортирование более чем в 2,5÷3 раза, тем самым значительно уменьшая энергоёмкость процесса;

- возможность увеличения более 3÷5 раз дальности транспортирования концентрированной гидросмеси, что резко снижает многоступенчатость (по сравнению с грунтонасосами) и поэтому повышает надежность работы всей гидротранспортной системы и соответственно снижает эксплуатационные расходы;

- исключение абразивного износа движущихся частей трубопроводного оборудования, так как двигателем является не грунтовой насос, а водяной насос, что позволяет снизить металлоёмкость процесса транспортирования;

- значительное уменьшение переизмельчения транспортируемых минеральных частиц, что характерно для грунтовых центробежных насосов при прохождении твердого материала через проточные каналы;

- возможность транспортирования кусков твердого материала увеличенного размера, который, в отличие от грунтонасосов, определяется не проходным сечением проточных каналов, а диаметром транспортного трубопровода (пульповода);

— повышение стабильности равномерной подачи гидросмеси на обогатительные аппараты, что способствует повышению извлечения ценных компонентов при переработке их на обогатительных фабриках.

Результаты опытных и опытно-промышленных исследований приведенных на рисунках 5, 6, 7, 8 в зависимости от скорости и времени разгрузки гидросмеси в напорный трубопровод показывают, что величина весовой плотности гидросмеси, остается стабильной практически на протяжении всего цикла разгрузки. Было установлено, что устойчивая зона

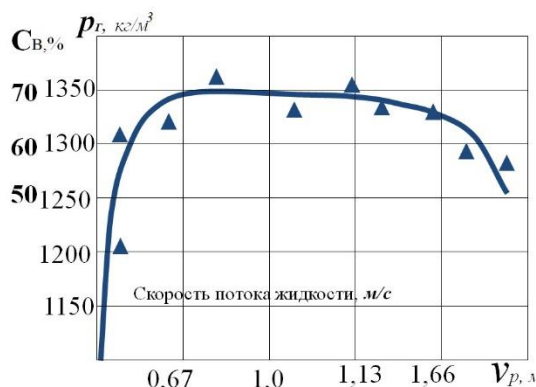


Рис. 5. Зависимость весовой плотности гидросмеси по результатам полигонных испытаний морского опытного комплекса на акватории Черного моря (г.Новороссийск) при подъеме ЖМК с глубины до 100 м.

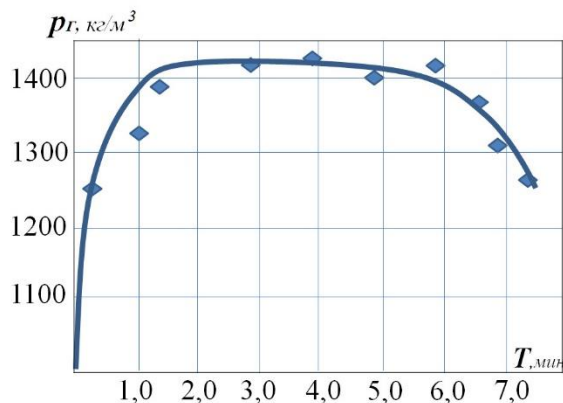


Рис. 6. Зависимость изменения величины весовой плотности гидросмеси (ρ_g) на протяжении цикла разгрузки камеры аппарата.

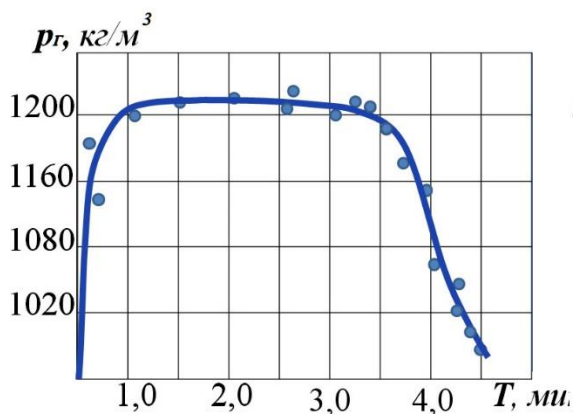


Рис.7. Зависимость весовой плотности гидросмеси от времени разгрузки рабочей емкости при опытных испытаниях эфелеуборочной установки на прииске "Отрожный" (Чукотка).

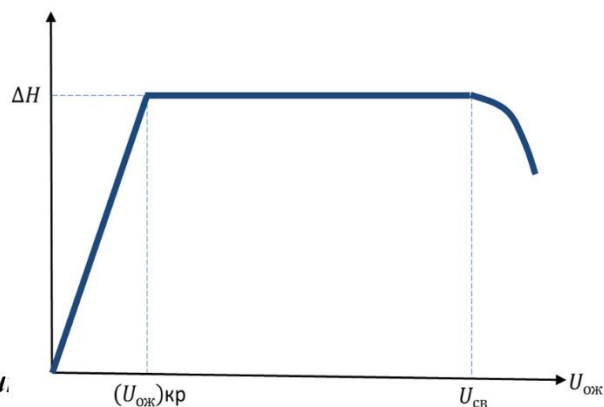


Рис.8. Типовая зависимость псевдоожижения, где $(U_{ож})_{кр}$ — минимальная скорость псевдоожижения; $U_{св}$ — скорость при свободном падении частиц.

пульпообразования с относительно стабильной величиной объемной плотности гидросмеси сохраняется до 70-75% объема загружаемого материала.

Проведенный анализ по определению скоростей свободного падения $U_{св}$ показал, что наиболее близкие значения $U_{св}$ ЖМК можно считать уравнения

Розенбаум Р.Б. и Тодес О.М. Однако для более конкретного вычисления данной величины, как показывают экспериментальные исследования, проведенные на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ необходимо учитывать поправочный коэффициент $k = 0,081 \ln(d) + 0,43$. В итоге скорость свободного падения частиц железомарганцевых конкреций определяется по уравнению:

$$U_{\text{св}} = \frac{\nu}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43). \quad (1)$$

где: Ar – параметр (критерий) Архимеда; d – диаметр частиц, м;
 ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с;

Таким образом, в камере загрузочного аппарата имеет место начальная минимальная скорость псевдоожижения, соответствующая гидравлической крупности частиц при стесненном падении при плотности упаковки $S_k = (1-S)^n$. Показатель степени n зависит от крупности частиц, определяется числом Рейнольдса Re и может быть вычислен по таблице С.В. Ричардсона и В.Р. Заки.

$$U_{\text{ож}} = (1 - S_k)^n \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d \cdot g \cdot \Phi}{\psi}} \quad (2)$$

Конечная (максимальная) скорость уноса единичных частиц на поверхности слоя, соответствует гидравлической крупности твердых частиц при свободном падении $U_{\text{св}}$.

$$U_{\text{св}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d \cdot \Phi \cdot g}{\psi}} \quad (3)$$

где: ψ – коэффициент лобового сопротивления частиц; S_k – плотность упаковки частиц в камере $S_k \approx 0,6$; ρ_T , ρ_0 – плотности твердых частиц и жидкости; d – диаметр частиц; Φ – коэффициент формы частиц; n – показатель стесненности.

Визуализация линий тока коаксиально закрученных струй в лазерном световом луче (рис. 9) позволяет выделить плотные и неплотные части (фазы); расход через плотную фазу определяется условиями начала псевдоожижения, между ними и проходит массообмен в камере загрузочного аппарата. Кинетическая энергия коаксиальной закрутки позволяет для широкого диапазона минеральных (твердых) частиц оставаться в слое псевдоожижения и в тоже время вовлекать другие более крупные фракции в процесс массообмена.



Рис.9. Визуализация линий тока закрученной струи жидкости генерирующей крупномасштабные вихри в лазерном световом луче.

При дальнейшем увеличении скорости потока твердые частицы уносятся из этой зоны. По существу, псевдоожижение представляет собой переходное состояние между неподвижным слоем и гидротранспортированием твердых частиц.

Для гидротранспортирования твердого материала необходимо учитывать избыточный напор в камере, который определяет геометрические параметры загрузочного аппарата, а также существенно влияет на образование зоны псевдоожижения, определяющую степень насыщения гидросмеси твердыми частицами.

Таким образом, при расчетах гидротранспортирования твердого материала, кроме гидравлических сопротивлений присущих трубопроводному транспорту, необходимо учитывать избыточный напор в камере загрузочного аппарата

Избыточный напор, необходимый для создания режима псевдоожижения в камере при высоте слоя твердого в ней L определяется следующим образом (рис.10).

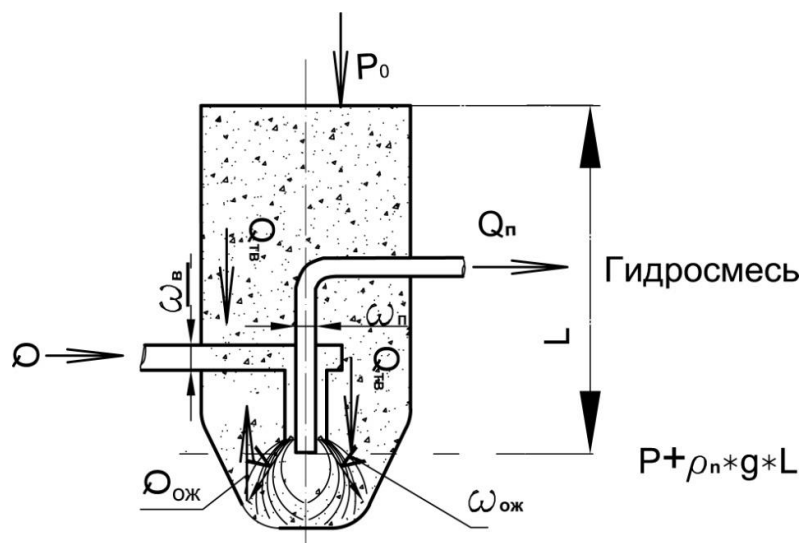


Рис.10. Схема для определения перепада давлений у выхода кольцевой насадки при полном заполнении камеры твердым материалом.

$$\rho_n = S \cdot \rho_T + (1 - S) \cdot \rho_0 \quad (4)$$

где ρ_n , ρ_T , ρ_0 – соответственно плотность пульпы, твердого, воды, кг/м³;
 S – объемная концентрация гидросмеси.

Слой зернистого материала высотой L переходит в псевдоожиженное состояние при следующем условии (4).

<i>Сопротивление восходящему потоку жидкости в камере</i>	=	<i>Вес зернистого материала в камере</i>
---	---	--

или

$$\rho_0 \cdot g \cdot \Delta H \cdot \omega_{ож} = \omega_{ож} \cdot L \cdot \rho_n \cdot g ; \Delta H = L \cdot \frac{\rho_n}{\rho_0} \quad (5)$$

$$\rho_0 \cdot g \cdot \Delta H = g \cdot L \cdot [(\rho_T - \rho_0) \cdot S_k + \rho_0]$$

Необходимый избыточный напор (потери напора) ΔH в камере для создания слоя псевдоожижения минеральных частиц жидкостью:

$$\Delta H = L \cdot \left[\frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot S_k + 1 \right] \quad (6)$$

Второе защищаемое научное положение.

Введенный геометрический параметр центробежной насадки (камеры закручивания) A , определяемый соотношением площадей поперечных сечений

пульповода ω_n и входного патрубка (водовода) ω_{gx} характеризует соответственно производительность и расстояние гидротранспортирования загрузочно-обменного аппарата, который устанавливается по уравнению $A = \frac{R_n}{R_{Bx}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{Bx}}\right)$.

Гидродинамические режимы формирования гидросмеси в коаксиальных патрубках предлагается рассматривать на основе теории центробежной насадки (форсунки), разработанной Г. Н. Абрамовичем.

При этом основным принципиальным отличительным признаком является генерация в кольцевом пространстве соосных патрубков закрученного потока жидкости за счет тангенциального подвода к ним напорной воды, который создает в плоскости разгрузки формируемой гидросмеси псевдооживленный (демпфирующий) слой.

Напор истечения из камеры закручивания кольцевой центробежной насадки (рис.11) равен:

$$\Delta H = \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (7)$$

где ΔH – избыточный напор жидкости (воды) в камере закручивания, м.вод.ст.;

V – суммарная скорость истечения закрученной струи, м/с

$$V = \vartheta^2 + U^2 + V_p \quad (8)$$

где ϑ , U , V_p – соответственно спутная (осевая), тангенциальная и радиальная скорости при выходе из кольцевой щели, м/с.

В отличие от прямоточного струйного течения, характеризующегося двумя составляющими скоростями: - радиальной и осевой, частицы жидкости в закрученном потоке движутся по спиральным траекториям и имеют три компоненты скоростей: радиальную V , осевую ϑ и тангенциальную U . Вид спиралевидной траектории зависит от распределения скоростей в потоке. Если частица имеет окружную и радиальную скорости, то спирали плоские, а окружную и осевую - цилиндрические; окружную, радиальную и осевую - конические. В прямоточных течениях значения V значительно меньше ϑ , направленных вдоль струи, а давление практически постоянно во всем объеме за исключением ядра; в закрученных - около сопла все скорости могут быть соизмеримы друг с другом, причем давление во всем объеме ниже, чем в окружающей среде.

Некоторые специалисты считают, что при скоростях истечения, равных $V=2\div3$ м/с, радиальная скорость при формировании кольцевой струи в коаксиальных патрубках составляет ~2 % от суммарной скорости, поэтому эта скорость в дальнейших расчетах не принимается во внимание и уравнение (8) примет вид

$$V = \vartheta^2 + U^2 \quad (9)$$

С учетом уравнения (9), зависимость (7) примет вид

$$\Delta H = \frac{v^2 + U^2}{2 \cdot g} \quad (10)$$

Радиус закручивания струйного потока при выходе из центробежной насадки может рассматриваться в двух вариантах:

1. радиус закручивания потока соответствует внешней образующей поверхности пульповода R_n (малый радиус).

Векторы скоростей соответствуют также выходу из центробежной насадки и определяют ее расход: Q_1 или Q_2 .

2. радиус закручивания потока при выходе из центробежной насадки соответствует внутренней образующей центробежной насадки R_0 (большой радиус);

Вихрь с радиусом R_n в основном определяет локальное пульпоприготовление (псевдоожижение) в плоскости вытеснения у внутреннего патрубка (пульповода).

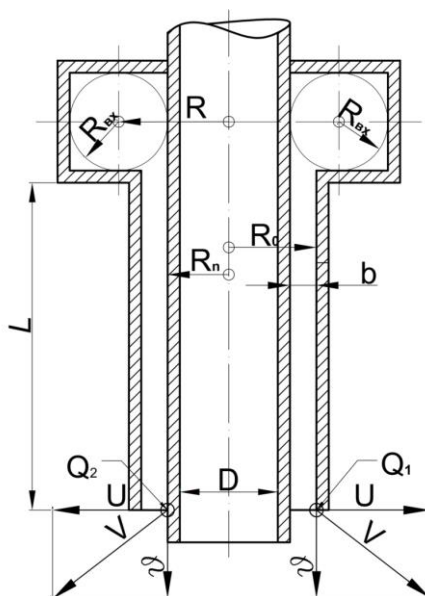


Рис.11. Расчетная схема аппарата вихревого пульпоприготовления.

Вихрь с радиусом R_0 в основном определяет начальный момент трогания зернистого материала (состояние взвешивания) по внешней поверхности искусственного жидкостного сферического грушеобразного потока.

Исходя из уравнения момента количества движения имеем:

$$Q \cdot \rho \cdot R \cdot v_{\text{вх}} = Q \cdot \rho \cdot R_n \cdot U \quad (11)$$

где Q – расход напорной жидкости м³/с;

R – начальный радиус закручивания, м;

v – скорость потока при входе в камеру закручивания, м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Особенностью закрученного потока является то, что создаваемый кольцевой водяной вихрь должен с минимальными потерями сохранить первоначально созданный момент количества движения в камере закручивания: $Q \cdot \rho \cdot R \cdot v_{\text{вх}}$

Для этого центробежная насадка должна иметь максимальный коэффициент расхода при оптимально создаваемом радиусе внутреннего вихря

в средней части потока, который соответствует диаметру транспортного пульповода $D_n/2=R_{\varepsilon}$. Поэтому минимум потерь энергии от гидроудара и гидравлического прыжка будет при условии равенства диаметров пульповода (внешнего) и формируемого центрального вихря центробежной насадки.

$$R_{\varepsilon} = R_n \quad (12)$$

Таким образом, исходя из уравнения (10) получим тангенциальную скорость на внешней образующей поверхности пульповода, формирующую демпфирующий, псевдооживленный слой в плоскости вытеснения сформированной гидросмеси (рис.11).

$$U = v_{\text{вх}} \cdot \frac{R}{R_n} \quad (13)$$

Для сечений 1-1 и 2-2 (рис. 11) уравнение неразрывности примет вид:

$$\pi \cdot R_{\text{вх}}^2 \cdot v_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D_0^2 - \pi \cdot D_n^2}{4} \cdot v \quad (14)$$

где $R_{\text{вх}}$ – внутренний радиус входного патрубка (рис. 11), м;

D_0, D_n – соответственно, внутренний диаметр центробежной насадки и внешний диаметр транспортного пульповода, м;

$\pi \cdot R_{\text{вх}}^2$ – площадь поперечного сечения входного патрубка, м²;

$\frac{\pi \cdot D_0^2 - \pi \cdot D_n^2}{4}$ – площадь поперечного сечения кольцевой струи, м².

Преобразуя уравнение (14) получим зависимость входной скорости потока от выходных параметров центробежной насадки (камеры завихрения):

$$v_{\text{вх}} = v \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0^2}{R_{\text{вх}}^2} \quad (15)$$

где ε – коэффициент сжатия кольцевой струи центробежной насадки (коэффициент заполнения сечения кольцевой струи).

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \quad \text{или} \quad \varepsilon = 1 - \frac{R_n^2}{R_0^2} \quad (16)$$

где ω_0 – площадь поперечного сечения камеры, м²;

ω_n – площадь поперечного сечения транспортного пульповода (по внешнему диаметру), м².

Используя уравнение (16) можно определить:

– наружный радиус пульповода;

$$R_n = R_0 \cdot \sqrt{1 - \varepsilon} \quad (17)$$

– внутренний радиус центробежной насадки;

$$R_0 = \frac{R_n}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad (18)$$

Подставляя уравнение (15) в уравнение (13), получим значение тангенциальной скорости в таком виде:

$$U = v \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0^2 \cdot R}{R_n \cdot R_{\text{вх}}^2} \quad (19)$$

Используя соотношения (17) и (18), получим:

$$U = v \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0}{R_n} \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{\text{вх}}^2} \quad \text{или} \quad U = v \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{\text{вх}}^2} \quad (20)$$

Уравнение (20) определяет соотношение тангенциальной скорости и осевой, т.е. основные параметры центробежной насадки: коэффициент заполнения сечения ε ; радиус закрутки R ; внутренний радиус центробежной насадки R_0 и радиус входного патрубка $R_{\text{вх}}$. Тогда имеем:

$$R = R_n + R_{\text{вх}} \quad (21)$$

Профессор Г.Н. Абрамович, исследуя также насадки для распыла топлива в самолетных двигателях, вводит понятие геометрического параметра центробежной насадки.

$$A = \frac{R_0 \cdot R}{R_{\text{вх}}^2} \quad (22)$$

Уравнение (22) определяет основной геометрический параметр для аппаратов, где пульпоприготовление формируется за счет спутной сплошной струи, а не кольцевой как в рассматриваемом случае.

Анализируя этот параметр A можно заключить, что косвенно он влияет на величину коэффициента заполнения сечения ε .

Совмещая уравнения (21) и (22) имеем следующие соотношения:

$$U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \cdot \frac{R_0 \cdot (R_n + R_{\text{вх}})}{R_{\text{вх}}^2}$$

или

$$U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \cdot \frac{R_0}{R_n} \cdot \frac{R_n \cdot (R_n + R_{\text{вх}})}{R_{\text{вх}}^2}$$

а с учетом выражения (19) окончательно получаем:

$$U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \cdot \frac{R_n}{R_{\text{вх}}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{\text{вх}}}\right) \quad (23)$$

Представим геометрический параметр центробежной насадки как

$$A = \frac{R_n}{R_{\text{вх}}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{\text{вх}}}\right) \quad (24)$$

Введенный геометрический параметр камеры закручивания (центробежной насадки) по уравнению (24) реально оценивает сущность процесса формирования псевдооживления демпфирующего слоя при напорном закручивании потока воды при входном радиусе трубы $R_{\text{вх}}$ и последующего вытеснения по транспортному пульповоду R_n с учетом необходимых расходно-напорных параметров гидротранспортирования твердого.

Следует заметить, что для уравнения (24), площадь поперечного сечения пульповода ω_n , определяет производительность установки, а площадь поперечного сечения напорного входного патрубка (при неизменном значении входного давления) $\omega_{\text{вх}}$ определяет дальность гидротранспортирования для грузочно-обменных аппаратов с пульпоприготовлением закрученной кольцевой струей при формировании псевдооживленного слоя возле узла разгрузки с последующим вытеснением твердого материала из камеры грузочно-обменного аппарата по пульповоду площадью поперечного сечения ω_n .

Исходя из уравнений (23) и (24), тангенциальная скорость из насадки равна:

$$U = \vartheta \cdot A \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (25)$$

Подставляя выражение (25) в уравнение (10), получим:

$$\Delta H = \left[1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^2 \right] \cdot \frac{\vartheta^2}{2 \cdot g} \quad (26)$$

Третье защищаемое научное положение.

Максимальные расходы жидкости через центробежную насадку (вихревую камеру) устанавливаются по уравнению $Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$, зависящие от коэффициентов расхода и заполнения (сжатия) кольцевой струи в соосных патрубках при определенных значениях геометрического параметра A .

Осевая скорость истечения через кольцевую щель центробежной насадки исходя из уравнения (25) и (26) равна:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (27)$$

где φ – коэффициент скорости при истечении кольцевой закрученной струи.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^2}} \quad (28)$$

С учетом значения коэффициента сжатия ε по уравнению (15) расход жидкости через центробежную насадку равен:

$$Q = (\omega_0 - \omega_n) \cdot \vartheta = \varepsilon \cdot \omega_0 \cdot \vartheta \quad (29)$$

а используя уравнение (27) получим:

$$Q = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \quad (30)$$

Коэффициент расхода μ при формировании кольцевой закрученной струи центробежной насадки равен:

$$\mu = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^2}} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1 - \varepsilon)^2}}} \quad (31)$$

Анализ этих уравнений показывает, что коэффициент заполнения сечения ε неоднозначно влияет на коэффициент расхода кольцевой струи μ . Поэтому определяем максимальную пропускную способность центробежной насадки с учетом начальных параметров потока ϑ_{ex} и R , т.е. исследуем функцию (31) на экстремум:

$$\frac{d\mu}{d\varepsilon} = -0,5 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1 - \varepsilon)^2} \right)^{-1,5} \cdot [-2 \cdot \varepsilon^{-3} - 2 \cdot A^2 \cdot (1 - \varepsilon)^{-3} \cdot (-1)] \quad (32)$$

Из построения графической зависимости $\mu = f(\varepsilon, A)$ (рис. 12) видно, что при определенном значении коэффициента заполнения сечения центробежной

насадки ε , коэффициент расхода жидкости через эту насадку может иметь максимум, т.е. имеют место минимальные потери при формировании кольцевого потока в центробежной насадке, а режим ее работы оптимален.

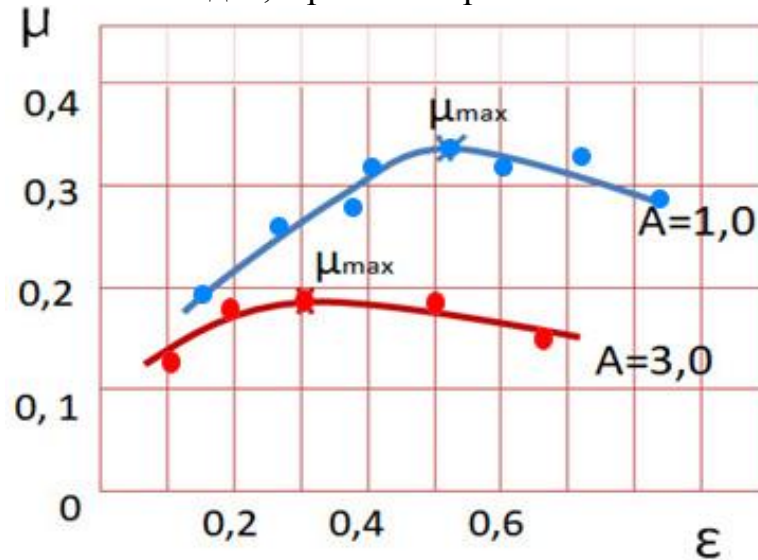


Рис. 12. Зависимость оптимума коэффициента расхода центробежной насадки μ от коэффициента заполнения сечения струи ε .

Максимум коэффициента расхода центробежной насадки имеет место при следующем соотношении

$$A = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^{1,5} \quad (33)$$

Подставив его в уравнение (31), получим максимальное значение коэффициента расхода центробежной насадки, работающей с наибольшим расходом:

$$\mu_{max} = \varepsilon^{1,5} \quad (34)$$

При этом максимальный расход через центробежную насадку

$$Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \quad (35)$$

Подставив уравнение (33) в (28), получим значение коэффициента скорости φ :

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^3 \cdot \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{-2}}}$$

или

$$\varphi = \varepsilon^{0,5} ; \varphi = \sqrt{\varepsilon}$$

Таким образом, уравнение расхода (35) равно

$$Q_{max} = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$$

где φ – коэффициент скорости кольцевой закрученной струи;

ε – коэффициент заполнения сечения кольцевой струи (коэффициент сжатия);

$\mu = \varphi \cdot \varepsilon$ – коэффициент расхода центробежной насадки.

Аналогично исследуем второй вариант, когда радиус закручивания потока при выходе из центробежной насадки соответствует внутренней образующей

центробежной насадки R_0 (большой радиус) уравнение момента количества движения представлен в виде

$$Q \cdot \rho \cdot R \cdot v_{\text{вх}} = Q \cdot \rho \cdot U \cdot R_0 \quad (36)$$

где R_0 – радиус внутренней образующей центробежной насадки (рис.10), м., а функциональная зависимость оптимума коэффициента расхода центробежной насадки μ от коэффициента заполнения сечения струи ε представлена на рисунке 13.

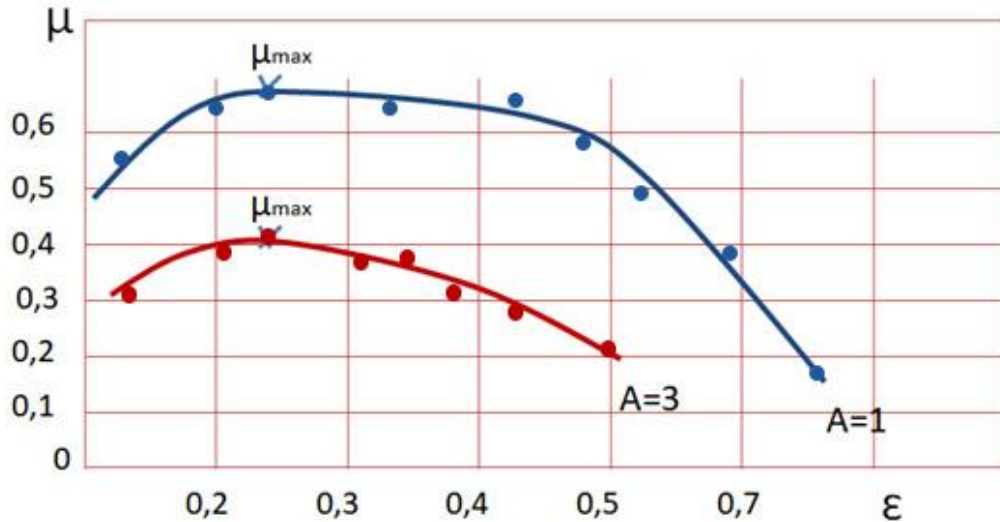


Рис. 13. Зависимость оптимума коэффициента расхода центробежной насадки μ от коэффициента заполнения сечения струи ε .

После математических преобразований, представленных в диссертации получим, что максимум коэффициента расхода центробежной насадки имеет место при следующем соотношении

$$A = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^3} \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (37)$$

Используя это уравнение, а также уравнение

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1 - \varepsilon}}} \quad (38)$$

получим максимальное значение коэффициента расхода центробежной насадки

$$\mu_{\text{max}} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}} \quad (39)$$

При этом максимальный расход через центробежную насадку равен

$$Q_{\text{max}} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \quad (40)$$

Четвертое защищаемое научное положение.

Объемная концентрация (плотность) формируемой в аппарате гидросмеси, определяемая границами псевдооживленного слоя, изменяется за счет осевой скорости при перемещении потока к загрузочному патрубку и регулируется расстоянием между плоскостью истечения кольцевой закрученной струи и плоскостью разгрузочного патрубка (торца пульповода).

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных нами в различных горнотехнических условиях, в том числе и морских показывает, что основным регулятором изменения объемной концентрации (плотности) гидросмеси, сформированной закрученными кольцевыми струями в аппарате и вытесняемой (разгружаемой) в пульповод является расстояние l между плоскостью кольцевого сечения начального истечения закрученной струи и плоскостью (торцом) разгрузочного патрубка трубопровода (рис.14).

Если суммарная начальная скорость истечения из насадки определяется избыточным напором, величина которого должна в первую очередь осуществлять интенсивный процесс псевдооживления твердого материала в камере аппарата в соответствии с высотой слоя твердого, то заданную при расчете гидротранспорта концентрацию S должна определять скорость этой же закрученной струи у плоскости разгрузочного торца пульповода.

При создании перепада давления в плоскости вытеснения твердого материала, как составляющая часть двухфазной смеси, в пульповод, вода должна профильтроваться через толщу слоя. Под давлением фильтрационного потока, твердые частицы взвешиваются и поступают в узел разгрузки (к устью пульповода). Образующаяся каверна непрерывно заполняется материалом из вышележащих слоев. В результате чего в зоне вытеснения происходит непрерывное движение твердых фракций сверху вниз в противотоке поднимающегося фильтрационного потока.

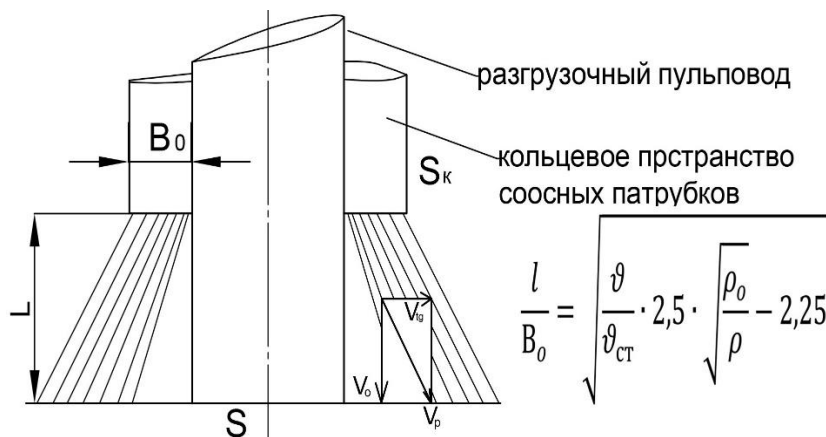


Рис.14.Фрагмент (участок) разгрузочного узла.

Это дает основание рассматривать движущийся материал как тяжелую жидкость с объемным весом, равным объемному весу этой гидросмеси. Общая скорость V определяет границы псевдооживления возле узла разгрузки, где расположен входной патрубок пульповода. Тангенциальная скорость U устанавливает боковые границы распространения потока воды в твердый материал. Осевая скорость ϑ определяет границы псевдооживленного состояния твердого материала определенной гидравлической крупности вдоль пульповода до плотности входа твердого материала в пульповод. Таким образом, закономерность уменьшения скорости при перемещении потока в камере должна осуществляться для осевой скорости ϑ .

В таблице 1 проанализированы результаты опытных зависимостей распространения затопленных свободных струй, которые получили хорошее экспериментальное подтверждение.

Таблица 1.

Осевые скорости затопленных (в воде) струй по ее длине (по различным формулам).

1	$\vartheta_{\text{ср}} = \vartheta \cdot \frac{1}{1 + 0,476 \cdot \frac{l}{d_0}}$	Струя воздуха в воздухе Г.Н.Абрамович	(41)
2	$\vartheta_{\text{ср}} = \vartheta \cdot \frac{1}{1 + 0,345 \cdot \frac{l}{d_0}}$	Струя воды в воде И.М. Коновалов	(42)
3	$\vartheta_{\text{ср}} = \vartheta \cdot \frac{1}{1 + 0,476 \cdot \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\text{ср}}}}$	струя воздуха в газе ρ_0 различной плотности $\rho_{\text{ср}}$ И.А. Шепелев	(43)

Уравнение 43 определяет изменение средней скорости по длине при условии, что начальная плотность струи (ρ_0) и окружающей среды ($\rho_{\text{ср}}$) существенно различны (опыты проведены в диапазоне $\frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_0} = 0,5 \div 2,0$)

Кроме того, экспериментально установлено, что отношение осевой скорости к средней длине распространения струи является величиной постоянной.

$$\frac{\vartheta_{\text{ос}}}{\vartheta_{\text{ср}}} = 3,1 \quad (44)$$

В таблице 2 представлены опыты, которые провел Ц.Э. Мирцхулава по изучению локального размыва несвязных затопленных грунтов падающей струей воды.

Таблица 2.

Изменение осевой скорости плоской струи воды толщиной B_0 .

1. в воде	$\vartheta'_{\text{ос}} = \vartheta \cdot \frac{1}{0,9 + 0,09 \cdot \frac{l}{B_0}}$	(45)
2. в несвязном затопленном грунте	$\vartheta''_{\text{ос}} = \vartheta \cdot \frac{1}{0,9 + 0,12 \cdot \frac{l}{B_0}}$	(46)
3. отражение струи от дна при местном размыве в несвязном затопленном грунте	$\vartheta'''_{\text{ос}} = \vartheta_{\text{дно}} \cdot \frac{1}{0,9 + 0,12 \cdot (\frac{l}{B_0})^2}$	(47)

Это подтверждает мнения Л.Г. Лойцянского и Г.Н. Абрамовича об изменении осевой скорости и квадратичном изменении тангенциальной скорости по длине струи (табл. 3) l .

Следует заметить, что струя, отраженная от стенки воронки локального размыва является касательной к размываемой породе, ее можно считать аналогией тангенциальной скорости в закрученных струях, которая касательна по отношению к породе в камере аппарата.

Таким образом, по аналогии со скоростями закрученной струи можно утверждать, что:

Таблица 3.

Осевые скорости затопленных (в воде) струй по ее длине (по различным формулам).

№ № п/п	Автор	l=0.2 м	l=0.4 м	l=0.6 м	l=1.0 м
1	Жученко В.А. $U_{oc} = U_o \cdot 7,08 \cdot \frac{d_o}{l}$	7,08	3,54	2,36	1,42
2	Коновалов И.М. $U_{oc} = \frac{U_o \cdot 2,42}{1 + 0,345 \cdot \frac{l}{d_o}}$	6,54	3,39	2,27	1,38
3	Мирцхулава Ц.Э. $U_{oc} = U_o \cdot \frac{1}{0,9 + 0,09 \cdot \frac{l}{d_o}}$	8,89	4,94	3,42	2,1
4	Мирцхулава Ц.Э. $U_{oc} = U_o \cdot \frac{1}{0,9 + 0,12 \cdot \frac{l}{d_o}}$	7,02	3,8	2,61	1,6
5	Мирцхулава Ц.Э. $U_{oc} = U_o \cdot \frac{1}{0,9 + 0,4 \cdot (\frac{l}{d_o})^2}$	0,06	0,016	0,007	0,0025

$v_{дно}$ - начальная скорость при отражении от дна воронки локального размыва (аналогична начальной осевой скорости истечения из кольцевой центробежной насадки), м/с;

v_{oc} - осевая скорость (аналогична осевой скорости в плоскости разгрузочного пульповода), м/с.

С учетом распространения закрученной струи в гидросмеси камеры загрузочного аппарата с плотностью ρ_{cp}

$$\rho_{cp} = S_{II} \cdot \rho_T + (1 - S_{II}) \cdot \rho_o \quad (48)$$

уравнение 47 максимально приближенное к условию истечения закрученной струи в псевдооживленный слой будет иметь вид :

$$v_{oc} = v \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_{cp}}} \cdot \frac{1}{0,9 + 0,4 \cdot (\frac{l}{B_o})^2} \quad (49)$$

где S_{II} – концентрация твердого в пульповоде;

B_o – ширина кольцевой закрученной струи при начальном истечении, м;

v_{oc} - осевая скорость струи, которая фактически соответствует гидравлической крупности твердого материала (d_T, ρ_T) вытесненного в плоскости разгрузочного отверстия пульповода с заданной консистенцией.

Таким образом, предложенная методология изменения скорости затопленной струи заключается в следующем:

1. Определяется число Ar

$$Ar = \frac{d_T^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \quad (50)$$

2. Число $Re_{св}$ (для свободного падения) равно

$$Re_{св} = e^{10 \cdot (\frac{\sqrt{\ln(10 \cdot Ar)}}{\ln 10} - 1)} \quad (51)$$

3. Для определенного числа $Re_{св}$ устанавливается показатель степени в коэффициенте стесненности (n).

4. Введя коэффициент формы частиц K_ϕ определяется число $Re_{ст}$ для стесненного падения.

$$Re_{ст} = (1 - S)^n \cdot K_\phi \cdot Re_{св} \quad (52)$$

5. Определяется скорость стесненного падения твердых частиц, которая будет соответствовать осевой скорости закрученной струи, приготавливающей гидросмесь в плоскости разгрузочного торца пульповода с гидротранспортной консистенцией S .

$$Re_{ст} = \frac{V_{ст} \cdot d_T}{\nu} \quad \vartheta_{ст} = \frac{Re_{ст} \cdot \nu}{d_T} \quad (53)$$

в плоскости разгрузочного отверстия

$$\vartheta_{ос} = \vartheta_{ст} \quad (54)$$

Используя уравнения 49 и 54 устанавливаем уравнение для определения необходимого расстояния l между плоскостью начального истечения кольцевой струи и плоскостью разгрузочного отверстия пульповода, основного параметра характеризующего объемную плотность формируемой гидросмеси.

$$\frac{l}{B_0} = \sqrt{\frac{\vartheta}{\vartheta_{ст}} \cdot 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} - 2,25} \quad (55)$$

Пятое защищаемое научное положение.

Угол раскрытия кольцевой закрученной струи ($\sim 90^\circ$ и более), образует гиперболоид вращения и значительно превышает его значения в прямоточных затопленных струях ($\sim 27^\circ$), что резко интенсифицирует массообмен между струей и окружающей средой, формируя высоконасыщенную твердыми частицами двухфазную смесь ($\sim 35-45\%$ по объему) и, как следствие, значительно увеличивает стабильную часовую производительность загрузочно-транспортного аппарата по горной массе.

По нашему мнению, угол раскрытия закрученной струи является одним из основных ее гидродинамических характеристик, некоторые специалисты считают это несколько условное понятие, так как границы струи у устья сопла образуют либо конус, либо гиперболоид вращения. Результаты наших исследований показали, что чем меньше разница в плотности закрученной струи и окружающей среды и чем интенсивнее закрутка, тем больше форма струи отличается от конической.

Однако с некоторым приближением можно считать начальный участок струи коническим и вершину этого конуса - углом раскрытия струи α . Он определяется

различными способами. В наших исследованиях для установления самой границы струи применялось фотографирование струи, в том числе и подкрашенной.

Кроме того, нами использовалась лабораторная установка с моделью из оргстекла, цилиндрической камерой закручивания и визуализацией гидродинамических условий формирования закрученных потоков методом лазерного светового ножа (ЛСН), разработанного на кафедре обогащения руд цветных и редких металлов МИСиС. Этот способ для аналогичных исследований применялся ранее в работе В.П. Дробаденко, результаты которых нами были проанализированы и учтены.

Принцип работы ЛСН (рис.15) заключался в пересечении исследуемого потока тонким плоским лучом лазера (гелий-кадмиевого типа или аргонового) с визуальным наблюдением и фотосъемкой линий тока в полученной световой плоскости. Для этого в жидкость вводилось светоконтрастное вещество, частицы которого рассеивали луч за счет отражения или преломления, либо флуоресцируя с другой длиной волны. Использовался насыщенный раствор нафталина в этиловом спирте с нулевой плавучестью и коэффициентом преломления $n=1,58$, в отличие от воды $n=1,33$. Кроме того, для повышения интегральной яркости изображения в спиртовой раствор нафталина вводился флуоресцеин натрия.

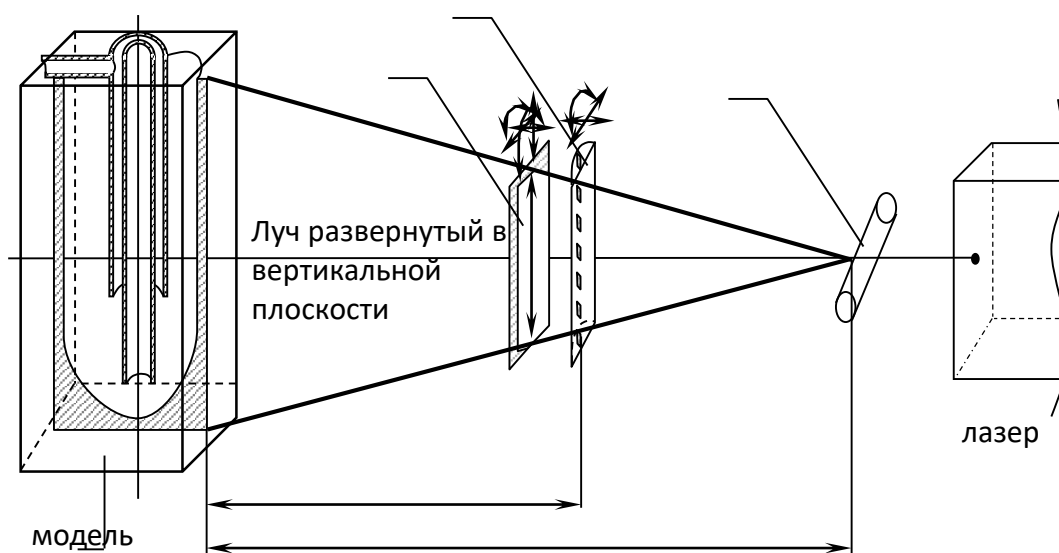


Рис. 15. Схема исследования гидродинамики коаксиальных закрученных потоков методом лазерного светового ножа.

1 - линза развертки; 2 - фокусирующая линза; 3 - щелевая диафрагма.

На рисунке 15 показана оптическая схема установки, состоящая из линзы развертки 1, фокусирующей линзы 2 и щелевой диафрагмы 3. Линза развертки луча представляет собой отрезок кварцевого цилиндра трансформирующая нитевидный луч лазера в расходящийся плоский луч.

Сам объект исследований - цилиндрическая камера диаметром 100 мм и высотой 200 мм была изготовлена из оргстекла (отшлифованного).

В центре ее размещался узел закручивания с коаксиальным расположением рабочих патрубков. Напорная вода подавалась по патрубку с внутренним диаметром 9 мм и тангенциальным подводом к камере закручивания.

Результаты проведенных исследований, представленные на рис. 15 и 16 однозначно подтверждают, что границы угла раскрытия струи по форме приближаются к гиперболоиду вращения и по величине в несколько раз превышают прямоточные – в наших экспериментах - более 90° . Сложная гидродинамика закрученных струй затрудняет получение универсального профиля скоростей и давлений.

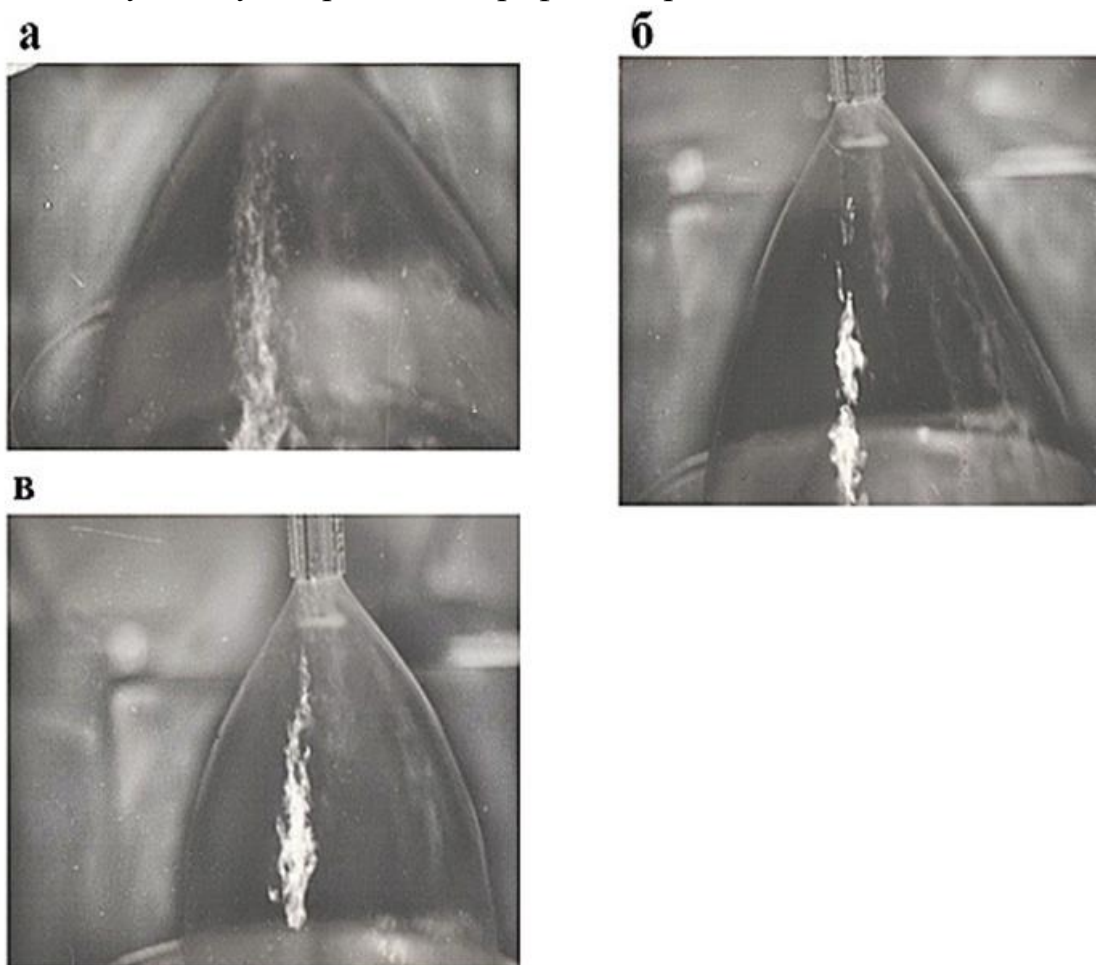


Рис. 16. Гиперболоид вращения, образованный при различных углах раскрытия кольцевой закрученной струей.

Поэтому в данной работе решалась прикладная задача по установлению влияния угла раскрытия затопленных закрученных струй на формирование двухфазных смесей (жидкое-твердое) для повышения часовой производительности загрузочного аппарата.

На основе полученных экспериментальных данных (табл.4) построены графические зависимости (рис.17) объемной плотности и концентрации гидросмеси в разгрузочном трубопроводе загрузочно-транспортного аппарата от угла раскрытия прямоточной и закрученной струи, выявлена функциональная зависимость плотности и объемной концентрации гидросмеси от угла раскрытия кольцевой закрученной струи.

Вследствие увеличения угла раскрытия коаксиально закрученной струи расширяется граница зоны псевдооживления, в результате повышается объемная концентрация формируемой и транспортируемой гидросмеси более чем в 2-2,5 раза (табл.4, рис. 17), которые могут быть аппроксимированы зависимостями:

Таблица 4.

Результаты экспериментов по определению объемной плотности гидросмеси в зависимости от угла раскрытия коаксиально-закрученной и прямоточной струй.

№ п/п	Угол раскрытия α , град	Характер струи	Расход гидросмеси, л/мин	Объемная плотность гидросмеси, кг/м ³	Объемная концентрация, S, %
1	10-12	прямоточная	18	1150	9
2	15-17		20,2	1185	11,2
3	16-18		28,1	1190	11,5
4	28	закрученная	28,3	1320	19,4
5	32		29,4	1425	25,7
6	45		18,9	1520	31,5
7	65		21,5	1600	36,0
8	83		22,6	1630	38,2
9	85		25,7	1600	38,7
10	92		26,1	1620	38,8
11	103		26,5	1640	39,0

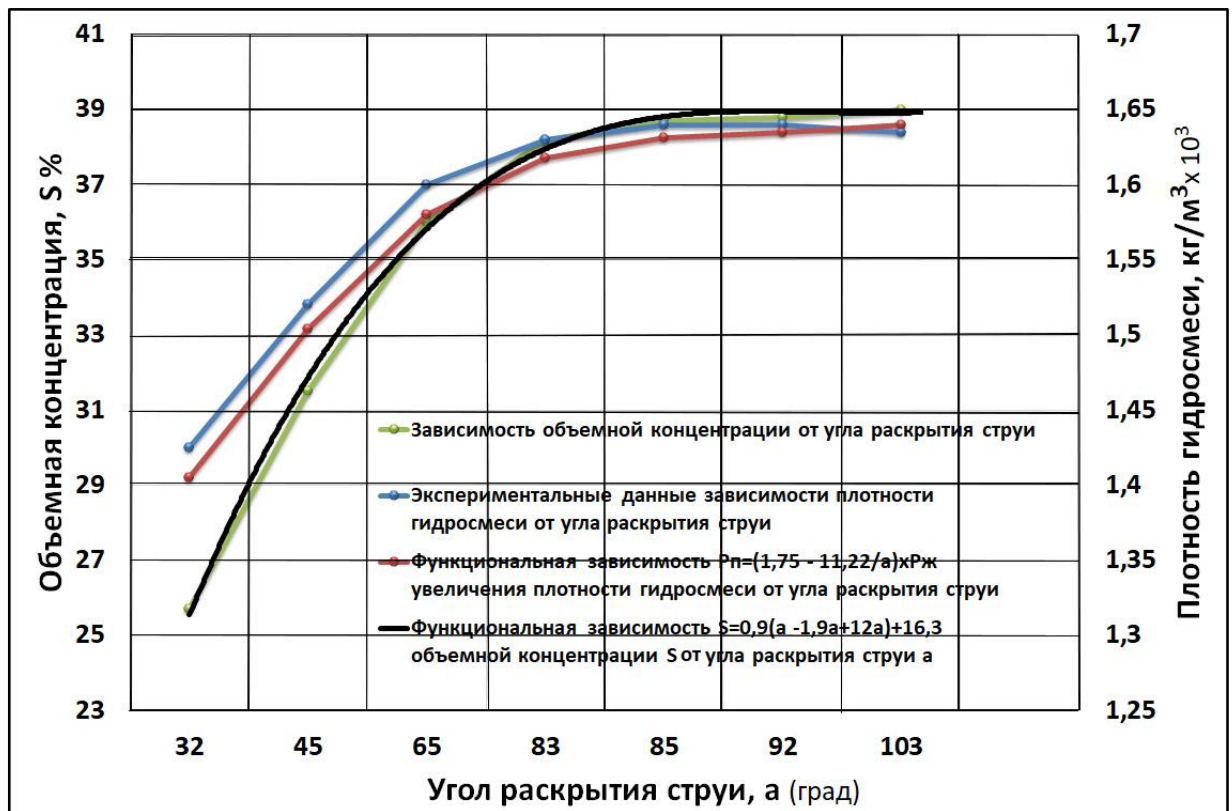


Рис.17. Зависимости объемной концентрации и плотности гидросмеси в разгрузочном трубопроводе аппарата от угла раскрытия закрученной струи.

$$\rho_{\Pi} = \left(\frac{1,75}{\alpha} - 11,22 \right) \cdot \rho_{\text{ж}} \quad (56)$$

$$S = 0,9 \cdot (\alpha^3 - 1,9 \cdot \alpha^2 + 12 \cdot \alpha) + 16,3 \quad (57)$$

Вышеприведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили разработать технологическую структуру глубоководного гидроподъема ЖМК, представленную на рисунке 18.

Она включает совместную работу загрузочного аппарата с пульсационной колонной, образующей полифункциональный массообменный транспортный комплекс, новизна которого подтверждена патентом РФ № 2558594

В принципиальной схеме, представленной на рисунке 18 гидросмесь от агрегата сбора 6 по гибкому пульповоду 4 поступает в колонну 7, где происходит процесс сепарации (обесшламливание) минерального сырья.

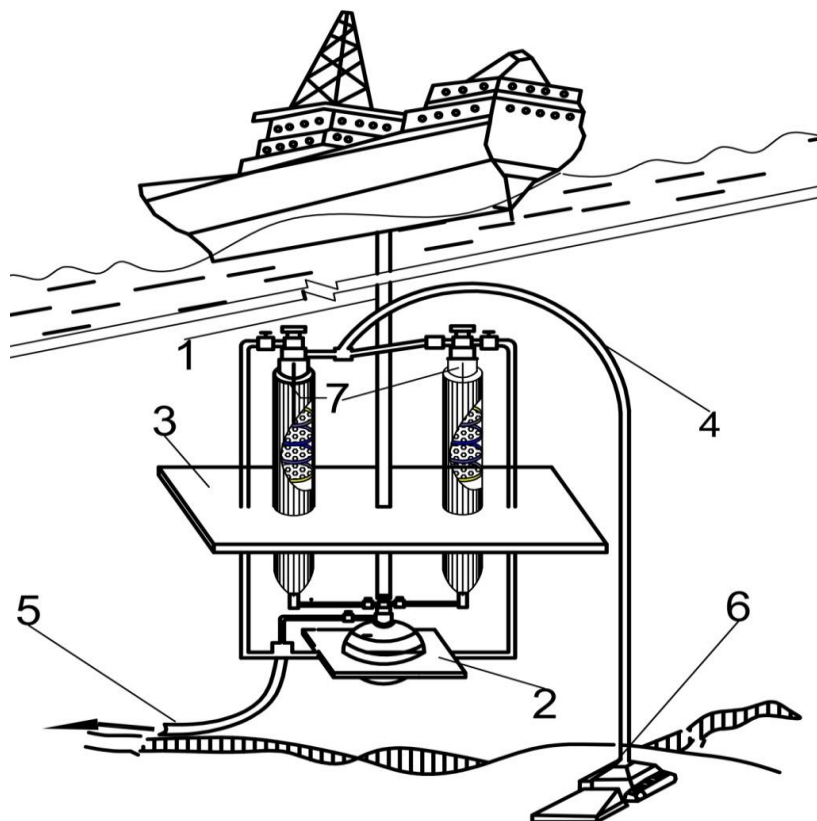


Рис. 18. Схема работы загрузочного аппарата в комплексе с полифункциональным массообменно-транспортным аппаратом.

1 – система магистральных трубопроводов (водовода и пульповода); 2 – загрузочная емкость массообменного аппарата; 3 – полупогружная платформа; 4 – трубопровод придонного транспорта ЖМК от агрегата сбора; 5 – трубопроводы слива технологической воды в выработанное пространство; 6 – агрегат сбора железомарганцевых конкреций; 7 – пульсационная колонна.

Скопившейся в ее нижней части зерновой материал направляется в загрузочную емкость массообменного аппарата, а шламовые частицы укладываются в выработанное пространство, что значительно снижает экологическую нагрузку на морскую флору и фауну. Техничко-энергетическая характеристика гидроподъема с использованием эрлифта и загрузочного аппарата рассматривается исходя из представленных на рис. 19 принципиальных технологических схем

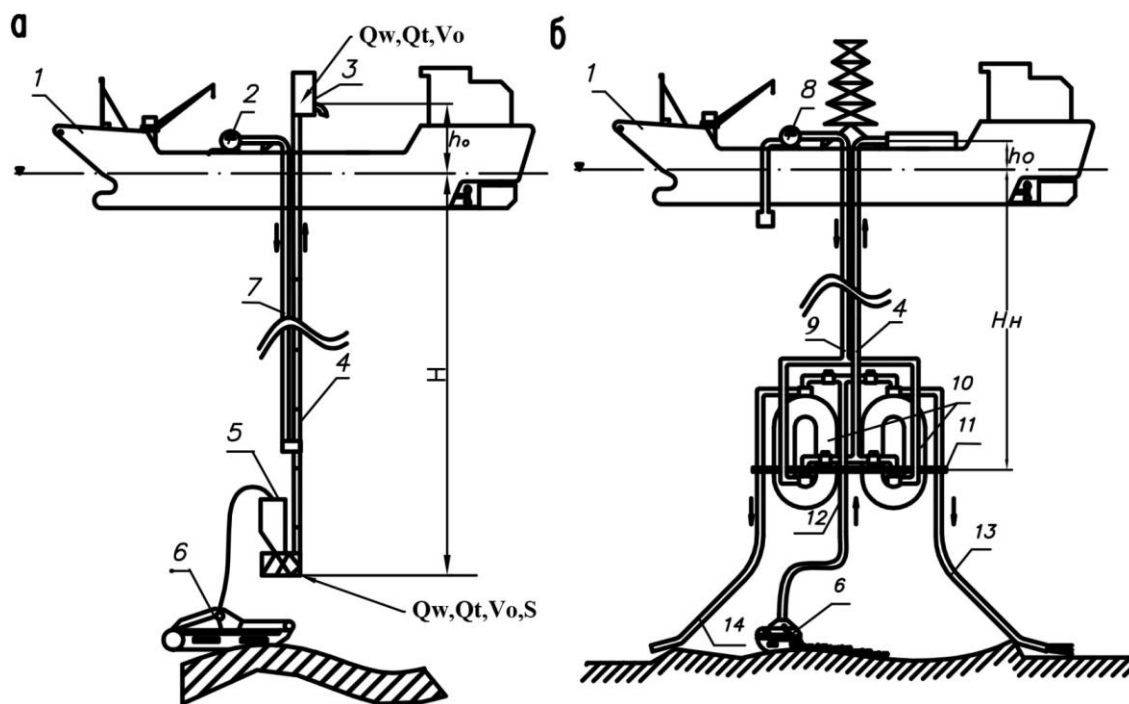


Рис.19. Расчетная схема гидроподъемника с использованием, а) –эрлифта, б) - загрузочного аппарата.

1 – плавсредство; 2 – компрессор; 3 – воздухоотделитель; 4 – пульповод; 5 – приемный бункер эрлифта; 6 – агрегат сбора; 7 – воздуховод; 8 – электронасосный агрегат; 9 – водовод; 10 – загрузочно-обменная емкость; 11 – погружная платформа; 12 – загрузочный пульповод; 13, 14 – сливной трубопровод; Q_t – производительность по твердому, т/час; Q_w – производительность по воде, т/м³; S – объемная концентрация по твердому; H – глубина подъема, м; h_0 – высота надводного борта судна, м.

Расчет технико-энергетических параметров нагнетательного эрлифта на основе уравнения баланса в эрлифтом подъемнике заключается в равенстве давления двухфазного потока (вода + твердое) до смесителя и трехфазного (вода + газ + твердое) после смесителя:

- давление двухфазного потока у смесителя со стороны линии всасывания $P_{\Pi} + P_{AT} - P_{CO}$;

- давление трехфазного потока у смесителя со стороны линии нагнетания $P_{CH} + P_{AT} + P_{тр}$.

Следовательно

$$P_{\Pi} + P_{AT} - P_{CO} = P_{CH} + P_{AT} + P_{т2}, \quad (58)$$

где: P_{AT} – атмосферное давление ($P_{AT} = 101325 \text{ Па}$); P_{Π} – давление внешнего столба, Па; P_{CO} – общие потери давления во всасывающей линии, Па; P_{CH} – потери напора от веса в линии нагнетания, Па; $P_{т2}$ – потери на трение трехфазной смеси в линии нагнетания, Па.

Решение задачи эрлифтного подъема и дальнейшей оценки энергетических параметров заключается в выявлении потребного расхода воздуха и решения уравнения:

$$\frac{(P_{\Pi} + 101325) - P_{CO}}{(P_{CH} + 101325) + P_{t2}} = 1 \quad (59)$$

А для загрузочно-обменной емкости баланс давлений в (камере) и сопротивлений в нагнетательной линии:

$$P_{атм} + P_H = P_{атм} + P_{ст} + P_{пер} - P_0 + P_{тр} + P_{вых} \quad (60)$$

или

$$P_{атм} + P_H = P_{атм} + \rho_{\Pi} \cdot g \cdot H_{\Pi} + \rho_{\Pi} \cdot g \cdot h_0 - \rho_0 \cdot g \cdot H_{\Pi} + \rho_0 \cdot g \cdot h_{тр} + \rho_{\Pi} \cdot g \cdot h_{вых} \quad (61)$$

где $P_{ст}$, $P_{пер}$, $P_{тр}$, $P_{вых}$, $P_{атм}$, P_H , P_0 , – потери давления соответственно на гидростатический столб гидросмеси в подъемной трубе, на переподем на борт судна, на трение в подъемной трубе, на выходе гидросмеси, атмосферное давление, необходимое давление нагнетания (давление, развиваемое насосом), гидростатический столб воды, Па; ρ_{Π} , ρ_0 – соответственно плотность пульпы и плотность морской воды, кг/м³ ($\rho_0 = 1025$ кг/м³); H_{Π} – длина линии нагнетания, м; h_0 – высота борта судна, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{вых}$ – потери напора на выходе гидросмеси, м вод. ст.; $h_{тр}$ – потери напора на трение в нагнетательной линии, м вод. ст.

Проведенный сравнительный анализ систем глубоководного гидроподъема показал, что загрузочные аппараты вихревого пульпоприготовления имеют значительное преимущество перед эрлифтным за счет уменьшения металлоемкости и энергоемкости соответственно в 1,8 и 2,7 раза в результате подачи высоконасыщенной гидросмеси объемной концентрации соответственно 10% и 30%. Грунтонасосный подъем также имеет низкую эффективность в первую очередь из-за многоступенчатости гидроподъема и переизмельчения ЖМК при прохождении через рабочие колеса агрегата.

Основные выводы и рекомендации.

1. Проведен анализ различных способов глубоководного гидроподъема на основе проведенной систематизации и сделан вывод о целесообразности применения загрузочных аппаратов различных конструкций, которых также систематизированы по способам гидродинамического формирования гидросмеси и ее разгрузки в пульповод.
2. Обосновано, что главным фактором, обеспечивающим формирование устойчивой и высоконасыщенной гидросмеси в загрузочных аппаратах, является процесс пульпоприготовления, зависящий от способа гидродинамической разгрузки камер и влияющий на эффективность подачи (загрузки) твердого материала в транспортный трубопровод.
3. Установлено, что основной особенностью загрузочного аппарата вихревого пульпоприготовления от других конструкций, является возможность стабильного пульпоприготовления и подачи за счет создания зоны псевдооживления возле узла разгрузки (вытеснения) в транспортный трубопровод высоконасыщенной гидросмеси (~30% и более).

4. Восходящая скорость определяет границы псевдооживления возле узла разгрузки, где расположен торец внутреннего пульповода; тангенциальная скорость – боковые границы затопленной коаксиально-закрученной струи, а осевая – характеризуется гидравлической крупностью: начальной – в стесненных условиях и конечной при свободном падении.

5. Визуализация линий тока коаксиально-закрученной струи в лазерном световом луче позволяет определять условия образования слоя псевдооживления в локальной зоне разгрузки гидросмеси в пульповод, который поддерживается и реализуется скоростными потоками.

6. Для обоснования методологии расчетов технологических и геометрических параметров загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления принята теория центробежной насадки Г.Н. Абрамовича; при этом основным отличительным признаком является генерация в кольцевом пространстве соосных патрубков-закрученного потока жидкости за счет тангенциального подвода к ним напорной воды, который создает в плоскости разгрузки формируемой гидросмеси псевдооживленный слой.

7. Полученное уравнение $U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon}} \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{вх}^2}$ представляет собой соотношение тангенциальной скорости и осевой, т.е. основные параметры центробежной насадки: коэффициент заполнения сечения ε ; радиус закрутки R ; внутренний радиус центробежной насадки R_0 и радиус входного патрубка $R_{вх}$.

8. Установленный геометрический параметр центробежной насадки определяется соотношением площади поперечного сечения транспортного пульповода (выходного патрубка) к площади поперечного сечения напорного водовода (входного патрубка); он структурно подобен геометрическому параметру водоструйного аппарата, однако в отличие от него пульпоприготовление формируется не за счет спутной сплошной струи, а за счет кинетической энергии коаксиально-закрученной струи.

9. Установленный коэффициент расхода μ при формировании кольцевой-закрученной струи центробежной насадки неоднозначно влияет на коэффициент сжатия струи ε и полученная графическая зависимость $\mu = f(\varepsilon, A)$ показывает, что максимальное значение коэффициента расхода равно $\mu_{max} = \varepsilon^{1,5}$; при этом максимальный расход через центробежную насадку $Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$.

10. При радиусе закручивания потока жидкости в соосных патрубках по внешней образующей поверхности пульповода R_n максимальный расход через центробежную насадку определяется из уравнения

$$Q_{max} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2-\varepsilon}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0.$$

11. Анализ результатов экспериментальных исследований кинетики выноса шламов в пульсационной колонне позволяет рекомендовать ее в качестве технологической составляющей в комплексе процесса глубоководного гидроподъема совместно с загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления.

12. Результаты экспериментальных исследований характера выноса шламовых фракций показывают, что вынос шламовых частиц с жидкостью при загрузке гидроподъемного аппарата ограничивается допустимой транспортирующей способностью восходящего потока в объеме камеры загрузочного аппарата и значительно зависит от скорости и загрузки исходного материала.

13. Анализ различных технологий гидроподъема твердых полезных ископаемых с учетом их экологической безопасности показывает, что использование загрузочного аппарата предлагаемой конструкции снижает негативную нагрузку на загрязнение океанических толщ воды за счет сброса твердых частиц в придонную часть выработанного пространства.

14. Предложена технология глубоководного гидроподъема твердых полезных ископаемых, включающая полифункциональный гидроподъемный комплекс, новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение №2558594 от 10.08.2015. Он осуществляет процесс сепарации, отделяя зерновую часть горной массы от шламовых фракций в пульсационной колонне. При этом зерновая компонента загрузочным аппаратом поднимается по вертикальному пульповоду на плавсредство, а тонкие частицы укладываются в выработанное пространство, что значительно снижает экологическую нагрузку на морскую флору и фауну.

15. Эффективность предложенного глубоководного гидроподъема по сравнению с другими способами выражается в формировании и подаче на поверхность высоконасыщенной гидросмеси с объемной концентрацией более 30%, что позволяет уменьшить диаметры вертикального пульповода, сократить металлоемкость трубопроводов, а также снизить энергоемкость процесса за счет уменьшения расхода жидкости, поднимаемой на плавсредство.

Результаты работы по теме диссертации опубликованы в следующих основных работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Маркелов С.В. Проблемы и перспективы освоения минеральных ресурсов дна морей и океанов // Горный журнал. 2019. № 11. С. 44-49.

2. Дробаденко В. П., Ключков Н. Н., Бунин Ж. В., Вильмис А. Л. Основные научные разработки кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства*. Горный журнал. 2018. № 11 (2256), Стр. 56-60.

3. Каширский А.С., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А. Новая технология крупнообъемного опробования твердых полезных ископаемых месторождений дна морей и океанов. Недропользование XXI век. 2018. № 2 (71). С. 36-42.

4. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л. Научно методическое обоснование эрлифтного гидроподъема при освоении месторождений дна морей и океанов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S11. С. 51-60.

5. Вильмис А.Л. Аналитическая оценка и систематизация загрузочных аппаратов камерного типа. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S11. С. 168-177.
6. Малухин Н.Г., Мухин Ю.А., Вильмис А.Л., Щербаков Ю.К. Скважинная гидродобыча янтаресодержащих глин пляжевого участка Пальмникенского месторождения. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 7. С. 54-57.
7. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Щемеров А.А. Технология и технические средства для освоения прибрежно-морских шельфовых месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 5. С. 58-61.
8. Дробаденко В.П., Луконина О.А., Вильмис А.Л. Полифункциональная установка на основе использования коаксиальных закрученных струй для моделирования новых гидротранспортно-подъемных технологий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 3. С. 297-301.
9. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Щемеров А.А. Повышение эффективности скважинной гидродобычи за счет оптимизации процессов пульпоприготовления и всасывания. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 2. С. 378-385.
10. Дробаденко В.П., Милютин А.Г., Калинин И.С., Ганджумян Р.А., Луконина О.А., Вильмис А.Л. Особенности освоения месторождений сланцевого газа. Недропользование XXI век. 2013. № 4 (41). С.62-65.
11. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л. Геотехнологические аспекты освоения погребенных россыпных месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. №7/2012. С.284-289.
12. ASSESSMENT OF DIFFERENT TECHNOLOGIES FOR VERTICAL HYDRAULIC TRANSPORT IN DEEP SEA MINING APPLICATIONS. Stanislav V., Drobadenko V., Malukhin N., Vilmis A., Heeren J., Bob van Doesburg. Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012 July 1-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil OMAE2012-8.
13. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А. Полифункциональная установка на основе использования коаксиальных закрученных струй для моделирования новых гидротранспортно-подъемных технологий. Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. №7/2011. С.318-321.
14. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Лев А.М., Тимошенко С.В., Вильмис А.Л. Особенности эрлифтного подъема при освоении подводных континентальных, шельфовых и глубоководных месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. №3/2011 С.367-375.

15. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л. Проблемы развития геотехнологических методов освоения месторождений полезных ископаемых. Журнал «Недропользование-XXI век» №2 (27) 2011 г. С.28-32.
16. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Луконина О.А. Обоснование скважинного способа тушения торфяных пожаров. Журнал «Недропользование-XXI век» №5 (30) 2011 г. С.76-79.
17. Малухин Н.Г., Вильмис А.Л. Скважинная гидродобыча янтаресодержащих глин пляжевого участка пальмникенского месторождения Казанская наука. 2011. № 1. С. 462-464.
18. Вильмис А.Л. Крупнообъемное опробование погребенных пливунных осадочных месторождений способом скважинной гидродобычи Разведка и охрана недр. 2010. № 3. С. 40-43.
19. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л. Повышение производительности очистной выемки пливунных песков при освоении погребенных, пливунных россыпных месторождений способом скважинной гидротехнологии. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Т. 1. № 12. С. 84-94.
20. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Малухин Г.Н., Вильмис А.Л. Развитие теории, и методов расчета скважинной гидротехнологии и их реализация при разработке месторождений полезных ископаемых. Горн. инф. -анал. бюл. Моск. гос. горн. ун-т 2008 г. №12. С.267-273.

Тезисы докладов:

1. Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Луконина О.А. Проблемы и перспектива освоения минеральных ресурсов. Тезисы докладов 14 международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва РГГРУ, 2-5 апреля, 2019г.) в 7 т.: доклады./ –Т. 2. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2019. –445 с. С.53-56.
2. Вильмис А.Л. Полифункциональный массообменный гидротранспортный аппарат для освоения глубоководных месторождений. В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7-ми томах. 2019. С. 291-294.
3. Вильмис А.Л. Обоснование технологической схемы подъема глубоководных железомарганцевых конкреций. Материалы Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)». (МГРИ–РГГРУ). В 2 т. Т. 1 / –М.: Издательство НПП «Фильтроткани», 2018. –626 с. С.488-489.
4. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Салахов И.Н. Технология сооружения штабеля кучного выщелачивания средствами гидротранспортирования. Материалы Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)». (МГРИ–РГГРУ). В 2 т. Т. 1 / –М.: Издательство НПП «Фильтроткани», 2018. –626 с. С.492-493.
5. Вильмис А.Л. Методическое обоснование параметров глубоководного подъема. Материалы XIII Международной научно-практической конференции

- «Новые идеи в науках о Земле» (Москва: РГГРУ, 5–7 апреля, 2017 г.): в 2 т.: доклады / – Т. 1. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. – 516 с. С.384-385
6. Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А. Интенсификация массообменных процессов для классификации и гидротранспортирования песчано-глинистых пород. Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва: РГГРУ, 5–7 апреля, 2017 г.): в 2 т.: доклады / – Т. 1 – М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. – 516 с. С.388-389.
7. Вильмис А.Л., Козлов М.Ю. Техническая возможность эжекторной выемки магнетитовых песков в шельфовой зоне. Материалы XII международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва РГГРУ, 8–10 апреля, 2015 г.) в 2 т.: доклады. / – Т. 2. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2015. – 546 с. С.26-27.
8. Вильмис А.Л. Перспектива использования кинетической энергии закрутки жидкости в загрузочных аппаратах. Материалы XII международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва РГГРУ, 8–10 апреля, 2015 г.) в 2 т.: доклады. / – Т. 2. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2015. – 546 с. С.28-29.
9. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Козлов М.Ю. Обоснование технологии разработки магнетитовых донных отложений в прибрежно-морской зоне. Материалы XI международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», Москва РГГРУ, 09-12 апреля, 2013 г.: Доклады: в 3 т. Т2. / МГРИ-РГГРУ. – М.: Ваш полиграфический партнер, 2013. – 426 с. С. 108-109.
10. Вильмис А.Л., Козлов М.Ю., Кононов Н.А. Оценка эффективности дезинтеграции коалинизированных песков ильменитсодержащих пород. Материалы VII Международной научно-практической конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых», Москва РГГРУ, 30 марта-5 апреля 2012 г. - М.: Экстра-Принт, 2012. - 242 с.
11. Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Мухин Ю.А., Щербаков Ю.К. Технологические аспекты разработки янтаресодержащих глин Пляжевого участка Пальмникенского месторождения способом скважинной гидродобычи. Материалы X Международной конференция «Новые идеи в науках о земле», М., РГГРУ, 12-15 апреля 2011 г. С. 175.
12. Дробаденко В.П., Малухин Н. Г., Тимошенко С. В., Вильмис А. Л., Богданов П. В. Технология скважинного опробования гравийно-песчаных отложений. Материалы 6-й Международной научно-практической конференция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых». 6-9 апреля 2010 г., М. РГГРУ. С.111.
13. Вильмис А.Л. Повышение производительности гидродобычного агрегата за счет интенсификации пульпоприготовления и всасывания. Материалы 6-й Международной научно-практической конференция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых». 6-9 апреля 2010 г., М. РГГРУ. С.128.
14. Вильмис А. Л., Тимошенко С. В., Богданов П. В. Технологические аспекты применения СГД при освоении сложноструктурных месторождений. Материалы

6-й Международной научно-практической конференция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых». 6-9 апреля 2010 г., М. РГГРУ. С.130.

15. Вильмис А.Л. Повышение эффективности скважинной гидродобычи за счет оптимизации процессов пульпоприготовления и всасывания. Сборник докладов на «IX Международной конференции «Новые идеи в науках о земле»». Москва, РГГРУ 14-17 апреля 2009 года -324 с.

16. Н.Г. Малухин, В.П. Дробаденко, А.М. Лев, А.Л. Вильмис, С.В. Тимошенко. Особенности эрлифтного подъема при освоении подводных континентальных, шельфовых и глубоководных месторождений. Сборник докладов на «IX Международной конференции «Новые идеи в науках о земле»». Москва, РГГРУ 14-17 апреля 2009 года -324 с.

17. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Тимошенко С.В., Луконина О.А., Вильмис А.Л. Испытания новой технологии эрлифтного грунтозабора для подводных исследований и поисковых работ. Материалы XI Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» РАН (ИО РАН) 25-27 ноября 2009 г. – М: ИО РАН, 2009 –253 с. С. 113-117.

18. Вильмис А.Л., Малухин Н.Г. Основные расчетно-методические положения для реализации скважинной гидравлической технологии при освоении сложноструктурных месторождений. Материалы научно-практической конференции «Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития гражданского и промышленного комплексов города Москвы». М., РГГРУ, 15-17 апреля 2008 г. – 334 с.

19. Вильмис А.Л., Лев А.М., Луконина О.А., Технологические параметры грунтозаборного устройства водоструйного насоса для подводной добычи золотосодержащих пород. Материалы научно-практической конференции «Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития гражданского и промышленного комплексов города Москвы». М., РГГРУ, 15-17 апреля 2008 г. – 334 с.

20. Вильмис А.Л., Абрамов Г.Ю. Скважинная гидродобыча глубоко залегающих руд КМА. В сб. «1-й советско-югославский симпозиум по проблеме скважинной гидравлической технологии, т.1, М., МГРИ, 1991г.

Патенты на изобретения:

1. Патент на изобретение № 2558594 РФ, МПК В01D11/02 В03В5/02 В01J8/16 В01F3/12. Способ ведения массообменных процессов и устройство для его осуществления/ Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Вильмис А. Л., Ребриков Д. Н., Козлов М. Ю. – № 2014132111/05; Заявл. 04.08.2014; Опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

2. Патент на изобретение № 2439250 РФ, МПК: Е 02 F 5 28, Е 02 F 3 88. Устройство для очистки водоемов. / Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Тимошенко С.В., Вильмис А.Л.-: 2010130181/03, заявл: 21.07.2010; Опубликовано:10.01.2012, Бюл .No 1

3. Патент на изобретение №2438739, МПК: А 62 С 3 02. Способ тушения торфяного пожара на глубине. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г., Ганджумян Р.А., Луконина О.А., Вильмис А.Л.: 2010146676/12; Заявл. 17.11.2010; Опубликовано: 10.01.2012; Бюл. № 1.

4. Авторское свидетельство SU 1737124 А1, 30.05.1992. Скважинный гидродобычный снаряд. Абрамов Г.Ю., Бабичев Н.И., Павельев В.Ф., Вильмис А.Л., Искужин С.М. Заявка № 4828864 от 23.05.1990.

5. Авторское свидетельство SU 1469141 А1, 30.03.1989. Гидромониторная секция скважинного добычного снаряда. Абрамов Г.Ю., Бабичев Н.И., Вильмис А.Л., Шанин С.О. Заявка № 4275321 от 20.05.1987.

Публикации в других изданиях:

1. В.П. Дробаденко, Г.Н. Малухин, А.Л. Вильмис, Н.Г. Малухин, Р.В. Кудряшов. Возникновение стабильного процесса псевдоожигения горной массы в объёме загрузочного аппарата при напорном гидротранспортировании. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13. 57-60.

2. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Кудряшов Р.В. Исследование особенностей истечения струй центробежных насадок в загрузочных аппаратах напорного гидротранспорта. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13. С. 60-63.

3. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Вильмис А. Л., Козлов М. Ю. Морские испытания новой технологии подводной добычи алмазосодержащих пород на шельфе Намибии. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13. С. 71-75.

4. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Кудряшов Р.В. Исследование особенностей истечения струй центробежных насадок в загрузочных аппаратах напорного гидротранспорта. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13.

5. Малухин Н.Г., Вильмис А.Л. Скважинная гидродобыча янтаресодержащих глин пляжевого участка Пальмникенского месторождения. Естественные науки в современном мире. 2012. № 2. С. 56-59.

6. Дробаденко В.П., Клочков Н.Н., Вильмис А.Л. Совершенствование работы гидрокомплексов при разработке россыпных месторождений. Вестник ЗабГК. 2012. №5. С.24-28.

7. Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л. Обоснование эффективности применения струйных аппаратов на горно-разведочных работах. Казанская наука №2 2011. С.279-281.

8. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Луконина О.А., Р.А. Ганджумян. Новый способ тушения торфяных пожаров. Лесное хозяйство №2, 2012. С.41-42.

9. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л. Проблемы и перспективы скважинной гидродобычи полезных ископаемых. Иргиредмет №10 2011. С.17-20.