

МИНОБРНАУКИ РОССИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ» (МГРИ)

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)

## **ДИССЕРТАЦИЯ**

### на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор Дробаденко Валерий Павлович

Москва 2020

# СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ДНА МОРЕЙ И	
ОКЕАНОВ	12
1.1. Перспективы освоения глубоководных	
месторождений	12
1.2. Актуальность освоения глубоководных месторождений для	
России	20
1.3. Геологическая характеристика основных промышленных залежей	
железомарганцевых конкреций	27
1.4. Краткий анализ способов и технологических средств освоения	
глубоководных месторождений	38
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	
ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОСМЕСИ В РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ	
ЗАГРУЗОЧНЫХ АППАРАТОВ	49
2.1. Систематизация загрузочных аппаратов по гидродинамике	
разгрузки гидросмеси	49
2.2. Анализ гравитационного способа разгрузки и гидродинамических	
режимов работы	50
2.3. Оценка гидродинамических режимов работы струйного способа	
формирования гидросмеси	59
2.4. Оценка гидродинамических условий фильтрационной	
разгрузки	65
2.5. Загрузочные аппараты с использованием закрученных потоков	
жидкости	69
Выводы по главе 2	73
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ	
ВЫСОКОНАСЫЩЕННОЙ ГИДРОСМЕСИ КОАКСИАЛЬНО-	
ЗАКРУЧЕННЫМИ СТРУЯМИ	74

3.1. Принцип работы и анализ результатов экспериментальных	
исследований загрузочных аппаратов вихревого	
пульпоприготовления	74
3.2. Гидродинамическая обстановка процесса псевдоожижения с	
одновременным вытеснением твердых частиц жидкостью в поле	
действия гравитационно-центробежных сил	90
3.3. Экспериментальные исследования влияния угла раскрытия	
прямоточных и коаксиально-закрученных струй на объемную плотность	
формируемой гидросмеси	102
Выводы по главе 3	112
ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕЖИМОВ	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО	
ПУЛЬПОПРИГОТОВЛЕНИЯ	114
4.1. Формирование вихря с радиусом кольцевого закрученного потока	
при истечении из насадки	114
4.2. Определение максимального расхода жидкости через центробежную	
насадку	125
4.3. Напорно-расходные характеристики затопленных струй в зоне	
вытеснения (разгрузки камеры)	129
4.4. Пример методологии расчета расходно-напорных характеристик	
геометрических параметров массообменно-транспортного	
аппарата	138
Выводы по главе 4	143
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	
ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОПОДЪЕМА ЗАГРУЗОЧНЫМИ	
АППАРАТАМИ	145
5.1. Технологическая структура предлагаемой системы	
гидроподъема	145

5.2.	Экологическое	обоснование	системы	
гидро	оподъема			153
5.3.	Технико-энергетическая хара	ктеристика гидроподъема		168
Вывс	оды по главе 5		•••••	173
ЗАКЈ	ІЮЧЕНИЕ		••••	175
СПИ	СОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛІ	ИТЕРАТУРЫ		179

#### ВЕДЕНИЕ.

#### Актуальность работы.

Освоение минеральных ресурсов Мирового океана, создание условий для их разведки и добычи в международных районах морского дна (МОМД) являются одними из долгосрочных задач национальной политики, определенных: «Поручением Правительства Российской Федерации от 03.08.2001 № МК-П4-13879; «Долгосрочной государственной программой изучения и производства минеральной базы на период 2005 – 2020 годов»; «Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года»; «Концепцией федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016-2031 годы».

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 геологоразведочные изыскания и анализ залежей полезных ископаемых в выделенном районе на исключительных правах. Разработка и испытание технологических схем добычи, подъема, транспортирования, обогащения. Проведение исследований по экологическим, техническим, экономическим, коммерческим и другим факторам, которые также должны учитываться при освоении минеральных ресурсов Мирового океана.

В глубоководных частях мирового океана расположены перспективные участки месторождений твердых полезных ископаемых, 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. км<sup>2</sup> 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.

Геологоразведочные работы на Российских участках ЖМК в поле Кларион-Клиппертон находятся на второй стадии разведки, значительная их площадь изучена в масштабе 1:50000, параллельно с ними проводятся инженерногеологические 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 ВНИИ Океангеология им. И.С. Грамберга и ЦНИГРИ, возможные сроки начала эксплуатационных работ 2021-2022 гг. Таким образом, можно полагать, что современный уровень развития горно-добычных и транспортных работ для освоения месторождений дна морей и океанов с точки зрения развития научно-технического прогресса отстает от Мирового уровня [65].

Эффективное использование ресурсного потенциала Мирового океана для экономического развития России требует создания инновационных технических и технологических решений по освоению ЖМК, которые с экологической точки зрения будут безопасными для сложной экосистемы океана, что на сегодняшний день представляет актуальную научную задачу.

#### Цель.

Обоснование освоения месторождений железомарганцевых конкреций на основе разработки энергосберегающей технологии глубоководного гидроподъема загрузочными 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 жидкости для формирования гидросмеси высокой объемной концентрации и дальнейшей ее подачей в транспортный трубопровод 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.
- 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.
- 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.
- Аналитическое обоснование расходно-напорных характеристик загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления.
- 8. Разработка математической модели расчетных параметров аппаратов вихревого пульпоприготовления.
- 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: анализ отечественной и зарубежной литературы по освоению глубоководных

месторождений полезных ископаемых, лабораторные исследования по влиянию кольцевой закрученной струи формирование угла раскрытия на высоконасыщенной гидросмеси в камере загрузочного аппарата, обобщение и обработка результатов лабораторных исследований и ранее проведенных опытно-промышленных испытаний, установление функциональных зависимостей, математическое моделирование расчета параметров аппаратов вихревого пульпоприготовления.

#### Научная новизна:

- 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 псевдоожиженного слоя, насыщенного твердыми частицами, концентрация которых регулируется скоростными потоками.
- 3. Показано, что коаксиально закрученные струи формируют различные крупномасштабные вихри, которые создают гидродинамические условия образования псевдоожижения и перемешивания взвешенных слоев, интенсифицирующих массообменные процессы в камере аппарата.
- 4. Установлено, что угол раскрытия коаксиальной закрученной струи составляет более 90<sup>0</sup> и зависит от скоростей истечения из соосных патрубков аппарата, превышая прямоточные (~25-27<sup>0</sup>) и формирует стабильную высоконасыщенную гидросмесь в зоне узла разгрузки в транспортный пульповод.
- Выявлено, что введенный геометрический параметр центробежной насадки, равный отношению площади сечения транспортного пульповода к водоводу (входного патрубка), реально оценивает сущность процесса формирования

псевдоожиженного демпфирующего слоя с учетом необходимых расходнонапорных 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.

способов Проведена систематизация технических средств И железомарганцевых конкреций в зависимости от гидравлического подъема 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 загрузочных аппаратах для получения высоконасыщенной гидросмеси; на основе аналитических исследований установлен максимальный расход жидкости через центробежную насадку; разработана методология расчета расходно-напорных характеристик геометрических параметров массообменно-транспортного аппарата; установлена технологическая структура предполагаемой 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 разведке и добыче железомарганцевых конкреций со дна морей и океанов с минимальным воздействием на окружающую среду.

#### Практическая значимость работы

заключается в разработке научно-методических рекомендаций и математической модели расчетных 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) ЛЛЯ 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 в учебном процессе работы реализуются при освоении студентами специальностей 21.05.04 «Горное дело» и общеобразовательных программ 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ, 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

10

the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012 July 1-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil OMAE 2012-8» [95]; «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 2019, 2017, 2015, 2013, 2011, 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.

# ГЛАВА 1. МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ДНА МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

#### 1.1. Перспективы освоения глубоководных месторождений

В настоящее время многими учеными и специалистами обосновано и доказано, что освоение морских месторождений твердых полезных ископаемых шельфа и океанического глубоководного дна Мирового океана является одним из перспективных направлений горного дела [4,5,9,11,13]. Все промышленно развитые страны занимаются решением проблем освоения минеральных ресурсов Мирового океана [102].

Геополитические аспекты, международно-правовая оценка изучения и освоения минеральных ресурсов Мирового океана, а также научная и геологоразведочная деятельность в Международном районе морского дна (МРМД) за пределами зон национальной юрисдикции прибрежных государств основана на Международной Конвенции по морскому праву 1982 г. В настоящее время этот основополагающий документ ратифицирован большинством стран Мира и вступил в действие на законном основании. Советский Союз (а позднее Россия) являлись активными разработчиками и сторонниками строгого следования статьям принятым Мировым Сообществом Конвенции. В частности, минеральные ресурсы на дне океана в Международном Районе рассматриваются как «всеобщее достояние» человечества и могут быть освоены с ведома и правил, принятых [15] Международным Органом по согласно директивам морскому дну (МОМД) ООН, штаб квартира которого размещается в г. Кингстон на о. Ямайка.

Главными и наиболее распространенными полезными ископаемыми из тех, что выявлены к настоящему времени в глубоководных районах Мирового океана, считаются железомарганцевые образования (ЖМО), включающие железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтомарганцевые корки (КМК), глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС), которые точнее называть глубоководными колчеданными рудами (ГКР) и фосфориты. В конкрециях, корках, колчеданных рудах и фосфоритах содержится значительное количество Ni, Co, Mn, Cu, Zn, Ag, Au, Pb u P, в них также присутствуют Pt, Cd, редкоземельные элементы и другие полезные компоненты [6,20].

Общая прогнозная стоимость ресурсов только ЖМК и КМК составляет примерно 38 трлн. долларов США, что по самым приблизительным оценкам почти в 2 раза превышает природную [23] стоимость ценных компонентов (*Ni*, *Cu*, *Co*, *Mn*, *Pt* и др.) в континентальных месторождениях (табл. 1.1) [37].

#### Таблица 1.1

Ценные	Запасы и	Мировые цены на	Валовая
компоненты	прогнозные	конечную продукцию	стоимость
ЖМК	ресурсы	(средние на 01.01.96 г.),	(млрд. долл.)
	(категории	дол./т.	
	P <sub>1</sub> P <b>2</b> +C <sub>2</sub> млн.т.		
Никель	6,26	6300	39,4
Кобальт	1,02	47800	48,8
Марганец	131,6	490	64,5
Медь	4,92	2320	11,4
Всего:			164,1

Валовая стоимость ЖМК Российского заявочного участка (рудное поле Кларион-Клиппертон, Тихий океан)

По минерально-сырьевому потенциалу твердых полезных ископаемых (ТПИ) океанического дна основные страны делятся на три группы. В первую входят США и Франция, на долю которых приходится ~ 70% общей площади экономических зон основных стран в Мировом океане [23].

Россия на ряду с Японией входит во вторую группу, природная ценность ресурсов которых составляет соответственно 12% и 10% от общей стоимости глубоководных полезных ископаемых (рис. 1.1) и [42,102]. Общая площадь экономических зон основных стран - 28,6 млн. км<sup>2</sup>; общая стоимость ресурсов ТПИ основных стран - 7783 млрд. долл. США. Оценка валовой стоимости

полезных ископаемых дна мирового океана в зонах особых интересов основных стран представлена на рисунке 1.2 [23].



Рис.1.1 Соотношение площадей экономических зон (млн.км<sup>2</sup>/%) основных стран в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах (А) и валовых стоимостей ресурсов ТПИ (млрд. долл. США/%) основных стран в зонах их интересов (Б).



Рис.1.2. Соотношение валовых стоимостей металлогенических (минералогенических) и прогнозных ресурсов ТПИ зон особых интересов основных стран (А) и ценных компонентов этих ТПИ (Б) млрд. долл. США/%).

В таблице 1.2. приведены соотношения стратегических металлов в рудах Мирового океана и континентов на основе статистических данных работы М.П. Бежановой и Л.В. Кызиной «Запасы и добыча важнейших видов полезных

## Таблица 1.2.

Соотношение ресурсов стратегических металлов в рудах Мирового океана и континентов по данным работы [56].

Виды океанического минерального сырья	Метал лы	Мировой океан		Мировой океан Континенты*		Соотно шения ресурс ов океан /суша
		Содержа	Pecypc	Содержа	Pecypc	-
		ния %%	ы млн.	ния %%	ы млн.	
			Т		Т	
Железомарганцевые руды (ЖМК) и (КМК)	Ni	0,63-1,42	603,5	0,7-2,6	162,0	3,7
	Си	0,60-1,21	388,1	0,3-3,97	1000,0	0,4
	Co	0,03-0,73	339,9	0,04-0,17	13,4	25,4
	Мп	20,0- 36,05	18724, 3	16-50	14623	1,3
	Pt	0,10-1,31	14,1	0,3-3,7	31,7	0,4
		$\Gamma/T$	тыс. т	$\Gamma/T$	тыс. т	
	Мо	0,05-0,07	37,0	0,01-0,10	19,6	1,9
Глубоководные полиметаллические сульфиды	Си	2,35-30,9	6,0	0,3-3,97	1000,0	0,006
	Zn	2,52-16,4	2,6	2,0-11,0	491,3	0,005
	Pb	2,27-9,30	1,4	1,1-6,1	220,3	0,06
	Ag	529-1900	29,5	100-400	915,8	0,03
		$\Gamma/T$	тыс. т	Г.Т	тыс. т	
	Au	4,14-62.0	802 т	1,4-5,9	109,4	0,007
		г/т		г/т	тыс. т	

По *Ni* океан превосходит континент в 3,7 раза, по *Co* превосходство особенно велико- в 25,4 раза, по *Mo* в 1,9 раза. Ресурсы *Mn* в океане и на

континентах сопоставимы. Все приведенные цифры касаются, в основном, железомарганцевых образований – конкреций и корок. Металлы, содержащиеся в составе ГПС в ресурсном отношении, заметно уступают соответствующим металлам суши. Их преимущество состоит в высоких (нередко ураганных концентрациях, особенно характерных для *Cu* (31,6% - рудный узел Логачев, CAX), *Au* (62 г/т - северо-западное поле рудного узла Семенов, CAX), отчасти для серебра (1900 г/т - поле Джейд, желоб Окинава).

Железомарганцевые конкреции распространены в абиссальных районах Мирового океана, на глубинах 4000-5000 метров и более, в пределах глубоководных котловин. Залежи ЖМК сложены обычно залегающими на поверхности дна стяжениями, диаметром от 4 до 12 см, наполовину и более погруженными в донные осадки. Встречаются полностью или частично погребенные слои конкреций. Количественной оценкой конкреционных скоплений является весовая плотность залегания - вес конкреций в пределах одного квадратного метра. Эта величина может изменяться от 5 до 20 кг и более на 1 м<sup>2</sup>. Состав ЖМК достаточно стабильный. Основными полезными компонентами являются Mn, Ni, Cu и Co. Попутными - Mo, V, *платиноиды*, висмут и РЗЭ. Средние содержания основных металлов на Заявочном Участке России, в поле Кларион-Клиппертон, следующие: Mn=27,96-29,73%; Ni=1,30-1,39%; Cu=0,91-1,15%; Co-0,22-0,24% (Лыгина, 2009).

B Мировом океане 18 полей распространения выделяется железомарганцевых образований, из которых 12 представлены скоплениями ЖМК и 6 - корками. Наибольшее количество объектов размещается в Тихом океане: 7 полей ЖМК и 5 полей КМК; в Индийском - 4 поля ЖМК и 1 поле КМК; в Атлантике - 1 поле ЖМК [102]. Все выявленные поля изучены в разной степени, но можно быть уверенным, что они исчерпали фонд возможных открытий. Основной интерес проявляется к высокопродуктивным полям с конкрециями и корками, содержащими высокие содержания цветных металлов. При выборе объектов изучения, важным критерием изучения является геохимическая специализация конкреций. Установлено, что в различных

гидрохимических зонах водной толщи океана формируются железомарганцевые образования разного состава.

Среди железомарганцевых конкреций выделяются пять геохимических типов: с умеренным суммарным содержанием цветных металлов, не превышающим 1.7% (Центрально-Тихоокеанский тип); с низким содержанием меди (0.6-0.7%) и кобальта (0.02%), но при высоких содержаниях Ni, особенно *Mn* (более 30%) Перуанский тип); с повышенным содержанием кобальта (0.4%) при низких содержаниях других металлов (Южно-Тихоокеанский тип); и геохимический тип, с содержанием Cu и Ni, в сумме больше 1.7% (нередко 2.0-2.5%), кобальта 0.20-0.23%, марганца около 30%. Последний геохимический тип широко распространен в поле Кларион-Клиппертон (Тихий океан) и носит одноименное название. Этот тип ЖМК считается специалистами практически значимым. Районы его распространения одновременно изучаются несколькими странами, которые имеют Международные сертификаты на Заявочные участки. Это Россия, Франция, Япония, Китай, Ю. Корея, Германия, сообщество восточноевропейских стран, объединенных в СО «ИНТЕРОКЕАНМЕТАЛ». Заявочный Участок Индии располагается в Индийском океане, в Центрально-Индоокеанском поле, где также встречены ЖМК геохимического типа Кларион-Клиппертон. Таким образом, в Мировом океане зарегистрировано 9 Заявочных участков ЖМК площадью 75 тыс. км<sup>2</sup>. каждый. Они покрывают значительную часть продуктивной площади дна, на котором распространены богатые рудные ЖМК в поле Кларион-Клиппертон (Тихий океан) - 8 Заявочных Участков и в Центрально-Индоокеанском поле (Индийский океан) - 1 Заявочный Участок [5].

Кобальтмарганцевые корки - другой вид железомарганцевых образований, широко распространенный в океане и имеющий практическое значение. Он залегает на подводных горах и гайотах, на глубинах 1000-3500 м. Залежи КМК обычно формируются на участках дна, где обнажаются коренные породы [102]: базальты [67], известняки, кремнистые образования, гравелиты. Кобальтмарганцевые корки покрывают их скальные выходы многослойным покровом в 2-12 см. толщиной. Мерой количественной оценки скоплений КМК также может быть вес корок в пределах 1 м<sup>2</sup>. В этом случае эта величина достигает нередко 70-80 кг/м<sup>2</sup> и более. Основными полезными компонентами КМК являются: Mn=20-22%; Co=0,5-0,6% и Ni=0,4-0,5%. В качестве попутных могут быть *Mo*, *Pt*, *P3Э* (прежде всего церий), висмут, талий, теллур (М.Е. Мельников, 2009).

Глубоководные полиметаллические сульфиды формируются в осевых зонах срединно-океанических хребтов во внутренних районах Мирового океана или по его периферии в переходных зонах - транзиталях, часто в тыловодужных структурах: рифтах, на окраинах котловин внутренних морей, в кальдерах вулканов. Глубина залегания объектов ГПС самая различная от 800-900 до 4200 метров. Они могут быть приурочены к неотектоническим поднятиям в пределах днища рифтовой долины или располагаться на ее бортах [104].

Общие масштабы распространения железомарганцевых образований в мировом океане огромны. По данным ВНИИ Океангеология (2008г.) составляют 94,5 млрд. т. сухой рудной массы. В т.ч. ЖМК – 51,3 млрд. т., КМК – 40,0 млрд. т. и не имеющий пока ресурсного значения гидротермальный тип корок – 3,4 млрд. т. (табл.1.3.) [104].

#### Таблица 1.3.

		1		
	Тихий океан	Атлантический	Балтийское	Индийский
Попомотри	(поле	океан (Северо-	море	океан (поле
Параметры	Кларион-	Американское	(Финский	Диамантина)
	Клиппертон)	поле)	залив)	
1.	2.	3.	4.	5.
Размеры, мм:				
минимальный	5	1	1	5
максимальный	70	67	30	75
средний	37	34	16	40

Сравнительная характеристика железомарганцевых конкреций из зон разного масштаба Мирового океана

1.	2.	3.	4.	5.
Содержание				
основных				
рудных				
компонентов, %				
Мп	23,3	12,9	17,1	18,5
Fe	5,10	17,1	25,3	6,75
Ni	0,96	0,28	0,06	0,46
Си	0,85	0,14	0,03	0,60
Co	0,23	0,22	0,006	0,25
Субстрат	красные	красные	песчано-	
	глубоководны	глубоководные	глинистые	карбонатные
	е глины	глины		илы
Марганцевый модуль Fe/Mn	0,21	1,32	1,47	0,36
Плотность, $\kappa \Gamma/M^3$ :	2100	2000	1600	2200
Морфология	эллипсовидн	эллипсовидные	сфероидальн	сфероидальн
	ые		ые	ые
Глубина залегания, м	5000	5200	20-100	4180
Участки с	2500	Не оконтурены	200	
геологоразвелочны			200	-
ми работами, км <sup>2</sup>				
Плотность	5-12	5-8	15-20	10-18
залегания, кг/м <sup>2</sup>				
Ресурсы (Р2), млн. т	440	-	0,9	-

Наиболее изученной из глубоководных зон является поле Кларион-Клиппертон в приэкваториальной части Северо-Восточной котловины Тихого океана, где за Российской Федерацией закреплен участок площадью 75000 км<sup>2</sup>.

В поясе Клиппертон-Кларион конкреции также не образуют сплошного покрова, их количество и состав существенно изменяются по площади и глубине. На основании исследований, выполненных здесь многочисленными экспедициями и промышленными фирмами, число участков, пригодных для добычи и обеспеченных поисковыми работами от 23 до 95 [61].

В пределах участка оцененные прогнозные ресурсы железомарганцевых конкреций и металлов в них составляют, млн.т: конкреции - 703; никель - 6,68;

19

медь - 5,5; кобальт - 1,1; марганец - 142. Эти содержания соответствуют крупным месторождениям никеля и меди и уникальным - кобальта и марганца.

#### 1.2. Актуальность освоения глубоководных месторождений для России

Как уже отмечалось выше Россия активно участвует в работе Международного органа по морскому дну ООН (МОМД ООН), в совместной организации «Интерокеанметалл». В качестве первоначального вкладчика имеет исключительное право на дальнейшее изучение и освоение ЖМК в пределах заявочного участка площадью 75 тыс. км<sup>2</sup> в восточной части поля Кларион– Клиппертон в Тихом океане (рис.1.3).

Кроме того, МОМД ООН утвердил поданную в декабре 2010 года российскую заявку на разведку минеральных ресурсов [68] Мирового океана. Участок сульфидных руд РФ расположен в северной приэкваториальной зоне Срединно-Атлантического хребта на глубинах 2–4 км.





Участки, зарегистрированные первоначальными вкладчиками: 1 – Япония; 2 – Франция; 3 – Россия; 4 – Китай; 5 – Корея; 6 – Германия; 7 – СО ИНТЕРОКЕАНМЕТАЛ; 8 – участки, находящиеся под контролем Международной Организации по морскому дну (МОД ООН). Участки, на которые претендуют международные консорицумы: 9 – ОМА; 10 – ОМІ; 11 – ОМСО; 12 – КСОN.

Стрелками указы участки, принадлежащие России полностью или на долевой основе (СС ИНТЕРОКЕАНМЕТАЛ).

Участок, который будет исследовать Россия, состоит из 100 блоков, площадь каждого — 100 кв. км. Участок РФ [103] расположен в северной приэкваториальной зоне Срединно-Атлантического хребта 1.4). (рис. Сульфидные руды там залегают на глубине 2-4 км. Подразумевается, что Россия преимущественное право на освоение месторождений [103]. получит Исполнителями контракта станут государственное предприятие ВНИИОкеангеология и Полярная морская геологоразведочная экспедиция.

На российском участке открыто шесть перспективных объектов. Их прогнозные ресурсы — 50-70 млн. тонн сухой рудной массы. При этом содержание руды в породе в разы больше, чем на суше.

Среднее содержание меди на суше — около 1%, а в глубоководных полиметаллических сульфидах на российском участке оно может составлять в среднем 2,5-10% (максимально — 30%). В тонне руды также содержится 4-10 г. золота (максимально — 17 г. на тонну) [103]. Считается, что оно является крупнейшим неосвоенным золотомедным месторождением в мире.



АТЛАНТИЧЕСКИЕ БОГАТСТВА РОССИИ

**Рис.1.4.** Участок РФ в северной приэкваториальной зоне Срединно-Атлантического хребта.

Если такие оценки подтвердятся, эти запасы будут сопоставимы с запасами на балансе "Норильского никеля".

Минерально-сырьевой потенциал в Мировом океане и в заявочных участках России показан в таблице 1.4 [22,23].

Современное состояние минерально-сырьевой базы России свидетельствует о том, что стратегически ценные компоненты, которые содержатся в рудах океана могут ее укрепить: ликвидировать существующий дефицит в *Mn*, пополнить истощающиеся запасы *Ni*, *Co*, *Cu* и других ценных металлов.

#### Таблица 1.4.

Минерально-сырьевой потенциал в Мировом океане и в заявочных участках России

	-	1 осени.		
Вид минерального	В Мировом	В пределах	Сравнительные данные п	
сырья	океане	заявочных	наземным	
и показатели	в целом	участков	месторо	ждениям
		России	Мир	Россия
			(отношение	
			океана к	
			суше)	
1.	2.	3.	4.	5.
Железо-	12 полей	Поле Кларион-		
марганцевые		Клиппертон		
конкреции (ЖМК)		(РРР-ЖМК)		
Прогнозные	51,3	0,58		
ресурсы (сухая				
руда), млрд.т				
Весовая плотность	5-30	14		
залегания, кг/м <sup>3</sup>				
Состав, %:				
Ni	0,13-1,24	1,41	1-2	1,3
Cu	0,68-1,04	1,13	1-2	1,2
Со	0,03-0,46	0,23	0,04-0,1	0,03
Mn	3,3-36,1	30	18-35	20
Мо	0,02-0,07	0,04-0,05	0,01-0,04	0,037
Прогнозные				
ресурсы металлов,				
млн т:				
Ni		5,7	242,7 (1,82)	27,9

1.	2.	3.	4.	5.
Cu	443,2 329,5	4,5	1801,6 (0 18)	101,83
Со	131,7	1,33	18,0 (7.2)	0,65
Mn	11104,0 22,7	120,5	21920 (0,51)	462,0
Mo		0,26	35,5 (0,68)	0,36
Состояние	Заявлено 13	Завершено два	В богатых	Запасы Мо
изученности,	участков, на	пятилетних	месторожде-	будут
обеспеченность	8 из которых	этапа по кон-	ниях Мп —	исчерпаны к
	ведется	тракту с	30-40 %. По	2020 г.;
	разведка по	МОМД. Общая	Ni PΦ	рентабельны
	контрактам с	продолжительн	занимает 2-е	е запасы Ni
	МОМД	ость контракта	место в мире	— к 2018 г.
		15 лет		
Кобальтмаргание-	6 полей	Район		
вые корки (КМК)		Магеллановых		
		гор (РРР-КМК)		
Ожидаемые	39,6	0,3-0,35		
прогнозные	,			
ресурсы (сухая				
руда), млрд. т				
Состав, %:				
Со	0,17-0,73	0,55-0,6	0,04-0,1	0,03
Ni	0,12-0,59	0,43-0,47	1-2	1,3
Mn	6,4-28,5	20,8-21,8	18-35	20
Мо	0,03-0,06	0,04-0,05	0,01-0,04	0,037
Прогнозные				
ресурсы металлов,				
млн. т:				
Со	240	1,87	18 (13,3)	0.65
Ni	156,1	1,46	242,7 50,04)	27,9
Mn	7049	69,2	21920 (0,32)	462
Мо	13,4	0,146	35,5 (0.38)	0,36
Состояние вопроса	В 2012 г	Заявка РФ на	Океан	Основной
	заявлено 2	обсужление в	сушественно	источник Со
	vчастка	МОМД.	превосходит	— Норильск
	(КНР и		сушу по	истошится
	Япония).		ресурсам и	вместе с
			содержанию	выработкой
			Со в руде.	богатых Си-
			1	Ni руд.

1.	2.	3.	4.	5.		
Глубоководные	120 рудных	Заявочный				
полиметаллические	объектов	участок —				
сульфиды (ГПС)		район				
		Срединно-				
		Атлантическог				
		о хребта (РРР-				
		ГПС).				
		,				
	200 210	00.100				
Прогнозные	208-210	80–100				
ресурсы сухая руда,						
МЛН. Т						
Состав %:						
	0 42-32 38	1 86-32 7	1-2	12		
Zn	1-32 3	0.63-2.51	2-10	1,2		
	0 42 -230	0.5-17.6	1 5-5	37		
Δσ*	10-1900	17 7-36	50-150	100		
Прогнозные	10 1900	17,7 50	50 150	100		
песурсы метаплов						
тыс т.						
Cu	42600	37260	$18016 \times 10^2$	$10183 \times 10^2$		
Zn	2600	630	7453	7453.2		
Au*	0.9-1	0.1	164.6	16.8		
Ag*	31,6	15,4	152,2	147		
Состояние	Заявлено 4	Россия в 2012	Си – второй	Рентабельны		
изученности,	участка	г. начала	металл по	е запасы Си		
обеспеченность,	(Россия,	разведку	востребован	будут		
конъюнктура	KHP,	участка по	ности после	исчерпаны к		
	Франция,	контракту с	А1 в мире	2016г.		
	Корея)	МОМД. Общая	-	Обеспеченно		
	1 /	продолжительн		сть		
		ость контракта		коренным		
		15 лет		золотом-10		
				лет,		
				россыпным-		
				7 лет.		
*- состав металла приведен в т/г.						

Как было отмечено в предыдущем разделе (1.1) уровень официальных документов для трех основных типов океанических полезных ископаемых (ЖМК, КМК и ГПС) находится в различной степени разработки. Для ЖМК,

заметно опережающее развитие по сравнению co всеми остальными разновидности ТПИ океана. В 2000 г. МОМД ООН были приняты правила полиметаллических конкреций. Это поиска И разведки позволило В последующие годы провести оформление контрактов на разведку заявленных скоплений [15] ЖМК нескольким странам: Франции, Японии КНР, Ю. Кореи, СО ИНТЕРОКЕАНМЕТАЛ, Германии и России. В настоящее время на российском заявочном участке, в пределах наиболее перспективного Российского Разведочного Района (РРР) завершается второй этап [15] поисковоразведочных работ (*Mn*, *Fe*) и попутных (Mo, Pt, P3Э, в основном, Ce) компонентов. Согласно концепции изучения и освоения океанического месторождения ЖМК [64], этап его промышленного освоения может наступить в начале двадцатых годов текущего столетия (2021-2022 гг.).

Повышенный интерес различных государств к освоению подводных ресурсов дна акваторий, усилия большого числа крупных отечественных и зарубежных специалистов и ученых, необходимость создания специализированных научно-исследовательских организаций и корпораций свидетельствуют о развитии новой отрасли – морского горного дела. Основная ее задача – создание и совершенствование методики и техники морских горноразведочных работ.

Анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы показывает, что ведущими зарубежными фирмами проводятся работы по созданию горно-разведочной техники И технологии лля освоения месторождений дна морей и океанов. Однако необходимо отметить, что вся имеющаяся в настоящее время научно-техническая информация, в настоящее время представлена только в патентной проработке. Отсутствуют конкретные примеры использования на практике многих подъемно-транспортных систем для глубоководных условий. Почти не публикуются данные по этой проблеме. Поэтому научно-исследовательские работы по освоению минеральных ресурсов глубоководного дна Мирового океана имеют большую актуальность в развитии экономики нашей страны и всего Мирового сообщества.

25

Из данных представленных в таблице 1.4 можно сделать вывод, что месторождения дна морей и океанов по своему составу и запасам представляют реальный практический интерес, если учитывать, что общемировая И минерально-сырьевая база России начинает ощущать дефицит в источниках целого ряда стратегических металлов. Наиболее худшая ситуация сложилось в марганцеворудной отрасли. Россия фактически не располагает месторождениями качественных оксидных марганцевых руд и ежегодно импортирует товарную марганцевую руду и ферросплавы на сумму более 200 млн. долларов. Являясь мировым лидером в области добычи никельсодержащих руд, Россия не может не думать о сохранении своего статуса в будущем. В настоящее время-никельдобывающая промышленность базируется на освоении месторождений Норильского рудного района. Их рентабельность возможна при добыче только богатых *Ni-Cu* сульфидных руд, ресурсы которых при одновременном нарастании глубины отработки сокращаются. «Норильский никель» производит 90% отечественной добычи никеля, около 70% добычи меди. 30% меди извлекаются из месторождений Урала, ресурсная база которого также нестабильна. Необходимо отметить, что Ni и Cu - основные ЖМК и КМК, а Си в очень высоких концентрациях содержится в ГПС.

Геологоразведочные работы на Российских участках ЖМК в поле Кларион-Клиппертон находятся на второй стадии разведки, значительная их площадь изучена в масштабе 1:50000, параллельно с ними проводятся инженерно-геологические и экологические исследования. Однако техникотехнологическое 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 ВНИИ Океангеология и ЦНИГРИ возможные сроки начала эксплуатационных работ 2021-2022 гг. Таким образом, можно полагать, что современный уровень развития горно-добычных и

26

транспортных работ для освоения месторождений дна морей и океанов с точки зрения развития научно-технического прогресса отстает от Мирового.

Эффективное использование ресурсного потенциала Мирового океана для экономического развития России требует создания технических и технологических решений по освоению ЖМК, которые с экологической точки зрения будут безопасными для сложной экосистемы океана, что на сегодняшний день представляет актуальную научную задачу.

# **1.3.** Геологическая характеристика основных промышленных залежей железомарганцевых конкреций

Океанические ЖМК имеют существенные отличия от шельфовых и встречаются во всех частях Мирового океана [87].

Процесс формирования и особенности размещения железомарганцевых образований Мирового океана достаточно полно описан [5,7,84,87,93,101].

Скопления океанических конкреций локализованы на глубине 4000-6000м. Конкреции расположены непосредственно на поверхности дна, нередко погружены в осадок, также встречаются конкреции, расположенные под слоем ила. Распределение ЖМК по дну крайне неравномерно (рис.1.5) [20,87, 98].

Океанические ЖМК по своей морфологии весьма многообразны. Чаще всего это округлые стяжения, форма которых варьирует от шарообразной до сплюснуто-овальной, иногда встречаются гроздевые формы, образовавшиеся из нескольких сросшихся конкреций (рис.1.6).

Наблюдаются также плитчатые и неправильно-угловатые формы, что определяется в основном формой нерудного ядра. Размеры конкреций изменяются от долей миллиметра или первых миллиметров (микроконкреции) до первых десятков сантиметров (чаще всего около 3 см). Как правило, они содержат ядро (иногда несколько ядер) из обломков вулканических и основных пород, зубов акулы, костей рыб и другого материала [102].



**Рис.1.5.** Карта распространения ЖМК и корок в Мировом океане. (1 – скопление железомарганцевых образований: а – корок, б – конкреций) [87].



Рис.1.6. Формы железомарганцевых конкреций.

Выделены следующие четыре генетических типа железомарганцевых и марганцевых залежей:

*Tun I.* Гидрогенные, сформировавшиеся при медленном осаждении (и адсорбции) из морской воды в окислительных условиях.

*Тип II.* Гидротермальные, возникающие при отложении из гидротермальных растворов в таких зонах активного вулканизма или высокого теплового потока, как активные океанские хребты, рифты и подводные вулканы.

*Тип III.* Гальмнролитические, источником которых служили металлы, поступившие в ходе подводного выветривания базальтов.

*Тип IV.* Диагеистические, образовавшиеся в результате диагенетического перераспределения металлов, главным образом марганца в осадочном чехле с диффузией и обогащением на границе окислительной и восстановительной зон (в основном на поверхности раздела осадок — вода) [20,22,101,].

В основном ЖМК встречаются в областях пелагического седиментогенеза, для которых характерны низкие скорости осадконакопления (миллиметры и их доли за 1000 лет), небольшая мощность осадочного чехла (до первых сотен метров). Наиболее характерными подстилающими (вмещающими) породами полигенные глубоководные красные глины, являются радиоляриевые, диатомовые и фораминиферовые илы. Большей частью ЖМК залегают на поверхности морского дна или в приповерхностном слое, а иногда образуют многослойные залежи в толще осадочного разреза. Наибольшие площади ЖМК занимают в пределах холмистых участков океанических котловин ниже критической глубины карбонатной компенсации. Накапливаются они на пологих склонах холмов, иногда на вершинах и у подножий. В депрессиях между положительными формами рельефа концентрация ЖМК, как правило, уменьшается.

Физические свойства ЖМК (табл. 1.5) определяются концентрически наслаивающимися пленками гидроокислов железа и марганца, чередующимися с прослойками нерудного состава. Колломорфные выделения гидроокислов железа и марганца слабо раскристаллизованы, а вся масса конкреции обладает

29

микропористостью, что определяет невысокие значения объемного веса, высокую водонасыщенность в естественном состоянии, хрупкость и невысокую переменную твердость в зависимости от степени обезвоживания [125].

Так, например, для северной тропической зоны Тихого океана объемная масса ЖМК равна 1,61—2,67 г/см<sup>3</sup>, плотность рудного вещества - 1,56—3,50 г/см<sup>3</sup>, твердость по шкале Мооса [19,32,68] -1—4; средняя влажность типичных пелагических осадков - 0,55—0,65, объемная масса натуральных осадков -1,29—1,47 г/см<sup>3</sup>. Исследования ЖМК Индийского океана показали, что они обладают влажностью от 0,26 до 0,59, характеризуются небольшими углами естественного откоса (31,5—40,5°) и объемной массой (1,03—1,18 г/см<sup>3</sup>, редко до 1,26 г/см3), зависящей от степени заиленности. Наиболее типичными значениями физических свойств являются: влажность - 0,35—0,49, объемная масса в сухом состоянии 1,22—1,39 г/см<sup>3</sup>, твердость по шкале Мооса - 2,5—3 [14, 102].

#### Таблица 1.5.

Геолого-	Основные	Разме	Плотн	Влажн	Порис	Прочн
генетический	морфотипы	ры, см	ость,	ость, %	тость,	ость,
компмплекс			г/см <sup>3</sup>		%	МПа
Преимущественно	Дискоидальны	4-12	1,84-	24,8-	55-	0,1-
диагетический	й, полиго-		2,11/19	36,7/30,	63/58,3	3,8/0,8(
(генотип С)	нальный		9(84)	3(84)	(84)	64)
Сидементационно-	Полигональны	2-8	1,85-	21.1-	57-	0,3-5/
диагенетический	й. сростковый		2,14/1,	37,7	63/59,3	1,7-9
тип (генотип В)	эллипсоидальн		99(41)	/31,1(4	(4)	
	ый			1)		
Преимущественно	Сфероидальны	2-4	1,81-	23,1-	45-	2,5-5/
сидементационны	й, эллип-		2,07/	33,9/	57,2/	3.4 (4)
й (генотип А)	соидальный		1,98(1	29,2(16	51,4(3)	
			6)	}		

Физико-механические свойства железомарганцевых конкреций Российского участка (рудная провинция Кларион-Клиппертон.

В океанах крупные поля распространения ЖМК, как правило, приурочены к глубоководным котловинам, вулканическим поднятиям и флангам срединно-

океанических хребтов. Они имеют определенную геохимическую специализацию (никель-медь-марганцевую, никель-медь-железистую, кобальтжелезистую, никель-кобальт-железистую), которая в пределах поля может значительно изменяться.

В Индийском океане известны обширные поля распространения ЖМК: Центрально-Индийское, Западно-Австралийско-Кокосовое, Южно-Австралийское, Аравийское, Сомалийское, Маскаренское, Мадагаскарское, Крозе, Агульяс-Капское (выходит в Атлантический океан). Плотность залегания ЖМК в целом по океану относительно невысокая — обычно не превышает 5 кг/м<sup>2</sup>, однако на ряде участков [42] Центральной, ЗападноАвстралийской, Южно-Австралийской (особенно к югу от разлома Диамантина) котловин достигает 15 кг/м<sup>2</sup> и более, в отдельных участках — 50—60 кг/м<sup>2</sup>. Среднее содержание металлов и значение никелевого эквивалента ниже, чем в Тихом океане (обычно не достигает рудных концентраций) [102].

В Северной Атлантике крупные поля ЖМК не обнаружены. Примером слабой распространенности ЖМК в Атлантическом океане служит широкое развитие турбидитов на абиссальных равнинах. Потенциальной областью богатых залежей конкреций является район развития глубоководных морских красных глин па юго-западе Северной Атлантики [19,20].

В Тихом океане выделяют следующие промышленные поля ЖМК.

Залежь в центральной котловине характеризуется плотностью залегания ЖМК до 15 кг/м<sup>2</sup> и более, среднее содержание металлов (в процентах): никеля — 0,76, меди — 0,61, кобальта — 0,26; среднее значение никелевого эквивалента—1,33 (на отдельных участках от 1,9 до 3). Ложе котловины представляет собой сложно расчлененную холмистую равнину. Глубины океана в районе достигают 5—6 км. Мощность осадочного чехла —до 100— 150 м, местами — до 400 м [14]. Осадки представлены в основном полигенными красными глинами.

Калифорнийское рудное поле характеризуется широким развитием подводных гор высотой 1,5—2 км. Глубина океана до 4— 4,5 км. Плотность

залегания конкреций от 0,5 до 13,5 кг/м<sup>2</sup>, среднее содержание металлов (в процентах): никеля — 0,94, меди — 0,56, кобальта — 0,19; среднее значение никелевого эквивалента — 1,41, на северном фланге—1,8—2,4. Осадки представлены глубоководными красными глинами и илами.

Поле конкрециеносности Маркус-Неккер расположено в пределах подводной горной системы и характеризуется сильно расчлененным рельефом. Донные осадки представлены фораминиферовыми илами. В восточной части выделяется рудное поле Уэйк-Неккер с плотностью залегания ЖМК от 0,5 до 20 кг/м<sup>2</sup>. Конкреции железокобальтового типа. Среднее содержание металлов (в процентах): никеля — 0,55, меди — 0,23, кобальта — 0,50. Местами на известняках и базальтах развиты железомарганцевые корки толщиной до 10—15 см и глыбовые конкреции диаметром до 20—30 см. Глубины океана 1,7—2,3 тыс. м [14].

В пределах конкрециеносного поля Южной котловины выделяются два рудных поля, характеризующихся высокой плотностью залегания ЖМК (от 10—15 до 30—40 кг/м<sup>2</sup>) и высоким содержанием кобальта (до 0,4—0,9 %). Среднее значение никелевого эквивалента 1,34%. В целом Южная котловина объединяет несколько глубоководных впадин, разделяющихся островными системами и подводными горными сооружениями.

Поля конкрециеносности в пределах Тихоокеанского бассейна (Гавайское, котловины Беллингсгаузена, Перуанское, Менарда) отличаются от рассмотренных рудных полей более низкой плотностью залегания ЖМК и меньшим содержанием рудных компонентов, однако из-за слабой изученности не исключено наличие в их пределах относительно богатых скоплений.

Рудное поле Кларион-Клиппертон расположено в северной приэкваториальной области Северо-Восточной котловины Тихого океана, в глубоководной впадине, на севере и на юге ограниченной зонами глубинных разломов Кларион и Клиппертон, на востоке - хребтом Математиков, на западе - центральной частью поднятия островов Лайн. Протяженность впадины составляет около 4700 км при ширине около 1100 км (рис.1.7) [61].

Глубины океана 4,5—5 тыс. м. Рельеф дна характеризуется развитием абиссальных холмов и отдельных вулканических гор, наряду с которыми имеются равнинные участки. Донные осадки представлены в основном радиоляриевыми илами. Мощность осадочного чехла 100—300 м. [14, 102]. Основными морфоструктурными элементами дна провинции Кларион-Клиппертон являются ложе глубоководной котловины, занимающее большую часть её площади, и западный склон Восточно-Тихоокеанского поднятия [61].

Железомарганцевые конкреции этой провинции содержат ряд рудных элементов, важнейшими из которых являются никель, медь, кобальт и марганец. Прогнозные ресурсы провинции (площадь 3601,7 тыс. км2) оценены в 17,4 млрд. т. сухой рудной массы.



Рис.1.7. Общая структура залежей ЖМК провинции Кларион-Клиппертон. 1,2 – границы структур: 1 – Подножие склона ВТП; 2 – региональные поднятия дна: 3,4 – оси региональных структур: 3 – поднятий, 4 – депрессий; 5 – разломы; 6 – оси палеомагнитных аномалий; 7 – скважины DSDP [97].

В пределах Разведочного района РФ результаты геологоразведочных работ позволили классифицировать этот объект как месторождение-гигант комплексных Fe-Mn-руд: крупное по Ni и Cu, уникальное по Co и Mn. Общая площадь оруденения составляет 42,6 тыс. км<sup>2</sup>, средняя плотность залегания ЖМК на поверхности дна — 14,7 кг/м<sup>2</sup>. Прогнозные ресурсы месторождения достигают 600 млн. т. сухой рудной массы при среднем содержании металлов в руде (%): 1,42 Ni; 1,15 Cu; 0,23 Co; 30,17Mn. Ресурсы Разведочного района РФ позволяют полностью обеспечить 20-летний контрактный срок эксплуатации месторождения ЖМК согласно правилам МОМД [5].

Рудная провинция Кларион-Клиппертон является одним из наиболее изученных в инженерно-геологическом отношении глубоководных районов Мирового океана [67,68].

В этом районе геологические исследования, включая изучение физикомеханических свойств (ФМС) донных отложений, ведутся с середины XX в. Наиболее ранние исследования ФМС донных отложений выполнены гидрографической службой Военно-морского флота США, на полигонах международной программы DOMES и в процессе реализации проекта глубоководного бурения (DSDP).

В нашей стране систематические геологоразведочные работы, ориентированные на изучение ЖМК в рудной провинции Кларион-Клиппертон, были начаты объединениями «Южморгеология» и «Севморгеология» в 1981 г. За прошедший период выполнены десятки рейсов научно-исследовательских судов, и практически в каждом из них, где проводился грунтовый пробоотбор, изучались ФМС донных отложений. При этом наиболее представительные данные по ФМС донных отложений получены на полигонах, где выполнялись специализированные инженерно-геологические работы (рис. 1.8) [56].

В морфоструктурном отношении эти области находятся в пределах глубоководной впадины Кларион-Клиппертон. Глубина океана в этой части провинции увеличивается в западном направлении от 3800-4300 м в восточной области до 4700-5300 м в центральной области. Рельеф дна характеризуется

преобладанием холмисто-грядовых равнин с ориентацией гряд в основном в меридиональном направлении. Превышение высоты холмов и гряд над днищем долин составляет от первых десятков до 400 м, а крутизна их склонов обычно не превышает 10°.



**Рис. 1.8.** Распространение железомарганцевых конкреций в Тихом океане (A) и полигоны специализированных инженерно-геологических работ в рудной провинции Кларион-Клиппертон (Б):

1— поля железомарганцевых конкреций; 2— границы рудной провинции Кларион-Клиппертон; 3— зоны трансформных разломов; 4— Разведочный район РФ; 5 разведочный Район Совместной организации «Интерокеанметалл»; 6— полигоны специализированных инженерно-геологических работ.

Высота гор вулканического и вулканотектонического происхождения может достигать 1000-1500 м [67].

В геологическом строении рудной провинции Кларион-Клиппертон принимают участие верхнекайнозойские отложения, донные осадки и магматические породы (базальты) фундамента и вулканогенно-осадочного чехла. По результатам геоакустического профилирования, изучения вещественного состава, микрофауны и физико-механических свойств донные образования подразделяются на инженерно-геологические комплексы, горизонты и слои. Номенклатура донных образований при характеристике геологического разреза принимается по «Общей инженерно-геологической классификации донных грунтов океанского дна» [68].

В работе «Физико-механические свойства донных образований на глубоководных месторождениях железомарганцевых конкреций» Кондратенко А.В. выделяет [56]:

I. Инженерно-геологический комплекс слабых и мягких (от жидкотекучих до мягкопластичных) преимущественно глинистых и кремнистоглинистых осадков голоцен-среднемиоценового возраста [67] не превышающих 35 м.

Слой I<sub>1</sub> – геохимически активный слой мощностью до 0,15 м в котором на поверхности дна, как правило, до половины или на 2/3 погружены железомарганцевые конкреции. При этом иногда частично или полностью «припорошены» осадками. Для поверхностного слоя осадков характерны очень низкие значения сопротивления вращательному срезу (0,7-2,6 КПа).

Параметры физических свойств конкреций различных морфотипов и размеров изменяются в следующих пределах: плотность конкреций 1,81-2,14 г/см<sup>3</sup>, влажность 21,1-37,7 %. Прочность ЖМК на одноосное сжатие имеет устойчивую корреляционную связь с их размерами: с увеличением размеров конкреций от 2 до 18 см их прочность уменьшается, соответственно, с 3,4 до 0,3 МПа. Эта закономерность связана с трещиноватостью конкреций и отражает тенденцию повышения количества и размеров трещин от более мелких к более крупным фракциям.

Горизонт I<sub>2</sub>. подстилающий геохимически активный слой. Сопротивление вращательному срезу в интервале опробования от 0 до 4 м изменяется в пределах 1,8-17,4 кПа, при этом отмечается устойчивая тенденция к увеличению значений сопротивления вращательному срезу с глубиной залегания с градиентом 2
кПа/м. Эта тенденция подтверждается результатами статического зондирования донных отложений [56].

Донные осадки, подстилающие геохимически активный слой, в интервале опробования 0,05-0,5 м характеризуются относительно небольшой изменчивостью физико-механических свойств [56].

II. Инженерно-геологический комплекс мягких (от текучепластичных

до тугопластичных) глинистых отложений раннемиоценового возраста [67].

На большей части провинции глинистые отложения залегают на карбонатной толще и сверху перекрыты покровным комплексом донных осадков. Выходы глинистых отложений на поверхность дна приурочены к склоновым участкам. Мощность глинистых отложений в депрессиях может достигать 45 м.

Вскрытые в разрезах цеолитсодержащие глины выделяются повышенной плотностью 1,27-1,39 г/см<sup>3</sup> и сопротивлением вращательному срезу в пределах 6,-17,4 кПа.

III. Инженерно-геологический комплекс мягких (полутвердых) карбонатных отложений раннемиоценового-олигоценового возраста.

Комплекс карбонатных отложений залегает в основании осадочного чехла и занимает не менее половины его мощности. Обнажения комплекса связаны со склонами гряд, вытянутыми в субмеридиональном направлении.

IV. Инженерно-геологический комплекс мягких (туго-пластичных) глинисто-кремнистых и кремнисто-глинистых отложений позднесреднеэоценового возраста.

Физико-механические свойства глинисто-кремнистых отложений колеблются в следующих пределах: плотность — 1,19-1,29 г/см<sup>3</sup>, сопротивление вращательному срезу — 5,5-29,8 кПа.

V. Инженерно-геологический комплекс твердых скальных магматических пород (базальтов) голоцен-эоценового возраста.

Базальты слагают фундамент, отдельные вулканические постройки и встречаются в виде эффузивных покровов. Базальты с массивной текстурой (плотность 2,4-3,1 г/см<sup>3</sup>) имеют прочность на сжатие 80-400 МПа. В базальтах с подушечной текстурой (плотность 2,3-2,8 г/ см<sup>3</sup>) прочность на сжатие не превышает 50-90 МПа [56].

Физико-механические свойства железомарганцевых конкреций и условия их залегания в геохимически активном слое, в интервале опробования 5-50 см. предопределяют выбор тех или иных средств и способов добычи, что является многофакторной задачей, решение которой зависит от вариации многих факторов, основным из которых является глубина моря.

Таким образом, исходя из горно-геологических условий залегания железомарганцевых конкреций рудной провинции Кларион-Клиппертон можно сделать вывод о том, что уже в ближайшее время предпосылки освоения минеральных ресурсов океана, определяющиеся, прежде всего высоким содержанием Mn, Co, Ni, Cu, Mo, примесями благородных, редких, рассеянных и редкоземельных элементов и уже подсчитанными прогнозными ресурсами, которые по сравнению с геологическими запасами континентов значительны, в ближайшей перспективе, при внедрении инновационных технологий и технических средств добычи и переработки будут экономически эффективны.

# 1.4. Краткий анализ способов и технологических средств освоения морских месторождений

В настоящее время прибрежно-морские россыпи континентального шельфа на глубинах до 80-100м интенсивно разрабатываются многочерпаковыми (до 50м), грейферными, эжекторными и эрлифтными драгами, погружными насосами у берегов США, Индии, Индонезии, Малайзии, Таиланде, Новой Зеландии, Австралии.

Первые опытно-промышленные работы по разработке оловоносных россыпей в нашей стране были предприняты «Минцветметом» СССР в 70-е годы

в прибрежной зоне моря Лаптевых (месторождение Чокурдатское). Однако этот опыт оказался не совсем удачным, т.к. не были в полной мере учтены горнотехнические условия и технологические возможности технических средств добычи. Но эти работы дали положительный результат – доказали возможность работы морского плавучего горно-обогатительного комплекса для получения оловянного концентрата и показали необходимость совершенствования технических средств и технологий в этих сложных горно-геологических условиях [40].

Немаловажным фактором является также слабое развитие инфраструктуры и в первую очередь транспортная система – это Северный морской путь, связывающий воедино огромные пространства Арктической континентальной окраины РФ [19].

Проблемой промышленного освоения глубоководных месторождений, в том числе ЖМК является создание принципиально новой отрасли – морской горнодобывающей промышленности, требующей значительных финансовых затрат и длительного времени.

Основными техническими проблемами являются создание глубоководного добычного оборудования и комплекса систем управления, обеспечивающего взаимосвязанную, взаимосогласованную и эффективную работу судна и глубоководного гидроподъемного оборудования в режиме добычи.

Разработка месторождений ЖМК будет осуществляться на выделенном РФ участке морского дна в Международном районе Мирового океана. Разработка будет регламентироваться Конвенцией ООН по морскому праву и контракту с Международным органом по морскому дну и под его наблюдением.

Положения принятой на III Конференции ООН в 1982 году Конвенции ООН по морскому праву предусматривают, что страна-заявитель может получить право на проведение добычных работ в промышленных масштабах на предварительно заявленном участке только при наличии собственной патенточистой и конкурентноспособной технологии промышленной добычи,

которая по предложению Международного органа по дну может быть передана на разумной коммерческой основе предприятию Органа или третьим странам.

Для добычи глубоководного минерального сырья в научно-технических публикациях предлагаются различные технологические комплексы. Обычно они осуществляют следующие технологические операции, определяющие его промышленную структуру: сбор и выемка твердого полезного ископаемого (ТПИ) на дне; его подъем в виде гидросмеси (пульпы) на поверхность, т.е. на добычное судно; перегруз (перекачка с добычного судна на транспортное, далее – на берег к потребителю) [4,36, 87,96,97,99].

По оценкам экспертов, затраты на систему транспортировки ТПИ могут составить до половины затрат на весь добычной комплекс. Также очевидно, что самые сложные технические проблемы возникают именно при создании протяженных и мощных подъемных коммуникаций [12,42,60,74].

В настоящее время нет единой стратегии разработки аппаратной цепи технологических средств добычи железомарганцевых конкреций, которые различаются по методу их подъема на поверхность. Рассматриваются три инженерных подхода: гидравлический комплекс, использующий гидравлический подъем твердых материалов по транспортному трубопроводу от агрегата сбора на судно, конвейерная многоковшовая землечерпаковая и челноковая (автономная) системы. В последнее десятилетие в докладе Подготовительной комиссии для Международного органа ООН по морскому дну и Международному трибуналу по морскому праву один из трех основных принципов конвейерной многоковшовой землечерпаковой системы был признан неэффективным из-за низкой производительности, а другой (челночной системы) – как техника второго поколения [42].

Таким образом, по нашему мнению, наиболее перспективным и технически реализуемым комплексом на данном этапе можно считать комплекс технологического оборудования на базе гидравлической системы подъема [12,13,30].

Способ подъема является одним из наиболее важных процессов в технологии переработки морских месторождений. Он, как правило, определяет не только целесообразность отработки того или иного месторождения, но и технологию добычных работ и экономическую эффективность всего [42] предприятия в целом.

Однако при выборе оптимального варианта технических средств для эффективной работы необходимо решить проблему снижения энергоемкости гидроподъема горной массы, которая является чрезвычайно актуальной проблемой при освоении морских месторождений полезных ископаемых. Наиболее реальным путем решения является *создание и формирование устойчивого режима движения высоконасыщенных твердым материалом гидросмесей* по горизонтальному и вертикальному трубопроводу большой протяженности.

Вид океанического добычного комплекса с применением эрлифта наиболее технически проработанного для подъема железомарганцевых конкреций, как пример представлен на рисунке 1.9 [9,11,37,39,42, 43,66,69,70,77] Он состоит из добычного судна, колонны подъемных труб (длиной до 6000 м), буферной платформы на нижнем торце колонны труб и донного самоходного (или буксируемого) агрегата сбора [42,59], соединенного с буферной платформой гибким шлангом. Кроме того, с буферной платформой с помощью троса связан кабель, который представляет собой телеуправляемый подводный аппарат, плывущий по курсу движения впереди буферной платформы и агрегата сбора.

Однако, несмотря на известные достоинства данной системы, основными их недостатками могут быть неустойчивые условия их работы, а также небольшая величина объемной концентрации, поднимаемой гидросмеси (~5–8%) при использовании труб большого диаметра (~700–900 мм) [62,98,99,100].

Большой диаметр трубопроводов при глубоководной добычи обладает неудовлетворительными прочностными характеристиками и, вследствие большого веса, необходимо увеличивать водоизмещение добычного судна.



Рис. 1.9. Эрлифтный добычной комплекс [53]:

1 — судно; 2 — вышка для сборки колонны труб; 3 — носовые подруливающие устройства; 4 — кормовые подруливающие устройства; 5 — колонна труб; 6 — смесители; 7 — буферная платформа; 8 — телеуправляемый подводный аппарат; 9 — кабель-трос; 10 — плавучий блок; 11 — гибкий шланг; 12 — агрегат сбора; 13 — шнековые (или гусеничные) движители агрегата сбора.

Несмотря на разнообразие предлагаемых гидравлических глубоководных вариантов подъема, проведенная нами систематизация представлена на рисунке 1.10, их основным элементом является вертикальный транспортный трубопровод. Его диаметр определяется мощностью агрегата, создающего необходимый расход и давление транспортируемой жидкости для преодоления сил тяжести и трения при движении гидросмеси, а также размером частиц минерального сырья. Принципиальная разница между этими системами заключается в способе передачи энергии потоку гидросмеси в трубопроводе.

Некоторые способы, приведенные на рисунке 1.10, характеризуются уменьшением средней плотности жидкости в верхних секциях вертикального трубопровода. Например, при вводе сжатого воздуха (рис. 1.10.а) в трубопровод на определенной глубине (*эрлифтный способ [44]*) или жидких углеводородов (рис. 1.10.е) и твердых частиц (рис. 1.10.д), плотность которых меньше плотности морской воды. Основное преимущество двух последних способов заключается в их повышенной надежности за счет отсутствия изотермического расширения рабочего агента по высоте подъемной трубы.

Самостоятельным технологическим звеном гидравлических систем подъема является способ подводного разделения. Он предусматривает расположение на определенной глубине УППК – вертикальной пустотелой камеры (рис. 1.10.д), где устанавливается насос для откачки воды из трубопровода, вследствие чего внутри ее создается атмосферное давление. Избыточное давление, действующее на нижнем торце трубопровода за счет гидростатического давления, вызывает направленное движение потока гидросмеси до камеры, где происходит разделение минерального сырья и воды. Практически такая система представляет комбинацию насосной и механической. Однако, способы гидроподъема (рис. 1.10. г,д,е) находятся только в начальной стадии технических разработок.

Грунтонасосный вариант подъема с двумя типами агрегатов, один из которых способен перекачивать гидросмеси повышенных концентраций, показан на рисунке 1.10.6.

Предлагается также вариант гидравлической системы подъема, в котором насосные агрегаты устанавливаются выше уровня моря (рис. 1.10.в), а транспортный трубопровод представляет собой двухтрубную систему с загрузочным устройством, расположенным у дна океана.



**Рис. 1.10.** Систематизация технических средств и способов глубоководного гидравлического подъема железомарганцевых конкреций: a) – 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 аппарата колонного типа, позволяющая 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

annapama.

Перепад давления на загрузочном устройстве определяется параметрами режима транспортирования железомарганцевых конкреций. На базе этого варианта возможен вариант системы подъема в тяжелых средах по замкнутой схеме.

Общим крупным недостатком систем гидравлического подъема (грунтонасосного, эрлифтного, УППК) является малая концентрация гидросмеси (обычно менее 12% твердого).

Система гидравлического подъема с применением центробежных грунтовых насосов позволяет транспортировать на поверхность (добычное судно) гидросмесь более высокой объемной концентрацией (~12–18%) [14,38]. Основным достоинством этой системы при эксплуатации для достижения заданной производительности по твердому является применение труб меньшего диаметра (~500 мм). Однако, как было отмечено в разделе 1.4 условия работы и центробежных расходно-напорные характеристики погружных насосов ограничивают допустимую высоту подъема на одну ступень, что потребует использовать многоступенчатые системы и большую их металлоемкость из-за абразивного износа движущихся частей агрегатов. Основным недостатком системы гидроподъема с использованием погружных грунтовых насосов является переизмельчение ЖМК при прохождении их через рабочее колесо грунтовых насосов [42,74,75].

По результатам зарубежных исследований грунтонасосного подъема ему свойственны следующие *технологические недостатки*:

- относительно невысокое содержание твердого материала в гидросмеси (~15 %), транспортируемой с глубины на борт судна, определяет небольшую производительность по железомарганцевым конкрециям и соответственно высокую энергоемкость всей технологии;
- ограниченность развиваемого давления на одну ступень требует применения многоступенчатых насосных агрегатов и соответственно понижает надежность всей технологии;

- абразивность транспортируемых гидросмесей вызывает частый выход из строя различных деталей грунтонасосов, замена которых требует каждый раз подъема и демонтажа оборудования и трубного става;
- высокая степень переизмельчения конкреций при прохождении через рабочие колеса и проточные части многоступенчатых грунтонасосов способствует значительному усложнению процесса обогащения на борту судна и увеличивает потери ценных компонентов при сливе [42] и загрязняет морскую воду.

Более перспективным, с точки зрения эффективности и безопасности для окружающей среды, можно считать способ трубопроводного гидроподъема железомарганцевых конкреций с использованием загрузочных аппаратов, работающих совместно с высоконапорными водяными насосами (рис. 1.10.в). Такие системы, как показывает опыт их эксплуатации при наземном гидротранспортировании [51] и шахтном подъеме, при достаточно значительном коэффициенте полезного действия способны обеспечить высокие плотности образуемой и доставляемой гидросмеси, позволяют практически исключить абразивный износ движущихся и проточных частей насосного оборудования, не требуют предварительного дробления транспортируемого материала и не способствуют его переизмельчению в процессе перекачивания. Использование для гидроподъема загрузочных аппаратов устраняет необходимость устройства перекачных станций и повышает надежность и экономичность работы транспортной системы в целом.

Примерами подобных транспортных глубоководных морских систем являются аппараты, предложенные фирмой «К.К.Хитачи сейсакусе» (Япония); кампаниями «Siemagitransplan GmbH» и «Klein Sehanzlin und Becker AG» (Германия), «Summa Corp», «Lockheed Vissiles and Spase», «Kamurlne» и др.

В отличие от известных конструкций в МГРИ-РГГРУ был разработан загрузочный аппарат, работающий на принципе взаимодействия закрученного кольцевого потока воды с твердым материалом (эффекта искусственного смерча), новизна которого подтверждена патентами России, США, Германии,

Австралии, Финляндии и других стран, два из которых удостоены золотой и серебряной медалями на Всемирном салоне изобретений «Eureka» в Брюсселе. Он прошел апробацию и опытно-промышленные испытания при гидротранспортировании [55] редкометальных песков на Верхне-Днепровском ГМК, Иршинском ГОКе, а также опытные испытания в Шотландии, ЮАР. Результаты показали высокую эффективность (30-35% твердого по объему), стабильность подачи гидросмеси, и надежность всех конструктивных элементов, что позволяет его рассматривать как один из оптимальных вариантов глубоководного подъема (рис.1.10ж) [31,32,34,38,60,71,72,74,75,76,79,80,81].

Морские испытания системы подъема с такими аппаратами проводились сотрудниками МГРИ совместно с ЦКБ «Океангеотехника» и Черноморской опытно-методической экспедицией и подтвердили работоспособность и эффективность предложенных конструкций загрузочного аппарата. Для проведения эксперимента были использованы железомарганцевые конкреции, собранные экспедициями «Южморгеологии» в центральной части Тихого океана.

Однако эта конструктивная схема не может в полной мере исключить антропогенного воздействия на условия среды обитания донных организмов и организмов поверхностного слоя водной толщи. Поэтому нами предложена технологическая схема (рис.3.ж) с применением не только загрузочного, но и аппарата колонного типа, позволяющая разделять донные осадки непосредственно на месте производства работ, складируя илистые фракции в выработанном пространстве и выдавая на борт судна высоконцентрированную железомарганцевых конкреций с использованием загрузочных гидросмесь аппаратов работающих на принципе взаимодействия закрученного кольцевого потока воды с твердым материалом (эффекта искусственного смерча). Данный способ в наименьшей степени будет влиять на жизнедеятельность бентосных организмов, а также на состояние верхних слоев водной толщи, так как отмывка конкреций происходит непосредственно на месте их залегания.

апробация новой гидротехнологии Создание И формирования И транспортирования высоконасыщенных гидросмесей на основе кинетической энергии закрученных струй жидкости (эффекта искусственного смерча) явилось предпосылкой для нового научного направления гидродинамика взаимодействия закрученных струй жидкости с твердыми минеральными частицами в гидротранспортно-подъемных установках.

Однако в целом необходимо отметить, что в настоящее время техническая готовность решения технологических задач, связанных с промышленным освоением глубоководных месторождений у нас в стране отстает от других стран.

Россия, имеющая заявочный участок в поле Кларион-Клиппертон (Тихий океан) заканчивает второй этап разведки. В 2016 году завершаются разведочные работы. Эта ситуация требует далее перехода к стадиям освоения месторождений (подготовка опытной добычи, а затем и добыча в промышленном масштабе в 2021–2022г.). Однако технико-технологическое обеспечение этих работ является слабым местом в этой проблеме и оценивается многими специалистами как неудовлетворительное.

На сегодняшний день требуется срочная активизация, интенсификация научно-технического обеспечения высокопроизводительным горноразведочным оборудованием эксплуатационных работ для разработки месторождений полезных ископаемых (ЖМК, КМК, ГПС, гидратов) на океанском дне.

Реализация поставленной проблемы полностью отвечает современным и будущим интересам России как суверенного государства для геологического, экономического, социального и научного развития нашей страны.

Таким образом, назрела актуальная необходимость научно-технического обоснования и научно-методическое обеспечение высокопроизводительных систем гидроподъема твердых полезных ископаемых для эффективного освоения месторождений дна морей и океанов в предельно короткие сроки.

#### ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОСМЕСИ В РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗАГРУЗОЧНЫХ АППАРАТОВ

#### 2.1. Систематизация загрузочных аппаратов по гидродинамике разгрузки гидросмеси

На основе проведенных исследований в предыдущем разделе был сделан вывод о необходимости проанализировать системы гидроподъема ЖМК и усовершенствовать трубопроводного вертикального технологию гидротранспорта с использованием [63] загрузочных аппаратов (питателей), имеющие известные преимущества: подача высоконасыщенной гидросмеси, отсутствие абразивного износа движущихся частей агрегата и другие. Они предназначены для ввода твердого материала в трубопровод, по которому движется поток жидкости под давлением. Загрузочный аппарат работает на воде, которая нагнетается в трубопровод обычными насосами [15]. Твердый материал в сухом виде смешивается с водой или гидросмесью в самом питателе и далее нагнетается в магистральную коммуникацию. Такие способы загрузки позволяют применять в схемах гидротранспортирования высоконапорные многоступенчатые насосные установки для чистой воды, а твердый материал вводить в напорный трубопровод минуя насос. Создавая высокий напор, можно транспортировать твердый материал на большие расстояния [15].

Технические конструкции загрузочных аппаратов разнообразны. Разработаны опытные и опытно-промышленные образцы аппаратов камерного, трубчатого, плунжерного, поршневого, шнекового, вихревого и других типов [3,11,30,24,27,30,3234,35,37,48,49,51,58,63,88].

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. По этому признаку нами была [14] проведена систематизация загрузочных аппаратов, представленная на рисунке 2.1, в том числе по следующим способам:

– гравитационному (рис. 2.1. 1а,б,в,г);

— струйному с восходящей и нисходящей разгрузкой (рис. 2.1. 2а,б,в,г);

фильтрационному (рис. 2.1. 3.а,б);

\_\_\_\_\_ закрученными потоками у дна камеры (рис. 2.1.4а,б)

 коаксиально закрученными струями жидкости (эффект искусственного смерча) (рис. 2.1.5).

## 2.2. Анализ гравитационного способа разгрузки и гидродинамических режимов работы

В загрузочных аппаратах гравитационного типа формирование гидросмеси основано на поступлении твердого материала под действием сил тяжести [50,98] в проходящий напорный поток жидкости. Данный способ был использован в установке A3B-2 с производительностью по гидросмеси 300÷400 м<sup>3</sup>/ч с объемной концентрацией 1:6,5÷1:9 [15,35]. Загрузка по схеме на рисунке 2.1.1а осуществлена в установке A3B-25 с производительностью по гидросмеси 450÷550 м<sup>3</sup>/ч с объемной концентрацией 1:4÷1:5.

Для уменьшения гидродинамического несовершенства гравитационной разгрузки, обусловленное односторонним подводом материала к потоку жидкости в напорную линию, разрабатывались более совершенные конструкции этих аппаратов. С точки зрения оптимизации размеров устройства более эффективна схема на рисунке 2.1.16 в которой камера в нижней части переходит в смеситель, выполненный в форме конфузора, изогнутого по кривой, близкой к параболе. Смеситель сопряжен с водоводом под углом 45<sup>0</sup>. В месте сопряжения имеется отражатель как продолжение донной части камеры. Посредством наклона напорного трубопровода уменьшена скорость  $\vartheta_1 = \vartheta_{\text{вх}} \cdot \cos \theta$ , где  $\vartheta_{\text{вх}} -$ скорость на входе [37]. Путем плавного сопряжения стенки камеры и трубопровода увеличено расстояние *l*.





Это позволило повысить время смешения, плотность гидросмеси  $\rho_{cm}$  и в конечном итоге производительность установки по твердому с 67 м<sup>3</sup>/ч для A3B-2 до 120 –150 м<sup>3</sup>/ч и A3B-25 –150 м<sup>3</sup>/ч.

Для увеличения стабильности процесса пульпообразования (гидродинамической устойчивости) в конструкции загрузочных аппаратов используют механические побудители в виде шнека, ротора или другого оборудования, устанавливаемого [63] перед отверстием для ввода твердого в транспортный трубопровод, что препятствует образованию сводов и зависаний в камере аппарата [63].

Интенсифицировать гравитационный способ загрузки удалось увеличением скорости загрузки твердого материала  $\vartheta_0$ , что и использовано в польском питателе ГИГ-3. Принципиальная схема аппарата показана на рисунке 2.1.1.в. Применение шнека, установленного перед отверстием для ввода твердого в напорный трубопровод, позволило регулировать скорость  $\vartheta_0$  изменением числа оборотов и тем самым воздействовать на формирование плотности смеси. Согласно данным [37] производительность по твердому, в сравнении с A3B-2 при одинаковых рабочих напорах возросла до 180 м<sup>3</sup>/ч с соотношением твердого к жидкому 1:4.

Для глубоководных систем гидроподъема твердых полезных ископаемых разработаны конструкции загрузочных аппаратов, работающих на этом принципе.

Например, компанией «Summa Corpor» (США) был предложен способ и устройство для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых с двухкамерным питателем (пат. США 4 141159) (рис.2.2). Собранное и измельченное с помощью специального устройства [34,63] твердое полезное ископаемое направляется для временного хранения в бункер накопитель 1 гидроподъемной установки. Добычное судно (плавсредство), соединено с установкой гидроподъема двумя, соосно расположенными ставами труб. По кольцевому зазору между внутренней и внешней трубой подается напорная вода. Основная часть воды направляется под бункер, сообщающийся с внутренней

трубой 2 вертикального трубопровода. Перед подъемным трубопроводом установлены две загрузочные камеры 3, которые включаются в работу попеременно. Под действием сил гравитации в нижнее отверстие загрузочной камеры поступает твердая фракция горной породы, и под действием напорного потока воды по внутреннему вертикальному ставу труб поднимается на добычное судно.

Гидродинамика гравитационного способа пульпообразования схематично представлена на рисунке 2.1.1.г и обусловлена односторонним вводом твердого материала под действием гравитации в напорный поток жидкости в трубе.



**Рис.2.2.** Патент U.S. Patent Feb. 27, 1979. Sheet 1 of 5 4,141,159, USA. Гравитационный способ разгрузки глубоководного камерного аппарата. 1 – бункер-накопитель; 2 – трубопровод; 3 – загрузочные камеры.

Смешение твердого с жидким происходит на поверхности раздела фаз с образованием спутного движения пульпы, увлекаемой в напорный трубопровод. Твердый материал 1 опускается в поток жидкости 3 под действием гравитационной силы. На поверхности раздела 2 создается спутное движение гидросмеси с профилем скорости 4. Более благоприятные условия для ввода твердого материала в напорный трубопровод создаются в пристенной зоне 7, где вследствие торможения жидкости у стенки уменьшается гидродинамическая сила, действующая на твердые частицы. Увеличение скорости жидкости  $\vartheta_{\rm BX}$  нецелесообразно, так как ведет к уменьшению величины вертикального перемещения частицы (X), а также площади сегмента (S) трубопровода, загружаемого твердым материалом и как следствие снижению плотности формируемой гидросмеси.

На размеры зоны пульпообразования ( $S_{\theta}$ ) и величину плотности формируемой гидросмеси ( $\rho_{e}$ ) оказывают влияние как параметры трубопроводов (патрубков) и твердых частиц, так и скорость напорного потока.

Для ее оценки в работе [35,55,71] приведена приближенная модель движения частицы при гравитационной разгрузке. При этом уравнение гидродинамики твердой частицы в потоке жидкости имеет вид:

(2.1)

$$m \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = k_f \cdot c \cdot \frac{\rho_B \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{2} \cdot S + mg$$

где : m — масса твердой частицы  $m = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho_T}{6}$ ; S — площадь поперечного сечения частицы  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ;  $\rho_{s,} \rho_T$ — плотность жидкости и твердой частицы; c — коэффициент сопротивления твердой частицы;  $\vartheta_1, \vartheta_2$  — соответственно скорости потока жидкости и твердых частиц.

Проведенные аналитические исследования по базовому уравнению (2.1) позволили определить время перемещения твердой частицы на определенное расстояние от места ее ввода в напорный трубопровод и в конечном итоге оценить площадь сечения *S* слоя твердого материала, увлекаемого в трубопровод или величину зоны пульпоприготовления (насыщение жидкости твердыми частицами).

На рис. 2.3.6 приведены результаты аналитических исследований значений (X) для трубопровода ( $D_y=0,05 \text{ }$ *м*) при l=B,  $\kappa_f=3$ ; c=0,44;  $\rho_s=1000 \text{ }$ *к* $2/m^3$ ;  $\rho_T=2300 \text{ }$ *к* $2/m^3$ ;  $\gamma=0,43$  и соответственно d=2,5*мм*; 5,0 *мм*; 10,0 *мм*, а также различных скоростях  $W_0$ , значений (X) и (t) при D=0.04*м*; l=D*и* d=0,02*м*.

Из рисунков следует, что расстояние (x) и время перемещения частицы в поток в определяющей степени зависит от скорости жидкости  $\vartheta_1$  и начальной скорости частицы  $W_0$ . Практическое значение имеют скорости жидкости  $\vartheta_1 > \vartheta_{\kappa p}$  (где  $\vartheta_{\kappa p}$  – критическая скорость транспортирования).

При этом максимальная площадь пульпоприготовления в движущемся потоке представляет собой сегмент с параметрами (рис. 2.3.а):

$$S = \frac{1}{2} \cdot \left[ a \cdot \frac{D}{2} - b \cdot \left( \frac{D}{2} - x \right) \right]$$
(2.2)

где a = 
$$\sqrt{b^2 + \frac{16}{3}} \cdot x^2$$
; b = 2 ·  $\sqrt{x \cdot D - x^2}$ 

*D* – диаметр трубопровода.

Из рисунка 2.3.в, показывающего изменение отношения ( $S_a/S$ ) площади пульпоприготовления к площади трубопровода в зависимости от изменения скорости течения жидкости ( $\vartheta_1$ ) при различных ( $W_0$ ) u (d), можно говорить о том, что, увеличивая скорость прохождения жидкости в трубопроводе, уменьшается величина перемещения частицы (x), а также площади пульпоприготовления. Следствием этого является снижение плотности формируемой и транспортируемой гидросмеси.

В устройстве, разработанном компанией «Катуг Incorp» (США) для освоения глубоководных месторождений ЖМК предлагается способ и оборудование, содержащее: камерный аппарат с роторным обменным устройством и

однокамерной установкой шлюзового типа (рис.2.4). Комплекс представленного оборудования осуществляет подъем руды на добывающее судно посредством высоконапорного насоса, размещенного либо на борту судна, либо на полупогружной платформе и роторного устройства, направляющего полезное ископаемое в подъемный трубопровод.



**Рис.2.3.** Гидродинамика гравитационного способа формирования гидросмеси. а) расчетная схема; б) зависимость перемещения твердых частиц в поток жидкости от скорости воды V, скорости опускания твердого U, диаметра частиц d; в) зависимость соотношения площади [58].

Через ротор 3 твердое полезное ископаемое, загруженное в камеру 1 подается в подъемный трубопровод, размещенный под камерой 1, за счет действия гравитационных сил.



**Рис.2.4.** Схема устройства вертикального гидроподъема с аккумулирующим буункером и роторным механизмом (патент США 4.391.468). 1 – загрузочная камера; 2 – сливной патрубок; 3 – роторное устройство.

Применение механического побудителя в виде роторного обменного, шнекового устройства и других механических побудителей для условий разработки железомарганцевых конкреций накладывает определенные ограничения на размеры твердого, что предполагает их предварительную подготовку, т.е. дробление. Помимо этого выход из строя ротора, или его износ, снижают степень надежности работы всей технологической цепи аппаратов при освоении глубоководных месторождений полезных ископаемых. Другим направлением увеличения интенсификации гравитационной разгрузки явились попытки увеличения площади контакта твердого материала с жидкостью и соответственно зоны пульпоприготовления и скорости подачи твердого материала в напорный проходящий поток.

Так, например, была разработана конструкция камерного аппарата с горизонтальной разгрузкой [32,49,60,], в которой основная масса напорного потока жидкости проходит в нижней части камеры непосредственно, а для исключения возможности образования сводов устройство снабжено байпасной трубой. При этом небольшое количество напорной жидкости подается в верхнюю часть загрузочной емкости и, помимо замещения разгружаемого твердого материала, за счет избыточного давления обеспечивает ускоренное его поступление в придонную часть. Процесс пульпоприготовления и разгрузки здесь осуществляется подачей в нижнюю часть камеры напорного потока воды, проходящего по винтообразной пластине к боковому выходному отверстию. Для обеспечения свободного прохождения транспортного потока отверстие подачи жидкости в нижней части защищено козырьком. Таким образом, область пульпоприготовления, в которой на границе раздела фаз под действием гравитации и частично избыточного давления, твердый материал вводится в напорный поток, здесь уже представлена не малым сегментом, а занимает часть камеры, что в свою очередь может способствовать повышению плотности образуемой и транспортируемой гидросмеси.

Однако здесь все также увеличение скорости проходящего через камеру транспортного потока жидкости обуславливает снижение величины плотности формируемой и подаваемой гидросмеси, что особенно существенно для увеличенных расстояний транспортирования и больших глубин при гидроподъеме.

Кроме того, большая площадь контакта твердого материала с проходящим скоростным потоком жидкости резко увеличивает возможность закупорок выходного отверстия в камере. А прохождение напорного потока гидросмеси в нижней части вдоль винтообразной пластины обуславливает повышенный

абразивный износ как ее непосредственно, так и нижней части корпуса камеры. Все это снижает надежность и эффективность такого способа разгрузки в целом [60].

### 2.3. Оценка гидродинамических режимов работы струйного способа формирования гидросмеси

Используя струйный способ подготовки гидросмеси исключается: образование зависаний и сводов в загрузочном аппарате, а также неравномерная подача твердого в напорный трубопровод.

Принципиальные схемы загрузочных аппаратов при восходящем и нисходящим способах показаны на рисунках 2.1.2.а, б, в, г [3, 30,34,42,43,69].

При такой компоновке гидротранспортных аппаратов гидродинамическая разгрузка осуществляется за счет направленного течения потока жидкости, где одна его часть направляется на псевдоожижение (размыв) твердого в аппарате, а вторая часть на вынос псевдоожиженной гидросмеси в напорный трубопровод (рис. 2.1.2.а,б). Данная схема позволяет контролировать плотность гидросмеси за счет изменения расстояния между двумя частями потока l, *m.e.* между торцами патрубков для подачи воды и разгрузки гидросмеси [45].

Разгрузка гидросмеси из загрузочного аппарата в первом и во втором случае осуществляется в спутном потоке (направления двух потоков жидкости совпадают).

При нисходящей разгрузки камерного аппарата часть потока направлена вниз, а значит при таком способе пульпоприготовления гидравлические сопротивления небольшие. Но в нижней части камеры находится небольшое количество твердого материала. В течение разгрузки твердое перемещается в нижнюю часть камеры под действием сил гравитации, однако скорость поступления транспортируемого материала тормозится под действием поступающего потока воды, что приводит к значительным энергетическим затратам и снижению объемной плотности гидросмеси разгружаемой в напорный трубопровод. Схема загрузки рисунок 2.1.2.6 нисходящим потоком была разработана и экспериментально проверена в лабораторных условиях института Днепрогипрошахт и применена в проекте питателя ПСГ-1, который в промышленных условиях не проверялся [37]. Здесь также можно управлять плотностью смеси изменением расстояния между патрубками. Из приведенных схем следует, что формирование гидросмеси осуществляется равномерным подводом твердого по периметру трубопровода. Однако данная схема разгрузки гидросмеси ненадежна из-за частых закупорок разгрузочного патрубка.

В случае разгрузки гидросмеси в нисходящем потоке закупорку разгрузочного патрубка удалось исключить (рис.2.1.2.а). Она исследовалась в ИГД им. Скочинского и в институте «Проектгидромеханизация» с различными горными породами: углем, песком, некоторыми породами и рудами различной плотности и крупности. Формирование гидросмеси отличалось гидродинамической устойчивостью, высокой (до 1:2 по объему) и относительно регулируемой концентрацией твердого в смеси [30]. Этот способ применен в шлюзовом аппарате института Гидропроект с производительностью по твердому ~300 м<sup>3</sup>/ч. при объемной концентрации 1:4,5 ÷ 1:10 и рабочем напоре 1,0 МПа. Впервые был испытан на опытном участке строительства Нурекской ГЭС.

Разгрузка гидросмеси по схеме рисунка 2.1.2.в предусматривает псевдоожижение потоком воды, подаваемым на замещение породы в камере, другая её часть поступает вместе с твердым в напорный трубопровод. Возможно управление расходами и плотностью посредством изменения расстояния *l* между торцами водоводного и разгрузочного патрубков. Очевидно, что минимальная скорость воды должна быть не ниже скорости осаждения частицы в потоке.

Так как процесс пульпоприготовления осуществляется равномерным подводом твердого по всей площади трубопровода за счет работы части потока воды на размыв транспортируемого материала, направленного от крайнего нижнего положения в центр основной массы горной породы, аккумулируемой в камере, то повышается объёмная плотность гидросмеси по сравнению с разгрузкой гидросмеси в восходящем потоке. Немецкая фирма «Klein Schanzlin und Becker AG» (ФРГ), для освоения глубоководных месторождений ЖМК предложила установку гидроподъема, состоящую из нагнетательного и всасывающего насосов , установленных в подъемном ставе труб на определенной глубине, попеременно работающих на одну из камер (2-4 камеры), расположенных в распределительной станции. Всасывающий насос создавал разрежение, за счет чего гидросмесь поступала в одну камеру аккумулируя твёрдое до полного ее заполнения. Для подъема твердого материала на борт судна по второму участку трубопровода в эту камеру подавалась напорная вода, вытесняющая твердое. Для непрерывной работы комплекса камеры работают попеременно.

Известна разновидность струйной разгрузки с расположением патрубков в нише шлюзовой камеры [58] (рис.2.1.2.г) с некоторым снижением плотности гидросмеси ( $p=1170 \kappa c/m^3$ ) в напорном трубопроводе, так как материал поступает в трубопровод только со стороны камеры, противоположная сторона струи, обращенная к стенке, остается незагруженной, что и влияет на особенности псевдоожижения.

Исследования С.А. Коржаева на лабораторной установке позволили выявить основные характеристики формирования гидросмеси восходящим потоком. При диаметре твердых частиц  $d_{cp} = 2,6 \text{ мм}$  максимальные значения объемной плотности  $\rho_{\Pi}=1400 \text{ кc/m}^3$ . При увеличении расстояния между патрубками  $\rho_{\Pi}$  достигала некоторого предельного значения и в дальнейшем не изменялась. Повышение скорости жидкости по опытам [48] позволяло увеличивать значение  $\rho_{\Pi}$ . Для диаметров частиц до 22 мм и при росте скоростей от 0,5 м/с до 2,0 м/с объемная масса гидросмеси снизилась на 8% независимо от расстояния *l/d*. Для мелкозернистого материала с  $d_{cp} = 0,35$  мм. при *l/*d = 1,5 и применении раструба на входе в трубопровод получена консистенция равная 1:3, но при  $d_{cp} = 2,6 \text{ мм}$  значение  $\rho_{\Pi}$  не превышало 1400 кг/м<sup>3</sup>. В опытах В.П.Лахтина, В.Н.Кочеткова при сравнительных испытаниях нескольких способов разгрузки камер на песчано-гравийном материале средняя плотность гидросмеси составила только 1240 кг/м<sup>3</sup> (9 = 2,0 м/с) (рис. 2.1.2.а) [49]. По нашему мнению, прекращение роста плотности гидросмеси при увеличении расстояния между торцами водоводного и разгрузочного патрубков объясняется тем, что присоединяемая к струе масса твердых частиц движется во внешней части слоя смешения *S*<sub>*H*</sub>.

Влияние размеров твердых частиц на взвешивание в потоке известно [11,30,31] и объясняется макроструктурой слоя смешения сред с образованием вихрей. Максимальная концентрация наблюдается там, где динамическое давление за счет поперечных пульсаций скорости компенсируется пульсациями частиц.

Таким образом, использование струи жидкости для формирования гидросмеси (рис.2.1.2.в) не позволяет в достаточной степени интенсифицировать разгрузку из-за ограниченных возможностей управления параметрами слоя смешения сред. При принудительной подаче сформированной смеси в струю созданием, например, увеличенного избыточного давления в камере неизбежно приведет к уменьшению напорного потока воды и будет сопровождаться уменьшением толщины слоя смешения. При этом возможно нарушение устойчивости подачи из-за значительной зависимости её от давления и взаимодействия частиц в камере.

Применение нисходящего потока по схеме рисунка 2.1.2.6 не дает преимуществ по механизму перемешивания. В то же время нам представляется, что движение периферийной части струи у стенок камеры в отличие от схемы с восходящим потоком ухудшает разжижение твердого материала у границы раздела сред и, как следствие, будет сопровождаться снижением производительности по твердому [37].

Анализ гидродинамической обстановки струйного способа формирования гидросмеси показывает, что на выходе из патрубка подачи воды образуется несвободная затопленная [25,90] струя с ядром и слоем смешения (рис.2.5).

В ядре скорость постоянна, а в слое смещения уменьшается до скорости движения поверхности раздела фаз. Для затопленной струи известны параметры:

длина начального участка  $l_{\mu}=8,95r_0$ ; углы границ зоны смешения  $tg\beta_c=0,112$ ;  $tg\beta_{\mu}=0,158$  и расход струи, возрастающий вследствие присоединения массы.

$$Q_s = Q_0 \cdot \left(1 + 0.046 \cdot \frac{l}{r_0} + 0.004 \cdot \frac{l^2}{{r_0}^2}\right)$$
(2.3)

Эти соотношения справедливы для работы свободной затопленной струи. В гидросмеси, имеющей большую плотность, качественная картина не изменится. Согласно [35] при  $n = \rho_T / \rho_B = 1,7$  где  $\rho_T -$  плотность материала в зоне разгрузки) можно уменьшить длину начального участка до  $l_H = 8r_0$  с увеличением углов границ, струи  $tg\beta_c = 0,125$ ;  $tg\beta_{\mu} = 0,175$ .

Периферийная часть струи, поступающая в камеру на пульпоприготовление, будет проходить через кольцевую площадь

$$\frac{S_0}{S_{\rm H}} = 2 \cdot \frac{l}{r_0} \cdot tg\beta_{\rm H} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{r_0} \cdot tg\beta_{\rm H}\right)$$
(2.4)

где  $S_0 = \pi r_0^2$ 

Подача же гидросмеси в разгрузочный патрубок будет осуществляться через слой смешения площадью

$$\frac{S_{\rm H}}{S_0} = 2 \cdot \frac{l}{r_0} \cdot tg\beta c \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{r_0} \cdot tg\beta c\right)$$
(2.5)

При этом скорость в слое смешения определяется как

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_0} = 2 \cdot \left(\frac{y_2 - y}{\delta}\right)^{3/2} - \left(\frac{y_2 - y}{\delta}\right)^3$$
(2.6)

где :  $\delta = y_1 + y_2$  ширина слоя смешения.



**Рис. 2.5.** Гидродинамика струйного способа формирования гидросмеси: a)- расчетная схема; б)- соотношения объёмных расходов жидкости в различных зонах действия потока.

Дальнейшее решение этой задачи, приведенное в работе [60], сводится к определению соотношения объемных расходов, представленных на рисунке 2.5.

Тогда

$$\frac{Q_{\rm c}}{Q_{\rm H}} = 0,222 \cdot \left(\frac{l}{r_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_0}{l} - 0,066\right)$$

Расход жидкости в ядре струи, проходящем через относительную площадь

$$\frac{S_{\pi}}{S_0} = \left(1 - \frac{l}{r_0} \cdot tg\beta c\right)^2$$
(2.8)

(2.7)

(2.9)

составит

$$\frac{Q_{\rm R}}{Q_0} = \left(1 - 0.125 \cdot \frac{l}{r_0}\right)^2$$

На рисунке 2.5 приведены значения относительных расходов  $Q_c$ ,  $Q_{H}$  и  $Q_{\pi}$  начального участка струи. При этом из графиков следует, что в целом расход струи

 $(Q_{E\Pi} = Q_H + Q_C + Q_R)$  превышает вычисленный по формуле (2.3) для условий свободной затопленной струи. Начиная с соотношения  $l/d \ge 2$  расход  $Q_H$  увеличивается быстрее, чем  $Q_C$  из-за более интенсивного присоединения пульпы к струе во внешней зоне, что соответственно вызовет поступление в напорный трубопровод гидросмеси меньшей плотности. Таким образом, расположение торцевых отверстий патрубков подачи напорной жидкости и восходящей разгрузки двухфазной смеси (гидросмеси) в камере на расстоянии l > 2d нецелесообразно.

Результатами различных исследований [3,13] было установлено, что плотность формируемой подобным образом гидросмеси зависит также и от соотношения  $\rho_m/\rho_e$ . В частности при  $\rho_m/\rho_e \approx 1,7$  объем присоединенной массы увеличивается примерно на 40% ( $Q_{ET}/Q_0=1,4$ ),что определяет предельные возможности такого способа пульпоприготовления и разгрузки. Это обусловлено тем, что ограниченные возможности управления параметрами слоя смешения сред не позволяют в достаточной степени интенсифицировать пульпоприготовление и разгрузку [74].

#### 2.4. Оценка гидродинамических условий фильтрационной разгрузки

На рисунке 2.1.3.а. и рисунке 2.1.3.б. показаны принципиальные схемы загрузочных аппаратов с фильтрационной разгрузкой гидросмеси с ее модификацией (телескопическим всасом и ограждающей трубой).

Гидродинамическая схема разгрузки с подачей жидкости через горную массу изучалась на гравийно-песчаном материале крупностью - 20 + 2,5 мм с содержанием 78,5% и фракций < 2,5 мм - 21,5% [75]. Как видно из графиков наиболее высокую плотность гидросмеси обеспечивают схемы на рисунке 2.6.а и 2.6.б. При способе разгрузки на рис.2.1.3.а жидкость фильтруется через твердые частицы пород ко дну камеры, в результате формируется гидросмесь, которая поступает в трубопровод. В опытах при скорости 9= 2,0 м/с достигнута средняя плотность гидросмеси, равная 1270 кг/м<sup>3</sup>. При уменьшении значений 9 удельный объем смеси возрастал; по мере повышения скорости во всасывающем

патрубке увеличивается продолжительность заключительной стадии операции, что и приводит к снижению плотности гидросмеси (график рис.2.6.д) [35,75].

Более совершенная схема такой разгрузки приведена также в работе [54,60] и показана на рис 2.1.3.6. В основу её положен принцип работы всаса землесоса в зумпфе. За счет использования ограждающей трубы рабочая камера делится на центральную и периферийную зоны, сообщающиеся в верхней и нижней частях. В верхнюю полость подается вода, которая фильтруется через горную массу к всасывающему трубопроводу. В центральной зоне, имеющей меньшее гидравлическое сопротивление, твердый материал вырабатывается в начальной стадии загрузки, а затем в нижнюю часть камеры опускается горная масса из периферийной зоны. Таким образом, фильтрационная загрузка сменяется всасыванием с открытой поверхности, то есть в установке осуществлена двухстадийная разгрузка.

Исследования на лабораторной установке с камерой  $D_K = 500$  мм при диаметрах ограждающей трубы D = 200, 120 мм, а всасывающей - 50 мм, показали, что повышенная плотность гидросмеси обеспечивается при меньшем значении D. Как и следовало ожидать, опускание всасывающей трубы на расстояние от 0 до 200 мм сопровождалось увеличением значений плотности песчано-гравийной гидросмеси до 1400 кг/м<sup>3</sup> (рис. 2.6.е). Однако, при разгрузке полидисперсного материала с мелкодисперсными частицами неизбежна сепарация частиц по поверхности равных скоростей с вымыванием более мелких и кольматация ими пор твердого материала. В этом случае повышается вероятность образования сводов у входного отверстия, и операция разгрузки характеризуется повышенной удельной энергоемкостью устройства.

Рассматривая гидродинамику этого способа необходимо учитывать, что движение горной массы в камере фильтрационного загрузочного аппарата имеет непостоянный характер, движение имеет неустойчивый режим, возникают различнонаправленные силы: гравитации, архимедова сила, сила трения, гидравлические сопротивления фильтрационного потока.



**Рис.2.6.** Зависимости плотности песчано-гравийной гидросмеси, формируемой различными узлами разгрузки камерных питателей, от скорости в пульповоде.

а) гравитационный; б) струйный с восходящей разгрузкой; в) струйный с восходящей разгрузкой в нише камеры; г) с закрученным потоком жидкости у плоского дна камеры; д) с фильтрационной разгрузкой;, е) с фильтрационной разгрузкой, ограждающей трубой и телескопическим всасом [35,58]. Условия движения имеют вид

$$\sum F = G - F_{\rm ap} - F_{\rm pp} - F_{\rm pp} > 0$$

Равнодействующая гравитационной и архимедовой силы

$$G - P_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot (\rho_{\mathrm{T}} - \rho_0) \cdot (1 - m)$$
(2.11)

(2.10)

где *D* – диаметр камеры, м;

*H* – высота слоя горной массы, м;

 $\rho_m$ ,  $\rho_0$  – соответственно объемная плотность твердого в целике и воды, кг/м<sup>3</sup>; m – порозность горной массы  $m=1-\rho_{H}/\rho_{m}$ ;

 $\rho_{\rm H}$  – объемная плотность горной массы в насыпном состоянии.

Сила трения при движении горной массы в камере рекомендуется определять по расчету бокового давления в бункере:

(2.12)  
$$T = \frac{\pi}{2} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot K \cdot D \cdot H^2 \cdot (\rho_{\rm T} - \rho_0) \cdot (1 - m)$$

где f – коэффициент трения между горной массой и стенками бункера;

*є*, *К* – коэффициенты соответственно зависания и бокового давления.

Приняв за основу уравнение Лева для слоя из частиц произвольной формы при любом режиме фильтрации можно определить силу гидравлического сопротивления встречного фильтрационного потока движущемуся слою горной массы.

$$P_{\phi} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot \rho_0 \cdot Q_{\mathrm{T}}^2 \cdot \mathrm{H}}{d_{\mathfrak{I}} \cdot \pi \cdot D^2} \cdot \left[\frac{(1-m)^{3-n}}{m^3} \cdot \varphi^{3-n}\right]$$
(2.13)

где  $\lambda = f(Re)$  – коэффициент сопротивления;

 $Q_T$  – производительность по твердому, м<sup>3</sup>/с;

n=f(Re) – показатель степени;

 $\varphi$  – коэффициент формы частиц;

 $d_{9}$  – диаметр шара эквивалентный частице по объему, м;

g – гравитационное ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Проведенные аналитические расчеты показали, что наибольшее влияние на движение горной массы в камере загрузочного аппарата имеют две противоположно направленные силы: гравитационные и гидравлического сопротивления вихревого фильтрационного потока. При этом режим работы ограничивается объемной плотностью и размерами твердых частиц: 1мм-для породы, 2мм-для угля с минимальным расходом 50м<sup>3</sup>/ч [63].

## 2.5. Загрузочные аппараты с использованием закрученных потоков жидкости

Закрученные потоки, известные в атмосферных явлениях (циклоны, смерчи, торнадо), часто используются в технике для интенсификации процессов тепло и массообмена в энергетических установках, в вихревых МГД – генераторах, для регулирования тяги ракетных двигателей, в котельных установках и во многих других агрегатах. Так, в технических устройствах с горением известны преимущества закрученного факела перед прямоточным – интенсивная турбулизация, интенсификация процессов смешения, повышение эжекционной способности, наличие зон рециркуляции, способствующих увеличению массообмена. Исследования по аэродинамике показали, что закрутка потока является интенсивным средством воздействия на рабочий процесс в целом вследствие влияния центробежных сил вращения на пульсационное движение [27,37,39,49,54].

Закрученные течения жидкости также наблюдаются в природе (океанические вихри, водовороты и вихревые воронки при обтекании створов плотин и всасывании жидкости земснарядом) и используются в технологиях и

оборудовании (гидроциклоны, классификаторы, флотационные машины, распылители, водосбросы, теплообменники и др.) [28,38,49]. Известны попытки использования закрученного потока в гидротранспортных установках: в камерном питателе [24,58,63], в трубопроводах [30,43], во всасывающем насадке земснаряда [83].

На рисунке 2.1.4.а показана схема формирования гидросмеси за счет закручивания у плоского дна камеры потока несущей жидкости. Вращательным движением жидкости достигалось быстрое удаление остатков породы из камеры. Однако объемная масса смеси уменьшалась при увеличении скорости жидкости  $\vartheta$ и по результатам лабораторных исследований [63] составила 1300 кг/м<sup>3</sup> при  $\vartheta$ = 2,0 м/c (рис. 2.6.г). По нашему мнению, при этом способе в момент начальной закрутки *M* на вращение гидросмеси в камере происходят потери энергии:

$$(2.14)$$

$$M = O_0 \cdot \mathcal{P}_0 \cdot \mathcal{P}_{\rm fix} \cdot R_{\kappa}$$

где  $Q_0$  – объемный расход воды, м<sup>3</sup>/ч;

*R*<sub>*K*</sub> – радиус начальной закрутки, м;

 $\vartheta_{sx}$  – скорость потока жидкости на входе [63], м/ч.

Как следствие, снижается окружная скорость и торцевые перетечки к оси, обеспечивающие перемещение гидросмеси в трубопровод. Кроме того, вследствие одного входного патрубка ось закрученного потока будет смещаться от оси камеры с неравномерным распределением жидкости по сечению трубопровода.

Исследователями предложен камерный загрузочный питатель, в котором на торце подвижной трубы установлена полая коническая насадка с тангенциально расположенными на конической поверхности щелями, предусматривающие ввод жидкости по касательной и вращение смеси. Однако, по нашему мнению, распыливание жидкости из плоских щелей, несмотря на смешение сред с образованием вихрей, вызывает значительные повышенные потери энергии по сравнению с рассмотренными устройствами разгрузки. Имеются сведения о применении закрутки потока для подъема твердых частиц и поддержании их во взвешенном состоянии при подаче гидросмеси по трубопроводу. Это позволяет транспортировать твердый материал при меньшей осевой скорости. Согласно экспериментальным данным [49] закруткой с помощью винтовых гребней и пластин, устанавливаемых под углом к оси трубопровода, достигается снижение износа труб, вследствие подъема твердых частиц из нижней части горизонтального трубопровода в центральную зону, а также уменьшается расход удельной энергии на транспортировку гидросмеси.

Как развитие способа такой разгрузки можно рассматривать устройство согласно патенту ФРГ, показанное на рисунке 2.1.4.б. Жидкость, поступающая через тангенциальный патрубок 1, движется к оси камеры вдоль сужающегося вниз конуса 2 и винтовой перегородки 3 к выходному патрубку 4, расположенному хордально у дна конуса. Для загрузки породы в вихревую камеру предусмотрена кольцевая щель 6 между шпилем 5 и коническим дном 7. Таким образом, с, помощью днища 7 образована камера закручивания, сужающаяся книзу. Уменьшение её длины и отделение от основной массы породы позволяет повысить окружную скорость в направлении к оси, достигнуть понижения статического давления вокруг шпиля и осуществить устойчивую подачу твердых частиц через кольцевую щель. Применение винтовой перегородки и конической стенки расширяет рабочий диапазон скоростей жидкости. Поскольку направление движения потока обусловлено действием на него центробежной  $m \cdot 9^2/R$  и гравитационной  $m_g$  сил, то угол наклона вектора скорости к плоскости поперечного сечения равен:

$$\alpha = \arctan \frac{g \cdot R}{W^2}$$

(2.15)

и зависит от радиуса камеры и скорости вращения *W*, которая на радиусе начальной закрутки равна  $U_0$ . Для различных размеров камеры R = 0,5÷1,0 м и  $U_0$ =1,0÷2,0 м/с получим  $2a = 50-84^\circ$ . Увеличение скорости до 3÷4 м/с позволяет уменьшить угол до 17÷28°, снять перегородку, но это приведет к росту

энергозатрат. Снижение значений *а* по мере приближения потока ко дну обеспечивается также уменьшением радиуса потока за счет конической стенки, устройств естественный недостаток таких формирования гидросмеси заключается в неизбежном износе корпуса и днища аппаратов вследствие эрозии твердыми частицами. Повышение окружной скорости приведет к сепарации твердых частиц на конусе. Тем самым ограничена применимость устройства по гранулометрическому составу породы. С точки зрения гидродинамического качества схему формирования гидросмеси закрученными потоками следует считать перспективной для практического осуществления при удовлетворительном решении задачи обеспечения износостойкости дна и конуса.

Анализируя все конструктивные и гидродинамические особенности основных типов загрузочных аппаратов, приведенных нами в систематизации (рис.2.1), а также в работе [18], результаты сравнительных испытаний, выполненных в одинаковых лабораторных условиях для пяти типов разгрузочных устройств загрузочных аппаратов: гравитационного, струйного с восходящей разгрузкой в камере и в нише, фильтрационного, с применением закрученного потока у плоского дна камеры необходимо отметить следующее.

Несмотря на множество разнообразий конструкций они, по нашему мнению, не пригодны для глубоководного подъема по двум причинам: технологическим и конструктивным. Процесс пульпоприготовления, разгрузки гидросмеси в спутном и особенно при гравитационной разгрузки в трубопровод не позволяет регулировать ее в значимых пределах.

Гидродинамическое несовершенство большинства из них приводит к зависанию твердого, сводообразованию, неравномерности подачи, большой энергоемкости (особенно при закрутке потока у плоского 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 [39,47,92].

#### Выводы по главе 2

- Проведен анализ различных способов глубоководного гидроподъема на основе проведенной систематизации и сделан вывод о целесообразности применения загрузочных аппаратов.
- Предложена систематизация различных конструкций загрузочных аппаратов по способам гидродинамического формирования гидросмеси и ее разгрузки в пульповод.
- 3. Выявлено, 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.
- 4. Установлено:

- в загрузочных аппаратах гравитационного типа формирование гидросмеси (пульпоприготовление) происходит на поверхности раздела фаз с образованием спутного движения пульпы, что приводит к образованию сводов у границы раздела фаз и пульсирующей (неравномерной) подаче твердого материала, направляемого в напорный трубопровод;

- для **струйного** способа формирования гидросмеси при нисходящем и восходящем способах разгрузки интенсификация массообмена ограничена

возможностью управления параметрами слоя смешения сред, что не позволяет в достаточной степени интенсифицировать пульпоприготовление и разгрузку;

- в камере фильтрационного загрузочного аппарата движение гидросмеси имеет неустойчивый режим, возникают различно направленные силы: гравитации, архимедова сила, сила трения, гидравлические сопротивления фильтрационного потока, при этом режим работы ограничивается объемной плотностью и размерами твердых частиц: 1мм-для породы, 2мм-для угля с минимальным расходом 50м<sup>3</sup>/ч.

## ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОНАСЫЩЕННОЙ ГИДРОСМЕСИ КОАКСИАЛЬНО-ЗАКРУЧЕННЫМИ СТРУЯМИ

# 3.1. Принцип работы и анализ результатов экспериментальных исследований загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления

Поле центробежных ускорений, свойственное закрученному потоку, относительно простые схемы управления окружной и радиальной скоростями, временем пребывания и смешением ингредиентов в потоке выгодно отличают аппараты с такими течениями от прямоточных [10].

Известно также, что уровень локальных скоростей (пульсаций) в закрученных потоках превышает наблюдаемый в струях и трубопроводах. Это свойство и используется с целью интенсификации перемешивания сред.

Недостаточное применение кинетической энергии закрученных потоков в гидротранспортных установках объясняется ограниченной научно-технической информацией по гидродинамике двухфазных закрученных течений, отсутствием научно-методического обеспечения технологических и конструктивных параметров таких аппаратов.

В то же время представляет интерес точка зрения американских специалистов, высказанная в работе [28], что «несмотря на отсутствие полного понимания того, почему наличие крутки так сильно интенсифицирует некоторые процессы, в технических устройствах широко используются криволинейные линии тока, закрутка и вихреобразование».

В отличие от прямоточного струйного течения, характеризующегося двумя составляющими скоростями – радиальной и аксиальной, частицы жидкости в закрученном потоке движутся по спиральным траекториям и имеют три компоненты скоростей: радиальную *9*, аксиальную *U* и тангенциальную *W*. Вид спиралевидной траектории зависит от распределения скоростей в потоке. Если частица имеет окружную и радиальную скорость, то спирали плоские; окружную

и осевую – цилиндрические; окружную, радиальную и осевую – конические. В прямоточных течениях значения *Э* значительно меньше *U*, 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.

В отличие от прямоточного струйного течения закрученная струя имеет больший угол раскрытия, чем прямоточная, ввиду наличия центробежных сил, но максимум осевой скорости находится на оси струи, как и в прямоточной. При истечении струи в неподвижную среду того же состава первоначальная закрутка способствует более интенсивному расширению струи и быстрому затуханию избыточной скорости и других параметров. При значительной закрутке профиль аксиальной скорости имеет прогиб в осевой части, с увеличением расстояния максимум скорости смещается к центру, и он принимает вид свободной затопленной струи.

В сильно закрученных струях в приосевой области образуется течение, направленное противоположно основному движению – зона обратных токов, границей которой является поверхность с аксиальной скоростью, равной нулю. Для получения закрученных струй применяют ряд способов: тангенциальный подвод жидкости к трубопроводу через один и несколько каналов, улиточный завихритель; лопаточный с расположением лопаток касательно к условной цилиндрической поверхности, аксиально-лопаточный и шнековый завихрители.

Формирование кольцевого закрученного потока воды возможно и при установке аксиально-лопаточного завихрителя устанавливаемого в нижней части кольцевого зазора. В совокупности камера закручивания и соосно смонтированный водяной (внешний) и внутренний (пульповодный) патрубки конструктивно составляют разгрузочное устройство.

Физическую модель закрученного течения некоторые специалисты предлагает рассматривать в виде вихревых нитей, генерируемых в свободном слое смешения по механизму неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (рис.3.1), обусловленной разностью скорости [50], которая заключается в

76

неоднородности по вертикали плотностей потока на границе их раздела. При этом существует перепад скорости, т.е. течение жидкости рассматривается как ряд слоев, движущихся друг относительно друга с разной скоростью.



Рис.3.1. Неустойчивость потока по Кельвину-Гельмгольца.

Механизм турбулизации возникает вначале из-за неустойчивости, связанной с разрушением потока около твердых стенок, которые затем передают эти возмущения из слоя в слой.

Возмущение возникает в критическом слое, где скорость течения равна фазовой скорости. Но для дальнейшего роста, импульс должен передаваться от стенки в критический слой (напряжениями Рейнольдса). Очень малое значение вязкости может являться дестабилизирующим фактором: более сильный её эффект может привести к затуханию возмущений, что и является обоснованием критического числа Рейнольдса –  $Re_{\kappa p}$ .

На рисунке 3.2 представлена схема формирования закрученного потока по механизму неустойчивости по *Кельвину-Гельмгольца*; точка *а* характеризует начало смешивания потоков, в ней, как полагают, происходит скачок скоростей потоков разного происхождения: входящего в устройство закрутки со скоростью  $W_{ex}$  и стекающий со стенки трубопровода после поворота на 360° со скоростью W [60].



**Рис.3.2.** Влияние закрутки потока воды на поле скорости при формировании закрученного потока в коаксиальных патрубках.

Последняя определяется из равенства моментов количества движения жидкости на входе и радиусе начальной закрутки по уравнению:

$$W = W_{\rm BX} \cdot \frac{R_{\rm BX}}{r} \tag{3.1}$$

где *W* – текущее значение тангенциальной скорости;

R<sub>вх</sub>, r – соответственно начальный радиус закрутки и текущее значение радиуса.
В итоге, вихревые нити, образованные в слое смешения определяют макроструктуру потока, его эффективную вязкость и диссипацию энергии.

Многие исследователи [8,28] характеризуют интенсивность закрутки параметром закрутки S.

Например, в случае, когда поток закручен как целое на выходе из сопла, т.е. профиль осевой скорости считается равномерным, а скорость закрутки W возрастает от 0 (при r = 0) до (при r = d/2 параметр закрутки S в работе [50,74,75] определяется по уравнению:

(3.2)

$$S = \frac{0.5 \cdot G}{1 - 0.5 \cdot G}$$

где  $G=W_{m0}/U_{m0}$  – отношение максимальных значений тангенциальной  $W_{m0}$  и аксиальной  $U_{m0}$  скоростей в выходном сечении.

При малой интенсивности закрутки градиент давления, направленный против скорости основного потока, недостаточен для появления осевых обратных токов, как это показано на рисунке 3.3.а [8].

При очень высоком *S>0,6* возникают значительные градиенты давления в радиальном и осевом направлениях вблизи выходного сечения сопла, что способствует появлению осевой рециркуляции в форме центральной тороидальной рециркуляционной зоны, образованию более широкой струи с меньшей скоростью, чем в случае незакрученной струи (рис.3.3.б).



*Рис. 3.3.* Влияние закрутки потока воды на поле скоростей. а) слабо закрученная струя; б) сильно закрученная струя.

Сотрудниками Московского геологоразведочного института имени Серго Орджоникидзе в 90<sup>x</sup>-годах был разработан и апробирован в натурных условиях способ и устройство формирования и подачи высоконасыщенных гидросмесей на дальние расстояния, новизна которых подтверждена патентами РФ, США, Финляндии, Индии, Австрии и других стран [76-82].

Особенность данного способа заключается в том, что рабочим агентом для образования и транспортирования высоконасыщенной гидросмеси является коаксиально закрученный поток воды, формируемый в специальной камере [26,43] за счет соосного расположения внутреннего (разгрузочного) патрубка и внешнего (водяного), к которому тангенциально подводится напорная вода от насоса (рис. 2.1.5). Коаксиально-закрученные струи при выходе из кольцевого зазора генерируют крупномасштабные вихри (эффект искусственного смерча). Их взаимодействие с твердыми частицами имеет некоторую аналогию вихревой воронкой над донным отверстием при всасывании жидкости земснарядами И представляет пример стационарного ассиметричного пограничного слоя для описания которых могут быть применимы закономерности, выявленные [45] при квазитвердом вращении [46].

Работа загрузочно-камерного аппарата с формированием и подачей высоконасыщенной гидросмеси коаксиальными закрученными струями заключается в двух операциях (циклах):

- загрузочно-обменные ёмкости поочередно загружаются твердым сыпучим материалом или гидросмесью (цикл загрузки);

 напорный поток воды от насоса подается в узел разгрузки, в котором формируется закрученная струя, взаимодействующая с твердым материалом загруженной ёмкости (цикл разгрузки).

Загрузочно-обменные емкости могут иметь различные формы (цилиндр, сфера, тор). При этом узел загрузки смонтирован в верхней части загрузочно-обменной ёмкости с коаксиальным расположением патрубков слива жидкости и загрузки твердым [43]. Конструктивно узел формирования высоконасыщенной гидросмеси может быть расположен в нижней части посередине между двух камер торообразной формы. Патрубки для подачи напорной воды [45] и разгрузки гидросмеси располагаются коаксиально.

Вертикальные загрузочно-обменные ёмкости торообразной формы обеспечивают рациональное повышение прочностных свойств оболочки при минимальном увеличении их металлоёмкости, а также совмещение и симметричное расположение отверстий, необходимых для подвода рабочих коммуникаций: патрубков - загрузки и слива вытесняемой воды, подачи напорной воды и разгрузки гидросмеси (рис.3.4).



Рис. 3.4. 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 пульпопровод.

Это позволяет: во-первых, уменьшить зоны концентрации напряжений и обеспечить более равномерное их распределение; во-вторых, улучшить условия работы загрузочного узла путем перераспределения потока в двух отделениях ёмкости и независимого соединения при двухстороннем подводе к устью трубопровода восходящей разгрузки; в третьих, способствует повышению стабильности консистенции разгружаемой гидросмеси и создает её

максимальное насыщение твердым благодаря возможности регулирования угла встречи напорного потока воды и твердого материала при подходе к устью разгрузочного трубопровода.

Использование загрузочно-обменных ёмкостей большого объёма позволяет увеличить время рабочего цикла и уменьшить влияние переходных режимов (окончание разгрузки, переключение, начало разгрузки), что стабилизирует работу установки и качество формируемой гидросмеси по плотности и грансоставу.

Кроме того, повышаются эксплуатационные характеристики за счет уменьшения частоты воздействия переменных напряжений (атмосферное давление при загрузке, рабочее давление при разгрузке), способствующих образованию трещин усталости и последующему разрушению ёмкостей.

Надежность работы установки повышается в результате исключения контакта твердого материала с движущимися и проточными частями напорных агрегатов, обуславливающих их абразивный износ, использование для нагнетания вместо низконапорных грунтовых насосов, значительно более мощных, работающих на воде [17]. Непрерывность процесса гидротранспортирования можно обеспечить за счет использования большего количества аппаратов.

Значительные напорные характеристики камер, обеспечивающие возможность рационально повысить их объем, в совокупности с совмещенным и симметричным расположением входных и выходных отверстий увеличивают дальность транспортирования за счет применения высоконапорного насоса для воды.

В таблице 3.1 представлены результаты опытных и опытно-промышленных испытаний нескольких конструктивных вариантов аппарата в различных горнотехнических условиях при гидротранспортировании твердых полезных ископаемых [35].

Результаты опытных и опытно-промышленных работ, представленные в таблице 3.1, показали высокие значения.

82

	Предприятие, год испытаний.						
11	Иршинский ГОК		Верхне-Днепровский ГМК			Южморгеология; прииск	
наименование						Отрожный	
	Nº 1	Nº 2	N <u>∘</u> 3	<b>№</b> 4	<b>№</b> 5	<b>№</b> 6	№ 7
1. Назначение, транспортируемый материал	гидротранспор т концентрата	гидротранспорт концентрата	гидротранс порт хвостов обогащения	гидротранс порт редкометал ьных песков	гидротранспо рт редкометальн ых песков	гидроподъем железомарган ц. конкреций.	эфелеуборка промприбора ПГБ
2.Тип насоса	II Гр (поршневой)	ЦНС-180/340	ЦНС- 104/490	ЦНС- 380/420	ЦНС-380/420	НБ-32 (2 шт.)	12 НДС
Напор, МПа,	5,0	3,4	4,9	4,2	4,2	2,0	0,2
Расход воды м <sup>3</sup> /ч	25,0	180	105	380	380	25	
3.Давление в емкости, МПа	до 2,5	до 3,5	до 3,0	до 3,0	до 1,2	до 1,5	0,18
4.Форма рабочих емкостей	торообразная	торообразная	торообразн ая	торообразн ая	цилиндр ическая	торообразная	цилинд рическая
5.Количество и диаметр емкости, мм)	2 x 1020	2 x 1420	2 x 1420	2 x 1420	I x 1546	600	I x 2200
6.Высота емкости, м	3,9; 4,4	5,6	6,1	6,1	2,3	2,0	3,0
7.Объем, м <sup>3</sup>	7,0; 7,5	17,5	19,5	19,5	2,4	1Д4	10,0
8.Диаметр трубопровода, мм.	80	102, 133, 159	133	159, 219	133	76	100
9.Длина трубопровода, м	37	70, 30, 45 (кольцо)	400 (кольцо)	2500	400 (кольцо)	30	45
10Максимальная объемная консистенция Т:Ж	1:1,4 (весовая)	1:1,5(весовая)	1:2 (объемная)	1:1,25 (объемная)	1:2,8 (объемная)	1: 1,8	1:3(объемная)

Технические данные гидротранспортных установок, прошедших испытания на предприятиях [49].

Так. гидротранспортировании ильменитового концентрата при на Иршинском ГОКе объемная плотность которого составляла  $\rho_{\Gamma} = 3600 - 3800 \ \kappa r/m^3$ в диапазоне скоростей от 2,8 до 7,0 м/с (значения плотности гидросмеси в зависимости от параметров узлов разгрузки изменялись от 1265 - 1300 кг/м<sup>3</sup> до 1248 - 1275 кг/м<sup>3</sup>) (рис.3.5). В среднем по 14 циклам разгрузки изменение величин плотности составило менее 2%. На аналогичных устройствах, испытанных гидротранспортировании редкометальных при песков на Верхнеднепровском ГМК  $\rho_{\Gamma}$  =2500-2700 кг/м<sup>3</sup> в интервале скоростей 2,0-5,3 м/с, средняя плотность гидросмеси по 26 циклам разгрузки изменялась в пределах 1315 - 1290  $\kappa r/M^3$  (рис.3.5) [33,35,94].



**Рис.3.5.** Формирование и разгрузка гидросмеси ильменитового концентрата ( $\rho_{\Gamma}$ =3600-3800 кг/м) в зависимости от параметров узлов разгрузки.

Серия морских испытаний загрузочного аппарата, с использованием [42] кинетической энергии коаксиально закрученных струй напорной воды проведенных сотрудниками МГРИ, подтвердили способность формирования и транспортирования по вертикальному трубопроводу стабильной подачи

высоконасыщенной гидросмеси, величина которой зависит от конструктивных параметров и расхода (скорости) подаваемой воды (рис.3.6).



**Рис.3.6.** Формирование и разгрузка гидросмеси в аппаратах с  $\rho_{\Gamma} = 2500$ -2700 кг/м<sup>3</sup>.

Морские испытания загрузочных аппаратов с камерами в форме тора (рис.3.4) были проведены в 2000-х годах в акватории Черного моря (г. Новороссийск) сотрудниками МГРИ-РГГРУ ЦКБ совместно с «Океангеотенхника» [18,46,62] Черноморской опытно-методической И работоспособность экспедиции также подтвердили И эффективность конструкций Для предложенных загрузочного аппарата. проведения эксперимента были использованы железомарганцевые конкреции, собранные экспедициями «Южморгеологии» в центральной части Тихого океана.

Испытательный комплекс системы гидроподъема размещался на борту научно-исследовательского судна «Полигон» (рис. 3.7) и включал две загрузочно-обменные емкости (камеры), два водяных насоса НБ-32, трубопроводные коммуникации с запорной арматурой, измерительный участок с расходомером, плотномером и перепадомером [42].



Рис. 3.7. Морские испытания загрузочных аппаратов с использованием энергии закрученных струй на НИС «Полигон» в акватории Черного моря (г. Новороссийск):

а — палубная загрузочно-обменная емкость торообразной формы; б донная загрузочно-обменная емкость.

Технологическая схема морских испытаний заключалась в загрузке одной из емкостей железомарганцевыми конкрециями и напорной подаче гидросмеси по замкнутой схеме: палубная емкость – пульпопровод – подводная емкость – и обратно по замкнутому циклу [42].

Таким образом, осуществлялся непрерывный процесс гидроподъема с глубины до 100 м. Диаметр фрагментов конкреций составлял от 5 до 25 мм. Средние значения плотности транспортируемой гидросмеси изменялись от 1260 до 1396 кг/м<sup>3</sup> (консистенция по весу 38-65 %).

В зависимости от конструктивных параметров аппаратов производительность по твердому изменялась [42] от 7,2 т/ч до 25 т/ч.

При гидроподъеме из глубины 100 м (ЖМК с плотностью  $\rho_T = 2000 \text{ кг/м}^3$ ) и увеличении скорости потока жидкости от 0,70 до 1,72 м/с массовая консистенция гидросмеси изменилась от 66,7% до 51,8% (рис.3.8). При рабочих скоростях гидротранспортирования 2,3-3,2 м/с на расстояние 2500 м наблюдались стабильные показатели плотности гидросмеси, равные в среднем по 22 циклам разгрузки 1325-1340 кг/м<sup>3</sup>. При снижении скорости до 1,7 м/с, значения увеличивались до 1400-1425 кг/м<sup>3</sup> [42].

Результаты морских испытаний позволили установить, что коаксиально закрученные струи значительно повышают эффективность гидроподъема и гидротранспортирования различных видов минерального сырья за счет применения загрузочных аппаратов: с формированием высоконасыщенной гидросмеси коаксиально-закрученными жидкостными струями. Основными технологическими показателями при этом являются:

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

– увеличение 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 движителем 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 (пульпопровода);

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

Исследования гидродинамических условий формирования и подачи высоконасыщенных гидросмесей закрученными коаксиальными струями в лабораторных, опытных наземных и морских условиях, проводимые разными специалистами, в том числе и автором, установили закономерные особенности гидродинамики процесса. Так, на рис. 3,8, 3.9, 3.10, 3.11 представлены характерные кривые разгрузки камер загрузочного аппарата, из которых видно, что величина плотности (концентрации) гидросмеси, несмотря на различную вещественную характеристику исходного материала, остается постоянной практически на протяжении всего цикла разгрузки (в зоне псевдоожижения) и затем за счет изменения скорости параметров происходит разгрузка во внутренний пульповод.

Было установлено, что устойчивая зона пульпообразования с относительно стабильной величиной плотности гидросмеси сохраняется до 75% объема загружаемого твердого материала (рис. 3.8).

Стабильность подачи высоконасыщенной гидросмеси, заключающаяся в равномерности ее при разгрузке с более постоянной плотностью, достигается за счет улучшения гидродинамической обстановки при взаимодействии крупномасштабных вихрей, генерируемых коаксиально закрученными струями воды (эффекта искусственного смерча) с твердыми частицами, поступающими равномерно в зону псевдоожижения (пульпоприготовления).

Она составляет некоторый локальный объем, в пределах которого происходит непрерывное перемешивание без выноса ядра постоянного объема псевдоожиженных фракций твердого материала.



**Рис.3.8.** Результаты швартовых и полигонных испытаний морского опытного комплекса в акватории Черного моря (г.Новороссийск) при подъеме ЖМК из глубины до 100 м.



**Рис.3.9.** Характерные зависимости плотности гидросмеси от времени разгрузки рабочей емкости при опытных испытаниях эфелеуборочной установки на прииске "Отрожный» (Чукотка).



**Рис.3.10.** Характерное изменение величины плотности гидросмеси ( $\rho_{\Gamma}$ ) на протяжении цикла разгрузки камеры аппарата [63].



**Рис.3.11.** Изменение величины консистенции гидросмеси (S) в зависимости от скорости потока жидкости в кольцевом зазоре узла разгрузки (11кз) при различных расходах воды [63]: 1 - 0,36 м<sup>3</sup>/ч; 2 - 0,54 м<sup>3</sup>/ч; 3 - 0,72 м<sup>3</sup>/ч; 4 -1,08 м<sup>3</sup>/ч; 5-1,44 м<sup>3</sup>/ч.

Размещением в этой зоне входного отверстия патрубка разгрузки гидросмеси на выходе из камеры аппарата достигается более насыщенная твердыми частицами гидросмесь, регулируемая по объемной плотности.

Такая гидродинамическая обстановка дает возможность регулирования величины объемной концентрации (плотности) в процессе цикла разгрузки гидросмеси в транспортный трубопровод (пульповод). Это создает условия регулирования и поддержания объемной плотности, разгружаемой гидросмеси более постоянной в течение всего технологического цикла.

### 3.2. Гидродинамическая обстановка процесса псевдоожижения с одновременным вытеснением твердых частиц жидкостью в поле действия гравитационно-центробежных сил

Гидродинамическая обстановка во взвешенном слое в камере сложна и изменчива. Визуализация линий тока коаксиально закрученных струй в лазерном световом луче (рис. 3.12) 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.

Слой твердых частиц при малых скоростях восходящего жидкостного потока остается неподвижным, но при увеличении скорости твердые частицы свободно уносятся в нем, образуя псевдоожиженный слой. 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.

Если скорость воды (ожижающего агента) намного превышает минимальную величину, необходимую для возникновения псевдоожиженного

91

слоя, то он может продолжать расширяться за счет увеличения просвета (порозности) между твердыми частицами.



Ниже, более детально, рассмотрим приведенную выше концепцию.

В загрузочном аппарате при тангенциальной подаче напорной жидкости в соосные патрубки в виде закрученного потока создается локальное повышение давления у разгрузочного узла. Жидкость поступает в зоны более низкого (меньше от начального) давления, которые находятся только в двух местах:

- в транспортном трубопроводе;
- в верхней части камеры [36,41].

Движение жидкости снизу-вверх через слой твердых частиц сопровождается потерями напора.

При увеличении расхода подаваемой жидкости повышаются скорости восходящего потока, а при постоянном диаметре камеры можно полагать, что при повышении скорости восходящего потока потери напора постепенно возрастают и, наконец, достигается такое состояние, при котором сила трения жидкости при обтекании частиц, действующая снизу вверх, становится равной весу частиц, и слой как бы теряет вес [36,41]. При небольшом повышении этой критической скорости взвешивания частиц, сила трения при обтекании частиц возрастает и становится больше силы тяжести. Жидкость раздвигает частицы, т.е. порозность слоя увеличивается, а скорость в промежутках между частицами уменьшается [36,41] до тех пор, пока не уравновесятся силы, действующие на частицу.

При дальнейшем повышении скорости жидкости еще больше увеличивается пористость слоя.

Несмотря на то, что свойства частиц и жидкости сами будут определять характер псевдоожижения, многие факторы влияют на скорость перемешивания частиц и степень неоднородности слоя:

— геометрия слоя;

— скорость жидкости;

тип входа жидкости (тангенциально, как спутный соосный поток и т.д.);

— внутренняя геометрия камеры.

Таким образом, слой частиц в камере может находится в трех рабочих состояниях:

— псевдоожиженный;

— разрыхленный;

— фонтанирующий.

В последующем перепад давлений (градиент) у выхода кольцевой струи всегда будет больше, чем в верхней части камеры, т.к. псевдоожиженная масса будет вытесняться в пульповод и далее по нему транспортироваться [36,41].

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 расчетов 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. 3.13) [14,22,23,36,41].

$$\rho_n = S \cdot \rho_{\rm T} + (1 - S) \cdot \rho_0$$

$$\rho_n = (\rho_{\rm T} - \rho_0) \cdot S + \rho_0$$



**Рис.3.13.** Схема к определению перепада давлений у выхода кольцевой насадки: а, б – соответственно при полном и неполном заполнении камеры твердым материалом.

Перепад давлений у выхода кольцевой струи равен

 $\Delta \mathbf{P} = -\mathbf{P} + (\mathbf{P} + \rho_0 \cdot g \cdot l_1 + \rho_{\Pi} \cdot g \cdot l_2); \quad \Delta \mathbf{P} = (\rho_0 \cdot g \cdot l_1 + \rho_{\Pi} \cdot g \cdot l_2)$ или

$$\Delta H = \frac{\rho_0 \cdot l_1 + \rho_{\pi} \cdot l_2}{\rho_0}$$

Слой зернистого материала высотой *L* переходит в псевдоожиженное состояние при условии равенства (3.3).

Сопротивление	=	Bec	зернистого	(3.3)
восходящему потоку		материала і	в камере	
жидкости в камере				

ИЛИ

$$\rho_0 \cdot g \cdot \Delta H \cdot \omega_{\text{ow}} = \omega_{\text{ow}} \cdot L \cdot \rho_n \cdot g ; \ \Delta H = L \cdot \frac{\rho_n}{\rho_0}$$

 $ho_0 \cdot g \cdot \Delta H = g \cdot L \cdot [(
ho_{\rm T} - 
ho_0) \cdot S_{\rm K} + 
ho_0]$  кажется $ho_0$  это не надо

Необходимый избыточный напор в камере (для псевдоожижения материала) при псевдоожижении:

- водой

$$\Delta H = L \cdot \left[ \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot S_{\rm K} + 1 \right]$$

(3.4)

(3.5)

газом (воздухом) (р₀≈0)

$$\Delta H = L \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot S_{\rm K} \tag{3.5a}$$

где  $\omega_{ox}$  — площадь поперечного сечения загрузочного аппарата в горизонтальной плоскости среза выходного сечения центробежной насадки, м<sup>2</sup>;

*m* – порозность слоя зернистого материала в аппарате (доля пустот во всем объеме твердого);

 $\varepsilon_{\kappa} = (1 - m) - плотность упаковки зернистого материала в слое.$ 

Исходя из закона неразрывности, объемный расход жидкости, поступающий через кольцевую щель в режиме закрученной струи равен объемному расходу гидросмеси в транспортном трубопроводе [36,41].

(27)

(3.8)

$$Q = Q_n$$

$$Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_o$$
 ,  $Q_{max} = Q_n$ 

Таким образом, можно записать

$$Q_n = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \quad \text{или} \quad Q_n = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \pi \cdot R_0^2 \tag{3.7}$$

ИЛИ

$$Q_n = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{\pi \cdot R_0^2}{\pi \cdot R_n^2}$$

Исходя из определения  $\varepsilon$  по выражению  $\varepsilon = 1 - \frac{R_n^2}{R_0^2}$  или  $\frac{R_0^2}{R_n^2} = \frac{1}{1-\varepsilon}$ , получим (3.9)

$$\frac{Q_n}{\pi \cdot R_n^2} = \frac{\varepsilon^{1,5}}{1-\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

Определив необходимый избыточный напор  $\Delta H$  для перевода зернистого материала в состояние псевдоожижения в камере аппарата по выражению (3.5) и внешний радиус пульповода (исходя из расчетного

внутреннего диаметра пульповода D по условиям надежного гидротранспортирования) определим коэффициент заполнения выходного сечения жидкостью центробежной насадки.

$$\frac{\varepsilon^{1,5}}{1-\varepsilon} = \frac{Q_n}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} + \delta\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}}$$
(3.10)

где *D* – диаметр пульповода (внутренний), м;

 $\delta$ -толщина стенки пульповода, м.

Результаты опытных и опытно-промышленных исследований приведены на рисунках 3.6; 3.8; 3.9; 3.10; 3.11 в зависимости от скорости, плотности и времени разгрузки гидросмеси в напорный трубопровод и показывают, что являются типичными аналогами характерными для кривых псевдоожижения.

Так, графическая зависимость сопротивлениия зернистого слоя от скорости псевдоожижающего потока жидкости или газа имеет вид (рис. 3.14) [47].

Таким образом, в камере загрузочного аппарата имеет место начальная (минимальная скорость псевдоожижения, соответствующая гидравлической крупности частиц при стесненном падении при плотности упаковки  $S_{\kappa} = (1-S)^n$ , а также конечная (максимальная) скорость уноса единичных частиц на поверхности слоя, соответствующая гидравлической крупности при свободном падении.

Критическая скорость начального псевдоожижения в камере загрузочного аппарата соответствует скорости стесненного падения частиц с учетом:

- плотности упаковки частиц в камере  $S_{\kappa} \approx 0, 4$ ;
- плотности твердых частиц  $\rho_T$  и жидкости  $\rho_0$ ;
- крупности частиц d;
- формы частиц (коэффициент формы  $\Phi$ );
- лобового сопротивления частиц  $\psi$ ;



**Рис.3.14.** Типичная кривая псевдоожижения, где  $(U_{ox})_{kp}$  – минимальная скорость псевдоожижения; $U_{ce}$  -скорость при свободном падении частиц.

$$U_{\rm osc} = (1 - S_{\rm K})^n \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d \cdot g \cdot \Phi}{\psi}}$$
(3.11)

ИЛИ

$$U_{\rm ow} = m^n \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d \cdot \Phi \cdot g}{\psi}}$$
(3.11a)

Скорость уноса частиц на поверхности слоя (свободное паление частиц).

(3.12)

$$U_{\rm CB} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{d \cdot \Phi \cdot g}{\psi}}$$

стесненности падения частиц є.

Коэффициент формы частиц  $\Phi = \frac{\Pi OBEPXHOCTь ШАРА}{\Pi OBEPXHOCTь ЧАСТИЦ} = \frac{d_3^2}{d_T^2}$  при V<sub>ж</sub> = V<sub>ч</sub>, где d<sub>T</sub>-диаметр шара, эквивалентный частице по поверхности 1. для мелких частиц (d<0,1 мм, Re<1)

(3.13) 
$$K_{\Phi} = \sqrt{\Phi}$$

2. для средних частиц ( $d=0, 1\div 2, 5$  мм,  $Re=1\div 1000$ )

$$K_{\Phi} = \Phi$$

(3.14)

(3.15)

3. для крупных частиц (*d>2,5 мм, Re>1000*)

$$K_{\Phi} = \sqrt{\frac{1,56 \cdot \Phi}{8,95 - 7,39 \cdot \Phi}}$$

Для ориентировочного расчета плотность упаковки твердого материала в камере аппарата *S* принимаем  $S_{\kappa}=0,4$ , но для достоверности необходимо уточнить по справочным данным (таб. 3.2., 3.3)

Введя коэффициент формы  $K_{\phi}$ , для стесненного падения частиц получим выражение в критериальной структуре.

$$Re_{\rm ct} = m^n \cdot K_{\Phi} \cdot Re_{\rm cb}$$
(3.16)

где *Re<sub>cm</sub>*-число Рейнольдса для стесненного падения

$$Re_{\rm CB} = e^{10 \cdot \left(\sqrt{\frac{\ln(10 \cdot Ar)}{\ln 10}} - 1\right)}$$
(3.17)

где *Re<sub>ce</sub>* – число Рейнольдса для свободного падения

По данным Малухи	ина Г.Н.	По данным Куини (стр.68)		
	Φ		Φ	
Песок окатанный	0,855	Песок	0,6÷0,861	
Сокруглыми зернами	0,862	Битуминозный уголь	0,625	
Острозернистый	0,67÷0,6	Дробленая крошка	0,63	
Нефрикционный	0,588÷0,535	Песок	0,534÷0,622	
Уголь	0,33	Кварц	0,554÷0,622	
Антрацит	0,667÷0,286	Пылевидный уголь	0,696	
Сланец	0,315÷0,286			
Угольная пыль	0,617÷0,388			

#### Коэффициент формы частиц по данным различных исследователей.

100

#### Таблица 3.3.

#### Показатель степени при коэффициенте стесненности п

$n = \left(4,65 + 19 \cdot \frac{d}{D}\right)$	<i>Re</i> <sub>CB</sub> < 0,2	
$n = \left(4,35 + 17,5 \cdot \frac{d}{D}\right) \cdot Re^{-0,03}$	$0,2 < Re_{\rm cb} < 1$	
$n = \left(4,45 + 18,0 \cdot \frac{d}{D}\right) \cdot Re^{-0,1}$	0,1 < Re <sub>св</sub> < 200	
$n = 4,45 \cdot Re^{-0,1}$	$200 < Re_{\rm cb} < 500$	(3.17a)
n = 2,39	$Re_{\rm CB} > 500$	
		(3.18)

$$Ar = \frac{d^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0}$$

где Ar – число Архимеда

Определив число Архимеда по выражению (3.18), и затем число *Re*<sub>*c*<sup>6</sup></sub> по выражению (3.17) необходимо найти:

— показатель степени п согласно  $Re_{ce}$ ;

— скорость при свободном падении частиц, т.е. скорость уноса.

$$Re_{\rm CB} = \frac{U_{\rm CB} \cdot d}{\nu}; \quad U_{\rm CB} = \frac{Re_{\rm CB} \cdot \nu}{d}$$
(3.19)

где *v* – кинематическая вязкость жидкости.

При известном расходе гидросмеси в магистральном трубопроводе  $Q_n$  и концентрации твердого в ней *S* определим количество твердого

$$Q_{\rm T} = Q_n \cdot S \tag{3.20}$$

где *S* –концентрация твердого в трубопроводе при гидротранспорте.

Исходя из закона неразрывности, объемные количества жидкости входящие в аппарат и выходящие из него равны (рис.3.15),

$$Q = Q_n$$

но структурно разные: входящий поток Q состоит только из жидкости, а выходящий из расхода жидкости и твердого.

$$Q_n = S \cdot Q_n + (1 - S) \cdot Q_n = Q_{\mathrm{T}} + Q_{\mathrm{K}}$$
(3.22)

или согласно (3.21) и (3.22)

 $Q = Q_{\rm T} + Q_{\rm K}$  или  $Q_{\rm T} = Q - Q_{\rm K}$  или  $Q_{\rm T} = Q_{\rm o K}$  (3.23)



**Рис.3.15.** Баланс количества жидкости и твердого в объеме загрузочного аппарата.

То есть согласно (3.21), (3.22) и (3.23) расход твердого поступающий в разгрузочный трубопровод (пульповод) соответствует расходу жидкости отделившейся от струи закрученного потока. Эта жидкость движется вверх камеры навстречу гравитационному перемещению частиц.

Поскольку через сечение 1-1 аппарата проходит два течения (навстречу друг другу):

- вверх фильтруется жидкость для ожижения твердого с расходом  $Q_{ox}$ ;

- вниз гравитационно движется жидкость с расходом  $Q_T$ ,

следовательно, через сечение 1-1 (рис.3.15) проходит суммарный расход

$$Q_{\text{ow}} + Q_{\text{T}} = 2 \cdot Q_{\text{ow}} = 2 \cdot Q_{\text{T}}$$
, m.e.  $Q_T = Q_{\text{owe}}$ 

Средняя порозность зернистой среды равна  $m = 1 - \frac{\rho_{\text{H}}}{\rho_{\text{T}}}$ 

где  $\rho_{H}$ ,  $\rho_T$  – плотность горной массы в насыпке и в твердом теле.

Зная гидравлическую крупность частиц находящихся в плотном слое в камере аппарата с естественной пористостью *m* (расчет по (3.16) и с учетом расхода жидкости для переведения частиц в псевдоожиженное состояние в плоскости их загрузки в транспортирующий пульпопровод 1-1, можно составить следующее соотношение

$$U_{\rm om} \cdot \dot{\omega}_{\rm om} = 2 \cdot Q_{\rm om} \tag{3.24}$$

(3.25)

Откуда площадь сечения ожижаемого слоя твердого (рис.3.15, рис.3.16.) в плоскости I-I равно

$$\omega_{\rm ow} = \frac{2Q_{\rm ow}}{U_{\rm ow}}; \ D'_{\rm ow} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot Q_{\rm ow}}{\pi \cdot U_{\rm ow}}}$$

где:  $D'_{ow}$  - эквивалентный диаметр в плоскости псевдоожижения



Рис.3.16. Площадь псевдоожижения слоя твердого.

Сумма площади ожижения и площади сечения насадки составляет площадь поперечного сечения реального потока псевдоожижения.

$$D_g^2 = (\omega'_{\rm ow} + \omega_{\rm o})\frac{4}{\pi}$$
или  $D_g^2 = \frac{4}{\pi} \cdot \omega'_{\rm ow} + (D_o + 2 \cdot \delta)^2$  (3.26)

$$D_g = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \omega'_{\text{ox}} + (D_o + 2 \cdot \delta)^2}$$
(3.27)

# 3.3. Экспериментальные исследования влияния угла раскрытия прямоточных и коаксиально-закрученных струй на объемную плотность формируемой гидросмеси

Известно, что прямоточные затопленные струи характеризуются следующими факторами:

- угол раскрытия струи имеет наименьшее значения (15-27<sup>0</sup>) и зависит от коэффициента структуры потока, с его увеличением он возрастает, а дальнобойность снижается [14,38].

Для затопленных закрученных струй характерны следующие особенности [1,2,8,28,35]:

- в поле вихря может существовать разряжение, максимальное на оси струи и приближающееся к давлению в окружающей среде на границе струи;

- угол раскрытия струи зависит от интенсивности закрутки и превышает прямоточные струи;

- вдоль и поперек закрученной струи может иметь место значительный градиент скоростей и отрицательных давлений;

- при интенсивной закрутки в осевой зоне струи наблюдается обратное течение.

Угол раскрытия закрученной струи является одним из основных ее гидродинамических характеристик, хотя, как считают специалисты это несколько условное понятие, так как границы струи у устья сопла образуют не конус, а гиперболоид вращения. 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 а. 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 камеры 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 также в работе [35], результаты которых нами были проанализированы и приняты во внимание.

Принцип работы ЛСН 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 флуоресцируют с другой длиной волны. Использовался насыщенный раствор нафталина в этиловом спирте с нулевой плавучестью и коэффициентом преломления к=1,58, в отличие от воды к=1,33. Кроме того для повышения интегральной яркости изображения в спиртовой раствор нафталина вводился флуоресцеин натрия.

На рисунке 3.13 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 с тангенциальным подводом к камере закручивания.

Результаты проведенных исследований, представленные на рисунке 3.13 и на рисунке 3.14 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.

105

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. Стендовые испытания по исследованию влияния угла раскрытия прямоточных и закрученных струй были проведены на лабораторной установке (рис. 3.15), входящей в состав уникальной стендовой установки национальной значимости (УСУ), созданной на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ и зарегистрированной под № 4-73 в Минобрнауке.

Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований, включающая технологическую цепь оборудования, рассчитана в соответствии с учетом всех технологических параметров и конструктивных особенностей УСУ. В данном исследовании на установке, представленной на рисунке 3.16, использовалась замкнутая система водоснабжения, обеспечивающая непрерывность технологического процесса.

Загрузка твердого осуществлялась из емкости 2 посредством гидроэлеватора 3. Твердый материал под действием сил гравитации осаждался в камерах загрузочного аппарата 5 (а,б) с одновременным сливом воды в емкость 7, обеспечивая непрерывную работу центробежного насоса 12. Нагнетание воды в узел закрутки загрузочного аппарата центробежным насосом 7 обеспечивало формирование в камере загрузочного аппарата кольцевой закрученной струи, обеспечивающей демпфирование псевдоожиженного слоя в нижней части загрузочного аппарата, тем самым формируя гидросмесь со значительной объемной концентрацией.

При проведении исследований была использована технологическая проба природного песка из Подмосковного карьера «Гурбан» с размером фракций d<sub>cp</sub> от 0,25 мм до 1 мм.

Расход гидросмеси измерялся ультразвуковым расходомером марки EASZ-10P (рис. 3.17) [85].

106



**Рис.3.13.** Схема исследования гидродинамики коаксиальных закрученных потоков методом лазерного светового ножа. 1 - линза развертки; 2 - фокусирующая линза; 3 - щелевая диафрагма



Рис.3.14. Гиперболоид вращения, образованный кольцевой закрученной струей.


Рис. 3.15. Лабораторная установка по исследованию угла раскрытия закрученных и прямоточных струй.



Рис.3.16. Технологическая схема оборудования для определения угла раскрытия прямоточных и затопленных струй. 1 - металлический поддон: размер 1000×730 мм; 2 - зумпф металлического поддона; 3 - гидроэлеватор центрального типа; 4 - трубопровод: диаметр <math>D = 0,05 м, длина L = 2,3 м; 5 а.б. – камеры загрузочного аппарата соответственно с закрученными струями, либо с прямоточными: объем камеры  $V = 5,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; 6$  - отбор проб из напорного пульповода: D = 0,018 м; 7 - емкость для воды; 8 - карта намыва (короб): размер 1200×500 мм; 9 - слив воды; 10 - второй гидроэлеватор; 11 - наклонный желоб: длина L = 5 м; 12 - водяной насос.



Рис. 3.17. Измсерения расхода воды и гидросмеси на приборе фирмы «EESIFLO» марка EASZ-10P.

№п/п	Технические характеристики расходомера «EESIFLO» EASZ-10P:				
1	Диапазон измерения скорости потока	0,03 до 20 м/с			
2	Пределы допускаемой относительной	± 1% при v > 1 м/с			
		± (1/ v)% при v < 1 м/с			
3	Чувствительность по скорости	0,00025 м/с			
4	Количество измерительных каналов	1			
5	Цифровой интерфейс	RS232			
6	Аналоговые выходы	1 токовый (420) мА			
7	Пределы допускаемой приведенной	±0,1%			
	погрешности аналогового выхода				

Методика испытаний заключалась в предварительном установлении угла раскрытия жидкости с фиксацией его фотосъемкой и дальнейших измерений расхода и объемной плотности, формируемой гидросмеси в процессе работы лабораторного комплекса. Значения углов раскрытия устанавливались сочетанием расстояния от среза кольцевой насадки коаксиальных патрубков до торца внутреннего трубопровода (пульповода) и скоростями входящего тангенциального напорного потока воды в камеру завихрения.

Объемная концентрация твердого S в гидросмеси определялась расчетом из уравнения

$$ρ_{\rm T} = S \cdot (\rho_{\rm T} - \rho_0) + \rho_0 \quad \text{Kr/M}^3$$
(5.20)

*где*  $p_0$ ;  $p_n$ ;  $p_T$  – соответственно плотность воды, гидросмеси, и твердого 2650 кг/м<sup>3</sup>.

Расход (производительность) по твердому  $Q_T$  рассчитывалась по уравнению

$$Q_{\mathrm{T}} = Q_{\mathrm{\Pi}} \cdot S \, \mathrm{m}^{3/\mathrm{yac}}$$

По экспериментальным данным (табл.3.4) и характеру распространения закрученной струи выявлено, что ее форма в начальном сечении имеет форму гиперболоида, а угол раскрытия зависит от площади кольцевого сечения и радиальной скорости выходящего из насадки потока жидкости. В проводимых исследованиях угол раскрытия прямоточных струй изменялся от 10 до 18<sup>0</sup>, закрученных от 28 до 103<sup>0</sup> в начальном сечении.

### Таблица 3. 4.

(3.28)

(3.29)

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

№ п/ п	Угол раскрытия <i>а, град</i>	Характер струи	Расход гидросмеси, л/мин	Объемная плотность гидросмеси, кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация, <i>S</i> ,%
1.		2.	3.	4.	5.

1	2	3	4	5	6
	10-12		18	1150	9
	15-17	прямоточная	20,2	1185	11,2
	16-18		28,1	1190	11,5
	28		28,3	1320	19,4
	32	закрученная	29,4	1425	25,7
	45		18,9	1520	31,5
	65		21,5	1600	36,0
	83		22,6	1630	38,2
	85		25,7	1600	38,7
0	92		26,1	1620	38,8
1	103		26,5	1640	39,0

На основе полученных экспериментальных данных построены графические зависимости (рис.3.18) объемной плотности и концентрации гидросмеси в разгрузочном трубопроводе загрузочно-транспортного аппарата от угла раскрытия прямоточной и закрученной струи, выявлена функциональная зависимость плотности

$$\rho_{\pi} = \left(\frac{1,75}{\alpha} - 11,22\right) \cdot \rho_{\mathfrak{K}} \tag{3.30}$$

объемной концентрации гидросмеси от угла раскрытия кольцевой затопленной струи:

(3.31)  
$$S = 0.9 \cdot (\alpha^3 - 1.9 \cdot \alpha^2 + 12 \cdot \alpha) + 16.3$$



**Рис. 3.18.** Графические зависимости объемной плотности и концентрации гидросмеси в разгрузочном трубопроводе загрузочно-транспортного аппарата от угла раскрытия прямоточной и закрученной струи.

### Выводы по главе 3

1. Рассмотрен принцип работы и анализ результатов испытаний в моских и наземных условиях загрузочных аппаратов с формированием высоконасыщенной гидросмеси коаксиально закрученными жидкостными струями.

2. Выявлено, что для условий глубоководного гидроподъема предложенный загрузочный аппарат отвечает следующим требованиям:

формирует и поднимает высоконасыщенную (~35% по объему) гидросмеси, имеет компактную конструкцию, стабильную подачу гидросмеси, отсутствие переизмельчения транспортируемого материала, минимальные потери полезного компонента, низкую экологическую нагрузку на окружающую среду.

3. Визуализация линий тока коаксиально закрученной струи в лазерном световом луче позволяет определять условия образования слоя псевдоожижения в локальной зоне у разгрузки гидросмеси в пульповод, которая поддерживается и реализуется скоростными потоками.

4. Аналитически рассмотрен избыточный напор, необходимый для создания режима псевдоожижения в камере загрузочного аппарата который образуется при минимальной скорости соответствующий гидровлической крупности частич в стесненных условиях при плотности упаковки S=(1-m) и конечной (максимальной скорости уноса твердых частиц на поверхность слоя, соответствующей гидравлической крупности при свободном падении и далее при достижении критической скорости начинается ее разгрузка в патрубок пульповода.

В результате проведения экспериментальных исследований выявлено, что характер распространения кольцевой закрученной струи имеет форму вращающегося гиперболоида с углом раскрытия до 1300 в начальном сечении (в прямоточных до 200). При этом максимальная объемная конуентрация гидросмеси (~ 38-39%) достигается коаксиально закрученными струями жидкости при угле раскрытия более 800.

115

## ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО ПУЛЬПОПРИГОТОВЛЕНИЯ

# 4.1. Формирование вихря с радиусом кольцевого закрученного потока при истечении из насадки

Конкретный методологический подход к теории коаксиально-закрученных струй в научно-технической литературе отсутствует. Нами предлагается рассматривать методологию расчета определения технологических параметров формирования гидросмеси с использованием кинетической энергии коаксиально-закрученных струй (эффекта искуственного смерча) на основе теории центробежной насадки (форсунки) [1,2,15,28], приведенной Г. Н. Абрамовичем в работе [2].

При этом основным принципиальным отличительным признаком является [53] генерация в кольцевом пространстве соосных патрубков [15] закрученного потока жидкости за счет тангенциального подвода к ним напорной воды, который создает в плоскости разгрузки формируемой гидросмеси псевдоожиженный (демпфирующий) слой.

Напор истечения из камеры закручивания кольцевой центробежной насадки (рис.4.1) равен [1,2,35,36,53,73]:

$$\Delta H = \frac{V^2}{2 \cdot g} \tag{4.1}$$

где  $\Delta H$  – избыточный напор жидкости (воды) в камере закручивания, м.вод.ст.;

V-суммарная скорость истечения закрученной струи, м/с

$$(4.2)$$

$$V = \vartheta^2 + U^2 + V_p$$

где 9, U, V<sub>p</sub> – соответственно спутная (осевая), тангенциальная и радиальная скорости при выходе из кольцевой щели, м/с [15].

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 [53], осевую  $\vartheta$  и тангенциальную U. Вид спиралевидной траектории зависит от распределения скоростей в потоке. Если частица имеет окружную и радиальную скорость, то спирали плоские; окружную и осевую - цилиндрические; окружную, радиальную и осевую - конические. В прямоточных течениях значения V значительно меньше  $\vartheta$ , 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  $V=2\div 3$  M/c, радиальная скорость при формировании кольцевой струи в коаксиальных патрубках составляет 1-2 % от суммарной скорости, поэтому [15] эта скорость в дальнейших расчетах не принимается во внимание и уравнение (4.2) примет вид

(4.3)

$$V = \vartheta^2 + U^2$$

С учетом уравнения (4.3), зависимость (4.1) примет вид

$$\Delta H = \frac{\vartheta^2 + U^2}{2 \cdot g} \tag{4.4}$$

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

1. радиус закручивания потока при выходе из центробежной насадки соответствует внутренней образующей центробежной насадки *R*<sub>0</sub> (большой радиус) [15];

2. радиус закручивания потока соответствует внешней образующей поверхности пульповода *R<sub>n</sub>* (малый радиус) [15].



**Рис.4.1.** Расчетная схема аппарата исходя из теории центробежной насадки. Векторы скоростей соответствуют также выходу из центробежной насадки и определяют ее расход: *Q*<sub>1</sub> или *Q*<sub>2</sub>.

Вихрь с радиусом *R<sub>n</sub>* в основном определяет локальное пульпоприготовление (псевдоожижение) в плоскости вытеснения у пульповода.

Вихрь с радиусом *R*<sub>0</sub> в основном определяет начальный момент трогания зернистого материала (состояние взвешивания) по внешней поверхности искусственного жидкостного сферического грушеобразного потока [15].

Исходя из уравнения момента количества движения имеем:

(4.5)

$$Q \cdot \rho \cdot R \cdot \vartheta_{\rm BX} = Q \cdot \rho \cdot R_n \cdot U$$

где Q – расход напорной жидкости м<sup>3</sup>/с;

*R* – начальный радиус закручивания, м;

 $\vartheta$  – скорость потока при входе в камеру закручивания, м/с;

 $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

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

Для этого должны быть конструктивно учтены следующие особенности истечения жидкости из центробежной насадки с формированием кольцевой закрученной струи в плоскости вытеснения горной массы в пульповод:

- длина камеры закручивания *l* должна быть достаточной и необходимой для формирования жидкостной закрученной струи в вихре с минимальными потерями на трение [15];

- центробежная насадка должна иметь максимальный коэффициент расхода при оптимально создаваемом радиусе внутреннего вихря в средней части потока, соответствующему необходимому диаметру транспортного пульповода  $D_n/2=R_6$ . Поэтому минимум потерь энергии от гидроудара и гидравлического прыжка будет при условии равенства диаметров пульповода (внешнего) и формируемого центрального воздушного вихря центробежной насадки [15].

$$R_{\rm B} = R_n$$

Таким образом, исходя из уравнения (4.5) получим тангенциальную скорость на внешней образующей поверхности пульповода, формирующую демпфирующий [10,15], псевдоожиженный слой в плоскости вытеснения сформированной гидросмеси (рис.4.1).

$$U = \vartheta_{\rm BX} \cdot \frac{R}{R_n} \tag{4.7}$$

Для сечений 1-1 и 2-2 (рис.4.1.) уравнение неразрывности примет вид:

$$\pi \cdot R_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}}^2 \cdot \vartheta_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}} = \frac{\pi \cdot D_0^2 - \pi \cdot D_n^2}{4} \cdot \vartheta$$

(4.8)

(4.10)

(1 1 1)

где *R*<sub>ex</sub> – внутренний радиус входного патрубка (рис.4.1.), м.;

*D*<sub>0</sub>, *D*<sub>n</sub> – соответственно, внутренний диаметр центробежной насадки и внешний диаметр транспортного пульповода, м;

 $\pi \cdot R_{BX}^2$  – площадь поперечного сечения входного патрубка, м<sup>2</sup>;  $\frac{\pi \cdot D_0^2 - \pi \cdot D_n^2}{4}$  – площадь поперечного сечения кольцевой струи, м<sup>2</sup>. Преобразуем уравнение (4.8) следующим образом

$$\vartheta_{\rm BX} = \vartheta \cdot \frac{D_0^2 - D_n^2}{4 \cdot R_{\rm BX}} \qquad \text{или } \vartheta_{\rm BX} = \vartheta_0 \cdot \frac{R_0^2 - R_n^2}{R_{\rm BX}^2}$$
(4.9)

Получим зависимость входной скорости потока от выходных параметров центробежной насадки (камера завихрения):

$$\vartheta_{_{\rm BX}} = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0^2}{R_{_{\rm BX}}^2}$$

где є – коэффициент сжатия кольцевой струи центробежной насадки (коэффициент заполнения сечения кольцевой струи) [36,41].

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - w_n}{\omega_0} \quad \text{или} \quad \varepsilon = 1 - \frac{R_n^2}{R_0^2} \tag{4.11}$$

где  $w_0$  – площадь поперечного сечения камеры,  $M^2$ ;

ω<sub>n</sub> – площадь поперечного сечения транспортного пульповода (по внешнему диаметру), м<sup>2</sup>.

Используя уравнение 4.11 можно определить:

-наружный радиус пульповода;

$$R_n = R_0 \cdot \sqrt{1 - \varepsilon} \tag{4.12}$$

-внутренний радиус центробежной насадки;

$$R_0 = \frac{R_n}{\sqrt{1-\varepsilon}} \tag{4.13}$$

Подставляя уравнение (4.10) в уравнение (4.7), получим значение тангенциальной скорости в таком виде:

$$U = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0^2 \cdot R}{R_n \cdot R_{\text{BX}}^2}$$
(4.14)

(4.16)

Используя соотношения (4.13) и (4.12), получим:

$$U = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0}{R_n} \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{BX}^2} \qquad \text{или} \qquad U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon}} \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{BX}^2}$$
(4.15)

Уравнение (4.15) определяет соотношение тангенциальной скорости и осевой, т.е. основные параметры центробежной насадки: коэффициент заполнения сечения  $\varepsilon$ ; радиус закрутки R; внутренний радиус центробежной насадки  $R_0$  и радиус входного патрубка  $R_{ex}$ .

Тогда имеем:

$$R = R_n + R_{\rm BX}$$

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

$$A = \frac{R_0 \cdot R}{R_{\rm BX}^2} \tag{4.17}$$

Анализируя этот параметр *А* можно заключить, что косвенно этот геометрический параметр влияет на величину коэффициента заполнения сечения *є*.

Совмещая уравнения (4.16) и (4.15) имеем следующие соотношения:

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

ИЛИ

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

а с учетом выражения (4.13) окончательно получаем:

$$U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon}} \cdot \frac{R_n}{R_{\rm BX}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{\rm BX}}\right)$$
(4.18)

Представим геометрический параметр центробежной насадки как

$$A = \frac{R_n}{R_{BX}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{BX}}\right)$$
(4.19)

Введенный геометрический параметр камеры закручивания (центробежной насадки) по уравнению (4.19) реально оценивает сущность процесса формирования псевдоожижения демпфирующего сдоя при напорном закручивании потока воды при входном радиусе трубы  $R_{6x}$  и последующего вытеснения по транспортному пульповоду  $R_n$  (уже заданного с учетом необходимых расходно-напорных параметров гидротранспортирования твердого) [15].

$$m = \frac{R_n^2}{R_{\rm BX}^2} = \frac{\omega_n}{\omega_{\rm BX}} \qquad \sqrt{m} = \frac{R_n}{R_{\rm BX}} \tag{4.20}$$

где  $R_n$  – радиус камеры смешения водоструйного аппарата, м;  $R_{ex}$  – радиус рабочей насадки для напорной воды, м.

Уравнение (4.19) исходя из (4.20) можно представить, как [15]

$$(4.21)$$

$$A = \sqrt{m} \cdot \left(1 + \sqrt{m}\right)$$

а уравнение (4.17) определяет основной геометрический параметр для аппаратов, где пульпоприготовление формируется за счет спутной [15] сплошной струи, а не кольцевой как в рассматриваемом случае.

Следует заметить, что как для уравнений (4.19), так и (4.20), площадь поперечного сечения пульповода  $\omega_n$ , определяет производительность установки, а площадь поперечного сечения напорного входного патрубка (при неизменном значении входного давления)  $\omega_{ex}$  определяет дальность гидротранспортирования для загрузочно-обменных аппаратов с пульпоприготовлением закрученной кольцевой струей при формировании псевдоожиженного слоя возле узла разгрузки с последующим вытеснением твердого материала из камеры загрузочно-обменного аппарата по пульповоду площадью поперечного сечения  $\omega_n$ .

Если расход напорной воды для аппаратов эжекторного типа равен:

$$Q_{\mathfrak{z}} = w_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \tag{4.22}$$

то для формирования сферического псевдоожиженного (демпфирующего) слоя кольцевыми закрученными струями для определения необходимого расхода требуются дополнительные пояснения.

Исходя из уравнений (4.18) и (4.19), тангенциальная скорость из насадки равна:

$$U = \vartheta \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$
(4.23)

Подставляя выражение (4.23) в уравнение (4.4), получим:

$$\Delta H = \left[1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)^2\right] \cdot \frac{\vartheta^2}{2 \cdot g}$$
(4.24)

(4.25)

(4.26)

Откуда осевая скорость истечения через кольцевую щель центробежной насадки равна:

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

где  $\varphi$  – коэффициент скорости при истечении кольцевой закрученной струи.

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

С учетом значения коэффициента сжатия є по выражению (4.11) расход жидкости через центробежную насадку равен [15]:

$$Q = (\omega_0 - \omega_n) \cdot \vartheta = \varepsilon \cdot \omega_0 \cdot \vartheta$$
(4.27)

а используя уравнение (4.25) получим:

$$Q = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$$
(4.28)

Таким образом, коэффициент расхода *µ* при формировании кольцевой закрученной струи центробежной насадки равен:

(4.29)

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

Анализ этих уравнений показывает, что коэффициент заполнения сечения  $\varepsilon$  неоднозначно влияет на коэффициент расхода кольцевой струи  $\mu$  Таким образом, появляется необходимость определения оптимальной толщины кольцевой струи для формирования демпфирующего псевдоожиженного слоя в плоскости вытеснения. Для этого определяем максимальную пропускную способность центробежной насадки с учетом начальных параметров потока  $\vartheta_{ex}$  и R, т.е. исследуем функцию (4.29) на экстремум:

$$\frac{d\mu}{d\varepsilon} = -0.5 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2}\right)^{-1.5}$$
$$\cdot \left[-2 \cdot \varepsilon^{-3} - 2 \cdot A^2 \cdot (1-\varepsilon)^{-3} \cdot (-1)\right]$$
(4.30)

Взять вторую производную (для выявления максимума функции (4.30)) достаточно сложно. Поэтому построим график зависимости коэффициента расхода  $\mu$  (по уравнению (4.29) от коэффициента заполнения сечения  $\varepsilon$  (при постоянном значении геометрического параметра, т.е. при равных геометрических параметрах центробежной насадки).

Из таблицы 4.1 и графической зависимости  $\mu = f(\varepsilon, A)$  (рис.4.2) видно, что при определенном значении коэффициента заполнения сечения центробежной насадки  $\varepsilon$ , 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.

### Таблица 4.1

Зависимость коэффициента расхода от коэффициента сжатия кольцевой струи

8	μ	
-	A=3,0	A=1,0
0,5	0,158	
0,4	0,179	
0,32	0,185	
0,3	0,184	
0,2	0,16	0,19
0,4		0,333
8	μ	
U U	A=3,0	A=1,0
0,5		0,354
0,51		0,353
0,6		0,333
0,7		0,276



**Рис.4.2.** К вопросу отыскания оптимума коэффициента расхода центробежной насадки µ от коэффициента заполнения сечения струи  $\varepsilon$ .

Чтобы определить координаты этого оптимума, необходимо приравнять первую производную нулю (по выражению (4.29), т.е. исследовать искомую функцию на экстремум.

$$-0.5 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2}\right)^{-1.5} \cdot \left[-2 \cdot \varepsilon^{-3} - 2 \cdot A^2 \cdot (1-\varepsilon)^{-3} \cdot (-1)\right] = 0$$

При этом возможны два варианта I.

$$\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2} = 0$$
 (при  $\varepsilon < l$  такого случая быть не может)

II.

$$rac{A^2}{(1-arepsilon)^3} - rac{1}{arepsilon^3} = 0$$
, откуда  $A^2 = \left(rac{arepsilon}{1-arepsilon}
ight)^2$ 

или максимум коэффициента расхода центробежной насадки имеет место при следующем соотношении

$$A = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^{1,5} \tag{4.31}$$

Далее проанализируем вышеприведенные доводы:

Согласно данных таблицы 4.1 максимальные значения коэффициента расхода  $\mu_{max}$  получены:

— при ε=0,32, 
$$A = \left(\frac{1}{0,32} - 1\right)^{1,5} = 3,1$$
, по таблице A=3,0;
— при ε=0,505,  $A = \left(\frac{1}{0,505} - 1\right)^{1,5} = 0,97$ , по таблице A=1,0.

Подставив выражение (4.31) в уравнение (4.29), получим максимальное значение коэффициента расхода центробежной насадки, работающей с максимальным расходом:

$$\mu_{max} = \varepsilon^{1,5}$$

(1 32)

При этом максимальный расход через центробежную насадку

$$Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \tag{4.33}$$

Подставив уравнение (4.31) в (4.26), получим значение коэффициента скорости  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{1,5}\right]^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^2}}$$

или

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

или

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

Таким образом, уравнение расхода (4.33) равно

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

где  $\varphi$  – коэффициент скорости кольцевой закрученной струи;

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

# 4.2. Определение максимального расхода жидкости через центробежную насадку

Исходя из уравнения количества движения

$$Q \cdot \rho \cdot R \cdot v_{\rm BX} = Q \cdot \rho \cdot U \cdot R_0$$

где *R*<sub>0</sub> – радиус внутренней образующей центробежной насадки (рис.4.1), м.

или

$$U = v_{\rm BX} \cdot \frac{R}{R_0}$$

По уравнению неразрывности потока

(4.36)

(4.37)

(4.38)

(4.34)

(4.35)

$$\vartheta_{\rm BX} = \vartheta \cdot \varepsilon \frac{R_0^2}{R_{\rm BX}^2}$$

Подставляя (4.36) в выражение (4.35) получим

$$U = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{\rm BX}^2}$$

Рассматривая уравнение (4.37) после некоторых алгебраических преобразований имеем

$$U = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0 \cdot R}{R_{\rm BX}^2} = \vartheta \cdot \varepsilon \cdot \frac{R_0}{R_n} \cdot \frac{R_n \cdot (R_{\rm BX} + R_n)}{R_{\rm BX}^2}$$

или с учетом уравнения (4.13), т.е

$$R_{0} = \frac{R_{n}}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

$$U = \vartheta \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \cdot \frac{R_{n}}{R_{\text{BX}}} \cdot \left(1 + \frac{R_{n}}{R_{\text{BX}}}\right)$$
(4.39)

Используем геометрический параметр *А* центробежной насадки из предыдущего раздела

$$\mathbf{A} = \frac{R_n}{R_{\rm BX}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{\rm BX}}\right)$$

Таким образом, тангенциальная скорость равна (исходя из (4.39) и (4.19))

$$U = \vartheta \cdot A \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$
(4.40)

......

Подставляя выражение (4.40) в уравнение (4.4) получим:

$$\Delta H = \left[1 + A^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}\right] \cdot \frac{\vartheta^2}{2 \cdot g} \tag{4.41}$$

откуда осевая скорость кольцевой струи равна:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$
(4.42)

Расход через тангенциальную насадку равен:

$$Q = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$$
(4.43)

Таким образом, коэффициент расхода центробежной насадки равен (4.44)

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1 - \varepsilon}}}$$

### Исследуем функцию (4.44) на экстремум

$$\frac{d\mu}{d\varepsilon} = -0.5 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1-\varepsilon}\right)^{-1.5} \cdot \left[-2 \cdot \varepsilon^{-3} - A^2 \cdot (1-\varepsilon)^{-2} \cdot (-1)\right]$$

### Таблица 4.2

(4.45)

Зависимость коэффициента расхода от коэффициента сжатия кольцевой

струи

c	μ	μ		
C	A=3,0	A=1,0	C	
0,2	0,166	0,431	0,6	
0,3	0,204	0,437	0,62	
0,41	0,21717	0,4376	0,63	
0,42	0,21726	0,4377	0,64	
0,43	0,21719	0,431	0,7	
0,5	0,213			
3			3	

	A=3,0	A=1,0	
0,7	0,1767		

При решении уравнения (4.44) возможны два варианта:

I.

 $\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1-\varepsilon} = 0$  (при  $\varepsilon < l$  такого быть не может)

II.

$$\frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2} - \frac{2}{\varepsilon^3} = 0 \qquad A = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^3}} (1-\varepsilon)$$

Далее проанализируем вышеприведенные аналитические доводы. при є=0,42; А=3,01, по таблице 2А=3,0;

при ε=0,64; A=0,994, по таблице 2A=1,0.

Таким образом, максимум коэффициента расхода центробежной насадки имеет место при следующем соотношении

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

Подставив уравнение (4.46) в (4.44) получим максимальное значение коэффициента расхода центробежной насадки

$$\mu_{max} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}}$$
(4.47)

(4.46)

При этом максимальный расход через центробежную насадку

$$Q_{max} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0 \tag{4.48}$$

# 4.3. Напорно-расходные характеристики затопленных струй в зоне вытеснения (разгрузки камеры)

Расстояние *L* между срезом кольцевого сечения начального истечения закрученной струи и плоскостью разгрузочного отверстия (пульповода) является основным регулятором концентрации гидросмеси вытесняемой в пульповод (рис.4.3).



Рис. 4.3. Общая схема зоны концентрации гидросмеси на расстоянии L между кольцевой насадкой и срезом разгрузочного отверстия пульповода, где θ, θ<sub>Π</sub> – соответственно скорость истечения струи из кольцевой насадки и скорость у среза разгрузочного отверстия пульповода; S<sub>κ</sub> – плотность упаковки частиц в камере; S – концентрация гидросмеси у входного отверстия пульповода.

Если суммарная начальная скорость истечения из насадки определяется избыточным напором, величина которого должна в первую очередь осуществлять интенсивный процесс псевдоожижения 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 среза разгрузочного отверстия 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.

Это дает основание рассматривать движущийся материал как тяжелую жидкость с объемным весом, равным объемному весу этой гидросмеси.

Общая скорость V определяет границы псевдоожижения возле узла разгрузки, где расположен входной патрубок пульповода. Тангенциальная скорость U определяет боковые границы распространения потока воды в твердый материал. И только осевая скорость  $\vartheta$  определяет границы псевдоожиженного состояния твердого материала определенной гидравлической крупности вдоль пульповода до плотности входа твердого материала в пульповод. Таким образом, закономерность уменьшения скорости  $\vartheta$ .

Таким образом, как было установлено ранее по уравнению (4.25), осевая скорость истечения через кольцевую щель центробежной насадки равна:

— при радиусе кольцевого закрученного потока, равном внешнему радиусу пульповода  $R_n$ 

134

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

где коэффициент скорости  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^2}}$ ,

T.e.  $\vartheta = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$ 

Поскольку при максимальном расходе  $Q_{max}$  согласно уравнению (4.33)

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

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{1,5\cdot 2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^2}}; \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)}} = \sqrt{\varepsilon}$$

следовательно

$$\vartheta = \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

— при радиусе кольцевого закрученного потока равном внутреннему радиусу кольцевой насадки  $R_o$ 

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

где перепад напоров  $\Delta H$  представляет собой:

— векторную сумму двух скоростей закрученного потока: осевой  $\vartheta$  и тангенциальной U;

— необходимый избыточный напор в камере аппарата для создания режима псевдоожижения материала (32) (водой):

$$\Delta H = L \cdot \left[\frac{\rho_{\rm T} - \rho_{\rm o}}{\rho_{\rm o}} \cdot S_{\rm K} + 1\right]$$

Таким образом, необходима зависимость изменения скорости, затопленной струи от расстояния

$$V_x = f(\vartheta, l)$$

Анализируя множество опытных зависимостей распространения затопленных свободных струй, выделим только те из них, которые получили хорошее опытное подтверждение (табл.4.3).

$$I \vartheta_{cp} = \vartheta \cdot$$
  
 $\frac{1}{1+0,476 \cdot \frac{l}{d_o}}$  (струя воздуха в воздухе (Г. Н. Абрамович)

(4.49)

(4.50)

(4.51)

2. 
$$\vartheta_{\rm cp} = \vartheta$$
.

$$\frac{1}{1+0,345\cdot \frac{l}{d_0}}$$
 (струя воды в воде (И. М. Коновалов)

4. 
$$\vartheta_{\rm cp} = \vartheta \cdot \frac{1}{1+0,476 \cdot \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\rm cp}}}$$

(струя воздуха в газе  $\rho_0$  различной плотности  $\rho_{\rm cp}$  (И.А.

Шепелев)

Формула (4.51) определяет изменение средней скорости по длине при условии, что начальная плотность струи ( $\rho_0$ ) и окружающей среды ( $\rho_{cp}$ ) существенно различны (опыты проведены в диапазоне  $\frac{\rho_{cp}}{\rho_0} = 0.5 \div 2.0$ ).

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

(4 55)

$$\frac{\vartheta_{\rm oc}}{\vartheta_{\rm cp}} = 3,1$$

Очень важные опыты провел Ц.Э. Мирцхулава по изучению местного размыва несвязных затопленных грунтов падающей струей воды (таб.4.3).

Установлены зависимости изменения осевой скорости плоской струи воды толщиной B<sub>0</sub>:

1. в воде

$$\vartheta'_{\rm oc} = \vartheta \cdot \frac{1}{0,9 + 0,09 \cdot \frac{l}{B_0}}$$
 (4.53)

2. в несвязном затопленном грунте

$$\vartheta_{\rm oc}^{\prime\prime} = \vartheta \cdot \frac{1}{0,9 + 0,12 \cdot \frac{l}{B_0}},$$
(4.54)

что подтверждает выводы Лайцянского и Абрамовича об изменении осевой скорости по длине струи.

3. отражение от дна при местном размыве струи в несвязном затопленном грунте

$$\vartheta_{\rm oc}^{\prime\prime\prime} = \vartheta_{\rm dho} \cdot \frac{1}{0.9 + 0.12 \cdot (\frac{l}{B_0})^2},$$
(4.33)

что также подтверждает выводы Лайцянского и Абрамовича о квадратичном изменении тангенциальной скорости по длине струи.

### Таблица № 4.3

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

Nº	Apton	1=0.2	1=0.4	l=0.6	l=1.0
№ п/п	Автор	М	М	М	М
1	Жушенко В А				
	Лученко Б.А				
	d <sub>o</sub>	7,08	3,54	2,36	1,42
	$U_{\rm oc} = U_{\rm o} \cdot 7,08 \cdot \frac{40}{l}$				
2	Коновалов И М				
2	Ronobalob H.WI				
	$U_0 \cdot 2,42$	6,54	3,39	2,27	1,38
	$U_{\rm oc} = \frac{1}{1 + 0.245}$				
	$1 + 0,343 \cdot \frac{d_o}{d_o}$				
3	Мирцхулава Ц.Э.				
	11				
	0 <sub>0C</sub>	8,89	4,94	3,42	2,1
	$= U_0 \cdot \frac{1}{l}$				
	$0,9 + 0,09 \cdot \frac{l}{d_o}$				
4	Мирцхулава Ц.Э.				
	U <sub>oc</sub>	7.02	3.8	2.61	1.6
	- 111	.,	- 7 -	7 -	7 -
	$0,9 + 0,12 \cdot \frac{l}{l}$				
.5	Мирихулава Ц.Э.				
	U <sub>oc</sub>	0.07	0.017	0.007	0.0025
	1	0,06	0,016	0,007	0,0025
	$= U_0 \cdot \frac{1}{0.0 + 0.4 + l_{22}}$				
	$0,9 + 0,4 \cdot (\frac{1}{d_o})^2$				

формулам).

Следует заметить, что, струя, отраженная от стенки воронки местного размыва является касательной к размываемому грунту, точно также и тангенциальная скорость в закрученных струях касательна по отношению к грунту в камере аппарата. Таким образом по аналогии со скоростями закрученной струи можно утверждать, что:

θ<sub>дно</sub>- начальная скорость при отражении от дна воронки местного размыва (аналогично начальной осевой скорости истечения из кольцевой центробежной насадки), м/с;

θ<sub>oc</sub>- осевая скорость (аналогично осевой скорости в плоскости разгрузочного пульповода), м/с

С учетом распространения закрученной струи в среде пульпы в камере с плотностью  $\rho_{\rm cp}$  (4.51)

$$\rho_{\rm cp} = S_{\Pi} \cdot \rho_{\rm T} + (1 - S_{\Pi}) \cdot \rho_{\rm o}$$
(4.56)

выражение (4.55) максимально приближенное к условию истечения закрученной струи в псевдоожиженный слой будет иметь вид :

$$\vartheta_{\rm oc} = \vartheta \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\rm o}}{\rho_{\rm cp}}} \cdot \frac{1}{0.9 + 0.4 \cdot (\frac{l}{B_0})^2}$$
(4.57)

где  $S_{\Pi}$  – концентрация твердого в пульповоде  $S_{\Pi} = 0,6;$ 

 $B_0$  – ширина кольцевой закрученной струи при начальном истечении, м;

 $\vartheta_{\rm oc}$ - осевая скорость струи, которая фактически соответствует гидравлической крупности твердого материала  $(d_{\rm T}, \rho_{\rm T})$  вытесненного в плоскости разгрузочного отверстия пульповода с консистенцией заданной для напорного магистрального гидротранспортирования *S*, подобно выражению  $(3.16) \div (3.18)$ .

1. Определяем число Ar

$$Ar = \frac{d_{\rm T}^{3} \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_{\rm o}}{\rho_{\rm o}}$$
(4.58)

2. Затем определяем число *Re*<sub>се</sub> (для свободного падения)

$$Re_{\rm CB} = e^{10 \cdot (\frac{\sqrt{\ln(10 \cdot Ar)}}{\ln 10} - 1)}$$

3. Затем для полученного числа *Re*<sub>св</sub> определим показатель степени в коэффициенте стесненности (*n*) по выражению (3.17а).

4. Введя коэффициент формы частиц *К*<sub>ф</sub> определим число *Re*<sub>cm</sub> для стесненного падения подобно выражению (3.17)

$$Re_{\rm cT} = (1-S)^n \cdot K_{\phi} \cdot Re_{\rm CB}$$
(4.59)

5. Определим скорость стесненного падения твердых частиц, которая будет соответствовать осевой скорости закрученной струи приготавливающую гидросмесь в плоскости разгрузочного отверстия пульповода с гидротранспортной консистенцией *S*.

$$Re_{cT} = \frac{V_{cT} \cdot d_{T}}{\nu} \qquad \qquad \vartheta_{cT} = \frac{Re_{cT} \cdot \nu}{d_{T}}$$
(4.60)

в плоскости разгрузочного отверстия

$$\vartheta_{\rm oc} = \vartheta_{\rm ct} \tag{4.61}$$

Используя выражение (4.57) и (4.61) получим формулу для определения необходимого расстояния *L* между плоскостью начального истечения кольцевой струи и плоскостью разгрузочного отверстия пульповода.

(4.62)

(1 50)

$$\frac{l}{B_o} = \sqrt{\frac{\vartheta}{\vartheta_{CT}}} \cdot 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho}} - 2.25$$

1. Чем меньше скорость  $\vartheta_{cm}$ , тем более плотная упаковка, подготавливаемого в плоскости разгрузки (вытеснения, всасывания) материала;

2. Чем больше скорость  $\vartheta_{cm}$ , тем менее плотная упаковка подготавливаемого в плоскости всасывания грунта.

Преобразуем выражение (4.57) следующим образом:

$$\vartheta_{\rm CT} = \left(\frac{1}{0.9 + 0.4 \cdot \left(\frac{l}{B_o}\right)^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\rm o}}{\rho_{\rm cp}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\vartheta^2}{2 \cdot g}}$$

где  $\frac{\vartheta^2}{2 \cdot g}$  – перепад напора  $\Delta h$ , который создал скорость  $\vartheta$ 

$$\vartheta_{\rm CT} = \left(\frac{1}{0.9 + 0.4 \cdot \left(\frac{l}{B_o}\right)^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\rm o}}{\rho_{\rm cp}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

где  $\frac{1}{0,9+0,4\cdot \left(\frac{l}{B_O}\right)^2} = \varphi$  – коэффициент скорости истечения струи при перепаде

напоров  $\Delta h$  с учетом того, что насадка имеет длину в объеме твердого материала *L*.

$$\vartheta_{\rm CT} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_{\rm CT}} \cdot 2 \cdot g \cdot \Delta h}$$
(4.65)

или

(4.63)

(4.64)

$$\Delta h = \zeta_{\Xi_{\mathrm{K}}} \cdot \frac{\vartheta_{\mathrm{CT}}^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho_{\mathrm{cp}}}{\rho_{\mathrm{o}}}$$
 ,

что определяет потери напора струйного потока по объему зернистого материала плотностью среды  $\rho_{\rm cp}$ .

Рассмотрим истечение струи со скоростью  $\vartheta_o$  в среду с плотностью гидросмеси  $\rho_{\rm cp}$ 

$$\frac{\vartheta_o^2}{2 \cdot g} = \frac{\vartheta_{\rm cT}^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho_{\rm cp}}{\rho_{\rm o}} + \Im \zeta_{\rm K} \cdot \frac{\vartheta_{\rm cT}^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{\rho_{\rm cp}}{\rho_{\rm o}}$$
(4.67)

где ζ<sub>ζκ</sub>- коэффициент сопротивления канала распространения струи. Из выражения (4.67) имеем:

$$\vartheta_{\rm CT} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\zeta_{\rm K}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_{\rm CT}} \cdot 2 \cdot g \cdot \frac{\vartheta_o^2}{2 \cdot g}}; \quad принимая \quad \Delta h = \frac{\vartheta_o^2}{2 \cdot g} \quad \mu \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\zeta_{\rm K}}}$$
(4.68)
$$\vartheta_{\rm CT} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_{\rm CT}} \cdot 2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Выражения (4.68) идентично (4.65), что доказывает правильность структуры выражения (4.64), а, следовательно, и (4.62).

Диаметр входного патрубка ( $2R_{\rm Bx} = D_{\rm Bx}$ ) зависит от конструкции входа в камеру закручивания и потерь на входе. При этом

$$Q = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H} \cdot \omega_{\rm BX} \tag{4.69}$$

откуда

$$D_{\rm BX} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{\varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}}}.$$
(4.70)

Определив из выражения (4.40) коэффициент заполнения сечения найдем внутренний расход центробежной насадки *R*<sub>o</sub> по формуле (4.13), либо по выражению (4.33).

По формуле (4.13)

$$R_o = \frac{R_n}{\sqrt{1-\varepsilon}}.$$
(4.71)

(4.74)

По выражению (4.33)

$$Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_o \quad , \quad Q_{max} = Q_n$$

$$\omega_o = \frac{Q_n}{\varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}}, \quad \text{откуда } R_o = \sqrt{\frac{\omega_o}{\pi}}$$
(4.72)

Далее из выражения (4.31) с учетом найденного значения  $\varepsilon$  (по формуле (4.40) определим величину геометрического параметра *A*.

$$A = (\frac{1}{\varepsilon} - 1)^{1,5}$$
и исходя из (4.19)  

$$A = \frac{R_n}{R_{\text{BX}}} \cdot (1 + \frac{R_n}{R_{\text{BX}}})$$
 определим соотношение  $\frac{R_n}{R_{\text{BX}}}$  из полученного квадратного

уравнения

$$(\frac{R_n}{R_{\rm BX}})^2 + (\frac{R_n}{R_{\rm BX}}) - A = 0, \quad \frac{R_n}{R_{\rm BX}} = N.$$
 (4.73)

Зная, что внешний радиус пульповода равен  $R_n = \frac{D}{2} + \delta$ , то выходной диаметр напорного водовода определится из выражения

$$D_{\text{BX}} = 2 \cdot R_{\text{BX}} = \frac{2 \cdot (\frac{D}{2} + \delta)}{N}; \quad D_{\text{BX}} = \frac{D + 2\delta}{N}$$

# 4.4. Пример методологии расчета расходно-напорных характеристик геометрических параметров массообменно-транспортного аппарата

Принимаем высоту аппарата Н=6м.

Предварительный расчет линии гидротранспортирования позволил получить следующие результаты:

- производительность по твердому  $Q_m = 200 \ M^3/4$ ;
- внутренний диаметр пульповода *D*=300 мм;
- концентрация твердого в объеме гидросмеси *S*=0,15;
- 1. Необходимый избыточный напор в массообменной камере аппарата:

$$\Delta H = H \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot (1 - m)$$

где *H* – высота камеры аппарата (*H*=6 *м*);

 $\rho_m$ ;  $\rho_0$  – соответственно плотность твердого и воды ( $\rho_m = 1400 \ \kappa z/M^3$ ;  $\rho_0 = 1000 \ \kappa z/M^3$ );

m – порозность слоя горной массы (m=0,4).

$$\Delta H = 6 \cdot \frac{1400 - 1000}{1000} \cdot (1 - 0.4) = 1.44 \text{ m}$$

2. Коэффициент заполнения сечения тангенциальной кольцевой насадки:

$$\frac{\varepsilon^{1,5}}{1-\varepsilon} = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} + \delta\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}}$$

$$\frac{\varepsilon^{1,5}}{1-\varepsilon} = \frac{\frac{667}{3600}}{3,14 \cdot \left(\frac{0,3}{2} + 10 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,44}} = 0,429$$

где δ – толщина стенки трубопровода (δ=10 мм), м ε=0,403
3. Внутренний радиус центробежной насадки:
$$R_0 = \frac{R_n}{\sqrt{1-\varepsilon}}; \ R_0 = \frac{\frac{D}{2} + \delta}{\sqrt{1-\varepsilon}}; \ R_0 = \frac{\frac{0,3}{2} + 10 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1-0.403}} = 0.207 \text{ м}$$

Толщина кольцевой щели

$$b = R_0 - R_{\pi} = 0,207 - \frac{0,320}{2} = 0,047 = 47 \text{ MM}$$

4. Величина геометрического параметра А:

A = 
$$\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^{1,5}$$
; A =  $\left(\frac{1}{0,403} - 1\right)^{1,5}$  = 1,803

5. Определим соотношение  $R_n/R_{ex}$ 

$$A = \frac{R_n}{R_{_{\mathrm{BX}}}} \left( 1 + \frac{R_n}{R_{_{\mathrm{BX}}}} \right); \frac{R_n}{R_{_{\mathrm{BX}}}} = N_1$$
, тогда

$$N^{2} + N - A = 0, N = -0.5 \pm \sqrt{0.25 + 1.803} = -0.5 \pm 1.43$$

$$N = -0.5 + 1.43 = 0.933; R_{\text{bx}} = \frac{R_n}{N} = \frac{0.16}{0.933} = 0.171 \text{ m} = 171 \text{ mm}$$

 $D_{\rm bx} = 2 \cdot R_{\rm bx} = 372 \, {\rm mm}$ 

6. Восходящий расход воды, идущий на псевдоожтжение в плоскости вытеснения гидросмеси в транспортный трубопровод:

$$Q_{\rm T} = Q_{\rm ow} = \frac{100}{3600} = 0,0278 \; {\rm m}^3/{\rm c}$$

7. Скорость восходящего расхода воды в плоскости вытеснения (диаметр плоскости псевдоожижения принимаем  $D_{\mathcal{A}} = l \ M$ )

$$\vartheta_{\text{BOCX}} = \frac{Q_{\text{OK}}}{0,785 \cdot D_{\text{A}}^2} = \frac{0,0276}{0,785 \cdot 1^2} = 3.5 \cdot 10^{-2} \text{ M/c}$$

8. Гидравлическая крупность твердого при режиме псевдоожижения горной массы в плотности слоя

$$\vartheta_{\rm CB} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{g \cdot d_{\rm T}}{\Psi}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{1400 - 1000}{1000} \cdot \frac{9,81 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0,45}} = 0,188 \text{ M/c}$$

Так как число Re=555>500, показатель степени при коэффициенте стесненности равен n=2,39.

Таким образом, гидравлическая крупность твердого при стесненном падении (для плотной упаковки горной массы объемная концентрация равна *S*=0,6)

$$\vartheta_{\rm CT} = (1-S)^{2,39} \cdot \vartheta_{\rm CB} = (1-0,6) \cdot 0,188 = 0,021 \,{\rm m/c}$$

9. Для сохранения режима псевдоожижения при восходящем потоке равном  $\vartheta_{osc} = \vartheta_{cm} = 0,021 \text{ м/c}$  диаметр плоскости псевдоожижения равен:

$$\vartheta_{\text{ож}} = \vartheta_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{ож}}}{\omega_{\text{ож}}}$$
или  $\vartheta_{\text{ож}} = \frac{Q_{\text{ож}}}{0,775 \cdot D_{\text{Д}}^2}$ 

$$D_{\text{Д}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{ож}}}{0,775 \cdot \vartheta_{c\text{т}}}} = \sqrt{\frac{0,0278}{0,775 \cdot 0,021}} = 1,3 \text{ м}$$

10. Осевая скорость выхода кольцевой струи:

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

ИЛИ

$$\vartheta = \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}; \ \vartheta = \sqrt{403} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,44} = 3,37 \text{ m/c}$$

11. Тангенциальная скорость при выходе кольцевой струи:

$$U = \vartheta \cdot A \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}; \quad U = \vartheta 3,37 \cdot 1,803 \cdot \frac{0,403}{1 - 0,403} = 4,1 \text{ M/c}$$

12. Результирующая скорость (в плоскости выхода закрученного потока):

$$U_0^{'} = \sqrt{\vartheta^2 + U^2} = \sqrt{3,37^2 + 4,1^2} = 5,3$$
 м/с

Поскольку результирующая струя вылетает под углом к оси разгрузочной трубы, поэтому:

$$\cos a \cdot \frac{U}{U'_0} = \frac{4,1}{5,31} = 0,772$$

Уточненная результирующая скорость равна:

$$U_0 = U'_0 \cdot \cos a = 5,31 \cdot 0,772 = 4,1 \text{ M/c}$$

13. Скорость кольцевой струи в плоскости вытеснения равна гидравлической крупности горной массы при объемной концентрации, на которую был первоначально рассчитан гидротранспорт (*S*<sub>т</sub>=0,15)

$$\vartheta_{\rm CT} = (1 - S_0)^n \cdot \vartheta_{\rm CB}$$

При числе  $Re = \frac{\vartheta_{\rm CB} \cdot d_{\rm T}}{\mu} = \frac{0,188 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 560$ 

Так как *Re*>550, то *n*=2,39

$$\vartheta_{\rm ct} = (1 - 0.15)^{2.39} \cdot 0.188 = 0.93$$
 м/с

14. Исходя из равенства соблюдения скоростей в плоскости вытеснения разгрузочного трубопровода: текущей скорости кольцевой струи ( $\vartheta_x$ ) и гидравлической крупности горной массы ( $\vartheta_{cm}$ ) для заданной объемной концентрации гидросмеси в транспортном трубопроводе ( $S_{T}$ ) получим относительное расстояние от уровня выхода кольцевой струи до плоскости вытеснения к толщине кольцевой струи

$$\vartheta_{\rm x} = U_0 \cdot \frac{1}{1 + 0.365 \cdot \frac{l}{\rm B}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\rm okp}}}$$

где *в* – толщина кромки кольцевой струи (*в*=47 *мм*), м;

*l* – длина кольцевой струи, м;

*p*<sub>0</sub>, *p*<sub>окр</sub> – соответственно плотность воды и окружающей среды (горной массы при плотной упаковке *S*=0,6

$$\rho_{\rm okp} = \rho_{\rm T} \cdot S + (1 - S) \cdot \rho_0$$

где 
$$p_T$$
 – плотность твердого ( $p_T = 1460 \ \kappa c/M^3$ ), кг/м<sup>3</sup>.  
 $\rho_{\text{окр}} = 1400 \cdot 0.6 + (1 - 0.6) \cdot 1000 = 1240 \ \kappa r/M^3$ 

Преобразуя текущую скорость кольцевой струи *v<sub>x</sub>*, с учетом того, что в плоскости вытеснения соблюдается условие:

$$\vartheta_{\rm x} = \vartheta_{\rm ct}$$

Получим искомые относительные расстояния:

$$\frac{l}{b} = \frac{1}{0,365} \cdot \left( \frac{U_0}{\vartheta_{\rm CT}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\rm okp}}} - 1 \right)$$

$$\frac{l}{b} = \frac{1}{0,365} \cdot \left(\frac{4,1}{0,93} \cdot \sqrt{\frac{1000}{1240}} - 1\right) = 8,1$$

т.е. абсолютное расстояние соответствует величине

$$l = 8,1 \cdot b = 4,73 \cdot 47 = 381$$
 мм = 0,38 м

#### Выводы по главе 4:

1. 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 псевдоожиженный слой.

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

3. Установленный геометрический параметр центробежной насадки определяется соотношением площади поперечного сечения транспортного пульповода (выходной патрубок) к площади поперечного сечения напорного водовода (входной патрубок); 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.

4. Установленный коэффициент расхода  $\mu$  при при формировании кольцевой закрученной струи центробежной насадки неоднозначно влияет на коэффициент сжатия струи  $\varepsilon$  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  $Q_{max} = \varepsilon^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0$ .

5. При радиусе закручивания потока жидкости в соосных патрубках по внешней образующей поверхности пульповода  $R_n$  максимальный расход через центробежную насадку можно определить по уравнению  $Q_{max} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2-\varepsilon}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \cdot \omega_0.$ 

# ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОПОДЪЕМА ЗАГРУЗОЧНЫМИ АППАРАТАМИ ВИХРЕВОГО ПУЛЬПОПРИГОТОВЛЕНИЯ

#### 5.1. Технологическая структура предлагаемой системы гидроподъема

Расчеты отечественных и зарубежных специалистов показывают, что рентабельное горное предприятие должно иметь годовую производительность 3-4 млн. тонн горной массы при сроке существования 20-25 лет. При затратах на горно-обогатительное предприятие в несколько миллиардов долларов, содержание металлов должно обеспечивать годовое производство до 35 тысяч тонн меди, 40 тысяч тонн никеля, 3 тысячи тонн кобальта и до 500 тысяч тонн марганца.

Запасы железомарганцевых образований Мирового океана характеризуются более высокими средними содержаниями ценных компонентов. В результате освоения ЖМК перспективная потребность промышленности РФ может быть удовлетворена в кобальте более, чем на 100 %; в марганце – на 75 %; в никеле – на 20 %; в меди – на 10 %.

Для того чтобы не подрывать рынок цветных металлов, Конвенцией ООН по морскому праву устанавливаются некоторые ограничения на уровень добычи железомарганцевых конкреций. В течение 20 лет каждой страной-заявителем может быть добыто не более 465000 т никеля в год и попутно (в зависимости от состава конкреций) соответствующее количество меди, кобальта и марганца.

Учитывая среднее содержание никеля в ЖМК Российского участка и с учетом коэффициента извлечения никеля при обогащении и металлургическом переделе руд (0,9), ежегодный уровень добычи ЖМК определен в 3,5 млн. т. Тогда стоимость годовой продукции морского горного предприятия на базе месторождения ЖМК (никель, медь, кобальт, марганец) можно оценить примерно в 1 млрд. долл., что за 20 лет эксплуатации соответственно составит порядка 20 млрд. долл. Можно полагать, что при таких масштабах работ, уникальных даже для континентальных месторождений, основной проблемой является создание техники и технологии, особая сложность которых обусловлена также экстремальными условиями их эксплуатации.

Вопросам гидроподъема полезных ископаемых со дна морей и океанов посвящено достаточное количество публикаций [4,5,9,11,12,13,21,24,52,53,54,59,63,65,66,69,85,88,91,92]. При разработке месторождений Мирового океана предлагаются следующие технологические операции, определяющие структуру промышленного комплекса: сбор и выемка горной массы на дне; подъем на поверхность; поддержание добычного комплекса на поверхности океана; транспортировка твердых полезных ископаемых (ТПИ) в порты и к месту переработки [95].

Соответственно морской добычной комплекс для разработки месторождений ТПИ состоит из следующих систем:

- глубоководных добычных машин и механизмов (агрегаты сбора);

- систем транспортировки горной массы на поверхность (системы подъема);

- надводных плавсредств обеспечения [16,63] (добычное судно или платформа);

- средств транспортировки горной массы в порты (судно-сборщик);

- вспомогательных систем (спускоподъемные операции, управления, контроля, надводной и подводной навигации, получения и хранения информации об окружающей среде) [16,63].

Первые две, наиболее конструктивно сложные системы, определяющие способ разработки глубоководных месторождений, производительность и режим работы всего предприятия, представляют собой добычной комплекс [63].

Для варианта промышленной системы выемки с трубопроводной системой подъема (в частности с загрузочными аппаратами) и самоходным агрегатом сбора [63], некоторые специалисты предлагают установку между ними буфера, который располагается на торце транспортного трубопровода и защищает

агрегаты сбора от динамических нагрузок трубопровода и судна, а также несет на себе отдельное оборудование.

Использование в придонной части загрузочных аппаратов с коаксиально закрученными струями при подъеме ЖМК на борт судна может решить [63]. основные трудности Это, прежде всего, исключит контакт транспортируемых частиц с движущимися и проточными частями напорных агрегатов, обуславливающий абразивный износ последних и переизмельчение полезного ископаемого в процессе подъема. Даст возможность создать и доставить на плавсредство гидросмесь высокой плотности, а также использовать вместо низконапорных грунтовых насосов значительно более мощные, работающие на воде, и самое главное, использовать для гидроподъема камерные аппараты не требующие, как правило, высоких степеней дробления исходного материала [23].

Загрузочные аппараты в системе глубоководного гидроподъема технологически должны размещаться на погружной платформе, сообщенной с добычным судном основного транспортного трубопровода и системы кобелей и тросов (рис.5.1).

Из литературных источников [5,20,22,2350,56,61,68,84] известно, что рудная зона между двумя субмеридиальными трансформными разломами Кларион и Клиппертон в целом представляет собой абиссальную равнину с минимальными глубинами 4000 - 4500 м на востоке и максимальными 5200 - 5400 м на западе [19].

Рельеф дна этой зоны в основном пологоволнистый с чередованием депрессий и валообразных поднятий, относительная высота которых преимущественно составляет десятки метров при уклонах около I : 100. Встречаются также абиссальные холмы высотой от 50 - 100м до 200 - 400 м с основаниями диаметром 10 км и более. Поэтому погружная платформа должна размещаться на незначительной высоте над поверхностью дна (порядка 450 - 500 м) с целью исключения влияния на эксплуатацию добычного комплекса морфологии дна (рис. 5.1а.) [98]. При этом в процессе проведения работ

153

платформа буксируется добычным [15,16] судном. Подача твердого полезного ископаемого в загрузочно-обменные емкости от агрегатов сбора может осуществляться как в виде гидросмеси любой плотности по гибким трубопроводам, так и в виде отдельных конкреций механическим способом, поступающих сначала в приемный бункер-накопитель [15] сообщенный с камерой герметизирующим элементом, например, поворотным затвором (патент на изобретение № 4654003). При этом будет рассматриваться ниже, загрузочно-обменные емкости одновременно выполняют функции сгустителей в придонной части океана.

Слив замещаемой в процессе загрузки железомарганцевых конкреций технологической воды, в значительной степени насыщенной осадками и вмещающими породами, осуществляется в придонной части океана, в районе проведения добычных работ в выработанное пространство, что играет основную роль в обеспечении экологической безопасности предложенной гидроподъемной системы. Причем сброс может осуществляться непосредственно с погружной платформы, что до некоторой степени увеличит мутность водных толщ в районе добычных агрегатов, затрудняя работу следящей телеаппаратуры [98] (рис. 5.16, 6).

Предпочтительнее вариант, где предусмотрен слив технологической воды по гибким трубопроводам, а выработанное пространство, что позволит значительно увеличить эффективность работы всего комплекса технических средств в целом (рис. 5.1.а).

В процессе загрузки при аккумуляции железомарганцевых конкреций в емкостях основная масса вмещающих илов и гидробионтов, обитающих на конкрециях и на поверхности дна, а также верхний слой осадков будут в процессе сепарации отделяться в зоне противотоков в верхней части камер и срабатываться обратно в придонную часть океана.

Это позволит в принципе предотвратить загрязнение поверхности океана и основных водных толщ, а относительно высокая плотность сливаемой гидросмеси соответственно будет способствовать более быстрому осаждению

154

твердой части и ускоренному восстановлению биоценоза в районе проведения добычных работ. При этом разработанная система гидроподъема твердых полезных ископаемых дает возможность избежать попадание в верхние толщи радиоактивных элементов и тяжелых металлов, аккумулируемых морскими организмами и животными, истощающих фито- и зоопланктоны, вызывающих гибель личинок и рыб.



Рис.5.1. Принципиальная схема гидроподъема полезных ископаемых: а – морской добычной комплекс со сферическими загрузочно-обменными емкостями; б–загрузочный аппарат с торообразными загрузочно-обменными емкостями; в–то же, со [64] сферическими емкостями

1 — пульпопровод; 2 — загрузочно-обменная емкость; 3 — погружная платформа; 4 — загрузочный трубопровод; 5 — сливной трубопровод; 6 — агрегат сбора;7 водовод; 8 — загрузочный пульповод; 9 — узел загрузки; 10 — задвижка на водоводе слива; 11 — задвижка на водоводе; 12 — внутренний патрубок пульповода загрузочного устройства [64]. Таким образом, по трубопроводу на плавсредство будет поступать в значительной степени уже отмытые конкреции, что в свою очередь, значительно упростит технологическую схему отделения твердого материала на борту плавсредства, а также резко сократит количество взвешенных частиц на сливе, т.е. обеспечит быстрое разбавление взвесей до минимальных концентраций.

Как следует из вышеприведенного анализа экологическая безопасность систем трубопроводного гидроподъема зависит также от типа и расстановки напорного оборудования. Так, в системах с использованием загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления высоконапорные насосы, работающие на воде, могут устанавливаться, как на погружной платформе вместе с загрузочно-обменными емкостями, так и на борту добычного судна.

Причем, если для реализации первого варианта необходима разработка [40] специальных конструкций погружных агрегатов, отсутствующих не только в ассортименте, но и в проектных разработках отечественного насосостроения, то для второго варианта расстановки могут с успехом использоваться выпускаемые в настоящее время промышленностью как центробежные многоступенчатые насосы (например, типа ЦНС, ЦНСГ или ЦИС), так и центробежные питательные насосы (ПЭ-580-195). Размещение напорного оборудования на борту добычного судна потребует соответственно сооружения еще одного трубопровода от плавсредства до погружной платформы - напорного водопровода. Однако, по нашему мнению, капитальные затраты на сооружение водовода будут значительно ниже расходов на проектирование и изготовление высоконапорных агрегатов в погружном исполнении. При размещении насосной плавсредства станции на борту значительно упростится техническое обслуживание и ремонтные работы, а также исключается необходимость прокладки в придонную часть дорогостоящей кабельной силовой линии. Кроме того, при такой системе водоснабжения поступление в верхние толщи низкотемпературных мутьевых потоков с глубин 5000 - 5500 м в районе проведения добычных работ, насыщаемых в результате работы агрегатов сбора большим количеством взвесей, влияющих на экосистему пелагиали. Водозабор

с поверхности океана при естественных температуре ( i = +20°C) и солености позволит по завершении процесса подъема сбрасывать значительно менее охлажденную (по сравнению с грунтонасосным и эрлифтным способами) и мутную технологическую воду, сохраняя температурные и оптические свойства водных толщ, обеспечивая неизменную интенсивность фотосинтеза и сохраняя условия жизнедеятельности обитателей океанической толщи, особенно организмы фильтрации.

Особенно важно отметить, что при использовании дополнительных стадий осветления на борту плавсредства технология гидроподъема с установкой насосного оборудования на борту позволит организовать замкнутую оборотную систему водоснабжения, обеспечивающую практически полную экологическую безопасность собственно системы подъема.

Другими сложными техническими аспектами разработки глубоководных месторождений и, в частности ЖМК, связанными с характером их размещения на дне, малой мощностью (условная плотность залегания 15 - 25 кг/м<sup>2</sup> при h= 5 - 7 см), а также с отсутствием четких границ между участками с различной плотностью, является то, что, как правило, высокопроизводительное выемочное оборудование вынуждено работать в сложной динамической системе, непрерывно изменяющей под воздействием внешних факторов свои рабочие параметры. Проведенные расчеты показали, что для добычи 100 тыс.т конкреций судно-носитель совместно с агрегатом сбора и трубным ставом должно пройти около 7 тыс.км сложной траектории пути при непостоянном режиме работы выемочного оборудования. Это обуславливает значительные технические сложности в организации подачи непрерывно грузопотока твердого полезного ископаемого на борт плавсредства, а также производительной и непрерывной работы системы подъема.

Некоторыми специалистами было предложено концентрировать ЖМК непосредственно на дне в промежуточные склады с последующей их разработкой. Такое предложение позволило бы до некоторой степени решить проблему непрерывности подачи ТПИ. Однако необходимо отметить, что при переходе судна от одного промежуточного склада к другому систему подъема необходимо будет соответственно останавливать, а также вызывает сомнения возможность длительного хранения ЖМК в навалах на дне. В результате постоянно меняющих направляющие и силу придонных течений изначально железомарганцевые конкреции могут растекаться тонким слоем по поверхности океанического дна. Поэтому такие буферные склады могут сохраняться не продолжительный период времени. Кроме того, они, возможно, потребуют наличия в добычном комплексе дополнительного плавсредства и выемочного оборудования.

Необходимо также отметить, что французскими специалистами разработан ряд технологических схем насосного гидроподъема, в которых в придонных частях систем подъема предусмотрена специальная стадия подготовки, гомогенизированной гидросмеси. Исходные ЖМК в этом случае переизмельчаются дроблением и соединяются с вмещающими глинистыми породами в пропорции 55÷45 с целью стабилизации. При этом гомогенная пульпа позволяет резко действующие устойчивая снизить в райзере гидравлические сопротивления И использовать гидроподъема ДЛЯ высоконапорные поршневые насосы с равномерным их рассредоточением по длине трубопровода, подавая на борт гидросмесь высокой плотности (до 60%). Однако, в таких схемах системы извлечения на поверхность полезного компонента значительно усложняется и возрастает количество взвешенных частиц полезного компонента в сливе.

Использование загрузочных аппаратов предлагаемой конструкции по сравнению с другими способами гидроподъема (в том числе и других конструкций камерных питателей) снижает негативную нагрузку по загрязнению океанических толщ воды за счет сброса твердых частиц из верхнего слива аппарата в придонную часть выработанного пространства. Таким образом, реализуется способ укладки пустых пород на дно океана и сепарация поднимаемой на судно гидросмеси (можно полагать – включающей черновой концентрат железомарганцевых конкреций).

158

Специалисты выделяют четыре способа укладки пород:

- нерегулируемый сброс гидросмеси на поверхности океана с последующим ее гравитационным осаждением;

- сброс гидросмеси на глубине нескольких сот метров ниже поверхности океана;
 - укладка гидросмеси на дно в придонном слое;

- разделение поднятой на поверхность океана гидросмеси, слив осветленной воды и транспортирование всей поднятой горной массы в порт.

Первые два способа укладки хвостов характерны в основном для насосного, эрлифтного и насосно-сепарационного способов подъема. При этом при реализации насосного и эрлифтного способов подъема на борт судна будет поступать соответственно двух или трехфазная смесь, содержащая наибольшее количество вмещающих радиоляриевых илов и переизмельченного материала железомарганцевых конкреций с отдельными более крупными включениями [29,63]. На борту плавсредства доставленные последних ЖМК, после сложную систему отделения прохождения через OT несущей среды, складируются в соответствующих емкостях, а отработанная технологическая вода, насыщенная мелкодисперсным материалом, предназначается к сбросу на поверхности океана или на некоторой глубине [15,63].

## 5.2. Экологическое обоснование системы гидроподъема

С точки зрения экологии наиболее опасными являются районы работы основного технологического оборудования. По объему и степени экологической опасности выделяются четыре уровня (рис. 5.2):

«О» - поверхность океана в месте работы добычного судна;

«I» - на глубине 1000 м - уровень слива хвостовых пульп и район работы грунтонасосной станции;



**Рис. 5.2.** Схема возможного оборудования гидродобычного комплекса по загрязнению водных толщ на различных уровнях глубин океана.

# Перечень оборудования к определению возможных загрязнителей при его работе [60].

1. Добычное судно с приемным и обогатительным оборудованием, системой слива хвостов.

- 2. Подъемный транспортный трубопровод.
- 3. Система аварийных сбросных устройств гидросмеси.
- 4. Грунтонасосная станция с электродвигателем и транспортной станцией.
- 5. Система электрозадвижек и запорной арматуры.
- 6. Полупогружная платформа, или плавучий модуль.
- 7. Приемный бункер-накопитель.
- 8. Погружная трансформаторная станция.
- 9. Погружной грунтонасос придонного гидротранспорта.
- 10. Гибкий пульпопровод придонного гидротранспорта.
- 11. Жесткое шарнирное соединение с агрегатом сбора.
- 12. Агрегат сбора.
- 13. Подруливающее гребное устройство.
- 14. Многочерпаковое выемочное оборудование.
- 15. Шнековая дробилка с электродвигателем.
- 16. Приводное устройство ходовой части агрегата сбора.
- 17. Система кабельного электроснабжения.
- 18. Приемный бортовой бункер для сливных гидросмесей.
- Насос для закачивания хвостов обогащения и гидроподъема на глубину H = 1000 м.
- 20. Сливной трубопровод.

21. Насос с электродвигателем для подачи промывочной воды в сборочный лоток и на шнек агрегата сбора.

«I I» - на высоте 130 м от океанического дна - уровень сгущения подаваемой от агрегата сбора гидросмеси в бункере-накопителе и район работы придонного погружного грунтонасоса;

«I I I» - собственно уровень океанического дна - район работы агрегата сбора

Практически самый большой по объему и самый опасный В технологическом отношении это І-й уровень, расположенный на глубине 500 – 1000 м. Здесь происходит интенсивное физическое и химическое загрязнение водной среды. Затапливаемые на такую глубину технологические пульпы оказывают огромное негативное влияние на условия обитания фито – и зоопланктона, изменяют оптические и физические свойства водных толщ. Проводимый в 1991 году эксперимент «ВІЕ» уточнил представление о геоэкологической обстановке на полигонах в границах месторождения железомарганцевых конкреций на поле Кларион-Клиппертон, в условиях которой будет осуществляться добыча [69]. В частности, были установлены технологические параметры глубоководного намыва вмещающих пород, и для снижения экологических негативных последствий рекомендовано вести намыв (укладку) пород в зоне выемки ЖМК.

Как было отмечено выше, загрузочный аппарат с коаксиально закрученными струями в процессе вертикального гидротранспортирования функционально работает как сгуститель и может сепарировать шламовые фракции от зерновой части, что конструктивно предопределяет возможность его одновременно использовать и при гидроподъеме, и при сливе полидисперсных частиц для их укладки в выработанное пространство после выемки агрегатом сбора в придонную часть океана (рис. 5.3)

На рисунке 5.3 показана первая принципиальная технологическая схема, в которой водонасыщенный твердый материал от агрегата сбора 7 (самоходного или буксируемого) по гибкому пульповоду 8 поступает через приемный бункер в камеру аппарата 3, при этом в процессе загрузки, замещенная твердым материалом загрязненная жидкость со шламовыми частицами по сливному трубопроводу 5 поступает в придонный слой океана. По окончании процесса загрузки насосом, расположенным на судне, по трубопроводу 10 в камеру установки подается вода и происходит вытеснение сформированной в аппарате гидросмеси конкреций со средней консистенцией более [46] 35 % по объему.

Процесс формирования гидросмеси осуществляется в данной конструкции аппарата вихрями закрученной кольцевой струи напорной воды, создаваемой в узле разгрузки *6*. С целью получения непрерывного потока гидросмеси в схеме гидроподъема используются два и более загрузочных аппарата, работающих попеременно на один трубопровод.





1—плвсредство; 2—пульпопровод; 3—загрузочно-обменная емкость; 4—погружная платформа; 5— сливной трубопровод; 6— узел разгрузки; 7— агрегат сбора; 8—загрузочный пульповод; 9—узел разгрузки; 10—водовод.

Исследование характера выноса твердых частиц в процессе разгрузки камер аппарата в зависимости от содержания в гидросмеси глинистых фракций были проведены [24] на кафедре комплексного освоения и экологии россыпных и морских месторождений (рис.5.4) [41,71,75,88,89].

При проведении лабораторных исследований изучались оптимальные скорости загрузки в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры.



Рис. 5.4. Принципиальная схема опытной установки и проведения экспериментальных исследований. загрузочно-обменная емкость; 2 - пульповод; 3 - шланг слива; 4 - шланг подачи воды в загрузочно-обменную емкость; 5 – запорная арматура; 6 - насос; 7 – емкость с водой; 8 - мерные емкости.

При этом определялся вынос в загружаемой гидросмеси не только глинистых частиц, но и фракций ильменита, так как пробы были представлены каолинизированными ильменитсодержащими породами.

Количественные оценки допустимых скоростей восходящего потока в камере гидротранспортного аппарата определялись исходя из баланса гравитационных сил минеральных частиц и сил сопротивления несущей жидкости загружаемой гидросмеси [24].

При объемных концентрациях глины S=0,15; S<sub>2</sub>=0,3; S<sub>3</sub>=0,45 была установлена скорость выноса минеральных частиц.

По результатам эксперимента представлен график, на котором достаточно отчетливо видна рабочая зона выноса твердых фракций (рис. 5.5).



**Рис. 5.5.** Зависимость выноса тонких фракций от скорости загрузки аппарата с учетом глинистости загружаемой горной массы и заполнения массообменных емкостей.

Допуская, что режим движения восходящего потока в гидротранспортном аппарате ламинарный, при коэффициенте лобового сопротивления Ψ=24/Re ψ=24/Re=24·v/U<sub>cb</sub>·d<sub>т</sub> было получено уравнение для допустимых скоростей выноса шламовых минеральных частиц:

$$U_{\rm CB} = (1-S)^{\rm n} \cdot \frac{1}{18} \cdot \frac{{\rm g} \cdot d_{\rm T}^2}{\nu} \cdot \frac{\rho_{\rm T} - \rho_1}{\rho_1}$$

$$(5.1)$$

где  $\rho_1$ ;  $\rho_T$  – плотность глинистой суспензии и твердого, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – кинематическая вязкость глинистой суспензии м<sup>2</sup>/с;

- d<sub>T</sub> характерный геометрический параметр минеральной частицы, м;
- S общая объемная концентрация твердого, ед;
- n показатель стесненности потока;
- g ускорение свободного падения, м/с.

Во втором технологическом варианте глубоководного подъема ЖМК нами предлагается совместная работа загрузочного аппарата с пульсационной колонной, образующие полифункциональный массообменно-транспортный комплекс, новизна которого подтверждена патентом (рис.5.6). В обоих вариантах массообменные аппараты должны располагаться на погружной платформе, сообщенной с добычным судном посредством основного подъемного трубопровода и системой тросов и кабелей [37,57,63].

В принципиальной схеме на рисунке 5.6, гидросмесь от агрегата сбора 6 по гибкому пульпопроводу 4 поступает в пульсационную колонну 7, где происходит обесшламливание минерального сырья. Скопившийся в нижней части пульсационной колонны 7 материал направляется в загрузочную емкость массообменного аппарата 2, а шламовые частицы по трубопроводу 5 поступают в выработанное пространство. По окончании процесса загрузки также, как и в вышеприведенной схеме в камеру установки подается вода и происходит вытеснение сформированной в аппарате гидросмеси (со средней консистенцией более 35 % по объему) по магистральному пульповоду 1 на добычное судно [37].

Пульсационная колонна, предназначенная для разделения песчаношламовых фракций, представляет собой вертикальный гидравлический классификатор с импульсным восходящим потоком промывной жидкости имеет простую конструкцию, удобную по геометрическим размерам форму.

В настоящее время пульсационные реакторы широко применяются в химической и гидрометаллургической промышленности во многих странах.

Они обладают большой производительностью, низкой удельной энергоемкостью, малыми капитальными затратами, отсутствием движущихся частей внутри рабочей зоны аппарата.



Рис. 5.6. Схема работы загрузочного аппарата в комплексе с полифункциональным массообменно-транспортным аппаратом. 1 – система магистральных трубопроводов (водовода и пульповода); 2 – загрузочная емкость массобменного 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 [64].

Внедрение пульсационных колонн началось с решения чисто технических задач неорганической химической промышленности: экстракции, сорбции и промывки продукта. Последующее развитие исследований привело к расширению первоначальной области применения пульсационных колонн [28].

В настоящее время, в промышленности пульсационные колонны используются в области выщелачивания и классификации как составные части сложных технологических схем переработки сырья. Например, классификация применяется при необходимости раздельной обработки крупных и мелких классов [7,28].

Экономическая целесообразность применения пульсационной техники в сравнении с аппаратами других типов доказана во всех случаях ее применения. Сравнение технико-экономических показателей промывных пульсационных колонн с устройствами других типов однозначно свидетельствует о целесообразности их применения [28].

Преимуществом пульсационной колонны является отсутствие в ее конструкции движущихся частей. При небольших скоростях движения гидросмеси она может эксплуатироваться довольно продолжительный срок не останавливаясь на ремонт и техническое обслуживание.

На кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ были проведены исследования по классификации песчано-глинистых частиц в пульсационной колонне. В частности – процессов обесшламливания и обоснование выбора при этом граничного размера твердых фракций при их выносе из верхней части (конуса) аппарата (рис.5.7) [88,89].

Экспериментальные работы проводились на образцах различного гранулометрического состава. Максимальная амплитуда колебаний в пульсационной колонне регулировалась дискретно и составила 0,5; 0,84; 1,0; 1,17; 1,34 см для обеих частот 0,89 и 0,57 Гц и 2,09 для частоты 0,57Гц.

168



Рис. 5.7. Схема экспериментального стенда: 1 - пульсационная колонна; 2 пульсационная камера; 3 - питатель; 4 - емкость с промывной водой; 5 - насос; 6 - компрессор; 7- пульсатор; 8-электродвигатель; 9-шкивы; 10, 11манометры; 12-ротаметр; 13-емкость для слива шламов; 14гидротранспортный аппарат

В результате обработки лабораторных экспериментов получена удельная производительность пульсационной колонны по промытым пескам в зависимости от амплитуды, частоты колебаний и средней скорости восходящего потока [28] которые представлены на рисунке 5.8 и 5.9.

Анализируя кинетику выноса шламов из верхней части (конуса) колонны, было установлено, что выносятся только те частицы, которые в процессе интенсивного перемешивания в колонном аппарате не успели осесть под воздействием гравитации на определенную глубину за время нисходящего потока в конусе [28,57].



Рис. 5.8. Удельная производительность пульсационной колонны по промытым пескам. [144

С учетом вышесказанного для условий глубоководного подъема нами получен патент РФ на изобретение №2558594 от 10.08.2015 «Способ ведения массообменных процессов и устройство для его осуществления» (рис.5.10) в котором технологически взаимоувязана работа загрузочного с вихревым пульпоприготовлением [37] аппарата и пульсационной колонны, т.е. предложен полифункциональный массообменный гидроподъемный комплекс. Он осуществляет процесс сепарации, отделяя зерновую часть полезного компонента

горной массы от глинистых (иловых) фракций в пульсационной колонне. При этом зерновая компонента гидросмеси загрузочным аппаратом поднимается на плавсредство, а тонкие частицы (шламы) укладываются в выработанное пространство.



Рис 5.9. Гранулометрические кривые при f=0,56Гц и U=3,8ст/с в зависимости от амплитуды колебаний [144].

Конструктивно полифункциональный массообменный гидротранспортный аппарат включает колонну с закрепленными по вертикали перфорированными горизонтальными тарелками 7 и оборудованную установленной в нижней части корпуса аппарата специальной пульсационной камерой 5, а в нижней точке днища – систему разгрузки в виде разгрузочнотранспортного узла 11, герметически сообщенного с корпусом самого аппарата через специальный делитель-дозатор потока 10. Исходный материал (в виде пульпы) подается в колонный аппарат 1 сверху. По мере заполнения корпуса 2 твердым материалом в верхней части аппарата через систему сбора 3 и сливной патрубок 4 происходит слив промывочной жидкости с удаляемым мелкодисперсным материалом.

Одновременно вне колонного аппарата с помощью пульсационной камеры 5 и пульсатора 6 в колонный аппарат снизу подается энергетическая жидкость (вода). За счет пульсационных колебаний жидкости и под действием сил гравитации вдоль корпуса колонного аппарата, а также многократных изменений направлений воздействия потока на твердые частицы на перфорированных тарелках 7 происходит расслоение твердых частиц по гидравлической крупности. В условиях противотока глинистые фракции выводятся в верхний слив 3, а твердые частицы постепенно осаждаются и накапливаются в придонной конической части 8 днища колонны. Далее накопленный материал перемещается через выпускное отверстие 9, и, проходя делитель потока-дозатор 10 поступает в гидротранспортный подъемный аппарат 11, который формирует гидросмесь из зернистой полезной компоненты (в среднем ~30% по объему).

При этом обеспечивается значительное снижение энергоемкости процесса, а также металлоемкости всего комплекса за счет уменьшения диаметра подъемного трубопровода, т.е. часть расхода двухфазной смеси (шламы) удаляются на уровне полупогружной платформы через сливной патрубок 4 в выработанное пространство.

Одновременно с этим могут быть решены другие важные проблемы – повышение степени извлечения полезного компонента и снижения экологической нагрузки на водную среду океана.

Анализируя кинетику выноса шламов из верхней части (конуса) колонны, было установлено, что выносятся только те частицы, которые в процессе интенсивного перемешивания в колонном аппарате не успели осесть под

172

воздействием гравитации на определенную глубину за время нисходящего потока в конусе [28,57].



Рис.5.10. Полифункциональный массообменный гидротранспортный аппарат. 1 – колонный аппарат; 2 – корпус колонного аппарата; 3 – система сбора шламовых частиц; 4 – сливной патрубок; 5 –пульсационная камера; 6 – пульсатор; 7 – перфорированные тарелки; 8 – коническая часть днища колонны; 9 – выпускное отверстие; 10 – делитель потока-дозатор; 11 – гидротранспортный подъемный аппарат.

При этом в процессе проведения работ платформа буксируется добычным судном. Подача твердого полезного ископаемого в аппараты (в I и во II вариантах) от агрегатов сбора может осуществляться как в виде гидросмеси, так и в виде отдельных конкреций механическим способом, поступающих сначала в приемный бункер накопитель с дроблением негабаритных включений [37, 60,78].

### 5.3. Технико-энергетическая характеристика гидроподъема

Расчетные технологические схемы глубоководного гидроподъема железомарганцевых конкреций с использованием эрлифта и загрузочного аппарата, представлены на рисунке 5.11 и 5.12.

Уравнение баланса в эрлифтном 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  $P_{CH}$  +  $P_{AT}$  +  $P_{t2}$  .

Следовательно

 $P_{\Pi} + P_{AT} - P_{CO} = P_{CH} + P_{AT} + P_{t2}, \qquad (1)$ 

где: РАТ – атмосферное давление ( $P_{AT} = 101325 \Pi a$ );

 $P_{\Pi}$  – давление внешнего столба, определяется по выражению (13),  $\Pi a$ ;  $P_{CO}$  – общие потери давления во всасывающей линии, определяется по

выражению (16), Па;

 $P_{CH}$  – потери напора от веса в линии нагнетания, определяется по выражению (18),  $\Pi a$ ;



Рис.5.11. Расчетная схема гидроподъемника с использованием эрлифта:
D – диаметр подъемного трубопровода, м; Qt – производительность по твердому, т/час; Qw – производительность по воде, т/м<sup>3</sup>; S – объемная концентрация по твердому; U<sub>0</sub> – необходимый расход газа м<sup>3</sup>/мин; H – глубина подъема, м; h<sub>BC</sub> – длина линии всасывания, м; h<sub>H</sub> – длина линии нагнетания, м; h<sub>0</sub> – высота борта судна, м.

Р<sub>t2</sub> – потери на трение трехфазной смеси в линии нагнетания, определяется по выражению (19), *Па*.

Баланс давлений и сопротивлений технологии гидроподъема с использованием загрузочного аппарата представлен следующим образом:

$$P_{\hat{a}\hat{o}\,\hat{i}} + D_{\hat{i}} = D_{\hat{a}\hat{o}\,\hat{i}} + P_{\tilde{n}\hat{o}} + P_{\tilde{r}\,\hat{a}\hat{o}} - P_{0} + P_{\hat{o}\,\hat{o}} + P_{\hat{a}\hat{a}\,\hat{o}}$$

$$(27)$$

$$_{\text{WJIM}} P_{\hat{a}\hat{o}\,\hat{i}} + D_{\hat{i}} = D_{\hat{a}\hat{o}\,\hat{i}} + \rho_{\hat{i}} \cdot g \cdot \hat{I}_{\hat{i}} + \rho_{\hat{i}} \cdot g \cdot h_{0} - \rho_{0} \cdot g \cdot H_{\hat{i}} + \rho_{0} \cdot g \cdot h_{\hat{o}\,\hat{o}} + \rho_{\hat{i}} \cdot g \cdot h_{\hat{a}\hat{a}\,\hat{o}}$$

$$(27)$$

 $P_{cm} = \rho_n \cdot g \cdot H_{_{H}}$  - потери давления на гидростатический столб гидросмеси в подъемной трубе, Па;

 $P_{nep} = \rho_n \cdot g \cdot h_0$  - потери давления на гидростатический столб гидросмеси на переподъем на борт судна, Па;

 $P_0 = \rho_0 \cdot g \cdot H_{_{H}}$  - гидростатический столб воды (при 2-х трубной системе подъема), Па;

 $P_{mp} = \rho_o \cdot g \cdot h_{mp}$  - потери давления на трение в подъемной трубе, Па;

 $P_{_{Bblx}} = \rho_n \cdot g \cdot h_{_{Bblx}}$  - потери давления на выходе гидросмеси, Па;

где: *P*<sub>атм</sub> – атмосферное давление, Па (Р<sub>атм</sub> = 101325 Па);

*P<sub>n</sub>* – необходимое давление нагнетания (паспортное давление, развиваемое насосом, Па);

 $\rho_n$  – плотность пульпы, кг/м<sup>3</sup>;

 $\rho_0$  – плотность морской воды, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_0 = 1025$  кг/м<sup>3</sup>);

Н<sub>и</sub>-длина линии нагнетания, м;

*h*<sub>0</sub> – высота борта судна, м;

g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;



Рис.5.12. Принципиальная схема комплекса с загрузочными аппаратами. 1 – плавсредство, 2 – электронасосный агрегат, 3 – пульповод, 4 – обратный клапан на загрузочном пульповоде, 5 – узел разгрузки, 6 – загрузочно-обменная емкость, 7 – погружная платформа, 8 – задвижка на водоводе, 9 – узел разгрузки, 10 – сливной трубопровод, 11 – загрузочный пульповод, 12 – агрегат сбора, 13 – водовод.

*h*<sub>вых</sub>-потери напора на выходе гидросмеси, м вод. ст.;

*h*<sub>*mp*</sub> – потери напора на трение в нагнетательной линии, м вод. ст.;

Удельная энергоемкость *q* гидроподъема ЖМК определялась по уравнению, выведенному В.И. Александровым.

$$q = \frac{i_{\rm CM} \cdot \mathbf{g} \cdot \rho_{\rm I}}{3.6 \cdot S \cdot \rho_{\rm T}} \tag{4.43}$$

где *i*<sub>см</sub> – удельные потери напора;

 $\rho_n$ ,  $\rho_T$  – плотность пульпы и твердых частиц соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

*S* – концентрация гидросмеси.

Методика расчета вертикального гидротранспорта железомарганцевых конкреций определялась нами по стандартной методике Смолдырева А.Е., при этом гидравлическая крупность ЖМК при свободном падении вычислялась нами на основании экспериментальных исследований, проведенных на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства по уравнению

$$V_0 = \frac{v}{d_{\rm cp}} \cdot \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}} - (0.081 \cdot \ln(d) + 0.43), \qquad 2.35$$

где *v* – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;

*Аr* – число Архимеда;

*d<sub>cp</sub>* –размер частиц (средневзвешенный), по фракционному составу, м., а скорости стесненного падения по следующей зависимости

$$V_0 = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}} - (0.081 \cdot \ln(d) + 0.43).$$
(2.35)

Результаты расчетов показывают, что в сопоставимых условиях для минеральных частиц средней крупностью до 10 мм при глубине эрлифтного подъема 2000 м при часовой производительности 150, 300 и 600 т/час расчетные диаметры вертикального пульповода составляют 520 мм, 680 мм (при 600 т/час), а удельная энергоемкость процесса изменяется от 11 кВт/т до 16,25 кВт/т.

При использовании загрузочного аппарата внутренний диаметр вертикального става составляет 250-327 мм, а значение удельной энергоемкости *q на*ходится в пределах 5,5 кВт/т.

Таким образом, металлоемкость вертикальных трубопроводов, выраженная в их диаметрах, в принципе уменьшается в два раза, а энергоемкость снижается более чем на 200%.

### Выводы к главе 5.

- Анализ различных технологий гидроподъема твердых полезных ископаемых с учетом их экологической безопасности показывает, что использование загрузочного аппарата предлагаемой конструкции снижает негативную нагрузку по загрязнению океанических толщ воды за счет сброса твердых частиц в придонную часть выработанного пространства.
- Предложена технологическая структура глубоководного гидроподъема с загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления, размещаемыми на погружной платформе, расположенной на высоте 400-500 м. над поверхностью дна.
- 3. В процессе загрузки ЖМК в аппарат от агрегата сбора, слив технологической воды насыщенной шламовыми частицами и вмещаемыми породами осуществляется в придонную часть океана (выработанное пространство), позволяющий снизить мутность вышележащих водных толщ. При этом зерновая составляющая с высокой ее концентрацией направляется в вертикальный пульповод на плавсредство.
- 4. 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 степени ее заполнения.

- 5. 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.
- 6. Для глубокоговодного гидроподъема твердых полезных ископаемых предложен 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 пульповоду плавсредство, вертикальному на а тонкие частицы укладываются в выработанное пространство.

Применение полифункционального комплекса (загрузочного аппарата на основе кольцевых закрученных струй жидкости и классификационной колонны) для освоения глубоководных месторождений железомарганцевых конкреций значительно снижает энергоемкость и металлоемкость процесса вертикального гидротранспортирования соответственно в 3 и два раза.
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили решить задачу по обоснованию энергосберегающей технологии разработки глубоководных месторождений железомарганцевых конкреций загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления с укладкой шламовых фракций в выработанное пространство.

Основные выводы, полученные научные и практические результаты диссертационного исследования, сводятся к следующему:

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 (вытеснения) псевдоожижения разгрузки В транспортный возле узла трубопровод высоконасыщенной гидросмеси (~30% и более).

4. Восходящая скорость определяет границы псевдоожижения 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 псевдоожижения

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 псевдоожиженный слой.

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

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  $\mu$  при формировании кольцевой закрученной струи центробежной насадки неоднозначно влияет на коэффициент сжатия струи  $\varepsilon$  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<sub>n</sub>* 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

184

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Государственное издание технико-теоретической литературы. Москва, 1951 г.
- 2. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов., Госэнергоиздат, 1948, с.282.
- Акрамов А.А. Исследование процесса дозирования сыпучего материала струйчатым дозатором из камерного питателя в трубопровод. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. г. Донецк, 1966 г.
- Александров И. Л. Развитие исследований технологии глу-боководной добычи железомарганцевых конкреций во Франции и Японии. М., 1992. 36 с.
- Андреев С.И., Бабаева С.Ф. Минеральные ресурсы Мирового океана прагматическая реальность обозримого будущего или призрачный геополитический мираж. ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, 2014 г.
- 6. Аникеева Л.И. др. Атлас морфологических типов железомарганцевых конкреций Тихого океана. Printed in Geofizika Brno Czechoslovakia, 1985 г.
- Антонычев М. Я., Нагирняк Ф. И. Аналитические и экспериментальные исследования поведения минеральных зерен в процессах классификации в водной среде, Тр. Ин-та Уралмеханобр. Вып. 15. -1969, с. 118-211
- Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К., Сакаев А.Ю. Аэродинамика закрученной струи. М., «Энергия», 1977, с.3-5.
- Борисов А.А. Расчет и выбор оптимальных характеристик гидравлического комплекса для добычи железомаргонцевых конкреций со дна Мирового океана (Методические рекомендации) / Борисов А.А., Грибанов А. М., Пащенко В.С., Шевченко Ф.Л. – Геленджик:ПО «Южморгеология», 1990. – 56с.
- 10.Борщевский Ю.Т. Теория одно- и двухфазного турбулентного пограничного слоя. Киев. «Выща школа», 1975 г., 192 с.

- 11.Брюховецкий О.С., Хныкин В.Ф., Дробаденко В.П. Отчет о научноисследовательской работе «Исследования и выбор рациональных вариантов глубоководного гидроподъема с использованием загрузочных аппаратов. Москва, МГРИ, 1991г.
- 12.Бубис Ю.В., Молочников Л.И., Томаков П.И. Устройство для подводной добычи породы. Авторское свидетельство на изобретение № 1761956, М.: Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР, 1992.
- 13.Бубис Ю.В., Оздоева Б.М. Особенности глубоководного намыва. -М.: МГГРУ. — Межвузовский сборник «Комплексное освоение и экология россыпных и морских месторождений», 2004.
- 14.Вильмис А.Л. Аналитическая оценка и систематизация загрузочных аппаратов камерного типа. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S11. C. 168-177.
- 15.Вильмис А.Л. Методическое обоснование параметров глубоководного подъема. Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи внауках о Земле» (Москва : РГГРУ, 5–7 апреля, 2017 г.): в 2 т.: доклады / – Т. 1. – М. : МГРИ-РГГРУ, 2017. – 516 с. С.384-385
- 16.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.
- 17.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, 2015г.) в 2т.: доклады./. –Т. 2. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2015.–546с. С.28-29.

- 18.Вильмис А.Л. Вильмис А.Л. Полифункциональный массообменный освоения глубоководных гидротранспортный аппарат для месторождений//Статья в сборнике трудов XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "НОВЫЕ ИДЕИ В НАУКАХ 0 ЗЕМЛЕ" 7-ми В томах. Москва, 02-05 апреля 2019 г. Стр. 291-294
- 19.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.
- 20.Гасик М. И. Железомарганцевые конкреции мирового океана: юрисдикция, геология, геохимия, металлургия. Геология и полезные ископаемые мирового океана. № 1 / 2005
- 21.Гейер В.Г., Груба В.И., Акрамов А.А. Условия подобия движения материала в камерных питалелях. Сб. Гидравлическая добыча угля., 1964, вып. 17(5), с.64-69.
- 22.Глумов И. Ф. Автоматизированные геофизические комплексы для изучения геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. — М.: Недра, 1986.— с. 344.
- 23.Глумов Н.Ф., Задорнов М.М., Углов Б.Д., Болотов Л.А., Кулындышев В.А. Твердые полезные ископаемые дна Мирового океана и оценка стоимости Российских недр: Журнал «Минеральные ресурсы России. – 1997.
- 24.Головин А.В. Совершенствование технологии освоения редкометальных россыпных месторождений при рациональном использовании гидротранспорта высоконасыщенных смесей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2002 г.
- 25.Гольдштик М.А., Яворский Н.И. О затопленных струях. Прикладнаяматематика и механика., вып. 4, 1984, с. 950-956.

- 26.Гостинцев Ю.А., Зайцев В.А. О кинематическом подобии турбулентного закрученного потока в трубе. «ИФЖ», 1971 г., т.ХХ №3.
- 27.Гребенюк В.К. Исследование рабочего процесса и основных элементов струйного камерного питателя для гидротранспорта. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. г. Днепропетровск, 1970 г.
- 28. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. Перевод с английского. Под ред. Крашенинникова СЮ. М., Мир, 1987 г., 588 с.
- 29.Дик И.Г., Матвиенко О.В., Нессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии. 2000. Т.34. № 5. С. 478-488.
- 30.Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. Справочное пособ.–М.:Недра,1991.-304 с.
- 31.Дмитриев Г.П., Смолдырев А.Е. Гидротранспорт руд и концентратов. М., ИГД им. Скочинского. М., 1966 г., 59 с.
- 32.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.
- 33.Дробаденко В.П, Селезнев В.М., Луконина О.А. Отчет о НИР. Изыскание технологии добычных работ и транспорта с использованием гидромеханизации в условиях ВДГМК. М., 1984 г.
- 34.Дробаденко В.П., Александров И.И., Луконина О.А. //Обзор зарубежных материалов по специальным гидроподъемным установкам в комплексе разведки и добычи ТПИ со дна морей// «Геология и разведка» М.1988 г.
- 35.Дробаденко В.П. Интенсификация гидромеханизированной разработки россыпных месторождений на основе пульпоприготовления

закрученными струями. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1990 г.-470 с.

- 36.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Вильмис А.Л., Кудряшов Р.В. Исследование особенностей истечения струй центробежных насадок в загрузочных аппаратах напорного гидротранспорта. Общественнонаучный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том13.
- 37.Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Луконина О.А. Интенсификация массообменных процессов для классификации и гидротранспортирования песчано-глинистых пород. Материалы XIII Международной научнопрактической 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
- 38.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.
- 39.Дробаденко В.П., Луконина О.А., Семёнова К.М., Шарков А.А. Использование эффекта искусственного смерча в природоохранных геотехнологиях. Естественные науки в современном мире. Номер: 2 Год: 2012 Стр.44-49
- 40.Дробаденко В.П., Луконина О.А.//Разработка технологии гидроподъема ТПИ с использованием загрузочных аппаратов// В сб. Технические средства и методы освоения океанов и морей. МГРИ 1989 г.
- 41.Дробаденко В.П., Малухин Г.Н., Вильмис А.Л., Малухин Н.Г., Кудряшов P.B. Возникновение стабильного процесса псевдоожижения горной массы в объёме загрузочного аппарата при напорном гидротранспортировании. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том13. 57-60.

- 42.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г. Освоение шельфовых и глубоководных месторождений - перспектива расширения сырьевой базы России. Недропользование XXI век. 2010. № 3. С. 34-40.
- 43.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Богданов П.В. Современные гидротехнологии при сооружении технологических скважин и добыче полезных ископаемых. Разведка и охрана недр. №8, 2009 г, Стр.39-42
- 44. 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.
- 45.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Козлов М.Ю. Перспективы освоения шельфовых и глубоководных месторождений полезных ископаемых. Вестник РАЕН. 2013. Т. 13. № 5. С. 99-103.
- 46.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Козлов М.Ю. Обоснование технологических параметров эжекторной добычи магнетитовых песков в шельфовой зоне. Горный информационноаналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 11. Гидромеханизация, 2015.
- 47.Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Лев А.М. Расширение области применения новых конструкций гидротранспортных аппаратов // Избранные научные труды. К 100-летию со дня рождения профессора С.М. Шорохова. М.: РГГРУ. 2006.
- 48.Заря А.В. Разработка системы дозирования твердых материалов камерного загрузочного аппарата. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Донецк, 1985 г.
- 49.Заря С., Роко М. Влияние винтовой закрутки потока гидросмеси на производительность по транспортированию твердого материала. Материалы первого Международного симпозиума. Технология

гидромеханизированных земляных работ. Перевод с англ. А.С. Стари-кова. М., «Транспорт», 1980 г., с.53-65.

- 50.Кайнозойский рудогенез в шельфовых областях России = Cenozoic ore genesis in the Russia shelf areas : монография / А. М. Иванова, А. Н. Смирнов, В. И. Ушаков ; под ред. В. Л. Иванова. Санкт-Петербург : ВНИИокеанология, 2005. 167 с. : ил. ; 29 см. (Труды НИИГА-ВНИИокеанология / Рос. акад. наук, Всерос. НИИ геологии и минер. ресурсов Мирового океана им. И. С. Грамберга ; т. 207). Библиогр.: с. 158-167. 300 экз.
- 51.Ким-Чен-Сон. К выбору питателя для открытых горных работ. Сб. Гидромеханизация земляных и открытых горных работ. М., ЦНИИТЭСТРОМ, 1968 г., с.58-68.
- 52.Кириченко, Е.А. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмогидротранспортных системах: моногр./ Е.А. Кириченко, О.Г. Гоман, В.Е. Кириченко, А.В. Романюков. -Д.: Национальный горный университет, 2012. 268 с.
- 53.Кисляков, В.Е. Основы новой технологии разработки грунтов шельфа на больших глубинах / В.Е. Кисляков, П.В. Катышев, И.А.Баранова // Горная промышленность. 2013. №3. С. 96.
- 54.Козлов М.Ю., Луконина О.А., Насонов Д.А. Технические средства для освоения глубоководных месторождений дна Мирового океана. Материалы XII международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». Москва, 2015г.
- 55.Колодов О.М. Исследования параметров гидротранспорта крупнокусковых вскрышных пород с применением загрузочных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1966 г.
- 56.Кондратенко А. В., Неизвестное Я. В., Балыков В. Ю., Воронов М. А. Инженерно-геологические исследова-ния глубоководных донных

отложений в естественном залегании // Морские инженерно-геологические исследования. — СПб. : ВНИИОкеангеология, 2003. С. 7-19.

- 57.Корпачева С.М., Захаров Е.И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. М., Атомиздат, 1980г.
- 58.Лахтин В.П., Кочетков В.Н. Сравнительные испытания некоторых способов разгрузки камерных питателей. Сб.трудов ВНИИнеруд и гидромех. Вып.32. Тольятти, 1972 г., с.40-45.
- 59.Лезгинцев Г.М., Контарь Е.А., Кузнецов Г.И. Разработ-ка глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых Мирового океана. //Разработка месторождений твердых полезных ископаемых. Итоги науки и техники. М.:ВИНИГИУ1976. Т.14. с.365-436.
- 60.Луконина О.А. Научно-техническое обоснование технологии глубоководного подъема с использованием загрузочных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1991 г.
- 61.Люй Шихуэй. Строение, состав и генетические особенности железомарганцевых конкреций провинции Кларион-Клиппертон (Тихий океан). Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологоминералогических наук. Москва, 2008.
- 62.Малухин Н.Г., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л. Научно-методическое обоснование эрлифтного гидроподъёма при освоении месторождений дна морей и океанов. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 11. Гидромеханизация, 2015.
- 63.Марковский К.Ю. Совершенствование технологии крупнообъемного опробования глубоководных месторождений ЖМК с использованием загрузочных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва 1999 г.
- 64. Минеральные ресурсы Мирового океана. Концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.) / гл. ред. С.И. Андреев. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2007. 97 с.

- 65.Мызенкова Л.Ф., Бернацкая К.Ф. Проблемы создания морской добычной техники (по зарубежным данным). В сб. Разработка россыпных месторождений. М., МГРИ, 1967, с.112-121.
- 66.Нарышкина О. А. Выбор технологии глубоководного гидроподъема при добыче железомарганцевых конкреций в субтропической зоне Тихого океана. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва.
- 67.Неизвестнов Я.В. и др. Инженерная геология рудной провинции Кларион
  Клиппертон в Тихом океане : Труды ВНИИОкеангеологии М-ва природных ресурсов РФ и РАН. Т. 197. СПб. 2004
- 68.Неизвестное Я. В., Кондратенко А. В., Козлов С. А. и др. Инженерная геология рудной провинции Кларион-Клиппертон в Тихом океане: сб. тр. ВНИИОкеангеология. Т. 197. — СПб. : Наука, 2004. — 281 с.
- 69.Оздоева Б. М. Технология глубоководного намыва пород при добыче железомарганцевых образований Мирового океана : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.18.- Москва, 2006.- 114 с.
- 70.Отчет по НИР «Исследование процессов подготовки ЖМК к транспортированию и разработка рекомендации по выбору и созданию оборудование» ВНИПИОкеанмаш, Днепропетровск, 1966.
- 71.Отчет по НИР Технология разработки россыпных месторождений. МГИ, М., 1985.
- 72.Отчет по НИР. «Исследование и выбор рациональных вариантов глубоководного гидроподъема твердых полезных ископаемых с использованием загрузочных аппаратов». Москва, МГРИ, 1990 г.
- 73.Отчет по НИР. «Исследование и выбор рациональных, вариантов глубоководного гидроподъема ТПИ с использованием загрузочных аппаратов». М., МГРИ, 1990г.
- 74.Отчет по НИР. Технологиия подводной разработки россыпных месторождений. МГИ, М., 1985.

- 75.Отчет РФФИ по проекту 14-05-00167 «Научно-техническое обоснование освоения месторождений морского и океанического дна на основе формирования и движения высоконасыщенных гидросмесей по вертикальному трубопроводу». 2015 г.
- 76.Патент №2558594 от 10.08.2015 «Способ ведения массообменных процессов и устройство для его осуществления» Дробаденко В.П., Малухин Н.Г. и др.
- 77.Патент Канады №1329631 от 17.05.94 Method and apparatus for conveying materials in bulk by liquid pressure. Дробаденко В.П., Луконина О.А. и др.
- 78.Патент на изобретение № 2558594 РФ, МПК В01D11/02 В03B5/02 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.
- 79.Патент РФ № 2055642 от 10.03.96. Устройство для классификации и обогащения полезных ископаемых. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г.
- 80.Патент РФ №2077465 от 20.04.97 «Загрузочно-обменная емкость для гидротранспортирования сыпучих материалов» Дробаденко В.П., Малухин Н.Г и др.
- 81.Патент США № 4992006 от 12.02.96. Device for hydraulic conveyance of loose materials. Дробаденко В П., Луконина О.А.
- 82.Патент Финляндии №94513 от 15.06.95 «Laite irtoainesten hydrauliseksi siirtamiseksi anordning for hydraulisk overforing av losa material. Дробаденко В.П., Луконина О.А. и др.
- 83.Рощупкин Д.В. Разработка грунтов земснарядами. М., «Транспорт», 1969 г., 136 с.
- 84.Савенко В.С. Физико-химический анализ процессов формирования железомарганцевых конкреций в океане. М.: ГЕОС, 2004. 156с.
- 85.Семенова К.М. Совершенствование технологии гидроотвалообразования на основе подачи высоконасыщенных гидросмесей с учетом

геоморфологических факторов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2013 г. – 172 с.

- 86.Сержан С.Л. Обоснование рациональных параметров системы грунтозаборным устройством и гидродвигателем для добычи железомарганцевых конкреций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Санкт-Петербург – 2015.
- 87.Система подъема. Пояснительная записка УД.80.82.00.00.00. ООО. ПЗ-1.Ч.П. Днепропетровск, ВНИПИокеанмаш: 1990.75 с. ДСП.
- 88.Способы и устройства для добычи твердых полезных ископаемых при разработке глубоководных месторождений дна морей и океанов. М., ДНИГРИ, 1969г.
- 89.Тарасов Ю.Д. Комплексы для добычи железомарганцевых конкреций с морского дна / Ю.Д. Тарасов // Горное оборудование и электромеханика. -2011. - № 2. - С. 17-25.
- 90. Теперин Н.И. Движение струи в массе жидкости. Тр.СНИИИР, вып.10,1933, с 26-31.
- 91. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов / Г.А. Нурок, Ю.В. Бруякин, Ю.В. Бубис и др.; под общ.ред. В.В. Ржевского.
   М.: Недра, 1979. 381 с.
- 92.Тимошенко С.В. Обоснование технологии освоения подводных россыпных месторождений с обесшламливанием минерального сырья пульсационными потоками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 2002г.
- 93.Шевчук И.А. Железомарганцевые конкреции и перспективы их освоения. «Новые идеи в науках о Земле», XIII Международная научнопрактическая конференция (2017; Москва).» Москва 05 – 07 апреля 2017 года Стр. 309-310.
- 94.Ялтанец И.М. Проектирование открытых гидромеханизированных и дражных разработок месторождений. Издание 3-е, перераб. и доп. М.: МГГУ, 2003. - 760с.

- 95.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.
- 96.Bonatt E., Kraemer T., Rydetl H. S. Classification and genesis of submarine iron

  manganese deposits // Ferromarganese Deposits on the Ocean Floor
  (D.R.Ilorn, Ed.), Nat. Sci. Found., Washington. 1976. P. 159-166.
- 97.Marine mining: a new begining. Ed. Humphrey, P.B. Hawwaii: Dept of planning and economic development, 1985, p.317
- 98.McKelvey V. E., Wright N. A., Bowen R. W. Analy-sis of the World Distribution of Metal-Rich Subsia Manganese Nodules.— Geol. Surv. Circular, 1983, N 886
- 99.Proposed technologies for mining deep-seabed polymetallic nodules. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica, August 3-6, 1999.
- 100. Ruhn M. Nitze M, Funke B. «Verfahren Zum Eincklussen van Feststoffen in hydrailishe Föfdersysteme and Doppelbehälteranfgebelz». Патент ФРГ ДЕ 3144067AI B 65 G 53/40.
- 101. Новости энергетики. [Электронный ресурс]. –Электрон. дан. Режим доступа: <u>https://ruscable.blogspot.com/2011/08/blog-post\_751.html</u>
- 102. Геология и минерагения Мирового океана. [Электронный ресурс]. –
   Электрон. дан. Режим доступа:

https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-249.pdf

103. Во глубине сульфидных руд. [Электронный ресурс]. –Электрон. дан.
 – Режим доступа: https://www.kommersant.ru/doc/1691229