

На правах рукописи



КОЗЛОВ Максим Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОПОДЪЕМА
ПРИ ОСВОЕНИИ ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ НА ОСНОВЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Специальность 25.00.18 – Технология освоения морских месторождений
полезных ископаемых*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дробаденко Валерий Павлович

Официальные оппоненты: **Ялтанец Иван Михайлович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), Горный институт кафедра «Геотехнологии освоения недр», профессор, г. Москва

Малухин Григорий Николаевич,
кандидат технических наук, ФГБУ «Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья имени Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»), заместитель начальника отдела геолого-экономической оценки, экологии и лицензирования, г. Москва

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

Защита состоится «08» июня 2016 года в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.121.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте www.mgri-rggru.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Назаров А.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы заключается в необходимости освоения минерально-сырьевых ресурсов шельфовой зоны РФ в соответствии с Федеральным законом от 30.11.1995 №187-ФЗ (ред. от 02.05.2015) «О континентальном шельфе Российской Федерации», распоряжениями Правительства РФ: от 08.12.2010 №2205-р «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» и от 22.06.2015 №1143-р «Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016-2031 годы», учитывающие различные аспекты, связанные с топливно-энергетическим, социальным, экономическим, геополитическим и оборонным значениями для национальных интересов России.

Главный вопрос – это обеспечение надежного обоснования национальных интересов России в области расширения минерально-сырьевой базы, как геологическими доказательствами, так и научно-техническими средствами освоения месторождений полезных ископаемых.

В настоящее время геологоразведочные изыскания морских минеральных ресурсов намного опережают работы связанные с созданием технологических способов и технических средств для добычи и подъема полезных ископаемых со дна морей и океанов. Поэтому существует настоятельная необходимость разработки современных эффективных технологий, позволяющих проводить горнотранспортные работы с высокими технико-экономическими показателями.

Целью работы является совершенствование технологий добычи твердых полезных ископаемых на различных глубинах шельфа на основе разработки научно-методического обеспечения процессов гидродъема и технико-энергетической оценки работы гидротранспортного оборудования.

Основной идеей работы является обоснование рациональной технологии гидродъема и разработка методики расчета параметров гидродъема с учетом установления скоростей свободного и стесненного падения железомарганцевых конкреций (ЖМК) и процесса их дезинтеграции при работе различного оборудования (эжектора, эрлифта, грунтового насоса).

Задачи исследований:

- анализ аналитических и экспериментальных работ по определению гидравлической крупности твердых частиц в свободных и стесненных условиях;
- разработка методики и проведение экспериментальных исследований по определению скоростей свободного и стесненного падения различных фракций железомарганцевых конкреций;
- анализ результатов экспериментов и их сравнительное сопоставление с существующими расчетными уравнениями, получение функциональных зависимостей;
- исследование влияния физических свойств среды и выявление закономерностей изменения конечных скоростей свободного и стесненного

падения ЖМК;

- разработка методики и проведение экспериментальных работ по исследованию дезинтеграции железомарганцевых конкреций в процессе гидроподъема;

- анализ результатов экспериментальных исследований и определение степени дезинтеграции ЖМК при работе оборудования для различных глубин моря;

- разработка методики расчета основных параметров гидротранспорта по вертикальным трубопроводам для железомарганцевых конкреций;

- технико-энергетическая оценка параметров средств добычи конкреций в зависимости от глубины шельфовых месторождений.

Научные методы исследований. Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение практического опыта и литературных данных, лабораторные исследования, обобщение и обработка результатов исследований, полученных аналитическими, расчетными и экспериментальными путями, установление функциональных зависимостей. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с применением методов математической статистики, математических и графических программ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые экспериментально установлены диапазон и закономерности изменения скоростей свободного и стесненного падения (гидравлическая крупность) железомарганцевых конкреций различного фракционного состава в зависимости от изменения параметров несущей среды (температуры, солености) на основе методики, разработанной автором;

- получена функциональная зависимость, характеризующаяся критериями Рейнольдса (Re) и Архимеда (Ar), для определения гидравлической крупности в условиях свободного падения ЖМК сфероидальной формы крупностью от 5 до 30 мм, учитывающая влияние плотности, формы частиц и физические свойства среды;

- установлена функциональная зависимость скорости стесненного падения ЖМК на основе предложенной закономерности изменения гидравлической крупности конкреций с коэффициентом снижения скорости (k);

- экспериментально установлена зависимость дезинтеграции железомарганцевых конкреций при различных способах гидроподъема (эрлифт, эжектор и грунтовой насос) с морских глубин от 12 до 72 м и определена степень разрушения конкреций по классу $-5+1$ мм, как нетоварной продукции.

Защищаемые научные положения:

1. Скорости свободного падения железомарганцевых конкреций (V_0) крупностью от 5 до 30 мм должны определяться критериальным уравнением с корректировочной функцией скорости, учитывающей диаметр и характеристику частиц $V_0^{сн} = 0,081 \cdot \ln(d) + 0,43$, установленной в результате

аппроксимации расчетной и экспериментальной функциональной зависимости $V_0 = f(d)$.

2. Скорости стесненного падения железомарганцевых конкреций крупностью от 5 до 30 мм должны определяться по установленной в работе функциональной зависимости скорости свободного падения с коэффициентом снижения скорости (k):

$$V_{CT} = \left[\frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43) \right] \cdot k.$$

3. При движении гидросмеси по транспортному трубопроводу в условиях морских глубин от 10 до 72 м идет последовательный процесс дезинтеграции железомарганцевых конкреций по классу $-5+1$ мм, как нетоварной продукции, зависящий от конструктивных особенностей применяемого оборудования, степень разрушения конкреций изменяется от 3 до 15,5 % в сопоставимых условиях работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы основаны на использовании широкого диапазона научных методов исследований, включающих анализ и обобщение теоретических и экспериментальных работ, проведении лабораторных исследований и достоверной сходимости результатов с расчетными и практическими данными.

Личный вклад автора заключается в проведении анализа аналитических и экспериментальных работ по определению гидравлической крупности различных твердых частиц; разработке методики экспериментальных исследований для определения скорости свободного и стесненного падения ЖМК в зависимости от крупности частиц, при изменении параметров несущей среды (температуры и солености); установлении на основе проведенных лабораторных исследований функциональных зависимостей для определения гидравлической крупности конкреций в свободных и стесненных условиях; установлении степени дезинтеграции ЖМК при работе различного гидротранспортного оборудования; разработке методики расчета основных параметров вертикального гидротранспортирования для железомарганцевых конкреций; проведении технико-энергетической оценки параметров средств добычи конкреций в зависимости от глубины шельфовых месторождений; формулировании основных выводов и рекомендаций работы.

Научное значение работы. Впервые определена гидравлическая крупность шельфовых железомарганцевых конкреций, получены функциональные зависимости для определения скоростей свободного и стесненного падения при различных параметрах несущей среды (температуры, солености); установлена степень дезинтеграции ЖМК при вертикальном подъеме различным гидротранспортным оборудованием.

Практическая значимость работы заключается в разработке научно-методических рекомендаций для расчетов гидродинамических параметров при проектировании технологических комплексов гидроподъема ЖМК для

различных глубин на шельфе.

Реализация выводов и рекомендаций. Результаты работы используются кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий для специальностей 130400 «Горное дело», 131201 «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты проведенных исследований докладывались на международных конференциях «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2013, 2015 гг.), международных научных школах молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2012–2014 гг.), международной научной школе академика К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» РАН (Москва, ИПКОН РАН, 2014 г.), научной конференции «Физико-химическая геотехнология» (Москва, МГГУ, 2013 г.), съезде гидромеханизаторов России (Москва, НИТУ «МИСиС», 2015 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 16 опубликованных работах, в том числе в 5 статьях, в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации (ВАК при Минобрнауки России). По тематике исследований получен патент на изобретение РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 147 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 32 рисунка, 18 таблиц, списка литературы из 82 наименований.

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

В **первой главе** приведены общие положения о минерально-сырьевом потенциале морских месторождений твердых полезных ископаемых и перспективы освоения шельфовых месторождений РФ. Проведен анализ опытных работ, технологических способов и технических средств освоения прибрежно-морских месторождений.

Во **второй главе** проведен анализ литературных источников, рассмотрены существующие методы определения гидравлической крупности; разработана методика экспериментального изучения скоростей свободного падения ЖМК; проведены экспериментальные исследования по определению скоростей свободного и стесненного падения различных фракций; проведен анализ результатов экспериментов и их сравнительное сопоставление с расчетными уравнениями различных исследователей и предложены функциональные зависимости; исследовано влияния физических свойств среды на конечные скорости падения конкреций.

Третья глава посвящена проведенным экспериментальным

исследованиям по дезинтеграции железомарганцевых конкреций; определению степени дезинтеграции ЖМК при работе оборудования для различных глубин моря.

В четвертой главе представлена разработанная методика расчета основных параметров гидротранспорта ЖМК по вертикальным трубопроводам. Проведена технико-энергетическая оценка параметров различных технических средств добычи конкреций (эрлифта, эжектора, грунтонасоса) в зависимости от глубины шельфовых месторождений.

В заключении излагаются общие выводы и практические рекомендации.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору Дробаденко Валерию Павловичу, за постоянное внимание и неоценимую помощь в выполнении данной диссертации, а также всему коллективу кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ-РГГРУ, за помощь при проведении лабораторных экспериментов и консультации.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) по гранту РФФИ № 14-05-00167 «Научно-техническое обоснование освоения месторождений морского и океанического дна на основе формирования и движения высоконасыщенных гидросмесей по вертикальному трубопроводу».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Вопросы техники и технологии освоения полезных ископаемых в морских условиях отражены в работах В. В. Ржевского, Г. А. Нурока, Ю. В. Бубиса, Е. А. Козловского, Ю. В. Бруякина, С. Ю. Истошина, Л. Н. Молочникова, В. Б. Добрецова, Е. А. Контаря, В. П. Дробаденко, Н. Г. Малухина, И. М. Ялтанца, С. М. Штина, О. С. Брюховецкого, В. И. Александрова, Б. К. Ширяева, Б. К. Широкова, Ю. В. Кириченко, О. А. Лукониной, С. В. Тимошенко и других ученых.

Изучение и оценка минерально-сырьевого потенциала шельфовых областей в СССР, а потом и в России активно развивались с начала 1960-х годов работами специализированных производственных и научно-исследовательских геологических организаций: «ВНИИОкеангеология», «Институт океанологии РАН», «ЦНИГРИ», «Южморгеология», «Севморгеология», «Севвостгеология», «Дальморгеология», «Якутскгеология», «ВНИИМоргео», «ИМГРЭ» и др.

Шельф Российской Федерации является самым обширным в мире. В настоящее время российскими геологами интенсивно ведутся работы по обоснованию расширения шельфа за пределами 200-мильной зоны за счет присоединения к нему подводных хребтов Ломоносова и Менделеева, в конечном итоге, если МОМД ООН признает этот фактор, площадь шельфа России увеличится на 1,2 млн. км².

Практически во всех морских акваториях, омывающих территорию РФ

последние три десятилетия ведутся геологические изыскания по поиску и разведке прибрежно-морских россыпей и нерудного минерального сырья, включая техногенное. В результате составлены прогнозно-металлогенические и минералогенические карты на перспективные россыпные районы с выделением участков под поисково-оценочные и геологоразведочные работы. Конечным итогом явилось обнаружение целого ряда перспективных россыпей и проявлений на шельфе России.

По оценкам специалистов прибрежно-морские россыпные месторождения в ближайшем десятилетии станут основными источниками различного минерального сырья: касситерита, ильменита, магнетита, монацита, циркона, рутила, алмазов, золота и др.

Потенциальными для разработки являются морские россыпи Чукотки и Курильской гряды. Однако суровая температурная обстановка, характерная для шельфа Арктики и отчасти Дальнего Востока, создает дополнительные сложности в промышленном освоении месторождений.

Перспективными районами для первоочередного освоения прибрежно-морских россыпей, в ближайшие годы, можно считать шельф Балтийского моря, расположенный в благоприятных климатических условиях и характеризующийся мелководностью: средняя глубина 48 м максимальная 459 м. В нем сконцентрированы значительные запасы янтаря, магнетитовых песков и сопутствующие им элементы, а также железомарганцевых конкреций (ЖМК), которые являются нетрадиционным видом марганцевого сырья.

Составленная нами систематизация способов и технических средств для освоения шельфа по результатам проведенного анализа современного состояния и изучения данного вопроса позволяет рассматривать специфику их применения на различных глубинах дна морей и океанов.

С научно-технической точки зрения оптимальная глубина разработки месторождений полезных ископаемых должна соответствовать техническим характеристикам добычного комплекса, обеспечивающего максимальную производительность при минимальных затратах электроэнергии с учетом физико-механических свойств минерального сырья в конкретных горнотехнических условиях. Исходя из этих основных методологических положений, принимая во внимание, что при средних глубинах шельфа, принятых до 200 м, а максимальной ~400 м можно считать, что на сегодняшний день наиболее технологически обоснованными и технически целесообразными являются грунтонасосные, эжекторные и эрлифтные морские снаряды, эффективность которых во многом определяется процессами грунтозабора и гидроподъема горной массы на поверхность. При изменении глубины разработки и физико-механических свойств пород, в первую очередь объемной плотности и гидравлической крупности минеральных частиц, их формы и размера, изменяются условия всасывания (грунтозабора) и режим перемещения гидросмеси по вертикальному пульповоду. Это вызывает необходимость в проведении исследований гидравлической крупности ЖМК в

свободных и стесненных условиях для определения основных расчетных параметров гидротранспортирования: критической скорости $V_{кр}$, а также выявления минимальной степени дезинтеграции конкреций ввиду их хрупкости при работе различного гидротранспортного оборудования (эрлифта, эжектора, грунтового насоса).

Первое защищаемое научное положение.

Скорости свободного падения железомарганцевых конкреций (V_0) крупностью от 5 до 30 мм должны определяться критериальным уравнением с корректировочной функцией скорости, учитывающей диаметр и характеристику частиц $V_0^{ch} = 0,081 \cdot \ln(d) + 0,43$, установленной в результате аппроксимации расчетной и экспериментальной функциональной зависимости $V_0 = f(d)$.

Гидравлическая крупность железомарганцевых конкреций в свободных и стесненных условиях является основным расчетным параметром методики обоснования вертикального гидроподъема.

Исследованием конечных скоростей свободного падения твердых частиц различного минералогенического состава занималось большое количество ученых, в том числе П. Р. Риттингер, Дж. Г. Стокс, Ю. С. Аллен, П. В. Лященко, Б. В. Кизельватер, А. П. Юфин, А. Е. Смолдырев, В. Н. Гончаров, Р. Б. Розенбаум, О. М. Годес и др. Ими были проведены многочисленные исследования, в результате которых установлены функциональные зависимости и предложены многочисленные эмпирические уравнения. Однако для железомарганцевых конкреций таких исследования не проводились.

Лабораторные исследования по кинематике движения частиц ЖМК проводились на экспериментальном стенде, включающий крупномасштабные цилиндрические сосуды из оргстекла высотой 3800 мм, диаметром 125 и 250 мм.

Для проведения стендовых испытаний была использована технологическая проба ЖМК рудной залежи «Восточная-1» (Финский залив), из которой для проведения экспериментов были отобраны гладкие шарообразные конкреции диаметрами 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм. Средняя плотность частиц составляла 1630 кг/м^3 .

Анализ результатов проведенных экспериментов и сопоставление их с расчетными значениями скоростей свободного падения частиц железомарганцевых конкреций по большинству уравнений различных исследователей для чисел Рейнольдса $Re > 500$ показывают приемлемые результаты лишь для небольшого диапазона крупности зерен. Это позволяет сделать вывод о значительных отклонениях значений $V_0 = f(d)$ от экспериментальных (рис. 1), расчетные скорости свободного падения для частиц железомарганцевых конкреций более 10 мм завышены в $\sim 1,2-2$ раза.

Наиболее близкие результаты показывает уравнение Р. Б. Розенбаум,

О. М. Тодеса, К. С. Шифрина, что дает основание считать его базовым для определения скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций. Однако в диапазоне твердых фракций более 10 мм наблюдается завышение скоростей от 15 до 30 %.

Для более корректного вычисления величин V_0 следует ввести в это уравнение поправочный коэффициент $V_0^{ch} = 0,081 \cdot \ln(d) + 0,43$, установленный в результате аппроксимации расчетной и экспериментальной функциональной зависимости $V_0 = f(d)$ (рис. 1).

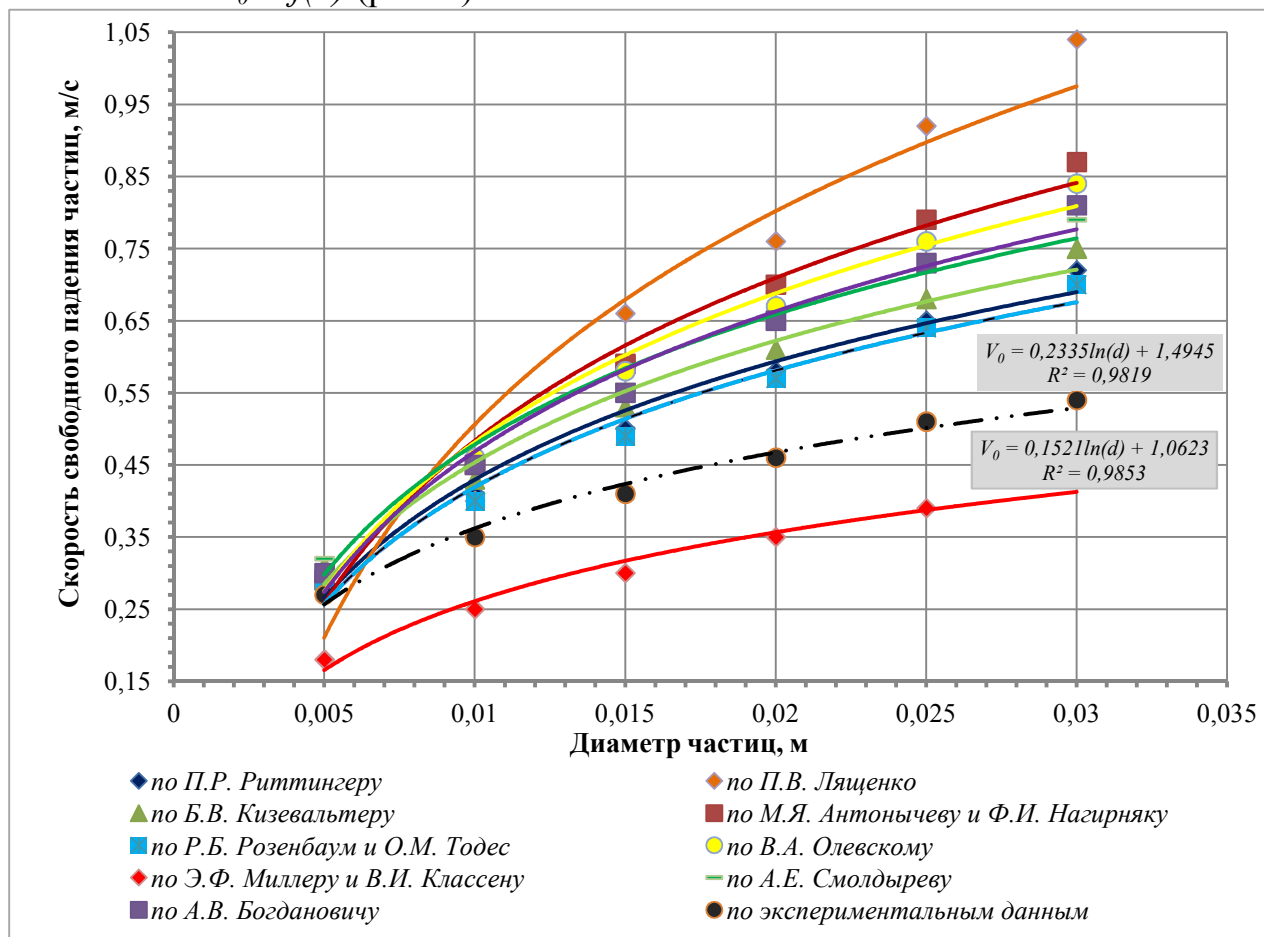


Рис. 1. Сравнение расчетных и фактических скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций.

Таким образом, скорость свободного падения частиц ЖМК крупностью от 5 до 30 мм нами предлагается определять по уравнению, м/с:

$$V_0 = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43), \quad (1)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; d – диаметр частиц, м; Ar – параметр (критерий) Архимеда.

Отклонение гидравлической крупности, для различных диаметров частиц, по предложенному уравнению не превышает 3 %.

Скорость свободного падения ЖМК является многофакторной величиной, на которую влияют: плотность, характер поверхности частиц, форма частиц, физические свойства среды (воды).

Известно, что шельфовые железомарганцевые конкреции в основном

имеют правильные сфероидальные и эллипсоидные формы, однако встречаются веретенообразные, гроздевидные, таблитчатые и полиморфные. При проведении экспериментов периодически наблюдались отклонения от величин, получаемых для зерен шарообразной формы. Эти отклонения тем больше, чем разнообразнее форма зерен и чем резче она отличается от шарообразной формы.

На рис. 2 изображен график отклонения конечных скоростей падения частиц ЖМК неправильной формы в воде, верхняя линия соответствует максимальному значению скорости падения, нижняя – минимальному. Кривые подтверждают, что отклонение в скоростях падения связано с формой частиц и характером их поверхности.

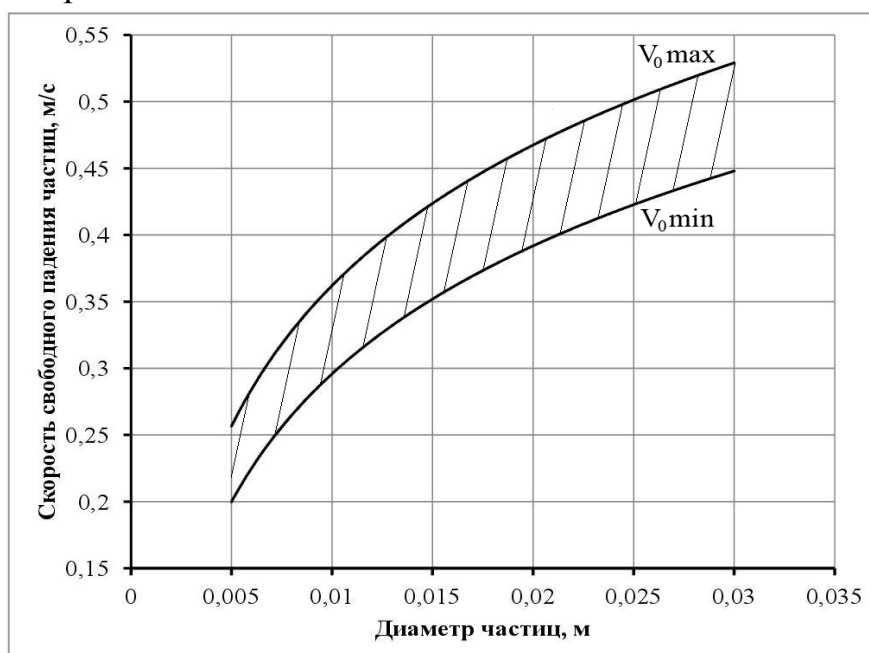


Рис. 2. Отклонение конечных скоростей падения ЖМК неправильной формы в воде.

Физические свойства гидросмеси помимо твердой составляющей в значительной степени обуславливаются свойствами жидкости, в нашем случае морской водой. Поэтому нами проводились опыты по изучению влияния температуры и солености воды на изменения скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций.

Анализ экспериментальных данных, показал, что при числах Рейнольдса $Re > 1000$, если не учитывать температуру воды, то погрешность определения гидравлической крупности составит от 3 до 8 % (рис. 3).

Для морской воды, чем ниже температура и выше соленость, тем больше ее плотность, следовательно, возрастают гидродинамические сопротивления, а скорость свободного падения частиц уменьшается.

На рис. 3 представлены графики изменения гидравлической крупности ЖМК при изменении физических свойств воды (температура от 5 до 20°C, соленость от 1 до 30 ‰), которые показывают, что при увеличении солености воды от 1 до 30 ‰ скорость свободного падения частиц уменьшается на 8-17 %.

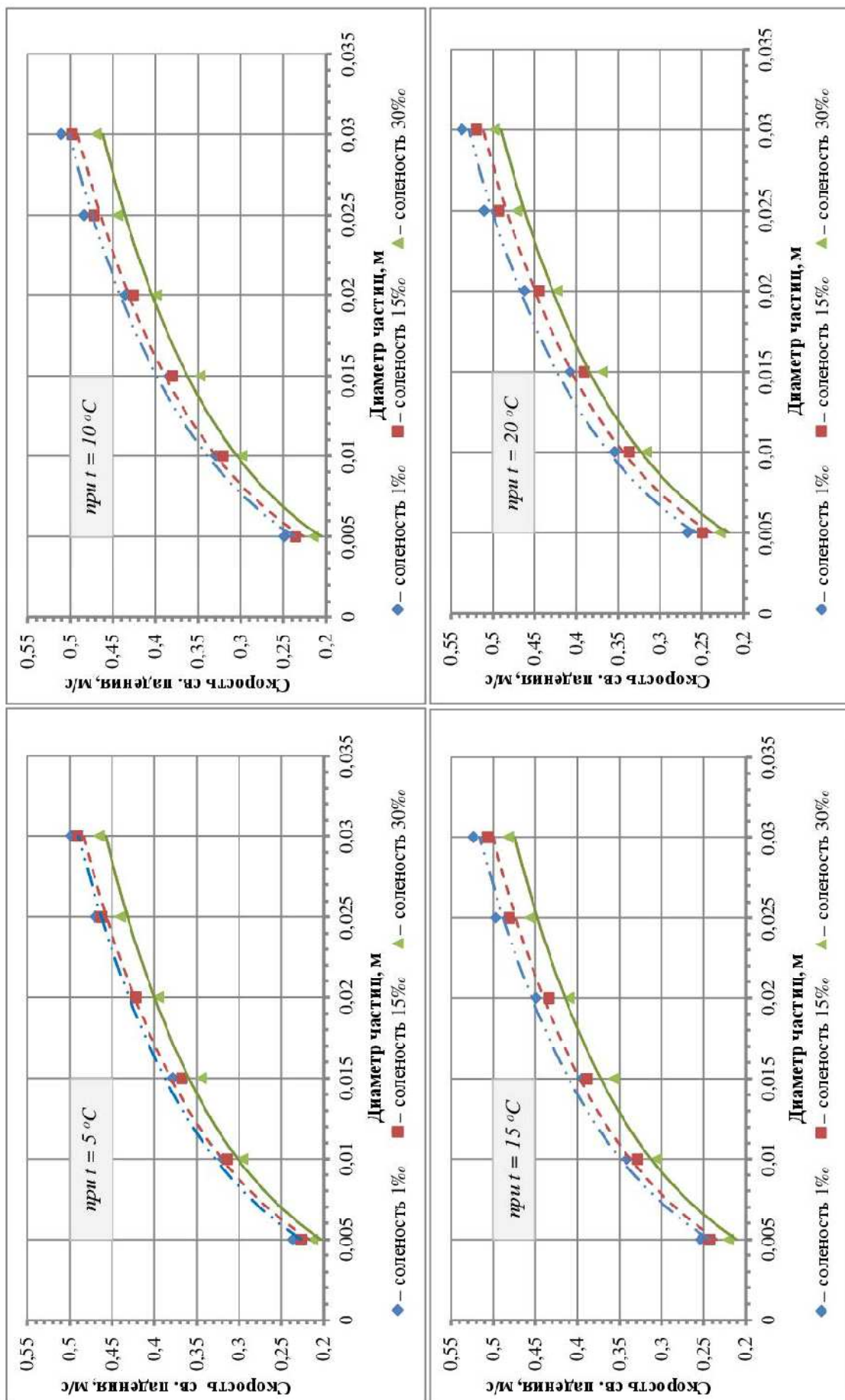


Рис. 3. Графики зависимости гидравлической крупности ЖМК от диаметра частиц при изменении физических свойств воды (температура от 5 до 20°C, солёность от 1 до 30 ‰).

Второе защищаемое научное положение.

Скорости стесненного падения железомарганцевых конкреций крупностью от 5 до 30 мм должны определяться по установленной в работе функциональной зависимости скорости свободного падения с коэффициентом снижения скорости (k):

$$V_{СТ} = \left[\frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43) \right] \cdot k.$$

Методические обоснования расчетных параметров движения гидросмесей в трубопроводах базируются на скоростях стесненного падения различных минеральных частиц, которые в свою очередь, определяются по значениям их гидравлической крупности, т.е. скорости свободного падения.

$$V_{СТ} = k \cdot V_0, \quad (2)$$

где k – коэффициент снижения скорости.

Реальные условия движения твердых частиц характеризуются закономерностями их массового или группового перемещения в ограниченном пространстве, при котором каждое зерно испытывает влияние окружающих фракций, а среда – динамическое воздействие, как каждого зерна в отдельности, так и всей движущейся массы в целом.

По мнению Б. В. Кизевальтера, Т. Г. Фоменко, А. Е. Смолдырева, В. Н. Шохина, сложность изучения закономерностей стесненного падения зерен предопределяется, зачастую, неверными результатами расчетов скоростей свободного осаждения частиц, поэтому следует прибегать к установлению закономерности стесненного падения путем обработки экспериментальных данных.

Нами для проведения экспериментальных исследований был использован лабораторный стенд, описанный выше. Эксперименты проводились в воде температурой 20°C для отдельных фракций железомарганцевых конкреций диаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм при объемной концентрации твердого 10 %.

Исследования и произведенные расчеты скоростей стесненного падения частиц ЖМК по большинству уравнений различных авторов, показывают приемлемые результаты лишь для небольшого диапазона определенных крупностей конкреций, что, соответственно, характеризует ограниченность их применения.

Так, расчеты скоростей стесненного падения для железомарганцевых конкреций, проведенные по теоретическим и эмпирическим уравнениям различных авторов, при $Re > 500$ и диаметре частиц более 10 мм дают завышенные результаты в 1,15-1,5 раза (рис. 4).

Наиболее близкие скорости стесненного падения к экспериментальным показывает уравнение, основанное на рассмотрении падения в жидкости отдельной частицы, находящейся в массе других частиц (по П. В. Лященко). Однако превышение скорости стесненного падения зерен ЖМК в воде по

сравнению с фактической (экспериментальной) составило ~ 1,3 раза.

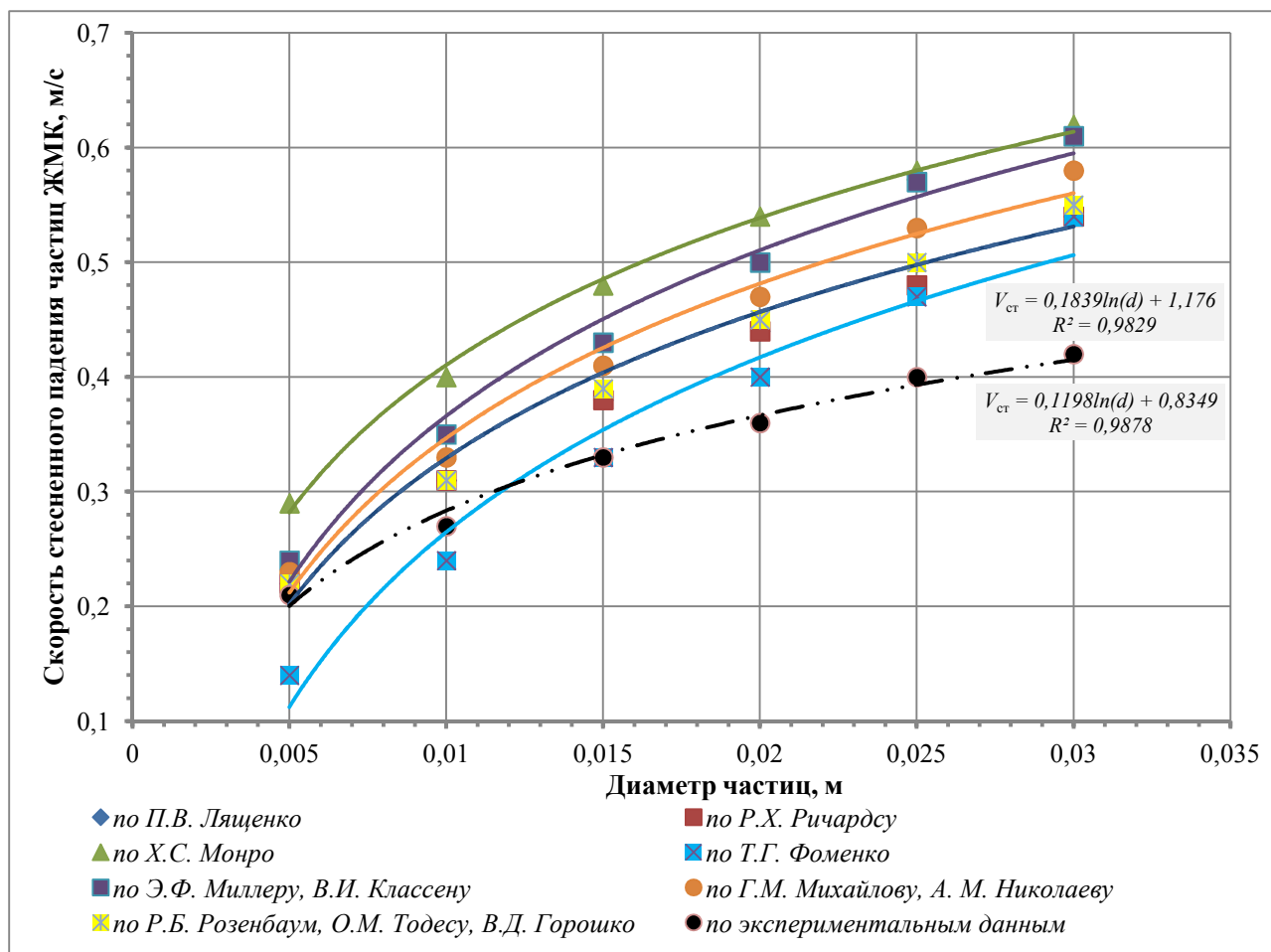


Рис. 4. Сравнение расчетных и фактических скоростей стесненного падения конкреций.

Согласно результатам экспериментальных исследований и последующему анализу расчетов скорости свободного падения частиц (V_0) было выявлено, что наиболее оптимальным является уравнение (1) в котором числа Рейнольдса (Re) и Архимеда (Ar) представлены в критериальной форме с учетом внесенных нами поправок для железомарганцевых конкреций.

Результаты расчетов скорости стесненного падения, проведенных по уравнению (2) для конкреций, в котором для определения скорости свободного падения применялось выведенное нами уравнение (1), показали отклонение опытных данных от расчетных в среднем 3 % (рис. 4).

Этот фактор дает основание для определения скоростей стесненного падения $V_{СТ}$ железомарганцевых конкреций рекомендовать применять следующее уравнение, м/с:

$$V_{СТ} = \left[\frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43) \right] \cdot k. \quad (3)$$

Значение коэффициента стесненности движения частиц ЖМК в потоке определяется уравнением $k = m^n$, где значение n зависит от числа Рейнольдса и вычисляется согласно формулам С. Ф. Ричардсона и В. Н. Заки.

Третье защищаемое научное положение.

При движении гидросмеси по транспортному трубопроводу в условиях морских глубин от 10 до 72 м идет последовательный процесс дезинтеграции железомарганцевых конкреций по классу –5+1 мм, как нетоварной продукции, зависящий от конструктивных особенностей применяемого оборудования, степень разрушения конкреций изменяется от 3 до 15,5 % в сопоставимых условиях работы.

Одной из особенностей гидротранспортирования твердого материала является разрушение горной массы (дезинтеграция) из-за взаимодействия со стенками оборудования и трубопровода, а также с движущимися, сопутствующими агрегатами породы между собой. В результате этого уменьшаются средние размеры отдельных кусков, зерна минералов высвобождаются из сростков и очищаются от глинистых примазок, т.е. происходит процесс дезинтеграции пород. Данный фактор имеет как положительное, так и отрицательное значение для последующего технологического передела добываемого полезного ископаемого.

Однако при добыче и гидроподъеме железомарганцевых конкреций сказывается отрицательное влияние дезинтеграции, в силу морфологических, минералого-петрографических, текстурных, и определяемых ими физико-механических особенностей ЖМК, в частности хрупкости.

Разрушение происходит преимущественно по ослабленным сечениям, имеющим трещиноватости или другие дефекты структуры, после перехода за предел прочности нормальных и касательных напряжений, возникающих в материале при его упругих деформациях – сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге.

Стендовые испытания по дезинтеграции железомарганцевых конкреций проводились на лабораторных гидрокомплексах входящих в состав уникальной стендовой установки (УСУ) и зарегистрирована в Минобрнауки под № 4-73. Она включает:

– грунтонасосную установку с замкнутыми на кольцо коммуникациями, запорной арматурой и контрольно-измерительной аппаратурой (рис. 5);

– эрлифтную установку с подъемной трубой внутренним диаметром 70 мм, высотой 3200 мм, смонтированной вокруг нее трубой обечайкой высотой 2300 мм, диаметром 450 мм, для кругооборота поднимаемой и сбрасываемой гидросмеси, в качестве воздухоотделителя служило дуговое сито с размером щели 5 мм (рис. 6);

– эжекторную (гидроэлеваторную) установку, которая конструктивно работала в технологическом режиме эрлифтной системы (рис. 7).

Для проведения экспериментальных исследований по дезинтеграции использовалась схема с замкнутым кругооборотом гидросмеси, моделирующей динамику гидроподъема железомарганцевых конкреций с морского дна с глубин от 10 до 72 м. Эксперименты проводились в сопоставимых условиях,

средняя рабочая скорость гидротранспортирования была постоянной и составляла $V_p \approx 1,8$ м/с.

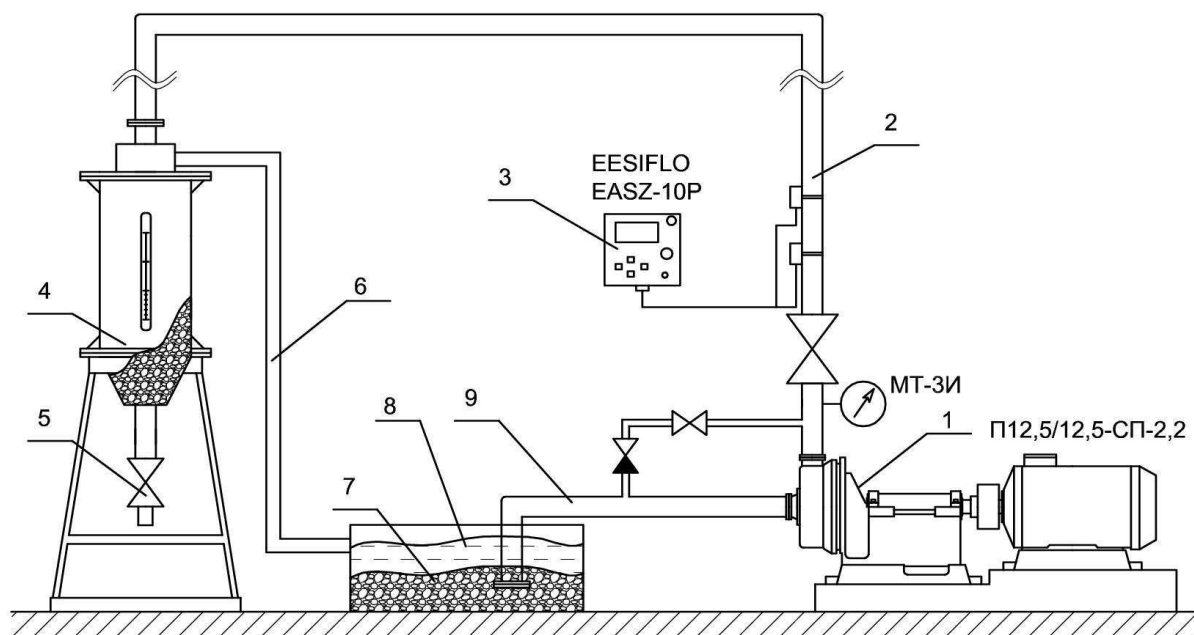


Рис. 5. Технологическая схема экспериментальной грунтонасосной установки.

1 – песковой насос; 2 – напорный трубопровод; 3 – расходомер; 4 – буферная емкость; 5 – кран для взятия проб; 6 – трубопровод для слива излишков воды; 7 – исходный материал; 14 – зумпф грунтонасоса.

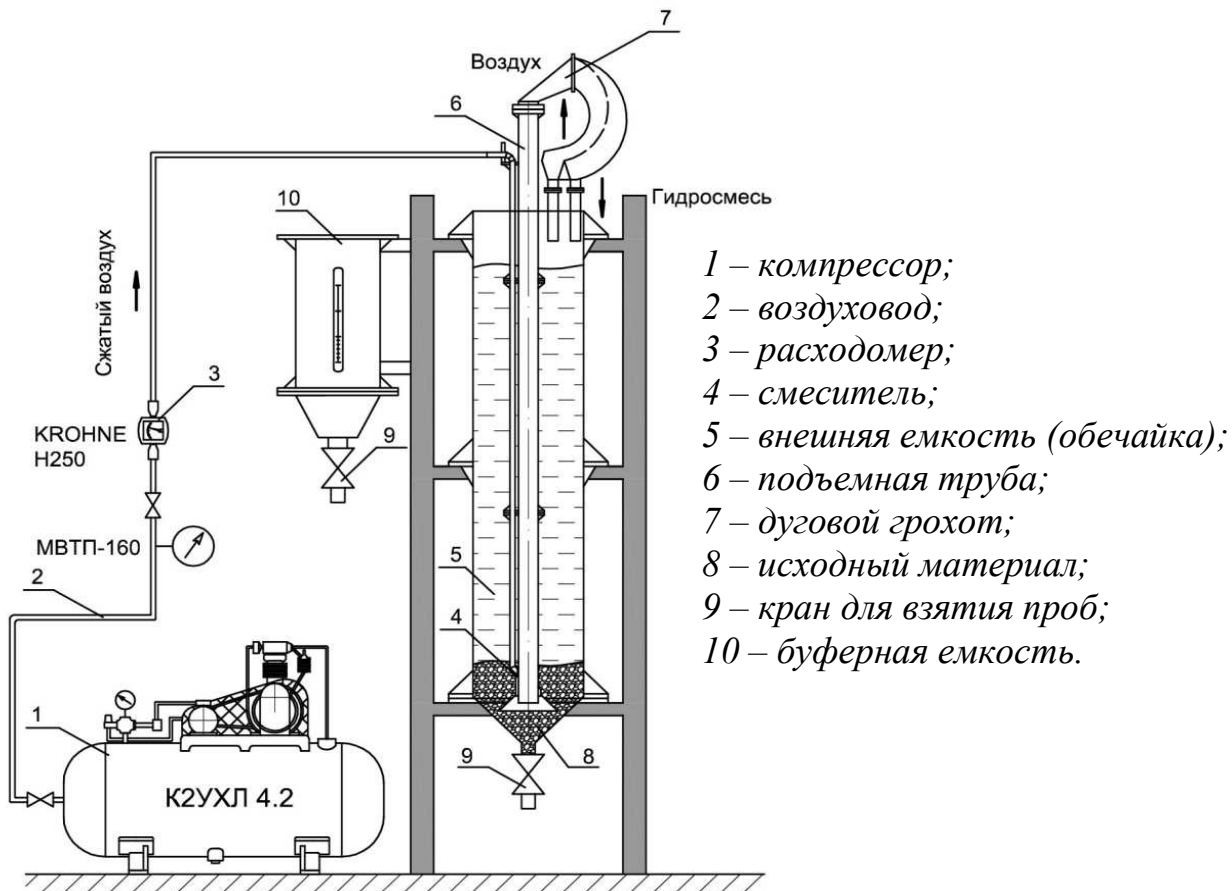


Рис. 6. Технологическая схема экспериментальной эрлифтной установки.

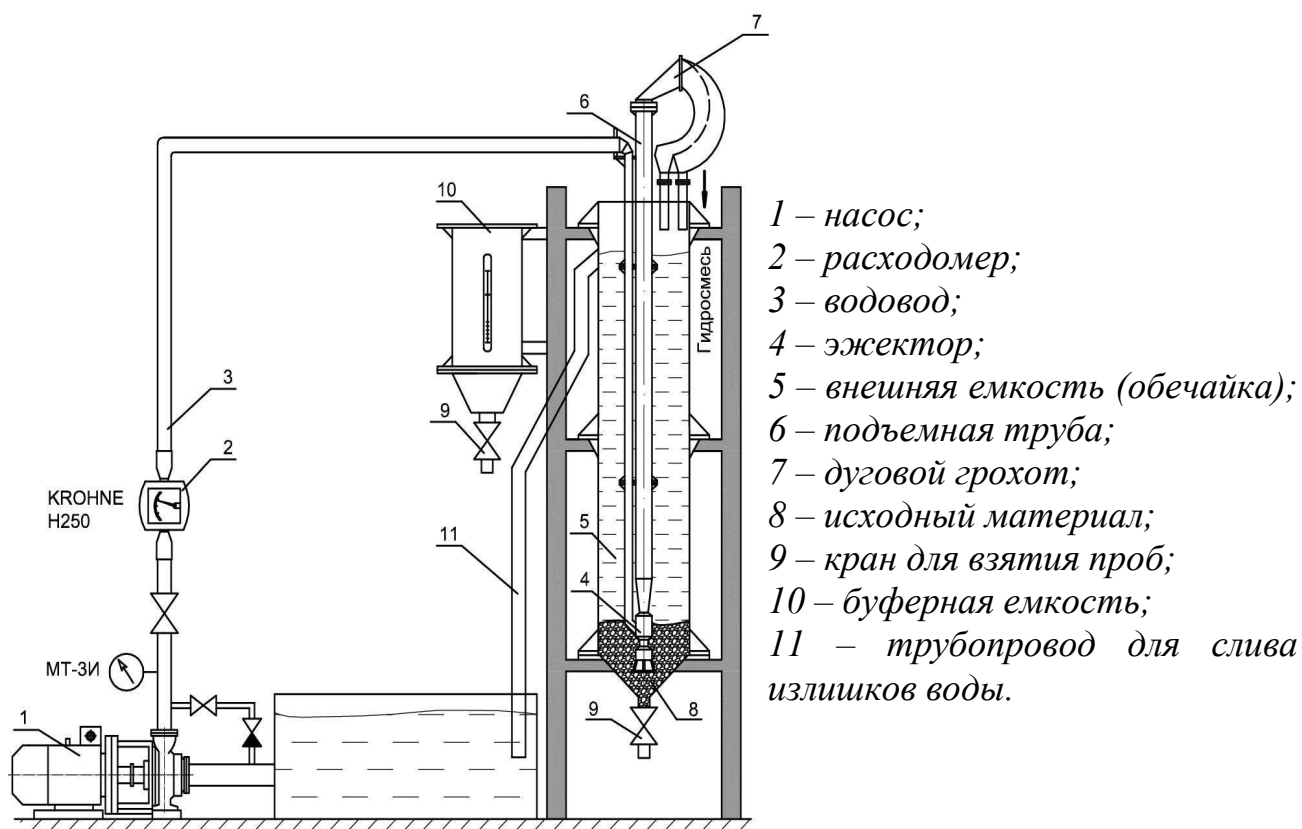


Рис. 7. Технологическая схема экспериментальной эжекторной установки.

Исходный материал для экспериментальных работ представлял собой влажные смеси железомарганцевых конкреций (технологическая проба ЖМК рудной залежи «Восточная-1») и горных пород следующих классов крупности: $-5+1$ мм; $-7+5$ мм; $-10+7$ мм. Соотношение конкреции к горным породам составляло 60:40.

Интенсивность процесса разрушения конкреций оценивалась по выходу шламового класса $-5+1$ мм.

Опытные исследования показали, что при эрлифтном подъеме конкреций с глубин от 12 до 72 м идет последовательный процесс разрушения конкреций класса $-10+7$ мм и увеличение выхода шламовой фракции $-5+1$ мм соответственно от 3 до 8,5 %.

Для эжектора при тех же условиях гидротранспортирования процент выхода фракции $-5+1$ мм составил от 6 до 12 %.

При вертикальном эрлифтном и эжекторном гидроподъеме конкреции разрушаются в результате динамического воздействия гидросмеси на верхнюю стенку дугового грохота вследствие увеличения скорости смеси на устье эрлифта и эжектора.

При перекачивании исходного материала грунтовым насосом выход шламовой фракции $-5+1$ мм составил от 11,5 до 15,5 %. Процесс дезинтеграции конкреций при работе грунтового насоса в большей степени зависит от скорости вращения (~ 1500 об/мин) и механического воздействия лопаток рабочего колеса на перекачиваемый материал и в меньшей от длины напорного трубопровода.

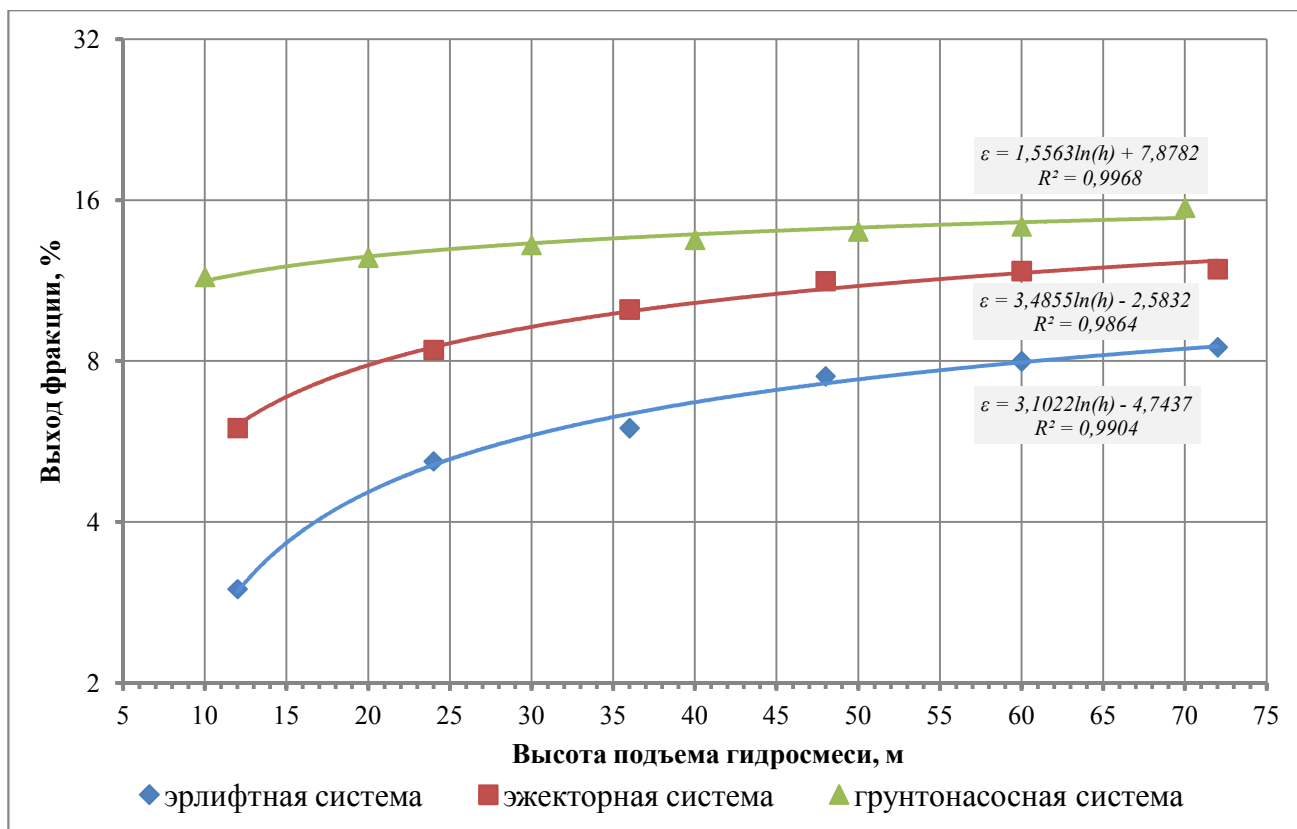


Рис. 8. Зависимость степени дезинтеграции ЖМК от способа гидроподъема.

По результатам исследований построена графическая зависимость степени дезинтеграции конкреций фракцией $-5+1$ мм в зависимости от способа подъема при различных глубинах залегания рудных залежей (рис. 8).

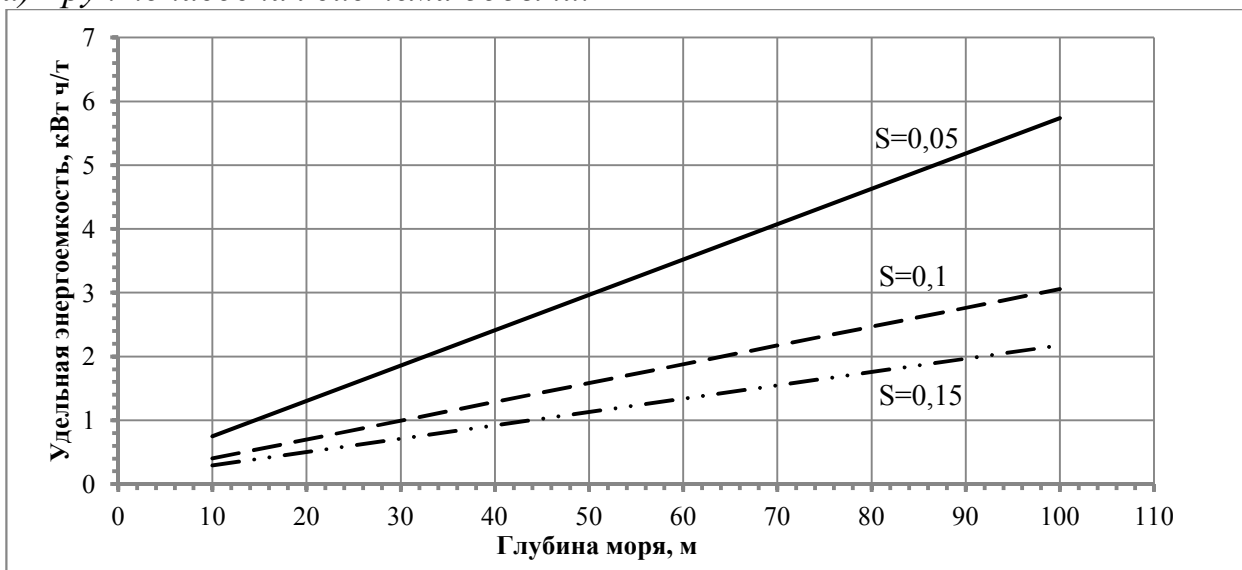
Проведенные экспериментальные исследования позволили разработать методику расчета основных параметров вертикального гидротранспортирования железомарганцевых конкреций. На ее основе проведена технико-энергетическая оценка параметров различных технических средств добычи конкреций (эрлифт, эжектор, грунтонасос) в зависимости от глубины шельфовых месторождений, позволяющая установить рациональную систему гидроподъема, при проектировании технологических комплексов.

На рис. 9 (а, б, в) представлены графики изменения удельной энергоемкости вертикального гидротранспорта ЖМК для грунтонасосной, эжекторной и эрлифтной систем в зависимости от глубины моря.

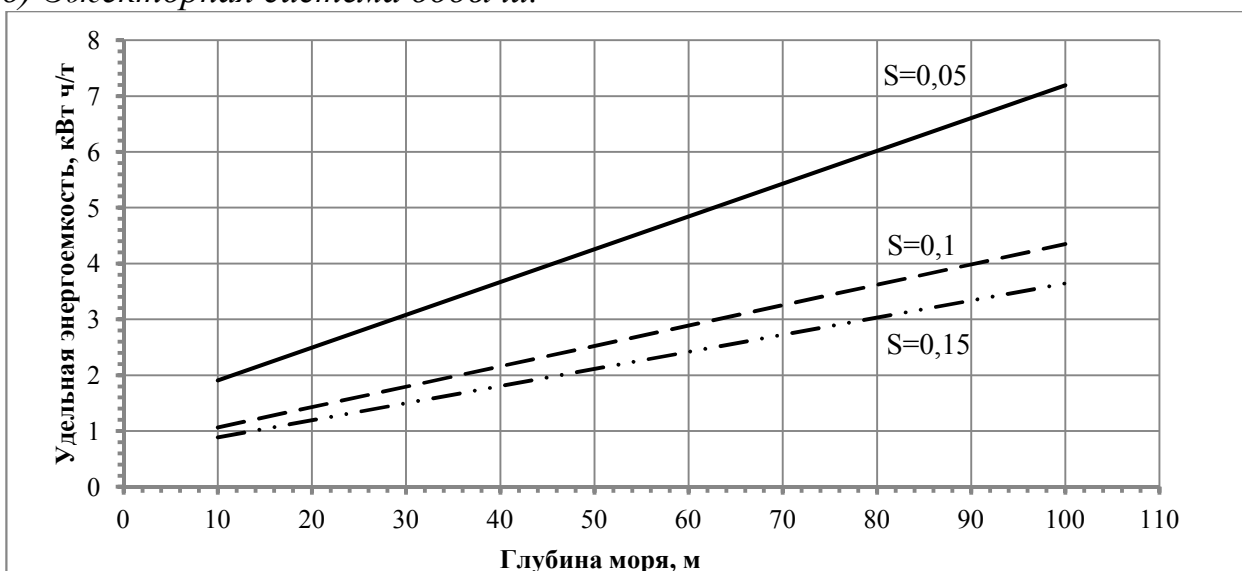
Для грунтонасосной системы энергоемкость изменяется от 0,75 до 5,74 кВт·ч/т, эжекторной – от 1,91 до 7,19 кВт·ч/т, эрлифтной – от 0,49 до 1,23 кВт·ч/т.

Как видно из рис. 9 энергоемкость процесса гидротранспортирования ЖМК при фиксированной производительности системы постоянно увеличивается с ростом глубины отработки от 10 до 100 м за счет роста линейных сопротивлений в трубопроводе зависящих от $i = f(V_p, D, d_{cp}, S, \rho_r)$. Однако энергоемкость может быть снижена за счет увеличения концентрации твердого (S) в гидросмеси, путем оптимизации процессов всасывания донных отложений и пульпоприготовления.

а) Грунтонасосная система добычи.



б) Эжекторная система добычи.



в) Эрлифтная система добычи.

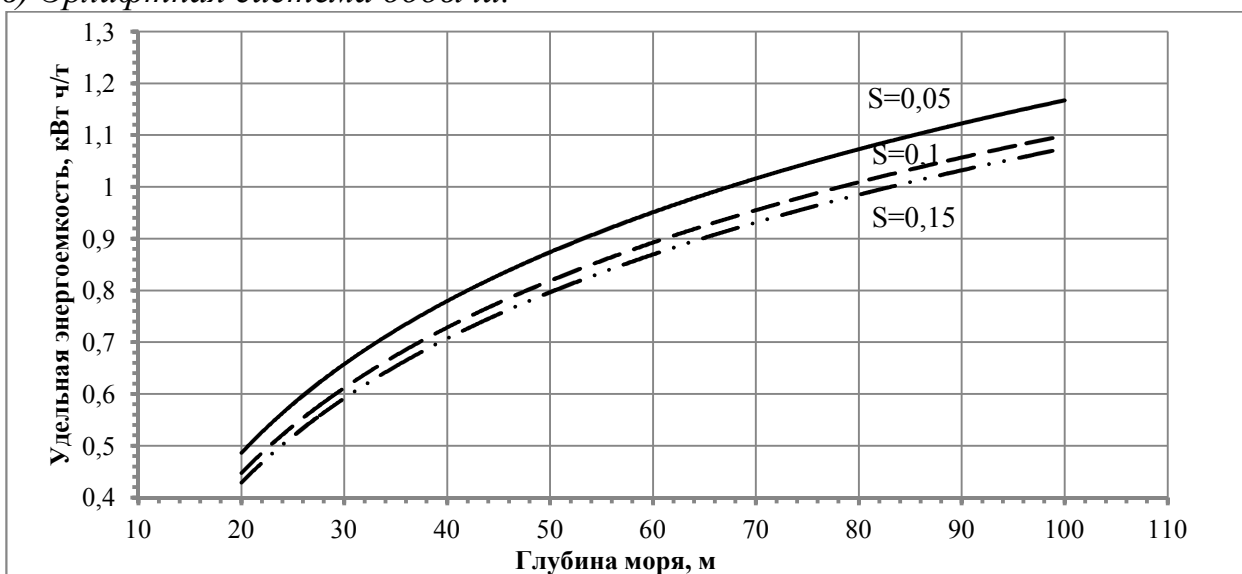


Рис. 9. Графики изменения удельной энергоёмкости в зависимости от глубины моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи по совершенствованию технологий добычи твердых полезных ископаемых на различных глубинах шельфа на основе разработки научно-методического обеспечения процессов гидроподъема и технико-энергетической оценки работы гидротранспортного оборудования.

Основные выводы и рекомендации, полученные при проведении научных исследований, заключаются в следующем:

1. Предложена методика и разработаны методические положения экспериментального изучения скорости падения железомарганцевых конкреций в свободных и стесненных условиях.

2. Впервые определена гидравлическая крупность ЖМК различного фракционного состава при свободном и стесненном движении.

3. Установлено, что наиболее точно скорость свободного падения частиц ЖМК можно определить по критериальной зависимости Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодеса, К. С. Шифрина с учетом полученной нами корректировочной функции скорости.

4. Получен диапазон отклонения конечных скоростей падения частиц в воде для конкреций неправильной формы.

5. Выявлены закономерности и особенности изменения скорости свободного падения различных по крупности конкреций (от 5 до 30 мм) при изменении параметров несущей среды (температуры, солёности).

6. Установлено, что скорость стесненного падения железомарганцевых конкреций определяется по уравнению, которое основано на падении в жидкости отдельной частицы, находящейся в массе других частиц и является произведением скорости свободного падения из полученного нами уравнения и коэффициента снижения скорости.

7. Выявлено, что значение коэффициента стесненности движения частиц ЖМК в гидросмеси зависит от числа Рейнольдса и вычисляется согласно формулам С. Ф. Ричардсона и В. Н. Заки.

8. Разработаны технологические схемы и методика проведения экспериментальных исследований по определению степени дезинтеграции железомарганцевых конкреций при работе различного гидротранспортного оборудования: грунтового насоса, эжектора и эрлифта.

9. Установлено, что при различных способах гидроподъема конкреций с глубин от 12 до 72 м идет последовательный процесс дезинтеграции класса $-10+7$ мм и увеличение выхода шламовой (не товарной) фракции $-5+1$ мм.

10. Разработана методика расчета основных параметров гидротранспорта по вертикальным трубопроводам для железомарганцевых конкреций.

11. Проведена технико-энергетическая оценка параметров различных технических средств добычи конкреций (эрлифта, эжектора, грунтонасоса) в зависимости от глубины шельфовых месторождений.

Основные положения диссертации опубликованы

в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Козлов М. Ю. Особенности методического подхода к обоснованию технологии эрлифтного грунтозабора твёрдых полезных ископаемых на шельфе. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Гидромеханизация.–2015.– №4 (специальный выпуск 11).– 464с. – М.: Издательство «Горная книга». С. 61-68. ISSN 0236-1493.

2. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Козлов М. Ю. Обоснование технологических параметров эжекторной добычи магнетитовых песков в шельфовой зоне. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Гидромеханизация.–2015.– №4 (специальный выпуск 11). – 464с. – М.: Издательство «Горная книга». С. 29-41. ISSN 0236-1493.

3. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Козлов М. Ю. Перспективы освоения шельфовых и глубоководных месторождений полезных ископаемых. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/5, том 13. С. 102-106. ISSN 1682-1696.

4. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Вильмис А. Л., Козлов М. Ю. Морские испытания новой технологии подводной добычи алмазосодержащих пород на шельфе Намибии. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13. С. 71-75. ISSN 1682-1696.

5. Журавлев А. С., Козлов М. Ю., Морозов Д. С. Перспективы освоения месторождений шельфовых железомарганцевых конкреций в Балтийском море. Общественно-научный журнал «Вестник Российской академии естественных наук», 2013/6.1, том 13. С. 66-70. ISSN 1682-1696.

В других изданиях:

6. Козлов М. Ю., Луконина О. А., Насонов Д. А. Технические средства для освоения глубоководных месторождений дна Мирового океана. Материалы XII международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва РГГРУ, 8-10 апреля, 2015г.) в 2т.: доклады.– М.: МГРИ-РГГРУ, 2015.–546с. С.18-19.

7. Вильмис А. Л., Козлов М. Ю. Техническая возможность эжекторной выемки магнетитовых песков в шельфовой зоне. Материалы XII международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва РГГРУ, 8-10 апреля, 2015г.) в 2т.: доклады.– М.: МГРИ-РГГРУ, 2015.–546с. С.26-27.

8. Козлов М. Ю. Аналитические и экспериментальные исследования определения скорости свободного падения железомарганцевых конкреций (ЖМК). Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 11 международной научной школы молодых ученых и специалистов. 24-28 ноября 2014г. – М: ИПКОН РАН, 2014–388с. С.157-158.

9. Козлов М. Ю., Некоз К. С. Оценка гидродинамической ситуации при гравитационной разгрузке гидросмеси в напорный трубопровод.

Материалы международной научной школы академика К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» РАН (ИПКОН РАН) 23-27 июня 2014 г.– М: ИПКОН РАН, 2014–428с. С.226-229.

10. Бутов И. И., Козлов М. Ю. Обоснование способа и средств измерений для регулирования процесса гидротранспортирования. Международная научная школа академика К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» РАН (ИПКОН РАН) 23-27 июня 2014 г.– М: ИПКОН РАН, 2014–428с. С.192-194.

11. Козлов М. Ю. Технологические аспекты освоения шельфовых месторождений. Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 10 международной научной школы молодых ученых и специалистов. 18-22 ноября 2013г. – М: ИПКОН РАН, 2013. С.148-150.

12. Дробаденко В. П., Калинин И. С., Вильмис А. Л., Козлов М. Ю. Обоснование выбора подводного колонкового пробоотбора донных магнетитовых песков в прибрежно-морской зоне. Материалы XI международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», Москва РГГРУ, 09-12 апреля, 2013г.: Доклады: В 3т. Т2./ МГРИ-РГГРУ. – М.: Ваш полиграфический партнер, 2013.–426с. С.106-107.

13. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Вильмис А. Л., Козлов М. Ю. Обоснование технологии разработки магнетитовых донных отложений в прибрежно-морской зоне. Материалы XI международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», Москва РГГРУ, 09-12 апреля, 2013г.: Доклады: В 3т. Т2./ МГРИ-РГГРУ. –М.: Ваш полиграфический партнер, 2013.–426с. С. 108-109.

14. Дробаденко В. П., Клочков Н. Н., Вильмис Л. А., Луконина О. А., Козлов М. Ю. Совершенствование работы гидрокомплексов при разработке россыпных месторождений. Вестник Забайкальского горного колледжа имени М. И. Агошкова: Агошковские чтения. - Чита: ЗабГК, 2012. - № 5. - 166 с.

15. Козлов М. Ю. Технологические аспекты освоения глубоководных месторождений полезных ископаемых с использованием загрузочных аппаратов. Материалы 9 международной молодежной научной школы «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Том 2. 19-23 ноября 2012г. – М: ИПКОН РАН, 2012.–544с. С.159-161.

Патенты:

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