

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Дробаденко В.П.

Москва 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Минерально-сырьевая база и перспективы освоения шельфовых месторождений Российской Федерации.....	11
1.2. Анализ опыта добычных работ при освоении шельфа.....	22
1.2.1. Опыт геологоразведочных и добычных работ на шельфе.....	23
1.2.2. Анализ технологических способов и технических средств освоения прибрежно-морских месторождений полезных ископаемых .....	26
1.3. Постановка вопроса, задачи и методы исследований.....	37
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРУПНОСТИ ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ В СВОБОДНЫХ И СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	41
2.1. Теоретические аспекты изучения конечной скорости свободного падения твердых частиц.....	41
2.2. Анализ существующих методов расчета.....	46
2.3. Методические положения экспериментального изучения скорости свободного падения частиц.....	59
2.4. Экспериментальные исследования определения гидравлической крупности ЖМК.....	62
2.4.1. Методика проведения экспериментов.....	62
2.5. Результаты экспериментальных исследований свободного падения ЖМК.....	65
2.5.1. Установление функциональной зависимости для скорости свободного падения железоманганцевых конкреций различной крупности.....	65
2.5.2. Влияние на скорость свободного падения температуры и солености окружающей среды (воды).....	70
2.6. Аналитические и экспериментальные исследования	

скоростей стесненного падения частиц в среде.....	77
2.6.1. Анализ исследований по определению скоростей стесненного падения минеральных частиц.....	77
2.6.2. Результаты экспериментальных исследований по определению скоростей стесненного падения ЖМК в воде....	87
Выводы по главе 2.....	92
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ.....	94
3.1. Технологические аспекты процесса дезинтеграции ЖМК.....	94
3.2. Экспериментальные исследования по классификации и дезинтеграции железоманганцевых конкреций.....	97
3.2.1. Технологические схемы и компоновка лабораторного оборудования гидрокомплексов.....	97
3.2.2. Методика проведения исследований.....	108
3.2.3. Результаты исследований.....	114
Выводы по главе 3.....	116
ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ .....	117
4.1. Основные положения инженерного метода расчета гидротранспорта .....	117
4.2. Методические рекомендации для расчета гидротранспорта ЖМК в вертикальных трубопроводах.....	124
4.3. Удельная энергоемкость гидравлического транспорта конкреций.....	129
4.3. Техничко-энергетическая оценка технических средств добычи шельфовых ЖМК в зависимости от глубины моря.....	133
Выводы по главе 4.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	141

## ВВЕДЕНИЕ

**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 гидроподъема и технико-энергетической оценки работы гидротранспортного оборудования.

**Основной идеей работы** является обоснование рациональной технологии гидроподъема и разработка методики расчета параметров гидроподъема 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.

**Научные положения**, выносимые на защиту:

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  $V_0^{ch} = 0,081 \ln(d) + 0,43$ , 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 ( $k$ ):

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

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.

**Научная новизна 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.

**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 в свободных и стесненных условиях; разработке методики и методических рекомендаций экспериментальных исследований для определения скорости свободного и стесненного падения железомарганцевых конкреций 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 грунтонасосного, эрлифтного и эжекторного

технологических комплексов; 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 по дисциплинам: С3.Б.20.1 «Технология и комплексная механизация гидромеханизированных открытых горных работ», С3.В.ОД.2 «Освоение морских месторождений», С3.В.ОД.5 «Морские геоконплексы», для специальностей 130400 «Горное дело», 131201 «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и результаты проведенных исследований докладывались на:

- VII Съезде гидромеханизаторов России (Москва, НИТУ «МИСиС», 4-6 февраля 2015г.);
- XII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 08-10 апреля, 2015г.);

– 11 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 24-28 ноября 2014г.);

– Международной научной школе академика К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» РАН (Москва, ИПКОН РАН, 23-27 июня 2014 г.);

– Научной конференции «Физико-химическая геотехнология» (Москва, МГГУ, 12-13 ноября 2013г.);

– 10 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 18-22 ноября 2013г.);

– XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», Москва РГГРУ, 09-12 апреля, 2013г.;

– 9 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 19-23 ноября 2012г.).

**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 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.

**Благодарности.** 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: проф. Н. Г. Малухину, проф. В. И. Папичеву, доц. И. С. Калинин, доц. А. Л. Вильмису, доц. О. А. Лукониной, доц. Н. Н. Клочкову, доц. М. И. Буянову.

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».

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.

## 1.1. Минерально-сырьевая база и перспективы освоения шельфовых месторождений Российской Федерации.

Континентальный шельф Российской Федерации является самым обширным в мире по площади – 6,2 млн. км<sup>2</sup>, что соответствует 22 % всей площади шельфа Мирового океана. В результате успешно проведенных комплексных геолого-геофизических исследований (начатых еще в 1997 году) и создания убедительной доказательной базы в соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву 1982 года, шельф России может быть увеличен на 1,2 млн. км<sup>2</sup>, если ООН одобрит заявку РФ на расширение внешних границ Арктики за счет подводных хребтов Ломоносова и Менделеева, которую наша страна представила в 2014 году [34, 35].

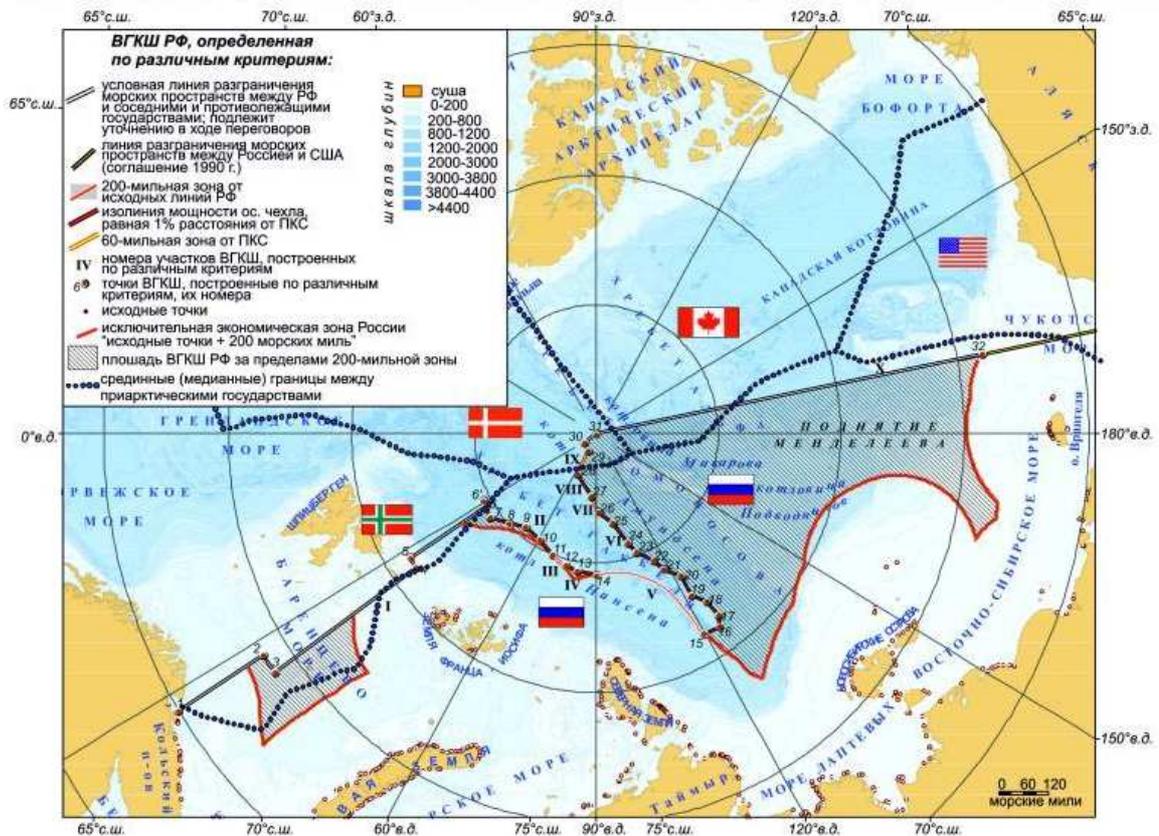


Рис. 1.1. Площадь расширенного континентального шельфа РФ за пределами 200-мильной зоны [33].

Помимо РФ на арктический шельф претендуют США, Канада, Дания, Норвегия, Исландия. Наша страна должна научно доказать, что ее морское дно простирается далеко в глубь Северного Ледовитого океана, будучи неотъемлемым продолжением Российской суши – Восточно-Сибирской платформы.

В минерально-сырьевой базе континентального шельфа выделяются две основные группы полезных ископаемых: углеводороды (нефть, газ, конденсат) – главная в ресурсно-экономическом отношении, и твердые полезные ископаемые (ТПИ), включая группу твердых горючих полезных ископаемых [38].

Твердые полезные ископаемые шельфовых областей представлены двумя основными группами: кластогенной (россыпи) и класто-биохемогенной (шельфовые железомарганцевые конкреции и корки, ракушняки, органо-минеральные илы). В комплексе ТПИ шельфовых областей важнейшую ресурсную роль играют россыпи, представленные двумя принципиально различающимися генетическими группами. По происхождению выделяются петрогенные россыпи – продукты разрушения горных пород и руд (золото, олово, платина, хромит, минералы титана, железа, циркония и редких земель, алмазы, гранат, самоцветы) и биогенные россыпи, формирующиеся за счет природных источников первично органического происхождения (янтарь, ископаемая мамонтовая кость) [65, 38].

В настоящее время в шельфовых областях страны известны 13 подводных месторождений с оцененными запасами сырья и более 50 объектов с прогнозными ресурсами [65].

Основные сведения о минерально-сырьевом потенциале шельфа Арктики и Дальнего Востока РФ приведены в таблице 1.1 [23, 70].

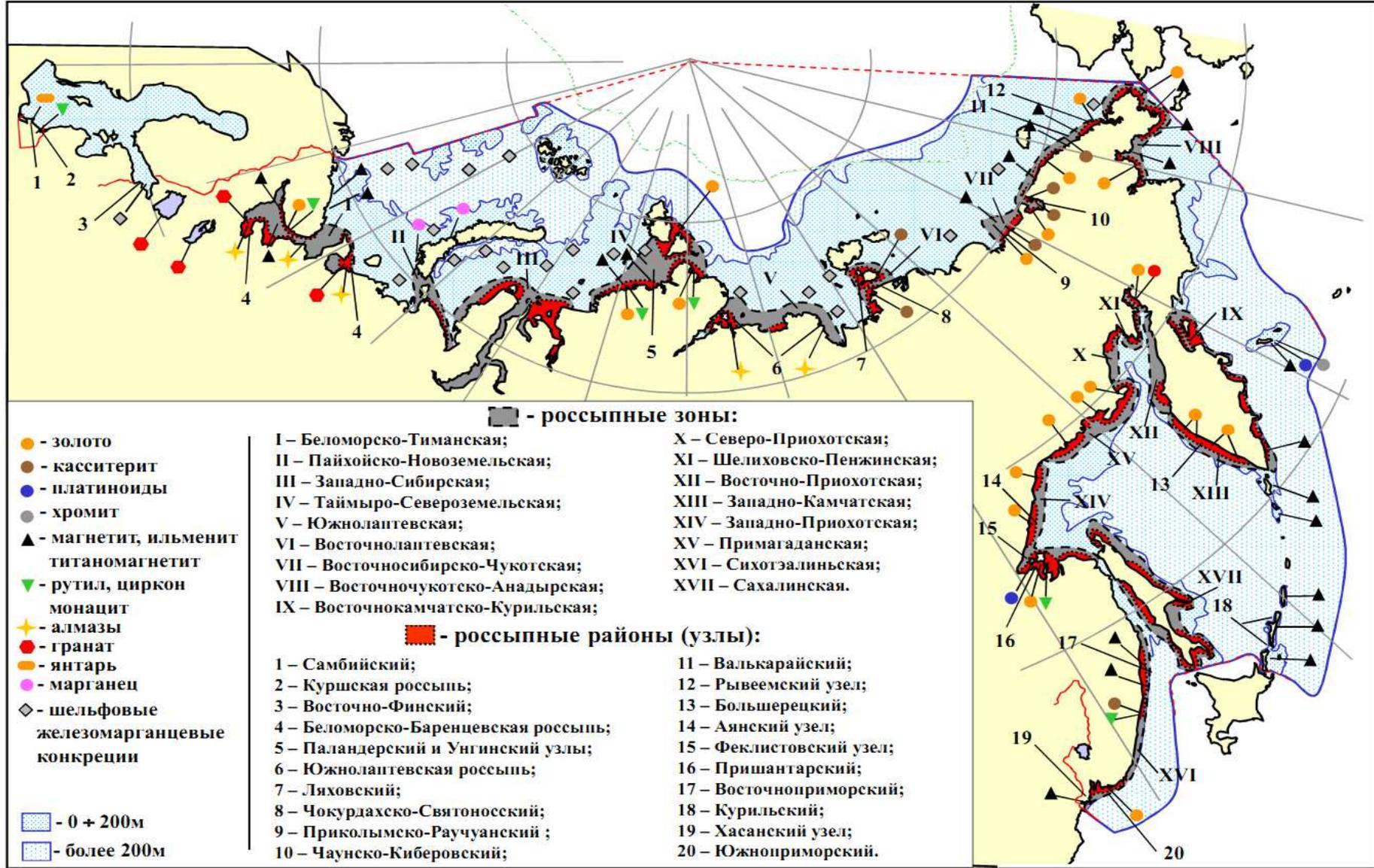


Рис. 1.2. Минерально-сырьевая база ТПИ в Арктической и Дальневосточной шельфовых зонах РФ

Таблица 1.1.

Минералогеническое районирование арктических и дальневосточных шельфовых областей.

Шельфовые области	Россыпные зоны	Россыпные районы	Россыпеобразующие минералы	
1	2	3	4	
Западноарктическая	Беломорско-Тиманская	Терский	золото, ильменит, мин. титана, циркон, рутил	
		Беломорский	ильменит, титано-магнетит, циркон, рутил	
		Канино-Тиманский		
	<i>Пайхойско-Новоземельская*</i>	Байдарацкий	алмаз, золото	
		Андерминский (Пайхойский)	алмаз, циркон, мин. титана	
	<i>Западно-Сибирская</i>	<i>Северо-Ямальский</i>	мин. титана, циркон	
		<i>Усть-Енисейский</i>		
	Таймыро-Североземельская		Челюскинский	золото
			Североземельский	золото, касситерит
			Северотаймырский	золото, циркон, мин. титана, железа
Центрально-арктическая	Южнолаптевская	<i>Анабаро-Хатангский</i>	золото, алмазы	
		<i>Усть-Ленский</i>		
Восточноарктическая	Востоchnолаптевская	Ляховский	касситерит	
		Чокурдакско-Святоносский	касситерит	
	Востоchnосибирско-Чукотская	Приколымско-Раучуанский	касситерит, золото	
		Чаунско-Киберовский		
		Валькарайский		
<i>Амгуэмо-Ванкаремский</i>				

	Восточночукотско-Анадырская	Восточночукотский	касситерит, золото
		<i>Провиденский</i>	
		<i>Золотогорский</i>	золото
Берингово-морская и Камчатско-Курильская	Восточнокамчатско-Курильская	Литкенский	золото, мин. титана и железа, хромит
		Восточно-Камчатский	мин. титана и железа, золото
		Курильский	золото, мин. титана и железа
Охотоморская	Североприохотская	Гижигинский	золото, касситерит
	Шелиховско-Пенжинская	Тайгоносский	золото
		Валижгенский	золото, хромит, платина
	Восточно-приохотская	Западно-Камчатский	касситерит
		Северо-Камчатский	золото
		Омгонский	золото, платина
	Западнокамчатская	Большерецкий	золото
	Западноприохотская	Пришантарский	золото
		Джугджурский	
		Кухтуйский	
	Примагаданская	Иньско-Тауйский	касситерит, золото
Кони-Пьягинский			
Японо-морская	Сихотэ-Алиньская	Южноприморский	золото
		Восточно-приморский	касситерит, редкие земли
	Сахалинская	Шмидтовский	хромит, золото
* – курсивом выделены прогнозируемые районы и зоны.			

*Россыпи Ti, Fe, Zr.* На западном побережье Татарского пролива на участках: мыс Ича – мыс Пещерный и бухта Лудза – бухта Неми, выявлены россыпные скопления минералов титана, железа и циркония, выделены 3 пляжевых, 13 прибрежных и прибрежно-морских россыпей. Прибрежные россыпи располагаются на глубине моря 2-6 м и вытянуты вдоль берега; прибрежно-морские – образованы на глубине до 15-20 м и прослежены на

1,3-1,9 км от берега. В пляжевых россыпях содержание титаномагнетита варьируется от 8 до 15 %, тогда как в морских – 3-7 %.

Общая продуктивность Восточноприморского района (ожидаемые запасы) составляет 51,3 млн. т железа и 9,1 млн. т оксида титана (II). Для их подтверждения необходимо проведение разведочных работ.

В бухте Сивучей близ устья р. Туманной и бухте Новгородской (Хасанский узел Южноприморского района) на пляже и дне акватории до глубины 20 м известны россыпи титаномагнетита и магнетита. Мощность продуктивных горизонтов составляют 5-6 м при содержании ильменита в среднем 20 кг/м<sup>3</sup> [32, 65].

*Россыпи Pt, Cr.* Минерально-сырьевой потенциал других полезных ископаемых в россыпях – платины, хромита, камнесамоцветов (группа агата–халцедона) в настоящее время – невелик [32, 38]. Единственная известная в шельфовых областях россыпь платины находится на юге о. Феклистова (архипелаг Шантарские острова) и прилегающем шельфе Охотского моря. Продуктивный пласт мощностью в среднем 2,3 м перекрыт торфами мощностью до 5 м. Содержание платины в пласте колеблется от 0,02 до 0,5 г/м<sup>3</sup> (среднее – 0,112 г/ м<sup>3</sup>).

Прогнозные ресурсы категории P<sub>2</sub> составляют в подводной части россыпи 120 кг; на суше – еще 120 кг, категории P<sub>3</sub> – 130-180 кг.

Россыпи платины обнаружены у северного побережья о. Большой Шантар, в Пенжинской губе, на севере о. Сахалин, у восточных побережий п-ова Камчатка. Здесь вдоль берегов Берингова моря от о. Карагинский до п-ова Кроноцкий рудопроявления хромита и платины и ореолы рассеяния этих минералов на пляжах и подводном береговом склоне до изобат 20-25 м (до 5 км от берега) [65].

*Золото.* Крупнейшим золотоносным узлом в восточно-арктической шельфовой области являются Рывеемский в Валькарайском районы. Здесь, кроме двух проявлений, оценены два месторождения, причем одно из них – крупное (запасы свыше 1,5 т). Содержание золота колеблется от 2 до 7,5 г/м<sup>3</sup>

при мощности пластов 0,5-0,7 м. Крупная морская россыпь Рыпильхин на юге пролива Лонга прослежена на дне до глубины моря 30-35 м; содержание золота колеблется от долей грамма до 1,1 г/м<sup>3</sup> [65].

В дальневосточных шельфовых областях, кроме Южноприморского района, существенные проявления россыпного золота находятся в Пришантарском районе.

В четырех россыпях на шельфе оценены суммарные прогнозные ресурсы  $P_2$  и  $P_3$  составляющие, соответственно, 1,3 и 11,3 т. Содержание золота колеблется от 5 до 150 мг/м<sup>3</sup>, иногда достигают 0,8-1 г/м<sup>3</sup>. Ширина золотоносных горизонтов составляет 10-100 м при мощности песков до 1-1,5 м и торфов – до 15-20 м.

Вдоль западного побережья Охотского моря в Аянском узле Джугджурского района концентрации золота отмечены на дне акватории в затопленных долинах и близ береговых линий до глубин 40–50 м [32, 65].

*Олово.* В России одним из основных оловодобывающих регионов является Северо-Восток. Открытие в последние десятилетия крупных и очень крупных россыпных месторождений касситерита (Тирехтяхского, Тенкели, Депутатского в Северной Якутии, месторождения Ляховского района на Новосибирских островах) существенно повлияло на представления о состоянии и перспективах расширения сырьевой базы олова [64].

В Чокурдахско-Святоносском россыпном районе выявлено Чокурдахское россыпное месторождение, расположенное в акватории Ванькиной губы в юго-восточной части моря Лаптевых, в 260 км к югу от россыпных месторождений Ляховского оловоносного района. Оно является первым разведанным россыпным месторождением олова на российском шельфе и залегает на плотике озерно-аллювиальных суглинков до отметки – 60 м и представлено оловоносными, в основном прибрежно-морскими, осадками. Мощность оловоносного пласта на акватории изменяется от 4 м (в прибрежной части) до 58 м (по мере удаления от берега). Протяженность россыпи 2,4 км, ширина в центральной части 520-800 м, на флангах – 240 м.

Максимальное содержание олова (до 6,9 кг/м<sup>3</sup>) установлены в центральной части россыпи при среднем содержании по месторождению 0,74 кг/м<sup>3</sup>. Запасы месторождения оценены по категории С<sub>1</sub> и составляют 19 тыс. т. Сумма запасов в акватории намного превосходит таковые в прибрежных частях суши. Так, запасы россыпного олова на шельфах моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (Западноляховский узел, Чокурдахское россыпное месторождение в Ванькиной губе, Прибрежное в Чаунской губе) составляет 110 тыс. т, тогда как месторождения, расположенные в прибрежной части о. Ляховского (Куттинское россыпное поле и россыпь Тарская) в сумме – 40 тыс. т. [32, 64, 65].

*Алмазы.* Ресурсы алмазов в шельфовых областях Арктики рассматриваются лишь как потенциальные. Экзогенная алмазоносность достоверно установлена в приморских районах двух арктических шельфовых областей – Западноарктической (Колько-Беломорско-Тиманская) и Южнолаптевской [65]. Потенциальные их ресурсы оцениваются: для шельфов Белого и Баренцева морей – 6,5 млн. карат, для лаптевоморского шельфа – 38,6 млн [38].

*Янтарь.* Расширение промышленных перспектив крупнейшего в мире янтареносного района, расположенного на Самбийском п-ове в Южной Прибалтике (Калининградская обл. РФ), возможно за счет изучения и освоения подводных россыпных месторождений янтаря, сосредоточенных в его обрамлении.

Их промышленные перспективы определены огромными запасами высокосортного янтаря-сукцинита (более 460 тыс. т), а также практически подтверждены многолетней успешной эксплуатацией суперкрупного Пальменикенского месторождения: ежегодная добыча достигала 500-600 т. На месторождении имелся Пляжевый участок (средняя мощность продуктивного пласта 6,4 м; содержание янтаря 2,3 кг/м<sup>3</sup>), где на протяжении 28 лет добыча велась с пляжа, но в условиях искусственного карьера, отделенного от моря дамбой. Однако в 2002 г. недостаточно укрепленная

дамба была прорвана морем, и добыча янтаря прекращена. Следует отметить, что себестоимость добычи янтаря на Пляжевом участке была в 17 раз ниже, чем на «сухопутном» карьере».

Особый интерес представляет перспективный участок бухты Покровской, располагающийся на шельфовом мелководье южнее Пляжевого участка, где в прибрежной полосе шириной 1,5-2 км выявлен продуктивный пласт. При этом содержание янтаря на отдельных участках достигает 0,5-2,5 кг/м<sup>3</sup>. Прогнозные ресурсы янтаря по категории Р<sub>2</sub> оценены в 133 тыс. т., что возможно, превысит ресурсы Приморского месторождения [65].

В таблице 1.2 представлены величины продуктивности для главных установленных россыпных районов северо-западной, арктической и дальневосточной шельфовых областей России [32].

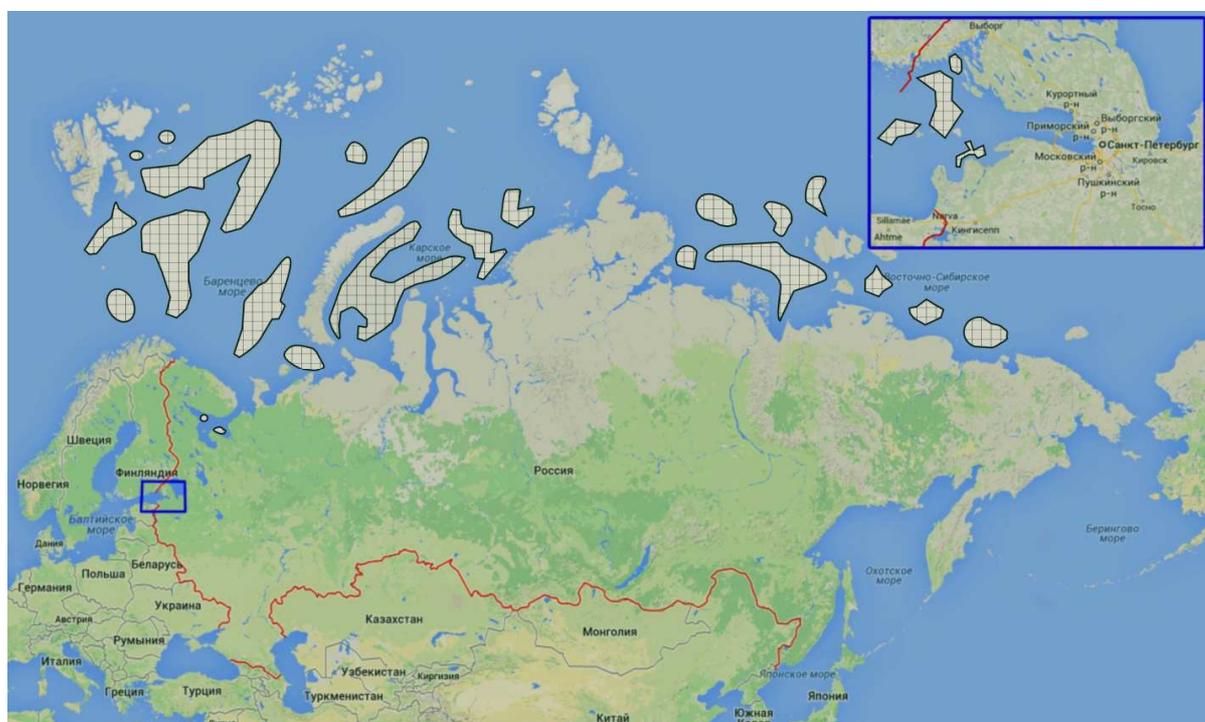
Таблица 1.2.

## Продуктивность россыпных районов.

Минеральное сырье	Россыпные районы (установленные, главные)	Запасы	Продуктивность		Масштаб районов
			реальная	общая	
Олово, тыс. т	Ляховский	107	162,3	171,4	Очень крупный
	Чаунско-Киберовский	23,4	50,3	65,2	Выше среднего; значительны прогнозные ресурсы по категории Р <sub>2</sub>
	Чокурдахско-Святоносский	18,2	26,3	35,4	Выше среднего
	Валькарайский	1,8	17,6	18,5	Средний
	Приколымско-Раучуанский	1,8	15,3	16,4	Средний
Золото, т	Валькарайский	202	>206	>225	Крупный с уникальным Рывеевским узлом
	Челюскинский	0,5	24,7	25,2	Выше среднего; значительны прогнозные ресурсы по категории Р <sub>2</sub>
	Южно-Приморский	3,2	6,7	7,6	Выше среднего

	Пришантарский	-	6,2	7,3	Выше среднего; значительны прогнозные ресурсы по категориям P <sub>1</sub> и P <sub>2</sub>
	Большерецкий	0,1	3,4	4,6	Ниже среднего
Янтарь, тыс. т	Приморский	467,4	590,4	-	Крупнейший в мире; значительны прогнозные ресурсы по категориям P <sub>1</sub> и P <sub>2</sub>
Минералы Ti, Fe, Zr млн. т; Fe+TiO <sub>2</sub>	Курильский	8,7	16,7	32,8	Средний
	Восточно-Приморский	-	16,4	60,6	Средний; значительны прогнозные ресурсы по категории P <sub>2</sub>
	Восточно-Камчатский	>10,8	16,0	16,3	Средний

*Шельфовые железомарганцевые конкреции.* В последние десятилетия выявилась промышленная ценность нового вида сырья – шельфовых железомарганцевых конкреций (ЖМК).



*Рис. 1.3. Схема расположения полей ЖМК в акваториях морей России.*

Шельфовые скопления ЖМК отмечаются во всех морях России при глубинах моря от 5-10 до 200-300 м (рис. 1.3). В Арктических морях площади

скопления ЖМК составляют сотни и тысячи квадратных километров; плотность залегания конкреций изменяются при средних показателях от 2-5 до 10-13 кг/м<sup>2</sup> (таблица 1.3). Размер конкреций – 3-5мм, реже до 12-15 мм в поперечнике [10].

Таблица 1.3.

Краткая характеристика рудных районов шельфовых железомарганцевых образований (ЖМО) [10].

№	Моря	Район размещения скоплений ЖМО	Глубина размещения ЖМО, м	Плотность залегания ЖМО, кг/м <sup>2</sup>
1.	Черное	Рудные поля: Каламитское, Рионское	80-110	2,5
2.	Балтийское	Заливы: Финский, Рижский	29-78 13-37	от 0,5 до 25-50
3.	Белое	Рудные поля: Двинское, Кандалакшское	28-181	нет данных
4.	Баренцево	Рудные поля: Шпицбергенское, Северобаренцево- морское, Новоземельское, Печорское	70-362	нет данных
5.	Карское	Центрально-Карское рудное поле	38-95	13,0
6.	Лаптевых и Восточно-Сибирское	Рудные поля: море Лаптевых. Восточно-Сибирское море - Индигирское поле	50-100	200-300 экз./м <sup>2</sup>
7.	Чукотское	Врангелевское рудное поле	14-194	500 экз./м <sup>2</sup>
8.	Берингово	Не установлены	-	конкреций не обнаружено
9.	Охотское	ЖМО встречены в юго-восточной части моря	600-2000	нет данных
10.	Каспийское	Подводный вал между Баку и мысом Куули	200	нет данных

Содержание элементов (%) в шельфовых железомарганцевых конкрециях [10].

Элементы	Содержание элементов, %					
	в глубоководных частях Мирового океана	в шельфовых областях морей				
		Белое и Баренцево	Карское	Восточно-Сибирское и Лаптевых	Балтийское (Финский залив)*	Черное
Fe	12,2-13,5	3,5-16,0	2,5-9,2	3,9-26,4	<u>1,54-41,31</u> 20,66	25,5
Mn	30,0-42,0	0,3-0,6 (до 10-12)	0,8-7,9	0,5-5,0 (до 10-12)	<u>0,68-34,68</u> 15,71	7,7
P	0,15-1,1	0,6-2,3	0,9	6-10 и более	<u>0,14-3,92</u> 1,75	6,4
Ni	0,6-1,4	Тысячные доли				
Co	0,2-0,8					
Cu	0,4-1,2					

\*в знаменателе – средневзвешенное значение.

Подсчет прогнозных ресурсов показал, что в двух площадях на юге Карского моря общим размером 16,4 тыс. м<sup>2</sup> содержится 24,6 млн. т. конкреций (прогнозные ресурсы P<sub>3</sub>), а на Северо-Сибирском пороге (6,9 тыс. м<sup>2</sup>) – 10,3 млн. т. Потенциальные ресурсы ЖМК во всех арктических морях превышает 100 млн. т [31, 38, 65].

Анализ литературных источников [31, 53, 61], климатических и горно-геологических условий, данных распространения и процентного содержания полезных компонентов в ЖМК на шельфе морей РФ показал, что на современном этапе наиболее перспективна добыча и переработка для получения ферромарганца, конкреций Балтийского моря.

## 1.2. Анализ опыта добычных работ при освоении шельфа.

Проблемы добычи полезных ископаемых в морских условиях отражены в работах Дж. Мери, В. В. Ржевского, Г. А. Нурика, 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.

### **1.2.1. Опыт геологоразведочных и добычных работ на шельфе.**

Впервые в мире прибрежно-морские россыпи (монацита) начали разрабатывать в Бразилии в XIX веке. В настоящее время, учитывая благоприятные климатические условия, россыпные месторождения шельфа активно разрабатываются в Юго-Восточной Азии (Малайзия, Таиланд, Шри-Ланка, Индия и др.), США (Флорида), Австралии, Японии и др. (таблица 1.5).

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», «ИМГРЭ», «Якутскгеология», «ВНИИМоргео» и др [38, 64].

Комплекс геологоразведочных и добычных работ был проведен на объектах в зависимости от горно-геологических условий их локализации, а также физико-географической обстановки. Для центрально- и восточно-арктических шельфов, где ледовый покров толщиной 2-2,5 м сохраняется до 9 месяцев, были проведены наледные исследования (геофизика, бурение). В 1974-1977 гг. были проведены работы на прибрежно-морских россыпях касситерита в Ванькиной и Чаунской губах и проливе Этерикан [64, 65].

Разведочно-эксплуатационное предприятие «Севморолово» разработало плавучий добычный комплекс, который включал в себя серийный земснаряд, лихтер «Горняк» с установленной на нем обогатительной фабрикой [64].

Таблица 1.5.

Основные ценные компоненты прибрежно-морских россыпей и районы их добычи.

Промышленные минералы	Плотность, кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup>	Главные промышленные компоненты	Сопутствующие промышленные минералы	Основные районы добычи
Магнетит, титано-магнетит	4,9-5,2	Железная руда, Ti, V	Ильменит, хроматил, рутил, гематит, циркон	Япония, Новая Зеландия, Филиппины, Индонезия
Ильменит	4,5-5,0	Ti, TiO <sub>2</sub>	Рутил, циркон, титаномагнетит, магнетит, монацит, ксенотим, тантало-колумбит	Австралийский Союз, Индия, Шри-Ланка, США (Флорида), ЮАР, Сьерра-Леоне
Рутил	4,2-4,3	Ti, TiO <sub>2</sub>	Ильменит, магнетит, циркон, ксенотим, анатаз, брукит, корунд	
Касситерит	6,8-7,1	Sn	Ильменит, магнетит, циркон, рутил, монацит, золото	Индонезия, Малайзия, Таиланд, Великобритания
Монацит	4,9-5,3	Th, Cr	Ильменит, магнетит, циркон, рутил, ксенотим, анатаз, брукит	Индия, Бразилия, Австралийский Союз (попутная добыча), США
Циркон	4,2-4,7	Ir, иногда Hf	Ильменит, рутил, магнетит, ксенотим, анатаз, брукит	Австралийский Союз, Индия, Шри-Ланка, США, (Флорида), Мозамбик, ЮАР
Алмаз	3,5	Ювелирное и пром. сырье	Хромит, гранат, ильменит	Намибия (Юго-Западная Африка), ЮАР
Золото	14-19	Au	Ильменит, магнетит, циркон, рутил, хромит, гематит, платина	США (Аляска), Канада. Попутная добыча в небольших объемах во многих странах

Опытнo-промышленные работы проводились на россыпи касситерита (месторождение Чокурдахское) в прибрежной зоне моря Лаптевых. Первый трехлетний опыт эксплуатации морского горно-добычного предприятия оказался не совсем удачным, т.к. не были учтены в полной мере суровые природные условия и инженерно-геологическая характеристика месторождения, а самое главное – технические средства добычи не полностью соответствовали поставленным задачам. Несмотря на это, проведенные работы дали и положительные результаты – доказали потенциальную техническую возможность разработки и обогащения оловоносных песков с получением оловянных концентратов на плавучей обогатительной фабрике.

В 1960-1980-х годах ПГО «Приморгеология» и ОАО «Дальморгеология» выполнили большой объем геологоразведочных работ с опытной добычей для Южноприморской группы россыпей золота в заливе Петра Великого (Японское море). Бурение скважин при глубине моря 50 м вели со специализированных судов и понтонов, для отбора проб использовали драгу и гидростатические пробоотборники [65].

Бурение с плавучих средств и донное опробование проводили на россыпепроявлениях золота в Пришантарье (юг Охотского моря), у западных побережий Камчатки, платины – близ о. Феклистова (архипелаг Шантарские острова), а подводных россыпей титаномагнетита в Татарском проливе.

В 1960-е годы поисковые работы и опытную добычу вели морским земснарядом «Выборгский» на Куршской россыпи титаномагнетита у побережья Самбийского полуострова (Балтийское море). По результатам работ МГИ создал несколько схем разработки подводных россыпей Балтики [65].

Опыт добычи янтаря в 1960-е годы у берегов Самбийского п-ова включал использование малых плавучих средств и землечерпательных машин. В настоящее время горные работы осуществляются сухойной

техникой, с созданием искусственного карьера с помощью дамбы за счет продвижения фронта горных работ в море свыше 700 м.

В 2000-х годах ООО «Петротранс» проводило поисково-разведочные работы на ЖМК в Российской части акватории Финского залива, а также отбор крупномасштабных проб ЖМК на нескольких залежах в Балтийском море. Были разведаны и поставлены на государственный баланс четыре месторождения ШЖМК, суммарные запасы которых по категориям  $C_1+C_2$  составили ~ 4,5 млн. т.

В 2004-2007 гг. ООО «Петротранс» проводило отработку технологии добычи ШЖМК и осуществляло крупнотоннажное технологическое опробование месторождения «Вихревое» в Финском заливе [31, 32, 38, 61].

К концу 2007 года общие запасы конкреций составили 7,44 млн. т, марганца – 0,71 млн. т. Содержание марганца в конкрециях составляет 13,25-23,95 %, железа – 13,64-23,64 %,  $P_2O_5$  – 2,98-5,21 %; плотность залегания 16,55-52,14 кг/м<sup>2</sup>, продуктивность по марганцу – 1,53-4,59 кг/м<sup>2</sup>. Запасы подсчитали по геологическим блокам на шести месторождениях (26 залежах) общей площадью 227 км<sup>2</sup> и на четырех месторождениях – Кургальское, Копорское, Вихревое и Рондо. Решением ГКЗ МПР РФ запасы этих месторождений были отнесены к оцененным [61, 65].

### **1.2.2. Анализ технологических способов и технических средств освоения прибрежно-морских месторождений полезных ископаемых.**

Под технологией подводной добычи понимается совокупность взаимосвязанных процессов, способов и приемов механизированного производства горных работ, учитывающие горно-геологические характеристики морских месторождений и возможности технических средств.

Подводная добыча полезных ископаемых может быть представлена следующей структурной схемой (рис. 1.4) [23], из которой следует, что

основополагающим признаком применения технологии выемки (добычи) является гидравлический, либо механический транспорт горной массы на поверхность.



Рис. 1.4. Структурная схема подводной добычи полезных ископаемых.

Технология подводной добычи твердых полезных ископаемых с использованием механического транспорта включает в себя: штанговые земснаряды, многочерпаковые драги, грейферные драги, системы с применением подводных скреперов, системы с применением подводных бульдозеров, многоковшовые канатно-цепные системы.

*Подводные скреперные установки и бульдозеры.*

Прибрежно-морские россыпи, залегающие до глубин 4-7 м, характеризуются наиболее интенсивным волновым воздействием и суточными колебаниями уровня вод в связи с приливами и отливами.

Эффективная разработка таких месторождений с применением плавучих земснарядов осложнена из-за осадки судов. Поэтому в последние десятилетия были созданы донные аппараты для работы в таких условиях, к ним относятся подводные бульдозеры на гусеничном ходу. Наибольших успехов в разработке таких машин добились в США и Япония (фирмы «Комацу» и «Хитачи»).

Скреперные установки применяются для разработки прибрежно-морских россыпей, залегающих от уровня воды до 4-5 м. Так, в США у побережья Флориды для добычи ЖМК при дальности разработки от места выгрузки 200-240 м часовая производительность установки составила более  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$  [23, 69].

#### *Многочерпаковые драги.*

При морской разработке прибрежно-морских нерудных и россыпных месторождений, в частности ильменито-рутило-циркониевых, золотосодержащих, алмазоносных, в большинстве случаев, применяют многочерпаковые драги.

По своим техническим возможностям (глубина отработки до 50 м) многочерпаковые драги являются наиболее распространенными и универсальными, т.к. могут производить добычу и переработку полезных ископаемых различного гранулометрического состава в сложных горнотехнических условиях. Однако на открытых участках, не защищенных от морских волн гидротехническими сооружениями, максимальная глубина добычи составляет 10 м. Средняя годовая производительность драг по горной массе ~ 3 млн.  $\text{м}^3$ .

В настоящее время широко известны крупнейшие в мире драги «Бима», «Банка-1», «Банка-2», «Белитунг-1» которые разрабатывают затопленные морями аллювиальные и элювиальные касситеритовые россыпи. Золотосодержащие россыпи разрабатываются в странах Юго-Восточной Азии (Индонезия, Таиланд, Индия, Малайзия) и в США. Однако при всех

своих достоинствах драги отличаются большой строительной стоимостью [23].

#### *Грейферные снаряды.*

Грейферные снаряды могут работать при добыче любых пород, кроме скальных, имеют небольшую удельную металлоемкость (по сравнению с многочерпаковыми снарядями), хорошую маневренность и максимальную глубину отработки до 90 м. Главными их недостатками являются: цикличность технологического процесса и снижение производительности при увеличении глубин разработки, так как в этом случае значительно увеличивается время подъема ковша в цикле черпания.

Известен проект грейферно-землесосного снаряда 4500ГЗ, разработанный в «Гидропроекте» и созданный на базе землеснаряда 350Л–50Л Астраханским судоремонтным заводом. Однако при максимальной производительности 161 м<sup>3</sup>/ч глубина разработки составляет 18 м [23].

#### *Штанговые земснаряды.*

Особенностью штанговых снарядов является то, что выемка породы осуществляется с приложением значительных усилий на режущую кромку ковша, поэтому они могут разрабатывать породы, которые в естественном залегании представляют собой плотные массивы, либо обломки предварительно разрыхленных скальных пород.

Штанговые земснаряды имеют производительность 250-500 м<sup>3</sup>/ч и наибольшую глубину разработки до 20 м. Главным недостатком, как и грейферных снарядов, является цикличность технологического процесса [23, 69].

Гидравлический способ разработки подводных месторождений полезных ископаемых включает в себя следующие снаряды: грунтонасосный, эжекторный, эрлифтный, систему с пневматическими камерными насосами, систему с погружными пустотелыми камерами, а также их комбинации.

Главная отличительная способность гидравлических снарядов – поточность, обеспечивающая высокопроизводительную разработку и транспортировку пород донных отложений [23, 80].

*Земснаряды с центробежными грунтонасосами.*

Земснаряды с центробежными грунтонасосами делятся на палубные, трюмные и погружные.

Главной причиной распространения этих насосов являются: простота конструкции, большая производительность, высокий коэффициент полезного действия, высокая концентрация твердого материала в пульпе (до 35 %) [79, 80, 20]. Основными препятствиями для эффективного использования грунтовых насосов являются: недостаточная всасывающая способность (6-7 м. вод. ст.), вследствие чего имеют относительно небольшую глубину разработки обычно максимально до 20 м при работе с крупнозернистыми породами, трудность обеспечения герметизации всасывающей линии и интенсивное изнашивание рабочих органов в процессе эксплуатации.

Эффективным средством увеличения глубины добычи является применение на снарядах дополнительных погружных насосов, расположенных ниже уровня воды. Опыт эксплуатации земснарядов с погружными грунтонасосами показал определенные перспективы для повышения гидромеханизации горных работ, так как позволяет увеличить производительность на 30-80 % (в зависимости от условий разработки) и увеличить глубину добычи до 100 м [24].

Вместе с тем, использование погружного грунтового насоса под водой требует установки на раме электрических кабелей, а также герметичной капсулы, встроенной в верхнюю часть грунтозаборного устройства, что крайне затрудняет его эксплуатацию, усложняет конструкцию и приводит к удорожанию машиностроения работы землесосного снаряда, уменьшению коэффициента использования рабочего времени, а также большим капитальным затратам [24, 69, 70, 80].

В 60-70-х годах проходили промышленные испытания земснарядов типа «Моллюск», предназначенных для добычи подводных отложений на глубинах 50-200 м, разработанных Московским горным институтом [23]

Опыт эксплуатации мощных погружных грунтонасосов на гусеничном ходу, на шельфе Намибии в 2000-х годах показывает, что при производительности 400-600 м<sup>3</sup>/ч коэффициент использования рабочего времени составил ~ 30 % [23].

Сфера применения землесосных снарядов с центробежными грунтовыми насосами определяется многими факторами, основными из которых являются глубина разработки и гранулометрический состав добываемой породы. Другое направление по увеличению возможной глубины разработки подводных отложений связано с применением водоструйных аппаратов-эжекторов (гидроэлеваторов).

#### *Эжекторные снаряды.*

В настоящее время существует большое количество конструктивных схем различных по назначению типов водоструйных насосов – эжекторов: центральные, с кольцевым подводом жидкости, комбинированные, с всасывающей линией, многосопловые, многоступенчатые. В горнодобывающей практике широко используются гидроэлеваторы (они же эжекторы) кольцевого и центрального типов.

Основные преимущества эжекторов: простота конструкции, отсутствие движущихся частей, небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, могут работать как в вертикальных, так в горизонтальных трубопроводных коммуникациях. Срыв вакуума в зоне всасывания не вызывает аварийных ситуаций и не влияет на его последующую работу. Недостатки: низкий коэффициент полезного действия (~ 20÷35 %), значительный расход воды и, как следствие, высокое энергопотребление земснаряда, ограниченная глубина разработки (~ до 100 м) [23].

Известен опыт эксплуатации глубоководного эжекторного японского земснаряда «Эйджа Гоу», у которого эластичный пульповод намотан на

большой барабан, установленный на плавсредстве. Земснаряд снабжен сменным буровым приспособлением на торце пульповода, осуществляющим бурение скважины во вскрышных породах, затем в нее вводится добычной снаряд-эжектор, который производит выемку песков и гравия в промышленном пласте.

#### *Эрлифтные снаряды.*

Основные преимущества технологии эрлифтного подъема сводятся к следующему:

- простота эксплуатации при полном отсутствии движущихся механических частей и силовых кабелей на месте добычи;
- повышение эффективности эрлифтного подъема при увеличении статического уровня воды в водоеме. Расчеты показывают, что подъем гидросмеси эрлифтом с глубины более 4000 метров обусловлен не физической сущностью процесса подъема пульпы, а, в основном, наличием необходимого высоконапорного компрессорного оборудования;
- надежность эксплуатации при внезапных остановках подачи воздуха;
- производительность плавно регулируется путем изменения расхода воздуха;
- небольшие капитальные и эксплуатационные затраты.

Недостатки: значительный расход сжатого воздуха, требуется определенная глубина погружения смесителя под воду (от 30 до 75 %), производительность сильно зависит от обеспечения подготовки горной массы.

Необходимо отметить, что погружаемая в воду часть эрлифтных снарядов значительно проще и надежнее, чем у снарядов с погружными грунтонасосами.

Эрлифтные земснаряды обеспечивают более глубоководную добычу горной массы, чем земснаряды с трюмными грунтовыми насосами и эжекторами.

Эрлифтные снаряды широко применяются на шельфовых месторождениях для добычи нерудных ископаемых, а также алмазоносных гравийно-галечных пород. В Намибии работают несколько алмазодобывающих судов (драг), переоборудованных на базе военных крейсеров. На одном из них «Samikor» совместно с фирмой «Namko» сотрудниками МГРИ-РГГРУ успешно были проведены морские испытания нового эрлифтного грунтозабора с механогидравлическим рыхлением, разработанного на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства.

Эрлифтные земснаряды широко применяются для добычи нерудных материалов. Конструкция эрлифтной установки фирмы «Гидроп» (Венгрия) применялась в бывшей Югославии, Польше, Франции и других странах.

Во Франции «Гидроп» вел добычу с глубин до 60м с удельным расходом воздуха на единицу объема горной массы 12-21 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в зависимости от горно-геологических условий эксплуатации [23].

В ряде стран в последние десятилетия проводятся исследования и опытно-экспериментальные работы по созданию океанических донных комплексов. С помощью эрлифтов может быть осуществлена глубоководная добыча (~ 6000 м) полезных ископаемых гидравлическим способом. Анализ литературных источников [23, 53, 54, 80] позволяет сделать вывод о перспективе использования эрлифтных глубоководных систем гидроподъема в составе океанического добычного комплекса.

*Эрлифтно-землесосные снаряды* – комплексная технологическая система, которая может осуществлять добычу минерального сырья из глубины водоема 30-70 м при крупности транспортируемого куска 100-200 мм и средней производительности 150-200 м<sup>3</sup>/ч по твердому материалу. Такие снаряды технически осуществлены, но неэкономичны, т.к. эрлифт поднимает гидросмесь в зумпф грунтонасоса, который осуществляет гидротранспорт. Кроме того, эта технологическая схема отмечается высокой себестоимостью [24].

*Технология скважинной гидродобычи* (СГД) заключается в равномерном гидромониторном размыве погребенного промышленного пласта и гидроподъеме образовавшейся гидросмеси на поверхность. Для гидроподъема гидросмеси в зависимости от горно-геологических условий разработки применяют гидроэлеватор (эжектор), эрлифт, либо их комбинацию.

К числу основных преимуществ, выгодно отличающих СГД от традиционных способов разработки, относятся [23,80]:

- сокращение капитальных затрат за счет исключения горноподготовительных работ;
- простота и безопасность ведения работ (в технологической схеме СГД применяют простое серийное оборудование – насосы, трубы, запорную арматуру);
- возможность создания поточной технологии;
- возможность автоматизации не только отдельных процессов, но и всего комплекса добычных работ.

*Установки с вертикальными пустотельными камерами.*

В последние годы развивается система гидроподъема твердых полезных ископаемых со дна морей и океанов с применением вертикальных пустотельных камер, получившая название VOMS (на русском языке аббревиатура – УППК) [23].

Анализ использования добычных комплексов для подъема полезных ископаемых показывает, что удельные энергозатраты на гидротранспортирование горной массы до поверхности океана на порядок превышают затраты на другие технологические процессы, в частности, на выемку и подготовку к подъему на выемочном агрегате.

Основные преимущества установок с погружными пустотельными камерами: большая глубина разработки, за счет поддержания в камерах атмосферного давления удается снизить удельные энергозатраты на гидроподъем, заглубление камер обеспечивает независимость от

гидрометеорологических условий моря, основные элементы собираются из стандартного промышленного оборудования, комплекс имеет жесткую конструкцию и минимум подвижных элементов.

*Пневматические камерные насосы.*

Одним из новых направлений в разработке донных, в т.ч. илистых отложений является использование земснарядов, оснащенных пневматическими камерными насосами (ПКН). Основные преимущества: осуществлять подачу высококонцентрированной (до 50 %) гидросмеси плотностью до 1900 кг/м<sup>3</sup> и при этом снизить мутность воды в зоне выемки при ведении работ, дальность рефулирования до 6000 м, минимальная глубина разработки 1 м, максимальная глубина разработки 200 м, высокая износостойкость по сравнению с грунтовым насосом, отсутствие вращающихся частей [20]. Недостатки: высокий расход сжатого воздуха, низкий КПД (15-35 %), разработка пород ведется углубочным воронковым способом, в результате чего при первичной проходке выбирается 20 % пород.

Опыт разработки подводных месторождений на шельфе показывает, что в каждом случае в зависимости от горногеологических, гидрологических и метеорологических условий, от глубины разработки и вида полезного ископаемого применяются различные технологические конструктивные решения для разработки [23, 69].

На основе проведенного анализа составлена систематизация технических средств для освоения шельфовых месторождений минерального сырья, она представлена на рис. 1.5.

На основании всего вышеперечисленного и по данным литературных источников [3, 23, 54, 67, 69, 80] в настоящее время наиболее перспективным и эффективным способом подводной добычи полезных ископаемых является гидравлический. Поэтому при разработке месторождений континентального шельфа наиболее обоснованным и технически целесообразным являются применение технологических комплексов с гидроподъемными установками землесосного (грунтососного), эрлифтного, эжекторного и других типов.

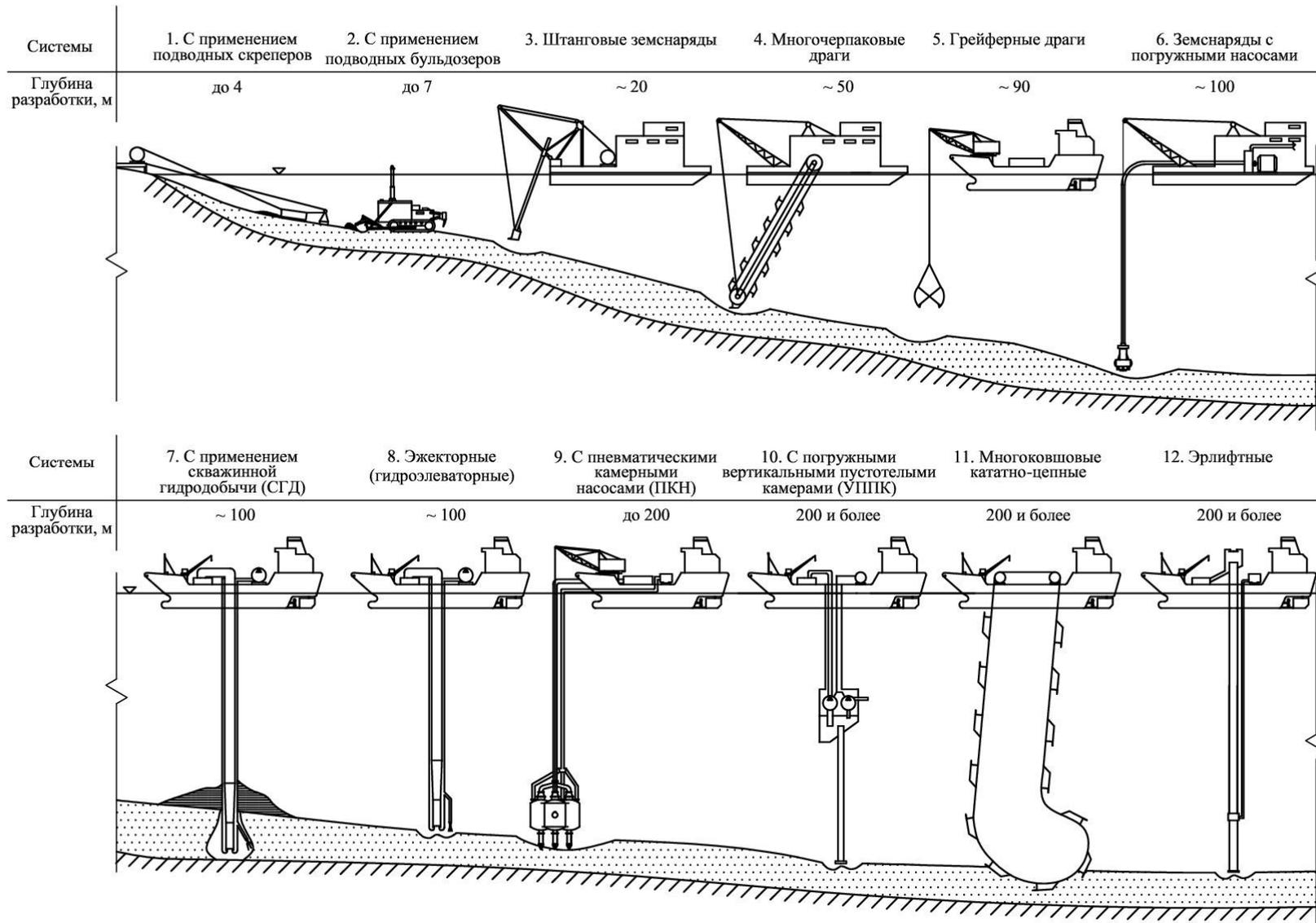


Рис. 1.5. Систематизация технических средств и способов освоения шельфовых месторождений полезных ископаемых.

### **1.3. Постановка вопроса, задачи и методы исследований.**

Как уже было отмечено выше, шельф России является самым обширным в мире. В настоящее время российскими геологами интенсивно ведутся работы по обоснованию расширения шельфа России за пределами 200-мильной зоны за счет присоединения к нему подводных хребтов Ломоносова и Менделеева, которые пересекают Северный Ледовитый океан от России до Канады через Северный полюс и тянутся в направлении Гренландии, открытых еще советскими специалистами. Если в конечном итоге МОМД ООН признает этот фактор, то цена вопроса – прибавление площади шельфа России на 1,2 млн. км<sup>2</sup> и сотни миллиардов долларов США для экономики страны.

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 были 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 будущем (десятилетия) 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 [27]. 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. В настоящее время марганец в РФ является остродефицитным стратегическим видом минерального сырья [61].

Составленная систематизация способов и технических средств для освоения шельфа (рис.1.5) 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 развития морской техники, наиболее технологически обоснованными и технически целесообразными являются грунтонасосные, эжекторные и эрлифтные морские снаряды.

Эффективная работа грунтонасосов, эжекторов и эрлифтов 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.

Таким образом, целью данных исследований для решения актуальной проблемы гидравлической добычи железомарганцевых конкреций на шельфе, является научно-методическое обеспечение технологии гидроподъема при различных глубинах шельфа и технико-энергетическая оценка работы гидротранспортного оборудования (эжектора, эрлифта, грунтового насоса).

В качестве способа достижения поставленной цели – идеи работы – принимается разработка методики расчета параметров гидроподъема с учетом установления скоростей свободного и стесненного падения железомарганцевых конкреций и процесса их дезинтеграции при работе различного оборудования.

Проблема расчета гидротранспортных систем включает в себя рассмотрение основных взаимовлияющих факторов с целью минимизирования энергетических затрат для увеличения эффективности рабочего процесса и оборудования гидротранспортного комплекса. Это позволяет определить в качестве главной задачи – исследование гидравлической крупности конкреций в свободных и стесненных условиях для определения основных расчетных параметров гидротранспортирования: критической скорости  $V_{кр}$ , гидравлических сопротивлений  $i$ , диаметра трубопровода.

Одним из важных условий добычи железомарганцевых конкреций является обеспечение минимальной степени их дезинтеграции, так как они достаточно хрупкие, непрочные и разрушаются при небольших механических нагрузках на них. Исследования и расчеты показали, что технологически возможно и экономически целесообразно перерабатывать ЖМК в товарную продукцию при концентрации марганца более 5 % [6, 10, 31, 61]. Следовательно, следующей задачей исследований является оценка степени дезинтеграции при работе гидротранспортного оборудования (эжектора, эрлифта, грунтового насоса).

Итогом исследований служит разработка научно-методических рекомендаций для расчетов гидродинамических параметров при проектировании технологических комплексов гидроподъема ЖМК на различных глубинах шельфа.

При выполнении поставленных задач работы использованы следующие методы научных исследований: анализ и обобщение практического опыта и литературных данных по определению гидравлической крупности для различных минеральных частиц; проведение лабораторных работ по определению скоростей свободного и стесненного падения железомарганцевых конкреций, а также по изучению факторов, влияющих на конечные скорости движения; анализ и обработка результатов экспериментальных исследований, и некоторых данных, полученных аналитическими, расчетными путями, а также их сопоставление и обобщение; установление функциональных зависимостей гидравлической крупности в свободных и стесненных условиях для конкреций различной крупности; анализ и обобщение практического опыта и литературных данных по технологическим аспектам процесса дезинтеграции; экспериментальные исследования по дезинтеграции железомарганцевых конкреций; обобщение и обработка материалов, полученных экспериментальным путем; аналитическое обоснование процессов дезинтеграции при работе различного оборудования с использованием методов математической статистики и обработки результатов исследований с помощью ЭВМ.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРУПНОСТИ ЖМК В СВОБОДНЫХ И СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ.**

### **2.1. Теоретические аспекты изучения конечной скорости свободного падения твердых частиц.**

Анализ литературных источников показывает, что исследования по определению конечных скоростей свободного и стесненного падения минеральных частиц, в первую очередь, проводились для гравитационных методов обогащения, основанных на различии объемной плотности минеральных зерен обогащаемой пульпы с учетом их размеров. Такое разделение осуществляется динамическим воздействием среды (вода, воздух) на минеральные смеси, состоящие из фракций разных по величине и удельному весу. В результате теоретических и экспериментальных исследований этих процессов разработаны различные методы расчета конечных скоростей свободного и стесненного падения твердых частиц в технологиях передела (обогащения) [15, 43, 46, 73, 76].

Однако для технологических процессов добычи железомарганцевых конкреций (ЖМК) с морских и океанических глубин такие исследования в публикациях научно-технической литературы отсутствуют.

Известно, что гидравлической крупностью называется скорость свободного падения одиночных тел (твердой частицы) в жидкостях без влияния на нее стенок сосуда. Когда падающая твердая частица достигает своей предельной скорости, и ускорение равно нулю, скорость становится постоянной и называется конечной скоростью падения.

Скорость падения частицы относительно жидкости определяется соотношением действующих на эту частицу сил [15, 43, 76], Н:

1) *гравитационной*;

$$F_1 = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \delta g, \quad (2.1)$$

где  $d$  – диаметр сферической частицы, м;

$\delta$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

2) *подъемной (архимедовой)*;

$$F_2 = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \Delta g, \quad (2.2)$$

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

3) *гидродинамического сопротивления* в движущейся среде, которое включает силы трения жидкости с твердыми частицами (вязкости) и динамические (силы инерции). Они действуют одновременно, но с неодинаковой силой. Гидродинамические сопротивления преобладают при значительных скоростях и размерах движущейся твердой частицы; силы трения – при небольших скоростях и размерах, а также при большой вязкости жидкости.

Для движения твердой частицы с постоянной скоростью гидродинамическое сопротивление в общем виде определяется уравнением [43, 73], Н:

$$F_3 = \psi \Delta V^2 d^2, \quad (2.3)$$

где  $\psi$  – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса;

$V$  – скорость движения частицы, м/с.

Сила сопротивления среды движущемуся в ней телу зависит от режима движения. Параметр, характеризующий характер течения жидкости и условия перехода ламинарного режима течения в турбулентный, как известно, называется числом Рейнольдса ( $Re$ ) и определяется по следующей формуле:

$$Re = \frac{Vd\Delta}{\mu}, \quad (2.4)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Н·с/м<sup>2</sup>.

В зависимости от режима меняется характер обтекания частицы средой. При ламинарном режиме происходит обтекание при небольших

скоростях движения и сопровождается плавным схождением элементарных слоев жидкости позади тела. В этом случае гидростатическое сопротивление зависит от вязкости среды и количественно определяется законом Стокса, Н:

$$P_B = 3\pi\mu Vd, \quad (2.5)$$

где  $P_B$  – сила сопротивления от трения слоев жидкости, Н.

Турбулентный режим ( $Re > 1000$ ) характерен для высоких скоростей движения и сопровождается образованием вихрей позади частицы [76]. Образование вихревой зоны за телом связано с потерей энергии жидкостью из-за трения о поверхность тела. Разность динамических сопротивлений при перемещении тела в среде описывается уравнением Ньютона-Риттингера, Н:

$$P_d = \frac{\pi}{16} \cdot V^2 d^2 \Delta. \quad (2.6)$$

Резкой границы между ламинарным и турбулентным режимами нет [73, 76]. Переход от одной зоны к другой происходит постепенно, вследствие этого между ними имеется переходная зона (рис. 2.1). В переходной зоне действуют оба вида сопротивлений движущемуся телу, но при увеличении турбулентности значение вихревого сопротивления возрастает, а значение сопротивления от трения уменьшается.

Для переходной области сопротивление определяется по формуле Аллена, Н:

$$P_a = \frac{5\pi}{8\sqrt{Re}} \cdot V^2 d^2 \Delta, \quad (2.7)$$

Уравнения (2.5) и (2.6) не учитывают трение слоев жидкости относительно друг друга и их кинематическую структуру, следовательно, не отражают всей картины сопротивления среды [15, 43, 73, 75, 76].

При рассмотрении общего сопротивления среды, вызываемого трением при обтекании тела жидкостью с учетом сил инерции, которые сопровождают друг друга Релей [43, 72] экспериментально установил зависимость между числом  $Re$  и силой сопротивления, которое испытывает падающее тело в виде шара, через коэффициент сопротивления  $\psi$ :

$$\psi = \frac{P}{V^2 d^2 \Delta}. \quad (2.8)$$

Коэффициент сопротивления  $\psi$  является безразмерным параметром, как и число Рейнольдса. Однако аналитической зависимости между этими двумя параметрами не найдено, и она представлена в виде экспериментальной кривой – гиперболы (рис. 2.1) [67, 72, 76].

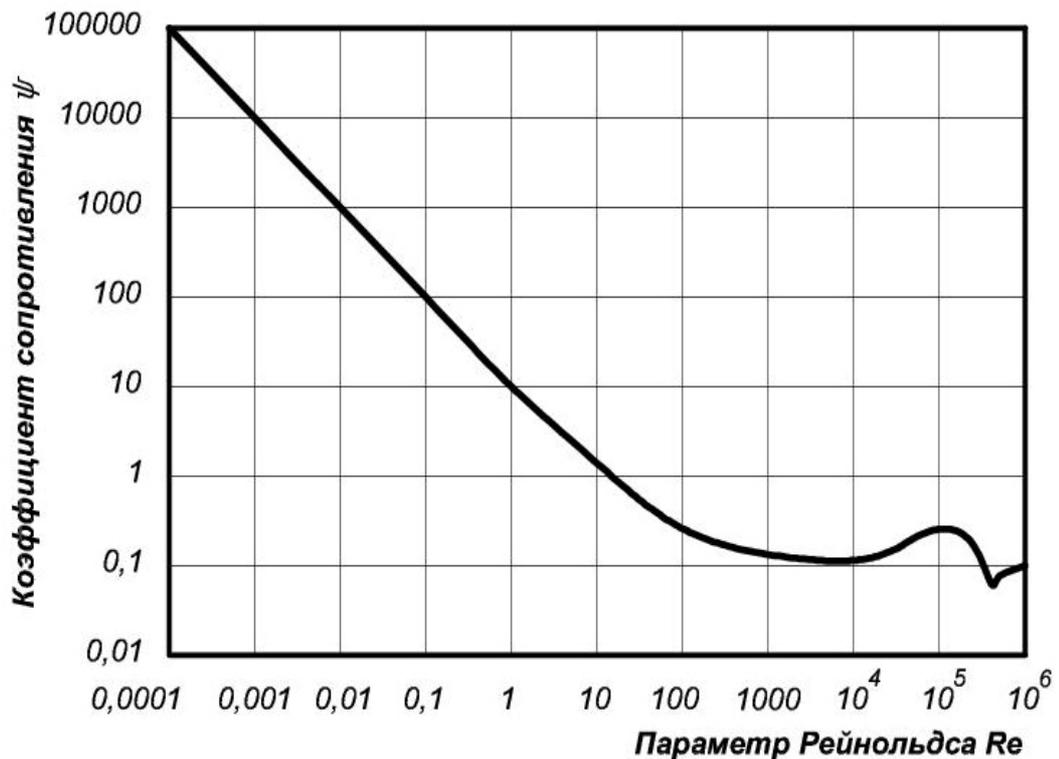


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента сопротивления  $\psi$  от числа Рейнольдса  $Re$  при свободном падении шарообразных частиц в жидкости (диаграмма Релея).

Плавный вид кривой указывает на то, что между турбулентным и ламинарным режимами существует постепенный переход от одного вида к другому по мере изменения числа Рейнольдса.

Зависимость  $\psi = f(Re)$  имеет важное значение для расчета скорости падения тел в жидкости. При изменении  $\psi$  выделяются четыре характерные области [15, 43, 76]:

1. Область малых чисел Рейнольдса  $Re < 1$ . В этой области коэффициент сопротивления  $\psi$  обратно пропорционален  $Re$ ,

обтекание шарообразных частиц ( $d < 0,1$  мм) является ламинарным. Коэффициент сопротивления равен  $\psi = 3\pi/Re$ .

2. Переходная область  $1 < Re < 1000$  ( $d = 0,1-2$  мм). Коэффициент сопротивления  $\psi$  убывает медленно, постепенно приближаясь к постоянной величине.  $\psi = 5\pi/8\sqrt{Re}$ .
3. Область чисел Рейнольдса  $10^3 < Re < 10^5$  ( $d > 2$  мм). Коэффициент сопротивления  $\psi$  является приблизительно постоянным  $\psi = \pi/16$  и сила сопротивления определяется полностью перепадом давления в турбулентной области.
4. Область резкого снижения коэффициента сопротивления  $10^5 < Re < 3 \cdot 10^5$ . Кризисная зона, в которой происходит резкое падение  $\psi$ , это вызвано сужением вихревой области за частицей вследствие перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный.

Считается, что при больших числах Рейнольдса влияние вязкостных сил сосредотачивается в сравнительно небольшом слое у частицы. Для определения общего сопротивления падающей частицы в жидкости В. Н. Гончаров предложил динамическое и вязкостное сопротивления привести к сопротивлению, условно сосредоточенному в пограничном слое жидкости толщиной  $\lambda$  [73, 76], Н:

$$P = k\mu\pi d^2 \frac{V}{\lambda}, \quad (2.9)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от изменения толщины пограничного слоя;

$\lambda$  – толщина пограничного слоя, м.

Значения коэффициентов  $k$  и  $\lambda$  могут быть определены для любой области значений  $\psi$  и  $Re$ . По Л. Прандтлю [60]:

$$\lambda = \frac{cd}{\sqrt{Re}}, \quad (2.10)$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности.

Толщина пограничного слоя имеет небольшую величину по сравнению с размерами обтекаемой жидкостью твердой фракцией.

Движение жидкости внутри пограничного слоя может быть ламинарным или турбулентным, однако при значительных скоростях обтекания ламинарный режим переходит в турбулентный, и вызывает интенсивность перемешивания. При этом толщина пограничного слоя в нем значительно возрастает [41, 73].

В то же время образующиеся на тыльной стороне частицы вихри отрывают пограничный слой от твердой фракции и это приводит к повышению ее сопротивления.

При обтекании шаровой поверхности увеличение скорости в пограничном слое перемещает точку его отрыва вниз по течению, что уменьшает размеры вихревой зоны и способствует резкому понижению сопротивления твердой частицы (при  $10^5 \leq Re \leq 10^6$ ).

С увеличением размеров твердой фракции при их падении образование вихрей увеличивается, и их сопротивление становится преобладающим в суммарном сопротивлении жидкости.

Проблемы определения сопротивления при свободном падении твердых частиц, как показывает проведенный анализ различных работ [5, 9, 14, 30, 40, 41, 48, 55, 63, 72, 74], решаются аналитическими и экспериментальными исследованиями, либо их комбинацией. Однако нередко результаты экспериментов не соответствуют теоретическим обоснованиям, что заставляет многих специалистов вводить в расчетные уравнения различные поправочные коэффициенты для конкретных, по своим физико-механическим свойствам, пород.

## **2.2. Анализ существующих методов расчета.**

На основании зависимостей (2.1)-(2.3) общее уравнение скорости свободного падения шарообразных частиц различных минералов принимает вид, м/с:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\pi d(\delta - \Delta)}{6\psi\Delta}}, \quad (2.11)$$

где  $V_0$  – скорость свободного падения частиц, м/с.

Уравнение (2.11) универсальное и позволяет при любых режимах определять значение скорости свободного падения частиц. Однако его использование является затруднительным вследствие постоянного изменения коэффициента сопротивления  $\psi$ , зависящего от режима движения и являющегося функцией параметра Рейнольдса.

Исследованием конечных скоростей свободного падения частиц занималось большое количество ученых, таких как И. Ньютон, П. Р. Риттингер, Дж. Г. Стокс, Ю. С. Аллен, П. В. Лященко, В. Н. Гончаров, И. О. Финкей, Б. В. Кизельватер, Э. Ф. Миллер, В. И. Классен, Т. Г. Фоменко, Р. Б. Розенбаум, О. М. Годес, Ц. В. Озеен, В. А. Олевский, А. М. Годэн, Х. С. Монро, М. А. Великанов, А. П. Зегжда, М. Я. Антонычев, Ф. И. Нагирняк, Ф. Фонштейн, А. Е. Смолдырев и др. [5, 13, 14, 30, 40, 42, 48, 49, 56, 67, 74]. Ими были проведены многочисленные исследования, в результате которых установлены функциональные зависимости и предложены многочисленные уравнения. Наиболее значимые из них представлены в таблице 2.1.

На основании проведенного анализа литературы существуют три способа определения конечных скоростей свободного падения минеральных зерен [43, 73, 76]:

- аналитический (по теоретическим уравнениям, эмпирическим и интерполяционным формулам);
- графический (по номограммам и графикам);
- экспериментальный (по табличным данным, составленным на основе экспериментальных исследований).

Таблица 2.1.

Уравнения для определения скорости свободного падения частиц в среде, опубликованных в различных литературных источниках.

№	Авторы, литературный источник	Предлагаемое уравнение	Границы применимости по $Re$	Уравнение подтверждено экспериментально для размера частиц
1	И. Ньютон, П. Р. Риттингер [43, 73, 76]	$V_0 = \sqrt{2,67gd \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)}$	$10^3 \leq Re \leq 10^4$	$d > 0,8$ мм
2	Р. Г. Люннон [72]	$V_0 = 5,5 \sqrt{d \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)}$	$10^3 \leq Re \leq 10^4$	$d > 1$ мм
3	Дж. Г. Стокс [43, 72, 76]	$V_0 = 0,545 d^2 \frac{(\delta - \Delta)}{\mu}$	$Re < 1$	$d = 0,012-0,12$ мм
4	Ю. С. Аллен [43, 73, 76]	$V_0 = k \sqrt[3]{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta} g\right)^2 \cdot \frac{r - hr'}{\sqrt[3]{\nu}}}$	$1 \leq Re \leq 10^3$	$d = 0,12-1,0$ мм
5	П. В. Лященко [43, 46, 73, 76]	$V_0 = \frac{Re \cdot \mu}{d\Delta}$	$10^{-3} \leq Re \leq 10^5$	$d = 0,012-2$ мм
6	В. Н. Гончаров [73, 76]	$V_0 = \frac{P \cdot \lambda}{k\mu\pi d^2}$	$10^3 \leq Re \leq 10^5$	$d > 2$ мм

7	Т. Г. Фоменко [72, 73]	$V_0 = Kg \frac{(\delta - \Delta)d\lambda}{\mu}$	$0,1 \leq Re \leq 10^5$	$d > 0,01 \text{ мм}$
8	Э. Ф. Миллер, В. И. Классен [73]	$V_0 = 0,099\sqrt{H(\delta - 1000)}$	$10^3 \leq Re \leq 10^4$	$d > 0,8 \text{ мм}$
9	Ц. В. Озеен [17, 73]	$V_0 = \frac{-C_1}{r} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{r}\right)^2 + 4rC_2}$	$Re < 1$	$d = 0,012-0,05 \text{ мм}$
10	В. А. Олевский, А. К. Корольков [55, 73]	$V_0 = k_1 d^{3n-1} \cdot v^{1-2n} \cdot \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)^n$	$0,01 \leq Re \leq 10^4$	$d = 0,12-0,42 \text{ мм}$
11	Б. В. Кизевальтер [40, 41, 42]	$V_0 = 68 \sqrt{\frac{\Omega}{8,95 - 7,4\Omega} \cdot \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)} d_3$	$10^3 \leq Re \leq 10^4$	$d = 0,02-25 \text{ мм}$
12	М. А. Великанов, А. П. Зегжда [12, 30, 78]	$V_0 = \frac{gr \left(\frac{\delta}{\Delta} - 1\right)}{0,105 + 4,5Re^{-1} + \frac{2,655}{\pi} \arctg \sqrt{Re^{-1}}}$	$Re \leq 1$	$d < 0,125 \text{ мм}$
13	А. Е. Смолдырев [67]	$V_0 = \sqrt{\frac{2g \cdot (\delta - \Delta) \cdot d}{3\Delta\psi}}$	$Re > 500$	$d > 3 \text{ мм}$
14	М. Я. Антонычев, Ф. И. Нагирняк [5, 17, 43, 73]	$V_0 = \frac{v}{d} \left( \sqrt{20,4 + 2,95\sqrt{Re^2\psi} - 4,52} \right)^2$	$0,1 \leq Re \leq 10^4$	$d > 2 \text{ мм}$

15	Р. Б. Розенбаум, О. М. Годес, К. С. Шифрин [19, 43, 63, 74]	$V_0 = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{(18 + 0,61\sqrt{Ar})}$	$1 \leq Re \leq 10^4$	$d > 2 \text{ мм}$
16	Э. В. Адамов [11]	$V_0 = 21,2 \frac{v}{d} \sqrt{\left(\sqrt{1 + 0,038Ar^{2/3}} - 1\right)^3}$	$0 \leq Re \leq 10^4$	-
17	Н. Ф. Меринов [49]	$V_0 = \frac{24}{d} \left(\sqrt{0,0001 + 7,494d^3} - v\right)$	$0 \leq Re \leq 10^4$	$d > 2 \text{ мм}$
18	А. В. Богданович [9]	$V_0 = \frac{vAr}{d(17,4 + 0,5\sqrt{Ar} + 0,7\sqrt[3]{Ar})}$	$0 \leq Re \leq 10^4$	$d > 2 \text{ мм}$
19	Руби [12, 78]	$V_0 = F \sqrt{dg \cdot \frac{\delta - \Delta}{\Delta}}$	$0,1 \leq Re \leq 10^4$	$d > 1 \text{ мм}$
20	Шене [11]	$V_0 = \sqrt[7]{\left(d \frac{\delta - 1}{0,0518}\right)^{11}}$	$1 < Re < 3000$	$d = 0,01-2 \text{ мм}$
21	В. И. Соколов [11]	$V_0 = 28,5 \sqrt[5]{(\delta - 1)^3 d^4}$	$1 < Re < 700$	$d = 0,1-2 \text{ мм}$

**Примечание:** \*Для удобства анализа все основные параметры исследуемых уравнений обозначены одинаковыми символами.

\*Основные параметры исследуемых уравнений, представленных в таблице 2.1:

$V_0$  – скорость свободного падения частиц, м/с;

$\delta$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр частиц, м;

$d_э$  – эквивалентный диаметр, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Ar$  – параметр (критерий) Архимеда;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Н·с/м<sup>2</sup>;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с ;

$\lambda$  – толщина пограничного слоя, м;

$\psi$  – коэффициент сопротивления;

$\Omega$  – коэффициент сферичности;

$k$  и  $h$  – постоянные коэффициенты  $k = 0,5$ ;  $h = 0,4$  (формула Аллена);

$r$  – радиус шара, м;

$r'$  – радиус наибольшего зерна, скорость падения которого подчиняется закону Стокса;

$K$  – коэффициент по Фоменко;

$k_1$  – коэффициент по Олевскому;

$H$  – высота зерна, м;

$C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты по Озеену;

$Re^2\psi$  – параметр Лященко.

*Аналитический способ определения конечных скоростей свободного падения минеральных зерен* – заключается в определении силы сопротивления по полю скоростей жидкости, полученному на основе интегрирования уравнений гидромеханики вязкой жидкости.

П. Р. Риттингер на основе выявленного Ньютоном динамического давления на шаровую поверхность, рассматривая падение шаровой частицы в

спокойной среде в которой действует сила тяжести, направленная вниз, и сила сопротивления среды, направленная в вверх и, приравняв силы, установил уравнение для определения конечной скорости падения, м/с:

$$V_0 = k \sqrt{d \left( \frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right)}, \quad (2.12)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от формы и плотности зерен, для шара  $k = 5,12$  ( $k = \sqrt{2,67g}$ ). На практике зерна минералов имеют неправильную форму, и коэффициент  $k$  является величиной непостоянной, для продолговатых тел – 5,4, для плоских тел – 4,39; для рудной смеси – 4,68.

Уравнение Риттингера было уточнено Р. Г. Люнном и приведено к виду, м/с:

$$V_0 = 5,5 \sqrt{d \left( \frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right)}. \quad (2.13)$$

Р. Х. Ричардс на основе экспериментальных исследований внес изменения в значения  $k$  для кварца – 0,092 ( $d > 0,016$  см), галенита – 0,104 ( $d > 0,016$  см), угля – 0,073-0,096 ( $d = 0,25-5$  см) [73].

Значение конечной скорости свободного падения по уравнению (2.12) зависит от диаметра зерен и от плотности.

Ю. С. Стокс допускал, что движение шаровой частицы характеризуется безотрывным обтеканием ее потоком, хотя другие исследователи считали не всегда так. В его уравнении учитывается только силы внутреннего трения среды (без влияния динамического сопротивления) и конечная скорость падения частицы будет прямо пропорциональна разнице плотностей минеральной частицы и среды и квадрату диаметра частицы и обратно пропорциональна абсолютному коэффициенту вязкости среды.

$$V_0 = 0,545 d^2 \frac{(\delta - \Delta)}{\mu}, \quad (2.14)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости жидкости, Н·с/м<sup>2</sup>.

Практика показала, что уравнение, предложенное Стоксом, применимо лишь для узкого диапазона твердых частиц 0,012-0,12 мм [73].

Формула Аллена была выведена в результате экспериментальной проверки по Риттингеру и Стоксу, в ходе которой было установлено, что в диапазоне крупности зерен от 0,12 до 2 мм значения скорости явно завышены.

$$V_0 = k \sqrt[3]{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta} g\right)^2} \cdot \frac{r - hr'}{\sqrt[3]{\nu}}, \quad (2.15)$$

где  $k$  и  $h$  – постоянные коэффициенты ( $k = 0,5$ ,  $h = 0,4$ );

$r'$  – наибольшие зерна данного минерала, м;

$r$  – радиус шара, м.

Дальнейшее развитие исследований в направлении совершенствования метода определения скоростей свободного падения частиц привело к разработке универсального метода П. В. Лященко, он основан на зависимости числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления (по диаграмме Релея) и учитывает оба вида сопротивления (раздел 2.1), испытываемого телом при его падении.

При падении частицы в среде наступает такой момент, когда сила тяжести частицы уравновешивается сопротивлением среды, и частица начинает двигаться с постоянной, т.е. конечной скоростью. Пренебрегая периодом ускоренного движения частицы, он принимал, что равномерное движение происходит при условии, когда вес тела в среде уравновешивается силой сопротивления среды [72].

П. В. Лященко путем исключения  $V_0$  и  $d$  из уравнений (2.4) и (2.8) получил параметр Лященко, равный:

$$Re^2 \psi = \frac{G_0 \Delta}{\mu^2}, \quad (2.16)$$

где  $G_0$  – вес частицы в среде, Н.

На рисунке 2.2 показана диаграмма зависимости параметра  $Re^2 \psi$  от числа  $Re$ .

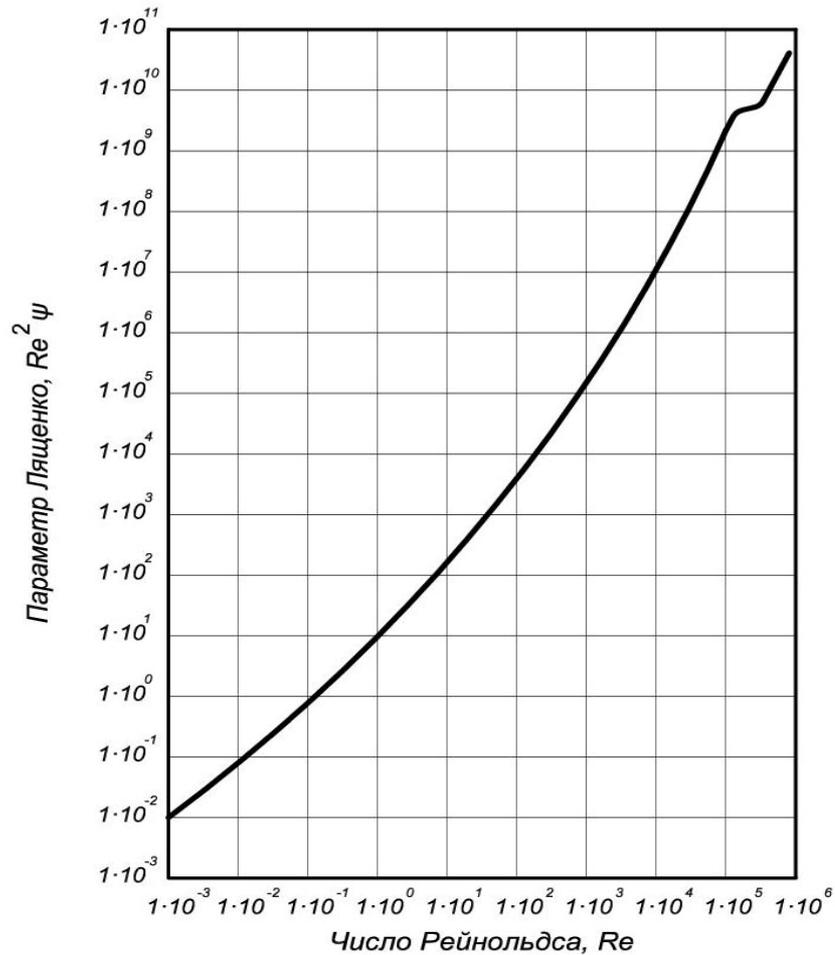


Рис. 2.2. Диаграмма зависимости параметра  $Re^2\psi$  от числа Рейнольдса (диаграмма П. В. Лященко).

Определив по диаграмме  $Re$  и подставив найденное значение в формулу (2.4), получим уравнение определения конечной скорости падения частиц в следующем виде, м/с:

$$V_0 = \frac{Re \cdot \mu}{d\Delta}. \quad (2.17)$$

Тогда значение конечной скорости свободного падения по уравнению (2.17) зависит от числа Рейнольдса, вязкости и плотности жидкости и диаметра частиц.

Эмпирические и интерполяционные уравнения для расчета скоростей движения частиц разными авторами были определены путем математической интерпретации графической зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса  $Re$  по кривой Релея (рис. 2.2) [43].

В. А. Олевский предложил зависимость, которая аппроксимирует кривую в диапазоне параметров  $Re$  до  $10^4$ . Кривая Релея делится на пять участков, в каждом из которых кривая приближенно, заменяется отрезком прямой [43, 55, 76]. Уравнение, описывающее отдельные участки имеет вид:

$$\psi = n_1 \cdot Re^{-q}, \quad (2.18)$$

где  $n_1$  и  $q$  – постоянные для данного участка кривой.

Скорость частиц при этом можно определить из уравнения, м/с:

$$V_0 = k_1 d^{3n-1} \cdot v^{1-2n} \cdot \left( \frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right)^n; \quad (2.19)$$

$$n = \frac{1}{1 - 2q};$$

$$k_1 = \left( \frac{\pi}{6n_1} g \right)^n.$$

Предпринимались попытки интерпретировать кривую Релея на значительном отрезке изменения чисел Рейнольдса одной зависимостью, чтобы получить универсальную формулу. Некоторые исследователи [5, 43, 55] предложили следующий вид функции  $\psi(Re)$ :

$$\psi = \frac{a_1}{Re} + \frac{b_1}{\sqrt{Re}} + c_1, \quad (2.20)$$

где  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  – постоянные коэффициенты, которые у разных авторов имеют непостоянные значения.

М. Я. Антонычевым и Ф. И. Нагирняком было предложено уравнение, которое охватывает большую область гидравлической классификации ( $0,1 \leq Re \leq 10^4$ ), и показывало достаточно хорошие результаты, сильно приближенные к экспериментальным данным [5], м/с:

$$V_0 = \frac{v}{d} \left( \sqrt{20,4 + 2,95\sqrt{Re^2\psi} - 4,52} \right)^2, \quad (2.21)$$

$$\text{при } \psi = \frac{3\pi}{Re} + \frac{2,08}{\sqrt{Re}} + 0,115.$$

Погрешность в расчетах скорости по уравнению (2.21) не превышает 9% [43].

Для определения гидравлической крупности для разных значений числа  $Re$ , также можно отметить формулу Руби [78], м/с:

$$V_0 = F \sqrt{dg \cdot \frac{\delta - \Delta}{\Delta}}, \quad (2.22)$$

где

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\mu^2}{gd^3\Delta(\delta - \Delta)}} - \sqrt{\frac{6\mu^2}{gd^3\Delta(\delta - \Delta)}}. \quad (2.23)$$

Т. Г. Фоменко, используя уравнение В. Н. Гончарова (2.9), выразил общее сопротивление среды падающего в жидкости тела, динамическое и вязкостное сопротивление пограничного слоя, и тогда формула скорости свободного падения частиц в среде примет вид [72, 73], м/с:

$$V_0 = Kg \frac{(\delta - \Delta)d\lambda}{\mu}. \quad (2.24)$$

Функциональная зависимость толщины обтекаемого слоя  $\lambda$  от  $d$ ,  $V_0$  и  $\mu$ , это было отмечено в разделе 2.1, определяется по Прандтлю (2.10).

А. Е. Смолдырев на основе многочисленных экспериментальных исследований уточнил и упростил уравнения Риттингера, Стокса и Аллена для различных чисел Рейнольдса [48, 67]. Для  $Re < 1$  уравнение свободного падения в среде примет следующий вид, м/с:

$$V_0 = 54,5d^2 \cdot \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right). \quad (2.25)$$

Для  $1 < Re < 500$ :

$$V_0 = 2,58d \sqrt[3]{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)^2} \sqrt{\frac{\Delta g}{\mu}}. \quad (2.26)$$

При свободном падении частиц в воде крупностью 0,15-2 мм А. Е. Смолдырев рекомендует использовать уравнение, м/с:

$$V_0 = 68d(\delta - 1) + C(\delta - 1); \quad (2.27)$$

$$C = 0,5 \left(\frac{t}{26} - 1\right),$$

где  $t$  – температура жидкости в °С.

Для турбулентной области  $Re > 500$  ( $d > 3$  мм):

$$V_0 = 5,11 \sqrt{d \left( \frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right)}. \quad (2.28)$$

В ряде работ предлагается для получения формулы скорости свободного падения использовать кривую Лященко  $Re^2\psi = f(Re)$ . Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодес, К. С. Шифрин [62, 74] методом математической интерполяции определили соотношение между критериями Рейнольдса и Архимеда  $Ar$  [47]:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (2.29)$$

Согласно формуле (2.29) уравнение определения скорости падения  $V_0$  принимает вид, м/с:

$$V_0 = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{(18 + 0,61\sqrt{Ar})}. \quad (2.30)$$

Ошибка при этом ( $Re > 100$ ) варьируется от 3 до 13% [18, 23].

*Графический способ определения конечных скоростей свободного падения минеральных зерен.* Известны три основных метода графического определения скоростей свободного падения минеральных зерен: по кривой Релея  $\psi = f(Re)$  (рис. 2.1), по графикам  $Re^2\psi = f(Re)$  и  $\psi/Re = f(Re)$  (рис. 2.2), по графикам  $Re^2\psi = f(\psi/Re)$  [43].

Суть первых двух графических методов заключается в том, что для определения скорости свободного падения или диаметра частиц необходимо рассчитать один из параметров ( $Re^2\psi$ ,  $\psi/Re$ ), а потом по графику найти второй и по нему определить искомую величину  $V_0$  или  $d$ .

Для определения скорости или диаметра частиц по третьему методу строится график зависимости  $\psi/Re = f(Re^2\psi)$  (рис. 2.3). Так как  $\psi/Re$  содержит скорость частиц, но не содержит диаметр, а  $Re^2\psi$  – наоборот, содержит диаметр, но не содержит скорости, то функция  $\psi/Re = f(Re^2\psi)$  представляет собой зависимость скорости частиц от их диаметра [43, 56].

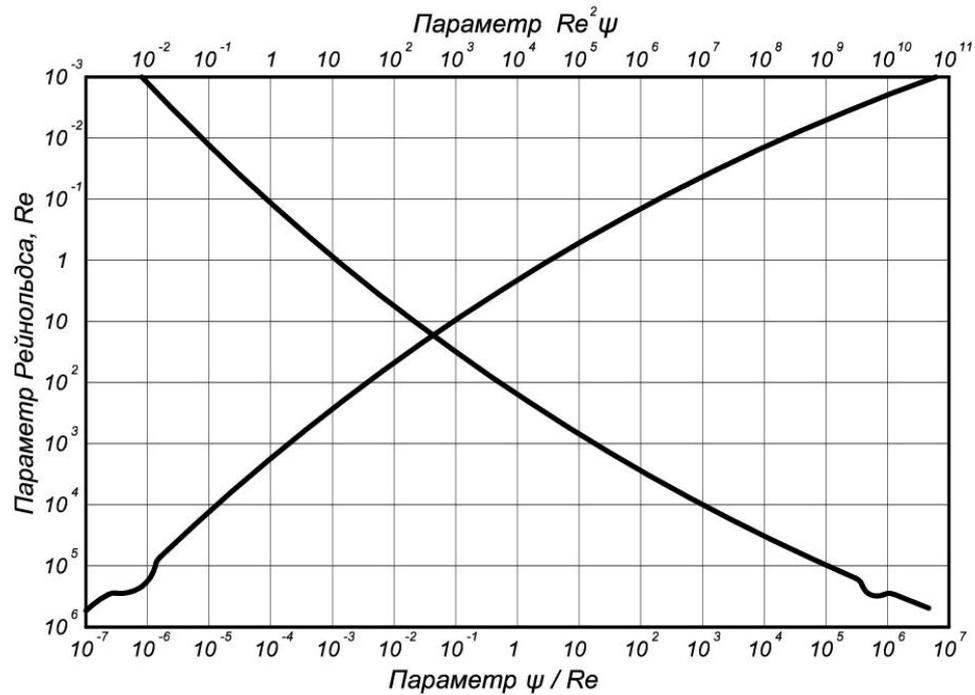


Рис. 2.3. Зависимость параметров  $Re^2\psi$  и  $\psi/Re$  от параметра Рейнольдса.

Для сравнительной оценки области применения расчетных уравнений и методик определения гидравлической крупности в зависимости от размера частиц и удельного веса необходимо воспользоваться результатами экспериментальных исследований П. В. Лященко, Т. Г. Фоменко, Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодеса, А. Е. Смолдырева, Ю. А. Маркова, Б. В. Кизевальтера, В. Н. Шохина, по которым можно сделать следующие выводы:

- Сравнение уравнений (таблица 2.1) по определению конечных скоростей для шара позволяет выявить их теоретическую основу и возможности внесения соответствующих поправок с учетом экспериментальных данных.
- Многие экспериментальные данные по различным минералам не соответствуют теоретическим, поэтому различные авторы вводят корректирующие коэффициенты.
- Поправки, учитывающие формы частиц, ввести весьма затруднительно, это связано с тем, что в каждом случае необходим их подбор. При этом для некоторых минералов коэффициенты даются разные или вообще

отсутствуют. Следует, конечно, отметить, что внесение некоторых поправок приближает результаты подсчета к фактическим скоростям. Однако и в таком виде уравнения для отдельных крупностей и удельного веса не точны.

- Отмечается, что надежное определение скорости свободного падения для частиц различной крупности и формы, возможно только экспериментальным путем [40, 46, 48, 72].

На основании всего вышеперечисленного для корректного расчета гидравлической крупности ЖМК необходимо достоверное определение гидродинамических сопротивлений движущемуся шару, которое может быть решено двумя друг друга дополняющими путями. Первый путь – теоретическое исследование скорости падения частиц, второй – непосредственные экспериментальные исследования скорости свободного падения железомарганцевых конкреций в воде при различной температуре и солености.

### **2.3. Методические положения экспериментального изучения скорости свободного падения частиц.**

Для повышения точности определения скорости свободного падения частиц, при выполнении экспериментальных лабораторных исследований, должны соблюдаться следующие условия:

1. *Частицы должны быть сферической формы.* В подавляющем большинстве ЖМК имеют правильную сфероидальную и эллипсоидную форму, однако, встречаются и веретенообразные, гроздевидные, таблитчатые и полиморфные типы [10].

При выполнении расчетов для крупных частиц за расчетный диаметр обычно принимается диаметр максимальной фракции, для продолговатых – среднеарифметический по трем измерениям, а для мелких – определяется эквивалентный диаметр – диаметр шарообразной частицы, которая имеет ту

же гидравлическую крупность, что и исходная фракция произвольной формы [13, 67], м:

$$d_э = \sqrt[3]{\frac{6G}{\pi n \gamma_{ТВ}}}, \quad (2.31)$$

где  $G$  – вес одной или  $n$  количества частиц, Н;

$\gamma_{ТВ}$  – объемный вес твердых частиц, Н/м<sup>3</sup>.

*а) Падающие частицы должны быть твердыми и гладкими.* Первая часть условия для исследуемых образцов выполнялась полностью. Вторая – в полной мере выполняема только для суспензий. На практике большинство конкреций отличаются друг от друга характером и структурой поверхности. Поверхность может быть: очень гладкая, шагреновая, шероховатая, сильно шероховатая и ботриоидальная [10]. Для выполнения этого условия необходимо прибегнуть к эквивалентному диаметру.

*2. Падающая частица должна достигнуть постоянной скорости в момент начала измерений и эта скорость передвижения не должна превышать некоторое предельное значение.*

В начальный момент движения на частицу должна действовать только сила гравитации. После начала движения в среде, спустя некоторое время, частица приобретает постоянную скорость движения (рис. 2.4).

Время  $t$ , за которое частица достигает конечной скорости, определяется формулой [76], с:

$$t = \frac{2,5V_0\delta}{(\delta - \Delta)g}. \quad (2.32)$$

Уравнение, учитывающее расстояние  $l_0$ , которое должна пройти частица для достижения конечной скорости имеет вид [76]:

$$\frac{l_0}{d} = \frac{\pi\delta}{12\psi\Delta} \cdot \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2}. \quad (2.33)$$

Экспериментальная проверка уравнения (2.33) показала, что путь, проходимый крупными частицами  $d > 2$  мм в начальный период до

достижения конечной скорости, имеет значительную величину, поэтому рекомендуется при определении скорости учитывать этот отрезок пути начального периода движения.

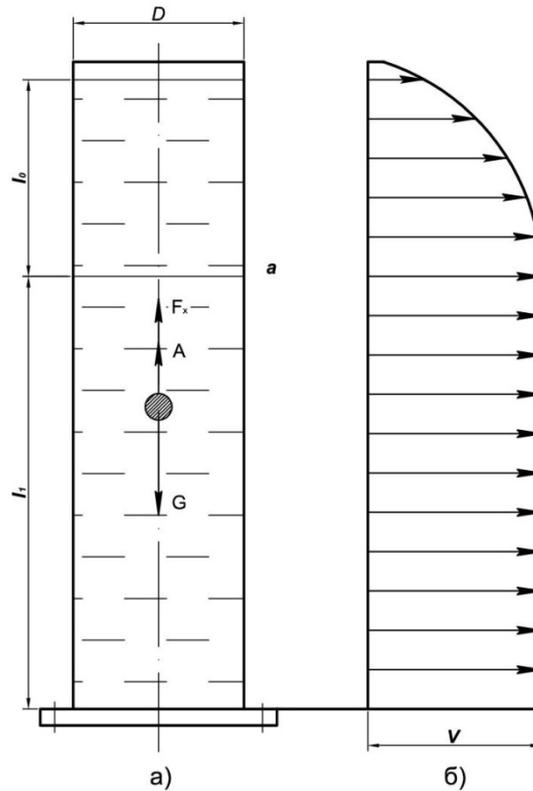


Рис. 2.4. Схема падения частицы ЖМК в воде (а) и эпюра скоростей движения (б).

3. Частица должна падать в безграничной среде, т.е. в бесконечном удалении от стенок сосуда. Как известно из гидродинамики, близость стенок сосуда заметно влияет на градиент скорости передвижения жидкости вдоль стенки. Стенки создают добавочное сопротивление и уменьшают скорость движения частиц [17, 71].

Исходя из термина «свободное» движение отдельного зерна в неограниченной и неподвижной среде или в сосуде, где размеры поперечного сечения, должны более чем в 20-30 раз превышать размеры зерна [76, 80]. Однако, исследования, проведенные Лорентцом, Ландебургом, Факсеном [71] на кварце, показали, что при нахождении частицы от стенки сосуда на расстоянии более 1 мм влияние стенки на скорость падения

частицы незначительно, а при расстоянии 10 мм – фактически можно пренебречь.

## **2.4. Экспериментальные исследования определения гидравлической крупности ЖМК.**

Основной задачей экспериментальных исследований являлось определение гидравлической крупности железомарганцевых конкреций, выявление закономерностей и особенностей изменения скорости свободного падения различных по форме, крупности фракций ЖМК при изменении параметров несущей среды (температуры, солёности), и в итоге установление обоснованного метода расчета с учетом коэффициентов, влияющих на конечную скорость движения частицы в среде.

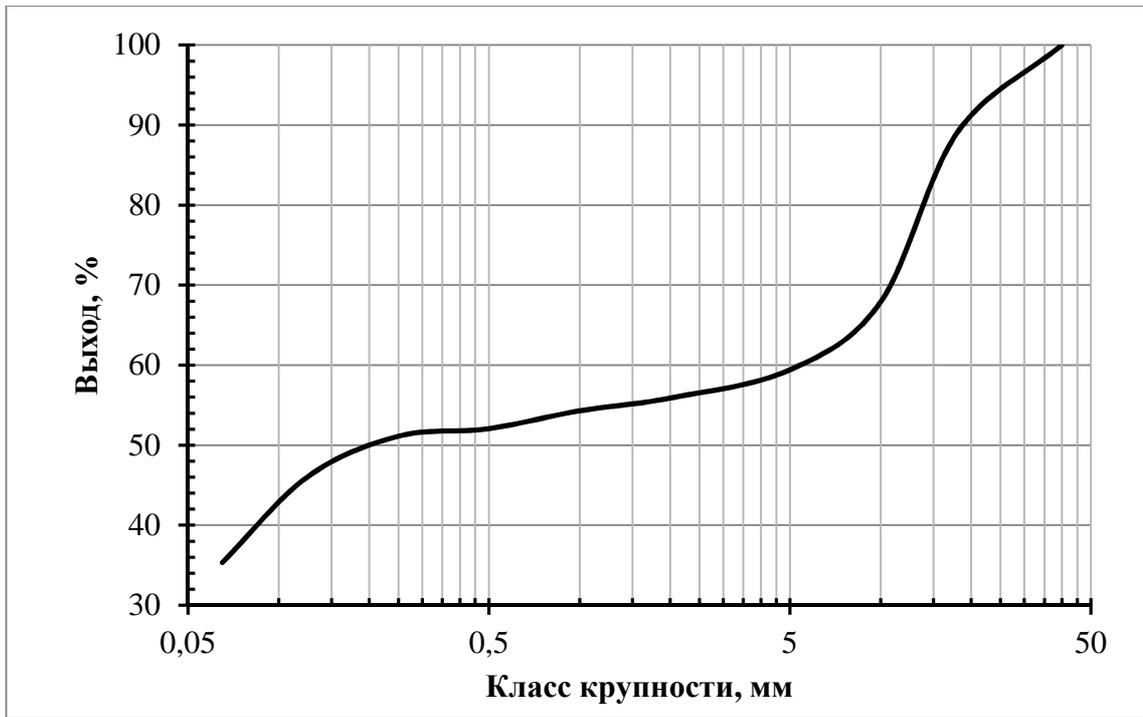
### **2.4.1. Методика проведения экспериментов.**

Для проведения стендовых испытаний была использована технологическая проба ЖМК рудной залежи «Восточная-1» (Финский залив). В таблице 2.2 и на рисунке 2.5 приведен гранулометрический состав пробы:

Таблица 2.2.

№ п/п	Класс крупности, мм	Выход класса, %
1	–40+18	10,9
2	–18+10	21,2
3	–10+5	8,48
4	–5+2	3,53
5	–2+1	1,59
6	–1+0,5	2,23
7	–0,5+0,25	0,95
8	–0,25+0,125	5,04
9	–0,125+0,063	10,75
10	–0,063	35,33
Итого		100,00

Из технологической пробы для проведения экспериментов были отобраны гладкие шарообразные конкреции диаметрами 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм (рис. 2.6). Средняя плотность частиц составляла 1630 кг/м<sup>3</sup>.



*Рис.2.5. Кривая гранулометрического состава ЖМК.*



*Рис.2.6. Железомарганцевые конкреции.*

Для проведения исследований по кинематике движения частиц ЖМК был изготовлен экспериментальный стенд, включающий крупномасштабные цилиндрические сосуды из органического стекла высотой 3800 мм, диаметром 125 и 250 мм (рис. 2.7).

Порядок проведения экспериментов заключался в следующем.



*Рис. 2.7. Лабораторный стенд для определения гидравлической крупности ЖМК.*

Первоначально для проведения экспериментов по определению гидравлической крупности ЖМК цилиндрические сосуды заполнялись водой, температура которой составляла 20°C, соленость 0 ‰.

Согласно методическим положениям раздела 2.3 и уравнению (2.32), время достижения конечной скорости частицей ЖМК диаметром 5 мм составит 0,17 с, диаметром 30 мм – 0,35 с. По уравнению (2.33) расстояние равно  $l_0$ , которое должна пройти частица диаметром 5 мм для достижения

конечной скорости падения равно 0,01 м, диаметром 30 мм – 0,56 м.

На основании вышесказанного, для достоверного определения скорости свободного падения ЖМК при проведении экспериментов,  $l_0$  принималось равным 1 м.

Каждый опыт начинался после приобретения равномерного движения фракцией. Затем секундомером замерялось время прохождения твердой частицы через фиксированное сечение измерительного сосуда (это сечение от поверхности воды находится на расстоянии, больше, чем путь, на котором устанавливается равномерное движение частицы).

На основании полученных значений вычисляется гидравлическая крупность частиц  $V_0$  в расчетный момент времени через соотношение высоты слоя жидкости, на котором началось равномерное движение –  $l_1$  и времени –  $t$ , по истечении которого частица проходит этот слой, м/с:

$$V_0 = \frac{l_1}{t} . \quad (2.34)$$

Для удобства расчетов расстояние  $l_1$  принималось равным 2 м.

После определения скорости свободного падения частиц ЖМК диаметром от 5 до 30 мм, при температуре воды 20°C и солёности 0 ‰, проводился ряд экспериментов при изменении параметров несущей среды.

Таким образом, проводились серии экспериментов по установлению скоростей свободного падения частиц ЖМК диаметрами 5-30 мм при изменении температуры воды от 5 до 20°C и солёности от 1 до 30 ‰.

## **2.5. Результаты экспериментальных исследований свободного падения ЖМК.**

### **2.5.1. Установление функциональной зависимости для скорости свободного падения железомарганцевых конкреций различной крупности.**

Проведенный анализ экспериментальных работ по определению конечной скорости свободного падения показывает, что большинство

экспериментов проводились для кварца с плотностью  $2650 \text{ кг/м}^3$ , имеются данные по касситериту ( $6920 \text{ кг/м}^3$ ), углю ( $1350 \text{ кг/м}^3$ ), антрациту ( $1550 \text{ кг/м}^3$ ), золоту ( $17000 \text{ кг/м}^3$ ). Авторами предлагаются уравнения по определению гидравлической крупности для различных минералов с многочисленными поправочными коэффициентами. Аналитического обобщения уравнений для определения конечной скорости свободного падения не существует, поскольку результаты эмпирических формул даже для минеральных фракций небольшого диапазона крупности, часто не соответствуют фактическим данным, а для частиц ЖМК и вовсе не существуют.

В научных публикациях исследований, связанных с кинематикой движения железомарганцевых конкреций, найти не удалось. Нет данных по свободному и стесненному падению ЖМК, зависимостей от крупности фракций, температуры и солености окружающей среды (морской воды). Поэтому назрела актуальная необходимость проведения экспериментальных исследований для корректного решения этой проблемы.

Как отмечалось в разделе 2.1. режим обтекания твердых частиц вихревым движением жидкости характеризуется числом Рейнольдса, которое Релей (для шарообразных фракций) экспериментально установил функциональную связь его с коэффициентом сопротивления  $\psi$ .

Для чисел Рейнольдса  $10^3 \leq Re \leq 10^5$  выявлено, что в области турбулентного обтекания коэффициент  $\psi$  является приблизительно постоянным.

Анализ результатов, проведенных нами экспериментальных исследований (таблица 2.3), и сопоставление их с расчетными значениями скоростей свободного падения частиц железомарганцевых конкреций по большинству приведенных уравнений из раздела 2.2 (таблица 2.1) для чисел Рейнольдса  $Re > 500$  показывают приемлемые результаты лишь для небольшого диапазона крупности зерен.

Опытные значения скоростей свободного падения ЖМК (при  $t = 20^\circ\text{C}$ )

№ опыта	Скорость свободного падения частиц ЖМК, м/с					
	d = 5 мм	d = 10 мм	d = 15 мм	d = 20 мм	d = 25 мм	d = 30 мм
1.	0,2625	0,3552	0,4211	0,4608	0,5277	0,5405
2.	0,2685	0,3534	0,4124	0,4598	0,5000	0,5376
3.	0,2584	0,3546	0,4175	0,4751	0,4988	0,5435
4.	0,2714	0,3527	0,4228	0,4556	0,5102	0,5420
5.	0,2685	0,3663	0,3984	0,4474	0,5168	0,5376
6.	0,2594	0,3578	0,4124	0,4751	0,5102	0,5277
7.	0,2710	0,3521	0,4073	0,4651	0,4938	0,5376
8.	0,2729	0,3497	0,4024	0,4751	0,5102	0,5333
9.	0,2625	0,3478	0,3992	0,4598	0,5277	0,5319
10.	0,2721	0,3527	0,4008	0,4706	0,5128	0,5376
11.	0,2685	0,3521	0,4040	0,4474	0,5063	0,5479
12.	0,2685	0,3546	0,3960	0,4577	0,5102	0,5263
<i>Ср. значение</i>	0,2669	0,3540	0,4077	0,4622	0,5102	0,5369

В таблице 2.4 представлены выборочные значения для сравнения расчетных скоростей свободного падения различных авторов с результатами экспериментальных исследований.

Сопоставление расчетных показателей по различным уравнениям, представленных в таблице 2.4 и на графике рис. 2.8 с результатами наших опытных исследований позволяет сделать вывод о значительных отклонениях значений  $V_0 = f(d)$  от экспериментальных. Все расчетные скорости свободного падения для частиц железомарганцевых конкреций более 10 мм завышены в  $\sim 1,2-2$  раза.

Таблица 2.4.

Сравнение расчетных и фактических скоростей свободного падения ЖМК.

№ п/п	Автор	Усредненная скорость свободного падения частиц для различных диаметров твердого, м/с					
		d = 5 мм	d = 10 мм	d = 15 мм	d = 20 мм	d = 25 мм	d = 30 мм
1.	П. Р. Риттингер	0,29	0,41	0,5	0,58	0,65	0,7
2.	П. В. Лященко	0,29	0,4	0,66	0,76	0,92	1,04
3.	Б. В. Кизевальтер	0,31	0,43	0,53	0,61	0,68	0,75
4.	М. Я. Антонычев, Ф. И. Нагирняк	0,29	0,45	0,59	0,7	0,79	0,87
5.	Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодес, К. С. Шифрин	0,28	0,4	0,49	0,57	0,64	0,7
6.	В. А. Олевский	0,3	0,46	0,58	0,67	0,76	0,84
7.	Э. Ф. Миллер, В. И. Классен	0,18	0,25	0,3	0,35	0,39	0,43
8.	А. Е. Смолдырев	0,32	0,46	0,56	0,65	0,72	0,79
9.	А. В. Богданович	0,3	0,45	0,55	0,65	0,73	0,81
10.	Экспериментальные исследования (автор)	0,27	0,35	0,41	0,46	0,51	0,54
11.	По предложенному уравнению (автор)	0,28	0,35	0,41	0,46	0,51	0,55

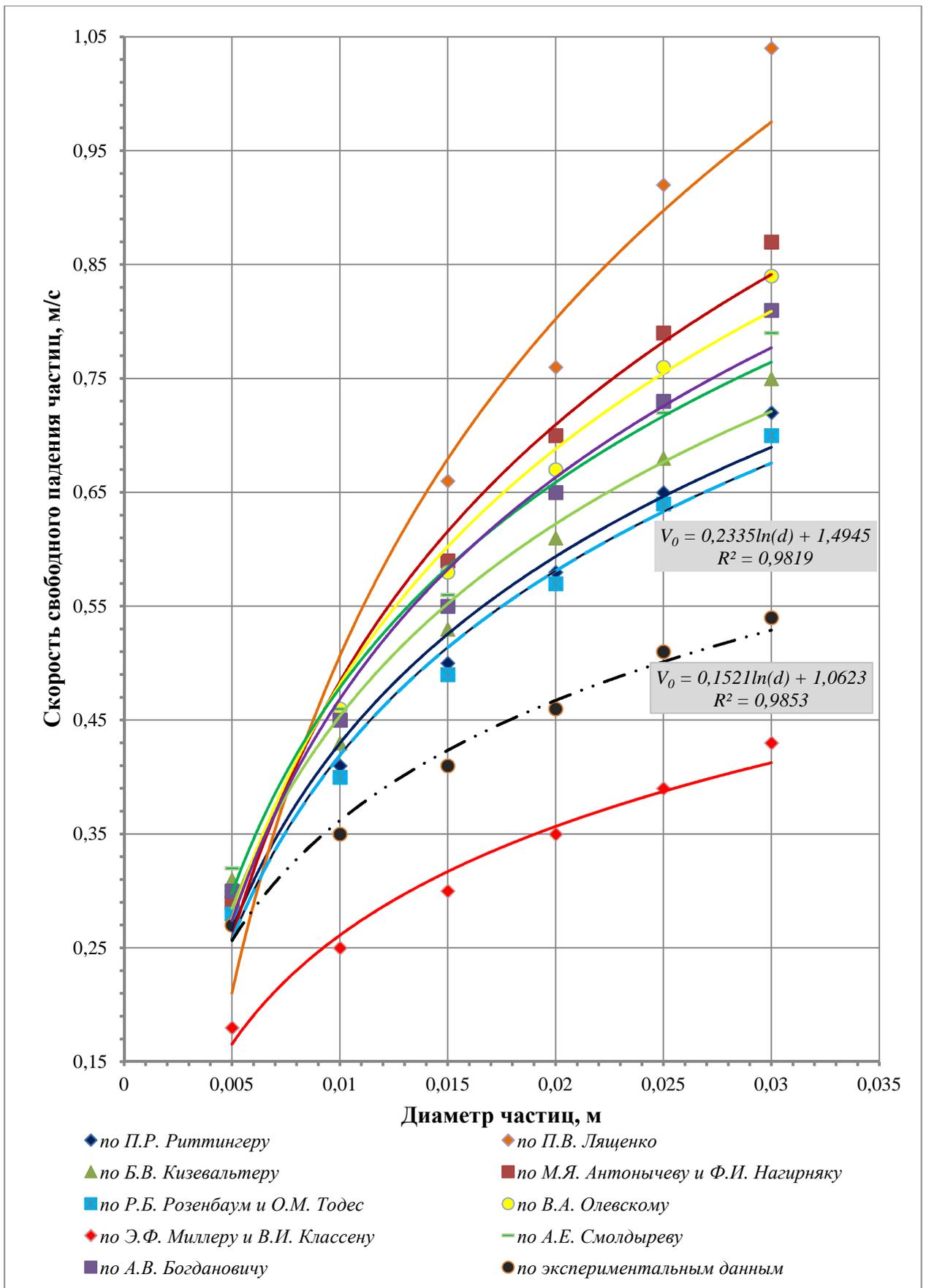


Рис. 2.8. Сравнение расчетных и фактических скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций.

Наиболее близкие результаты показывает уравнение Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодеса, К. С. Шифрина (2.30), однако в диапазоне твердых фракций более 10 мм также наблюдается завышение скоростей от 15 до 30 %.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ различных эмпирических функциональных зависимостей с результатами экспериментальных данных дают основание считать базовым для определения скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций уравнение (2.30).

Однако для более корректного вычисления величин  $V_0$  необходимо ввести в это уравнение (2.30) поправочный коэффициент  $V_0^{ch}=0,081\ln(d)+0,43$ , установленный в результате аппроксимации расчетной и экспериментальной функциональной зависимости  $V_0 = f(d)$  (рис.2.8).

В итоге скорость свободного падения частиц железомарганцевых конкреций нами предлагается определять по уравнению, м/с:

$$V_0 = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43). \quad (2.35)$$

Зависимость (2.35) дает хорошую сходимость с опытными данными (таблица 2.4). Отклонение гидравлической крупности, для различных диаметров частиц, по предложенному уравнению (2.35) не превышают в среднем 3 %.

### **2.5.2. Влияние на скорость свободного падения ЖМК температуры и солености окружающей среды (воды).**

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

Как было отмечено в разделе 2.3, железомарганцевые конкреции в основном имеют правильные сфероидальные и эллипсоидные формы, однако встречаются веретенообразные, гроздевидные, таблитчатые и полиморфные. При проведении экспериментальных работ по определению

конечных скоростей падения 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.

При скоростях, когда преобладает турбулентное сопротивление, частицы стремились повернуться перпендикулярно направлению потока. Это отчетливо проявлялось, когда ось симметрии частицы проходила через центр ее тяжести и когда она перпендикулярна плоскости, которая была расположена поперек движения потока, в этот момент она оказывала максимальное сопротивление. Р. Х. Ричардс отметил, что отсутствие симметрии влечет за собой вибрацию или вращение частицы [17]. Помимо вибрации, вращения вокруг своей оси, часто движение частиц осуществлялось волнообразно.

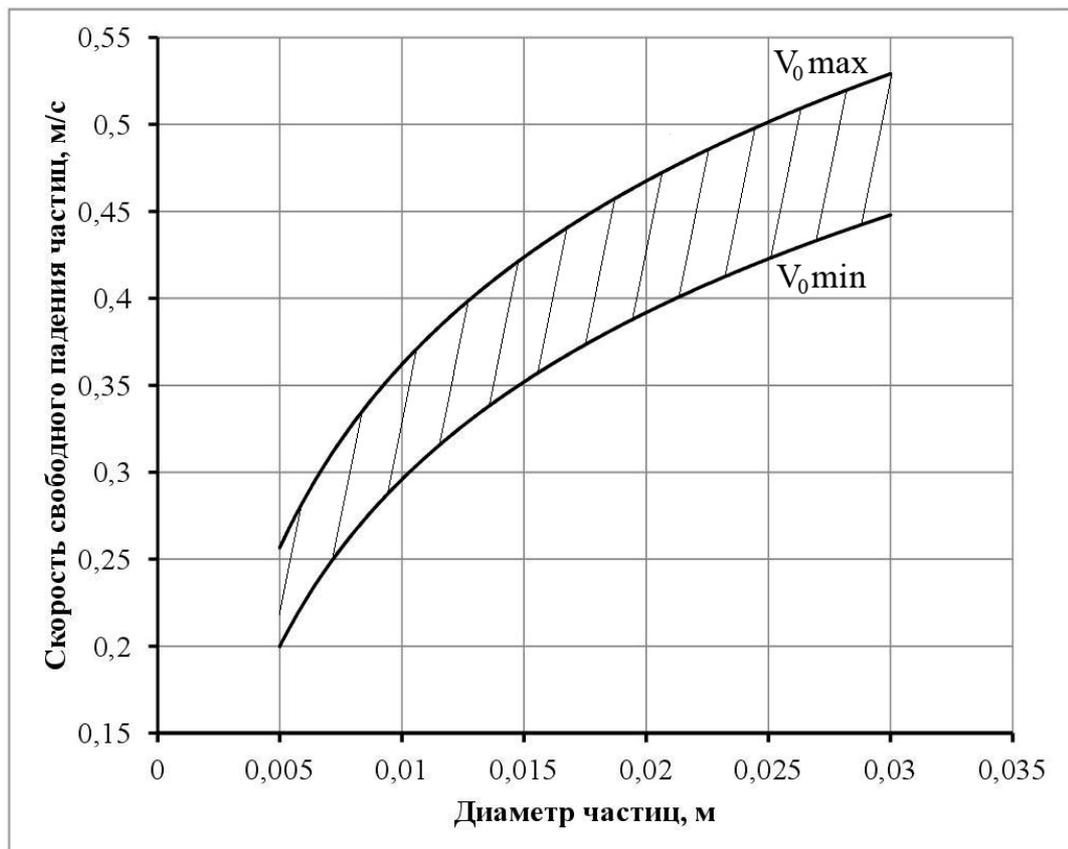


Рис.2.9. Отклонение конечных скоростей падения ЖМК неправильной формы в воде.

На рис. 2.9 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.

При движении гидросмеси твердые частицы под действием силы тяжести стремятся вниз и, когда движение прекращается, оседают на дно. Таким образом, гидросмесь может существовать только в движении (гидротранспорт легких частиц, плотность которых меньше плотности воды, не рассматривается).

Физические свойства гидросмеси помимо твердой составляющей в значительной степени обуславливаются свойствами жидкости [78]. Основными физическими свойствами жидкой составляющей гидросмеси являются: плотность, вязкость (динамическая и кинематическая) и температура жидкости.

Учитывая специфичность исследований, связанных с морской средой, к вышеперечисленным свойствам также следует отнести и соленость воды.

*Плотность* морской воды  $\rho_0$  зависит от температуры  $t$ , солености  $S$  и давления. Зависимость плотности от солености определяется уравнением [78]:

$$\rho_0 = 1000 \cdot \sigma_0, \text{ кг/см}^3 \quad \rho_0 = \rho_{T=0}; \quad (2.36)$$

$$\sigma_0 = (-0,093 + 0,8149 \cdot S - 0,482 \cdot 10^{-3} \cdot S^2 + 0,68 \cdot 10^{-5} \cdot S_3),$$

где  $S$  – соленость, ‰.

Коэффициент кинематической вязкости морской воды определяется по уравнению [37], м/с:

$$v_0 = \left[ 0,602 + 0,009 \cdot (K_{SW} - 10) \cdot \left( \frac{50}{T - 273} \right)^{0,56} \right] \cdot 10^{-6}, \quad (2.37)$$

где  $K_{SW}$  – коэффициент содержания солей, %;

$T$  – температура, К.

Как известно для морской воды существует зависимость плотности от температуры и солености. Так, при солености 35 ‰ и температуре 0°C,

плотность морской воды составляет  $1028 \text{ кг/м}^3$ . Наибольшая плотность у морской воды наблюдается при температуре  $-2,47^\circ\text{C}$  и солёности  $30 \text{ ‰}$ , и температуре  $-3,52^\circ\text{C}$  и солёности  $35 \text{ ‰}$  [36].

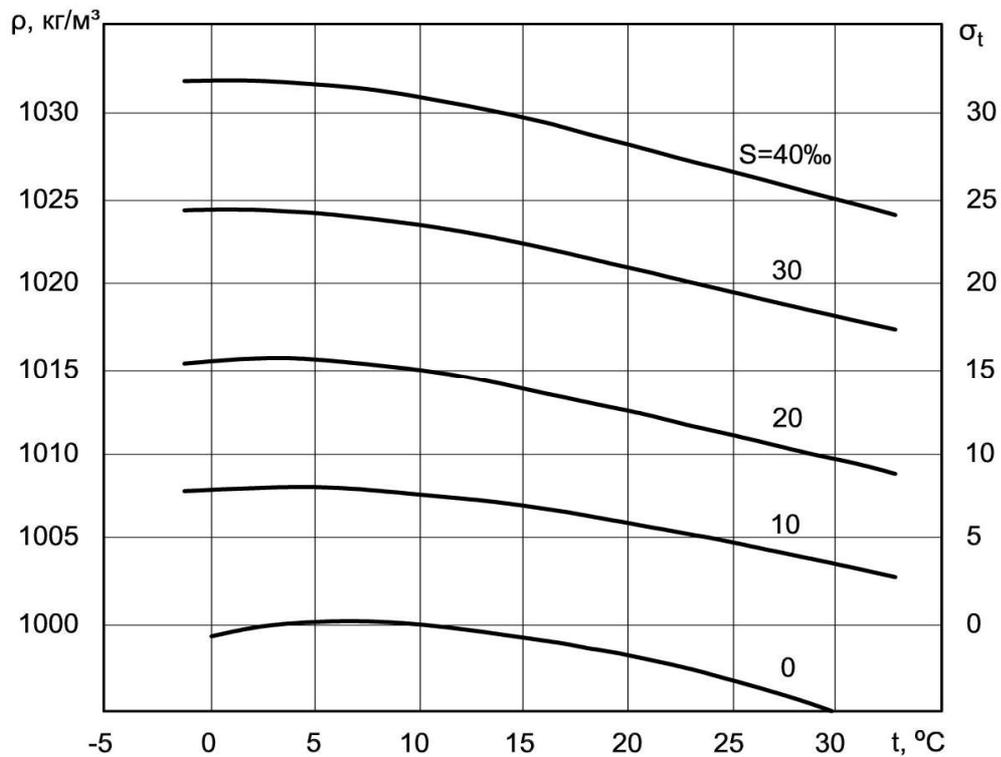


Рис.2.10. Связь плотности морской воды с ее солёностью и температурой.

Во многих публикациях описано влияние температуры на величину конечных скоростей падения зерен. Т.Г. Фоменко провел опыты на каучуковых шарах при различной температуре воды (от 275 до 300 К) [72]. Он выявил, что для ламинарной области, т. е. для чисел Рейнольдса  $Re < 1$ , температура является одним из основных факторов, влияющих на сопротивление среды при падении частиц в воде. Однако опыты показали, что сопротивление падающему в воде шару для чисел Рейнольдса более 200 практически от температуры не зависит.

Нами по методике, изложенной в разделе 2.4, также проводились опыты по изучению влияния температуры и солёности воды на изменения скоростей свободного падения железомарганцевых конкреций.

В таблице 2.5 представлена усредненная скорость свободного падения ЖМК при изменении физических свойств среды, полученная в результате экспериментальных исследований.

Таблица 2.5.

Влияние температуры и солености воды на гидравлическую крупность ЖМК.

№ п/п	Температура воды, °С	Соленость воды, ‰	Усредненная скорость свободного падения железомарганцевых конкреций, м/с					
			d = 5 мм	d = 10 мм	d = 15 мм	d = 20 мм	d = 25 мм	d = 30 мм
1.	5	1	0,2366	0,3195	0,3780	0,4218	0,4697	0,4984
2.		15	0,2264	0,3138	0,3671	0,4217	0,4623	0,4906
3.		30	0,2129	0,2956	0,3443	0,3953	0,4401	0,465
4.	10	1	0,2488	0,3295	0,3841	0,4357	0,4837	0,5104
5.		15	0,2355	0,3206	0,3801	0,4259	0,4719	0,4975
6.		30	0,215	0,2985	0,3478	0,3991	0,4444	0,4696
7.	15	1	0,2539	0,3413	0,3946	0,4492	0,4972	0,5239
8.		15	0,2434	0,3287	0,3887	0,4339	0,4808	0,5068
9.		30	0,2207	0,3064	0,357	0,4098	0,4562	0,4821
10.	20	1	0,2669	0,3543	0,4077	0,4622	0,5102	0,5369
11.		15	0,2495	0,3369	0,3903	0,4448	0,4928	0,5195
12.		30	0,228	0,3164	0,3688	0,4233	0,4713	0,498

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. 2.11).

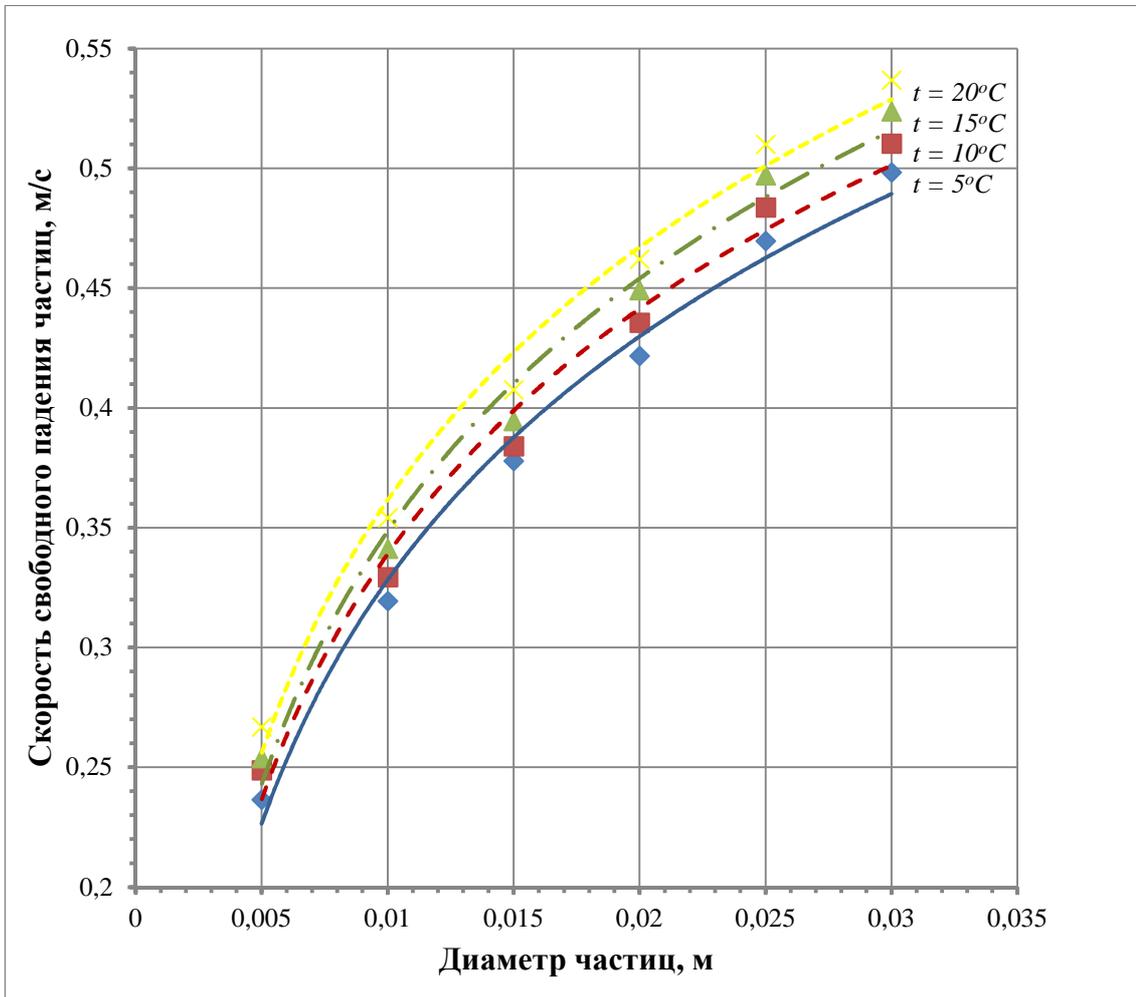


Рис. 2.11. График зависимости гидравлической крупности ЖМК от диаметра частиц при изменении температуры воды от 5 до 20°C при солёности 0‰.

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

На рис. 2.12 представлены графики изменения гидравлической крупности железомарганцевых конкреций при изменении физических свойств воды (температура 5-20°C, солёности 1-30‰), которые показывают, что при увеличении солёности воды от 1 до 30‰ скорость свободного падения частиц уменьшается на 8-17 %.

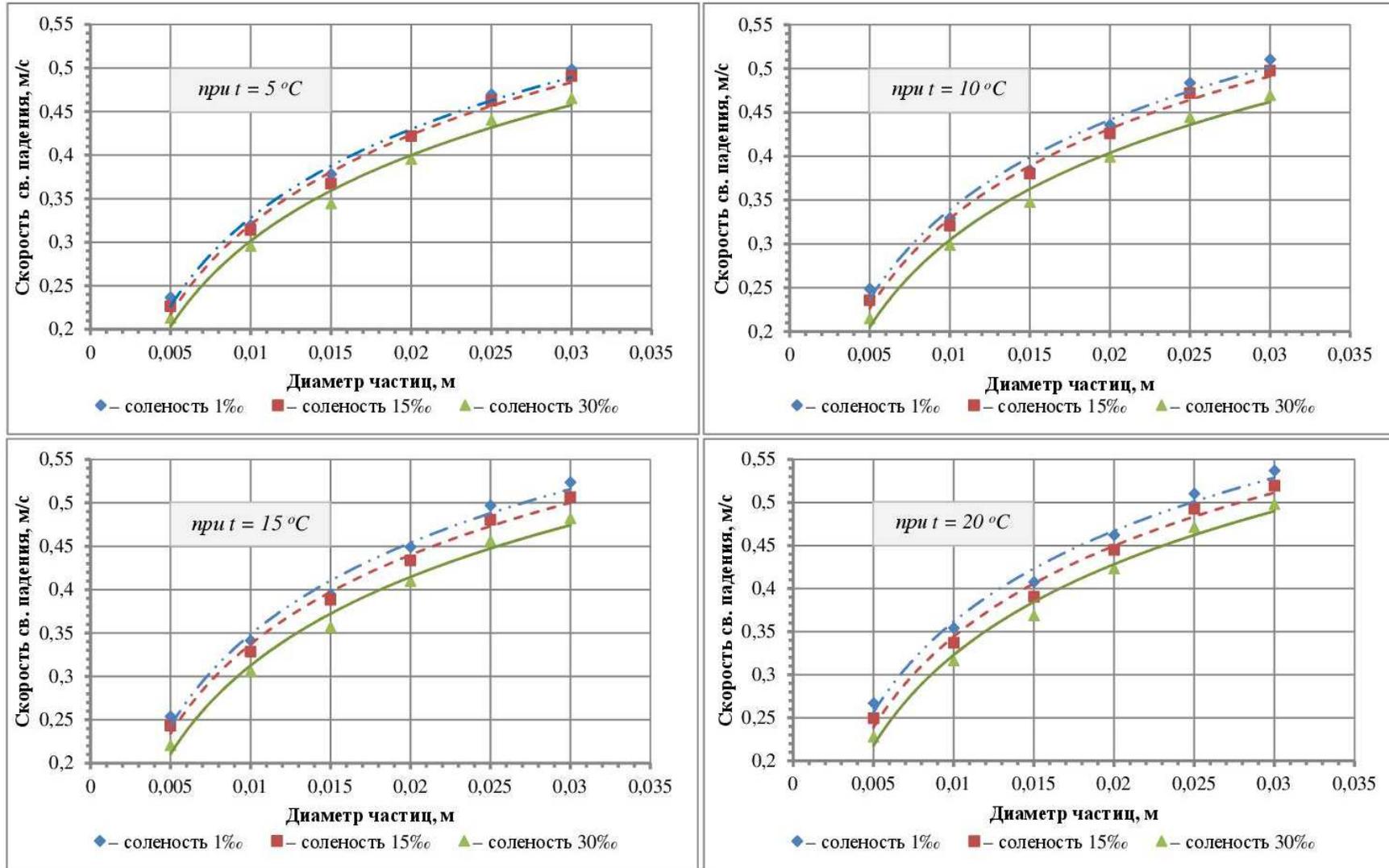


Рис. 2.12. Графики зависимости гидравлической крупности ЖМК от диаметра частиц при изменении физических свойств воды (температура 5-20°C, солёности 1-30 ‰).

## **2.6. Аналитические и экспериментальные исследования скоростей стесненного падения частиц в среде.**

### **2.6.1. Анализ исследований по определению скоростей стесненного падения минеральных частиц.**

Как известно 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. скоростей свободного падения.

Реальные условия движения твердых частиц при транспортировании пульп по трубопроводам 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.

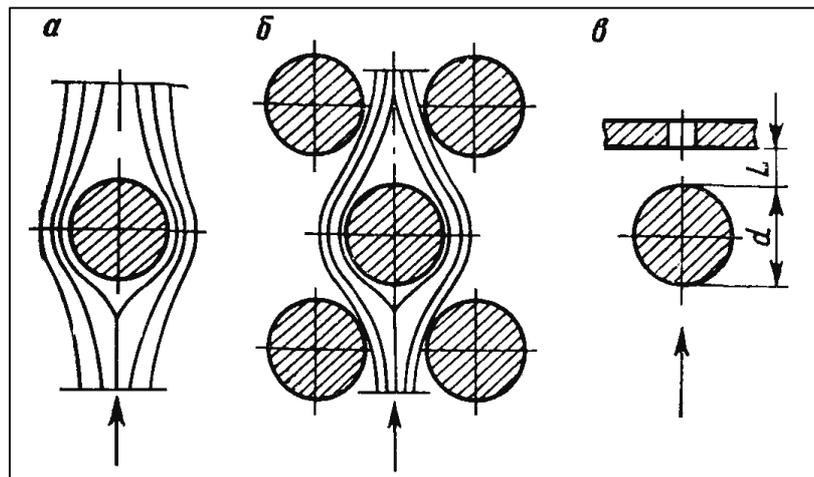
Как известно, стесненность падения минеральных частиц вызывается наличием стенок трубопровода или соседних частиц (расстояние между частицами менее  $10 \div 20$  их диаметра) [17, 71]. При стесненном движении наличие стенок вызывает уменьшение скорости падения твердых фракций вследствие того, что встречные потоки жидкости протекают между твердой частицей и границами, каждое зерно подвергается гидродинамическому воздействию среды и механическому воздействию за счет взаимного столкновения друг с другом, трения частиц друг о друга и стенки трубопровода. Возникающие дополнительные сопротивления резко меняют характер движения каждой отдельной частицы и гидродинамические условия обтекания ее жидкостью по сравнению с условиями свободного движения [17, 75].

При стесненном движении вес твердых фракций уравнивается силами трения, возникающими вокруг частиц в кольцевом пространстве, а также архимедовой силой.

Вектор скорости минерального зерна, движущегося в стесненных условиях, непрерывно изменяется по величине и направлению, а увеличение градиента относительной скорости приводит к увеличению гидродинамических сопротивлений и уменьшению скорости движения тел [19, 41, 50, 59, 67, 73].

В связи с широким использованием стесненного падения в расчетных уравнениях, проводились многочисленные исследования для различных минеральных частиц. К ним, прежде всего, относятся работы: Р. Х. Ричардса, П. В. Лященко, И. О. Финкея, М. Левы, А. С. Шуберта, Д. М. Минца, Х. С. Монро, И. Н. Качана, А. М. Годэна, Р. А. Мейкле, С. Ф. Ричардсона, В. Н. Заки, Б. В. Кизевальтера, В. А. Олевского, Э. Ф. Миллера, В. И. Классена, Т. Г. Фоменко, Н. Н. Виноградова, А. Е. Смолдырева, Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодеса и других [17, 19, 39, 43, 46, 62, 72, 76 и др.].

При стесненном падении на отдельную частицу действуют такие же силы, что и при свободном (раздел 2.1-2.2): гравитационная, подъемная, гидродинамические силы сопротивления (равнодействующая сил трения и давления).

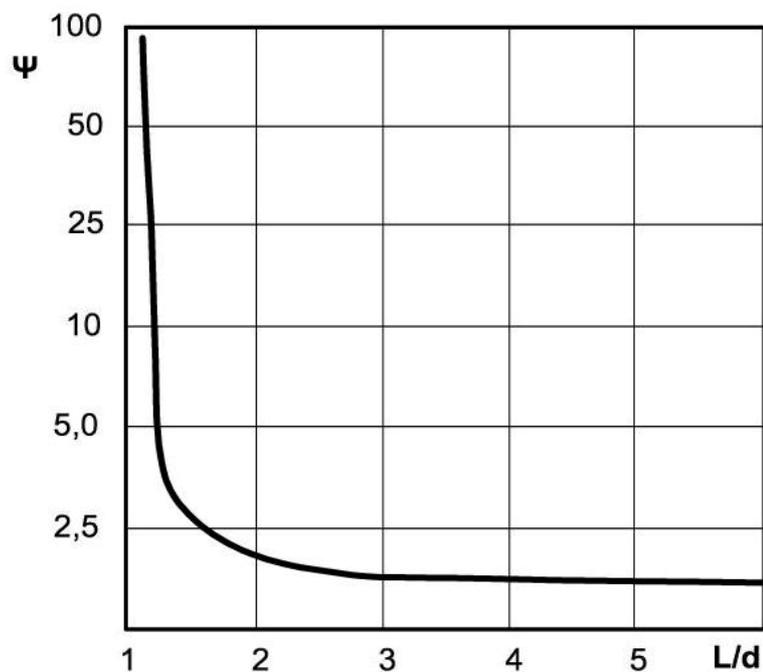


*Рис.2.13. Схема обтекания цилиндров по Н. Н. Виноградову: а – свободные условия обтекания; б – стесненные условия обтекания; в – вихревая область.*

Однако значение указанных сил будет иным, чем при свободном падении [21, 42].

В работе [16] установлено, что при стесненном обтекании цилиндров с осью, перпендикулярной направлению потока, вихревая зона за цилиндром уменьшается по сравнению с вихревой зоной в условиях свободного обтекания (рис. 2.13) [43].

Уменьшение вихревой зоны за телом не во всех случаях приводит к уменьшению силы сопротивления. Смоделировав стесненные условия обтекания изменением расстояния цилиндра от пластины с отверстием, Н. Н. Виноградов установил зависимость коэффициента сопротивления ( $\psi$ ) от относительного расстояния обтекаемого жидкостью цилиндра до плоскости с отверстием (рис. 2.14).



*Рис. 2.14. Зависимость коэффициента сопротивления ( $\psi$ ) от относительного расстояния обтекаемого жидкостью цилиндра до плоскости с отверстием (по Н. Н. Виноградову).*

Из рис. 2.14 следует, что в случае установки за цилиндром перегородки с отверстием, сила сопротивления увеличивается даже при уменьшении вихревой зоны позади цилиндра.

Увеличение сопротивления объясняется уменьшением давления в вихревой зоне. С уменьшением расстояния от цилиндра до отверстия сила сопротивления при той же скорости потока между цилиндрами увеличивается.

Нечто подобное происходит при стесненном падении, когда следующий ряд частиц играет роль стенки с отверстиями.

Наличие соседних фракций приводит к тому, что градиент скорости по нормали к поверхности в условиях стесненного обтекания должен быть больше, чем в свободных условиях (при условии постоянства скорости вне слоя), это приводит к увеличению равнодействующей силы трения.

Равенство действующих на частицу сил достигается для стесненного падения при меньших скоростях жидкости, чем в условиях свободного падения, таким образом, скорость стесненного падения меньше скорости свободного падения [15, 43, 73, 76, 81], м/с:

$$V_{CT} = k \cdot V_0, \quad (2.38)$$

где  $k$  – коэффициентом снижения скорости.

При этом снижение  $k$  зависит в основном от степени разрыхления движущейся массы – взвешенного слоя, который характеризуется коэффициентом разрыхления  $m$  (пористость слоя) – объемное содержание жидкой фазы в слое, который можно представить в виде:

$$m = \frac{W - W_T}{W} = \frac{W_{жс}}{W_{жс} + W_T}, \quad (2.39)$$

где  $W$  – общий объем взвешенного слоя;

$W_T$  – объем твердого во взвешенном слое;

$W_{жс}$  – объем жидкой фазы во взвешенном слое.

Предложены две основные концепции определения скоростей в стесненных условиях для однородных частиц [43, 76]:

1. Стесненное падение – совокупное движение частиц в виде фильтрационной среды, через которую жидкость протекает в вертикальном направлении снизу вверх;
2. Стесненное падение – падение в жидкости отдельной частицы, находящейся в массе других частиц.

В соответствии с этими концепциями различными авторами предложено множество уравнений скоростей стесненного движения частиц в средах.

К первой относятся функциональные зависимости: М. Лева [45], И. Н. Качана [39], Д. М. Минца, С. А. Шуберта [51], Б. В. Кизевальтера [40, 43] и др.

В результате их исследований предложено обобщающее уравнение для определения скоростей стесненного падения [76], м/с:

$$V_{cm} = M \frac{v(1-m)}{d_s \xi} (Re_{cm}^2 \psi_{cm})^n; \quad (2.40)$$

$$Re_{cm}^2 \psi_{cm} = \frac{g}{216} \cdot \frac{\delta - \Delta}{\Delta} \cdot \frac{d^3 \xi^3}{v^2} \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2}, \quad (2.41)$$

где  $d_s$  – эквивалентный диаметр частиц, м;

$v$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$m$  – коэффициент разрыхления слоя;

$\xi$  – коэффициент сферичности частиц;

$Re_{CT}^2 \psi_{CT}$  – параметр Лященко для стесненного падения частиц;

$M$  и  $n$  – постоянные коэффициенты, значения которых определяются по таблице 2.6 [43].

Таблица 2.6.

Значения коэффициентов  $M$  и  $n$  для различных  $Re_{cm}^2 \psi_{cm}$

Коэффициент	$Re_{cm}^2 \psi_{cm}$				
	7	7-17	17-750	750-5000	5000-130000
$M$	1,8	2,4	3,6	5,7	7,2
$n$	1	5/6	2/3	3/5	4/7

Учитывая ограниченность применения уравнения (2.40), Д. М. Минц и С. А. Шуберт [51] видоизменили его применимость и при больших коэффициентах разрыхления  $m$ , рассматривая равновесие частицы под воздействием потока жидкости среди других компонентов. Однако, с появлением коэффициента, зависящего от крупности и формы частиц, уравнение стало достаточно сложным для практического использования, так как лишь для тонких фракций этот коэффициент является постоянной величиной.

Уравнения второй группы, основанные на рассмотрении падения в жидкости отдельной минеральной частицы с учетом влияния других, были предложены рядом исследователей.

П. В. Лященко [46] на основе проведенных экспериментов установил следующую зависимость для стесненного падения, м/с:

$$V_{CT} = \sqrt{\frac{\pi d(\delta - \Delta)g}{6\psi_{CT}\Delta}}, \quad (2.42)$$

$$\text{при } \psi_{CT} = \frac{\psi}{m^n}. \quad (2.43)$$

$$V_{CT} = V_0\sqrt{m^n}, \quad (2.44)$$

где  $\psi_{CT}$  – коэффициент сопротивления стесненного падения;

$n$  – показатель степени, зависящий от крупности зерен изменяющийся в пределах 2,5-4.5.

Величина  $\sqrt{m^n}$ , является коэффициентом снижения скорости. Она показывает, во сколько раз уменьшается скорость свободного падения в условиях стесненного падения сплоченной массой при коэффициенте разрыхления  $m$  [81].

С. Ф. Ричардсон и В. Н. Заки [82], проделав систематические эксперименты по стесненному падению частиц (в основном шаров) различных диаметров (от 0,18 до 6,25 мм) и плотности (от 1060 до 10600 кг/м<sup>3</sup>) в жидкостях различной вязкости (вода, глицерин, масло), подтвердили справедливость уравнения (2.44). При этом было установлено, что показатель степени  $n$  существенно зависит от числа Рейнольдса. Ими были предложены зависимости (таблица 2.7) для определения  $n$  при вычислении скорости стесненного падения шарообразных частиц [21].

Таблица 2.7.

Зависимость значения показателя  $n$  от числа Рейнольдса.

$n = 4,65 + 19 \frac{d}{D}$	для $Re = \frac{V_{CB}d}{\nu} < 0,2$
-----------------------------	--------------------------------------

$n = \left(4,45 + 17,5 \frac{d}{D}\right) Re^{-0,03}$	для $0,2 \leq Re \leq 1$
$n = \left(4,45 + 18 \frac{d}{D}\right) Re^{-0,1}$	для $1 \leq Re \leq 200$
$n = 4,45 Re^{-0,1}$	для $200 \leq Re \leq 500$
$n = 2,39$	для $Re > 500$

где  $d$  – диаметр шара; м;

$D$  – диаметр сосуда, в котором осуществляется стесненное падение частиц, м.

По мнению В. Н. Шохина и А. Г. Лопатина коэффициент  $n$  следует принимать, для зерен  $< 0,1$  мм  $n = 1,5$ , для зерен  $> 2$  мм  $n = 6$ , тогда уравнение (2.44) примет вид, м/с:

$$V_{CT} = V_0 \cdot m^3. \quad (2.45)$$

Предложен также ряд других зависимостей, определяющих скорости стесненного движения частиц, которые составлены на основе различных теоретических предпосылок.

Р. Х. Ричардс на основании экспериментальных данных определения скоростей стесненного падения (скорости стесненного падения зерен кварца в 2,76 раза и для галенита в 3,47 раза меньше скорости свободного падения) предположил, что стесненное падение аналогично движению каждой частицы в жидкости. Он предложил следующую формулу для определения скорости стесненного падения [73], м/с:

$$V_{CT} = k \sqrt{d(\delta - \delta')}, \quad (2.46)$$

где  $k$  – числовой коэффициент из формулы Риттингера;

$d$  – диаметр падающих зерен;

$\delta$  – плотность зерен;

$\delta'$  – плотность гидросмеси.

Некоторыми исследователями была использована упрощенная модель стесненности – движение частиц в узких трубах. Из-за наличия сил гидродинамического взаимодействия между зерном и стенкой скорость

падения зерна уменьшается тем в большей степени, чем меньше отношение диаметра трубы к диаметру падающей в ней частицы. На основании вышеизложенного И. О. Финкей рекомендовал следующее уравнение [73], м/с:

$$V_{CT} = \frac{F - f}{F} V_0, \quad (2.47)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения трубки, м<sup>2</sup>;

$f$  – экваториальный диаметр шара, м.

Скорость стесненного движения частиц по Х. С. Монро [17], м/с:

$$V_{CT} = 51,1 \sqrt{d(\delta - \Delta)} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^{3/2} \right], \quad (2.48)$$

где  $D$  – диаметр трубы, м.

Профессор А. Е. Смолдырев [67] предложил рассчитывать скорость стесненного падения с учетом стенок трубы для перемещения крупных частиц по формуле, м/с:

$$V_{CT} = (1 - S)^2 \cdot \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \cdot V_0, \quad (2.49)$$

где  $S$  – объемная концентрация частиц.

Однако, уравнение (2.49) не согласуется со значениями показателя степени при стесненности потока, установленным С. Ф. Ричардсоном и В. Н. Заки (таблица 2.7), который для крупных частиц и  $Re > 500$  не может быть меньше  $n = 2,39$ .

При изучении стесненного падения частиц П. В. Лященко, Херст и другие, учитывали скорость в свободном сечении трубы. И.Н. Качан предложил для частиц менее 2 мм в стесненных условиях следующую зависимость [39, 73], м/с:

$$V_{CT} = a(\delta - 1000)(d - d_0) \frac{m}{1 - m}, \quad (2.50)$$

где  $m$  – коэффициент разрыхления слоя;

$a$  – коэффициент, учитывающий зависимость приведенной скорости от вязкости жидкости, формы и шероховатости поверхности зерен.

Т. Г. Фоменко на основе анализа экспериментальных данных получил зависимость [72, 73], м/с:

$$V_{CT} = 0,6d^{0,23}V_0. \quad (2.51)$$

Э. Ф. Миллером и В. И. Классеном была также предложена зависимость [73], м/с:

$$V_{CT} = V_2 n (1 - \beta V_2); \quad (2.52)$$

$$V_2^2 = \frac{2Hg(\delta - \Delta)}{1 + n};$$

$$n = 1 - m = 1 - (0,06 - 0,7);$$

$$\beta = \frac{8m\mu}{n(\delta - \Delta)d^2g},$$

где  $H$  – высота минерального зерна, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Уравнение А. М. Годэна для  $Re > 1$  [17, 73], м/с:

$$V_{CT} = V_0 \left(1 - S^{2/3}\right) (1 - S)(1 - 2,5S). \quad (2.53)$$

Стесненность условий движения проявляется в большей степени с увеличением объемной концентрации твердого в жидкости, так как в этом случае уменьшается расстояние между частицами, а, следовательно, и скорость их стесненного движения [76].

Предложены уравнения для определения скорости стесненного падения, в которых число Рейнольдса стесненного падения связывается с критерием Архимеда или коэффициентом сопротивления.

К ним относятся уравнения Р. Б. Розенбаум, О. М. Тодеса, В. Д. Горошко, Г. М. Михайлова, А. М. Николаева, В. А. Смоловика.

Так, согласно работе [19], м/с:

$$V_{CT} = \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar \cdot m^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot m^{4,75}}}, \quad (2.54)$$

а в работе [43]:

$$V_{CT} = \frac{27v}{d} \cdot \left(\sqrt{1 + 0,00407Ar \cdot m^{4,75}} - 1\right), \quad (2.55)$$

где  $Ar$  – критерий Архимеда.

А. Н. Базилевским и Б. В. Кизевальтером предложена формула скорости стесненного падения крупных частиц в вертикальном потоке бесструктурной суспензии [76], м/с:

$$V_{CT} = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\delta - \Delta \rho}{\delta - \rho \Delta}}}, \quad (2.56)$$

где  $\rho$  – плотность пульпы, составленной только из частиц, скорость которых определяется при объемной концентрации, равной концентрации частиц в суспензии;

$\Delta$  – плотность суспензии;

$V_{CT}$  – скорость стесненного падения тел в жидкости при объемной концентрации равной, объемной концентрации частиц суспензии.

В. А. Олевский для крупности 0,2-0,3 мм при  $m > 0,8$ , установил зависимость, в которой за характерную величину, определяющую условия стеснения, принимается не объемное, а весовое содержание твердого [4], м/с:

$$V_{CT} = V_0 \left(1 - \frac{T}{T_M}\right), \quad (2.57)$$

где  $T$  – весовая концентрация твердого;

$T_M$  – максимальная концентрация твердого материала в пульпе при расположении твердых частиц по кубической решетке.

Таким образом, проведенный анализ вышеприведенных уравнений различных авторов, по определению скорости стесненного падения минеральных частиц показывает, что ее величина зависит от гидравлической крупности частиц и степени разрыхления (пористости) движущегося слоя, который характеризуется коэффициентом  $m$  [43, 73, 76, 81].

Конечная скорость стесненного падения частиц значительно ниже скорости свободного падения (2.38), м/с:

$$V_{CT} = k \cdot V_0,$$

где  $k$  – коэффициент снижения скорости.

В научных публикациях авторы по-разному оценивают значение коэффициента  $k$ , что зависит от условий проведенных ими исследований (таблица 2.8).

Таблица 2.8.

Уравнения определения коэффициента снижения скорости при стесненном падении твердых частиц в жидкости.

№ п/п	Автор	Уравнение
1.	П. В. Лященко [46]	$k = m^n$
2.	Б. В. Кизевальтер [41, 43]	$k = \psi \cdot m^n$
3.	С. Ф. Ричардсон [43]	$k = m^n$
4.	В. А. Олевский [76]	$k = \left(1 - \frac{T}{T_M}\right)$
5.	Т. Г. Фоменко [72, 73]	$k = 0,6d^{0,23}$
6.	К. Грэм [47]	$k = \frac{1}{1 + \frac{d}{D}}$
7.	А. М. Годэн [17]	$k = \left(1 - S^{2/3}\right)(1 - S)(1 - 2,5S)$
8.	Б. Б. Кудряшов [47]	$k = 0,8 + 0,3\left(1 - 2\frac{d}{D_{TP}}\right)$
9.	Х. С. Монро [17]	$k = f \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^{3/2}\right]$
10.	И. Н. Качан [39]	$k = 0,15 \frac{m^3}{1 - m}$
11.	Е. А. Смолдырев [67]	$k = (1 - S)^n$
12.	В. Н. Гончаров [47]	$k = (1 - 1,42 \cdot S)$

### 2.6.2. Результаты экспериментальных исследований по определению скоростей стесненного падения ЖМК в воде.

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 в разделе 2.4.

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 (раздела 2.6.1), показывают приемлемые результаты лишь для небольшого диапазона определенных крупностей конкреций, что, соответственно, характеризует ограниченность их применения. В таблице 2.9 представлены выборочные результаты сравнения аналитических значений скоростей стесненного падения с опытными данными.

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 (таблица 2.9 и рис. 2.15).

Уравнения, основанные на рассмотрении массы падающих зерен как фильтрационной среды, через которую протекает жидкость в вертикальном направлении снизу-вверх, установленные М. Левой, И. Н. Качаном, Д. М. Минцем, С. А. Шубертом, Б. В. Кизевальтером не могут быть использованы для расчета скоростей стесненного падения ЖМК диаметром более 5 мм, так как полученные значения  $Re^2\psi$  стесненного падения (таблица 2.6) превышают максимальное значение 130 000.

В работах В. Н. Шохина, А. Г. Лопатина, Б. В. Кизевальтера и др. указана ограниченность применения уравнения (2.40), которая вызвана небольшими коэффициентами разрыхления  $m \leq 0,8$ , и при этом взвешенный слой может быть рассмотрен как фильтрационная (пористая) среда. При

$m > 0,8$  приведенное уравнение дает завышенные результаты (при приближении  $m = 1$   $V_{CT}$  стремится к бесконечности).

Наиболее близкие скорости стесненного падения к экспериментальным показывает вторая группа уравнений (2.44), основанных на рассмотрении падения в жидкости отдельной частицы, находящейся в массе других частиц (по П. В. Лященко). Однако расчеты показали превышение скорости стесненного падения зерен ЖМК в воде по сравнению с фактической (экспериментальной) до  $\sim 1,3$  раза (таблица 2.9).

На основании проведенных аналитических исследований основной причиной увеличения скорости стесненного падения частиц в воде, являлось изначальное завышение базовой скорости свободного падения ( $V_0$ ) при расчетах по формулам различных авторов и очень узкий диапазон диаметров частиц, для которых возможно применение уравнений (раздел 2.6.1).

Согласно результатам экспериментальных исследований и последующему анализу расчетов скорости свободного падения частиц ( $V_0$ ) (раздел 2.5) было выявлено, что наиболее оптимальным является уравнение (2.35) 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 (2.44) для ЖМК, в котором для определения скорости свободного падения применялось выведенное нами уравнение (2.35), показали отклонение опытных данных от расчетных в среднем 3 % (таблица 2.9) (рис.2.15).

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

$$V_{CT} = \left[ \frac{v}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43) \right] \cdot k . \quad (2.58)$$

Таблица 2.9.

Сравнение расчетных и фактических (экспериментальных) скоростей стесненного падения ЖМК.

№ п/п	Автор уравнения	Скорость стесненного падения частиц ЖМК для различных диаметров, м/с					
		d = 5 мм	d = 10 мм	d = 15 мм	d = 20 мм	d = 25 мм	d = 30 мм
1.	Уравнение согласно 2-ой концепции (по П. В. Лященко)	0,22	0,31	0,38	0,44	0,5	0,54
2.	Р. Х. Ричардс	0,22	0,31	0,38	0,44	0,48	0,54
3.	Х. С. Монро	0,29	0,4	0,48	0,54	0,58	0,62
4.	Т. Г. Фоменко	0,14	0,24	0,33	0,4	0,47	0,54
5.	Э. Ф. Миллер, В. И. Классен	0,24	0,35	0,43	0,5	0,57	0,61
6.	Г. М. Михайлов, А. М. Николаев	0,23	0,33	0,41	0,47	0,53	0,58
7.	Р. Б. Розенбаум, О. М. Годес, В. Д. Горошко	0,22	0,31	0,39	0,45	0,5	0,55
8.	Экспериментальные исследования (автор)	0,21	0,27	0,33	0,36	0,4	0,42
9.	По предложенному уравнению (автор)	0,21	0,27	0,32	0,36	0,4	0,42

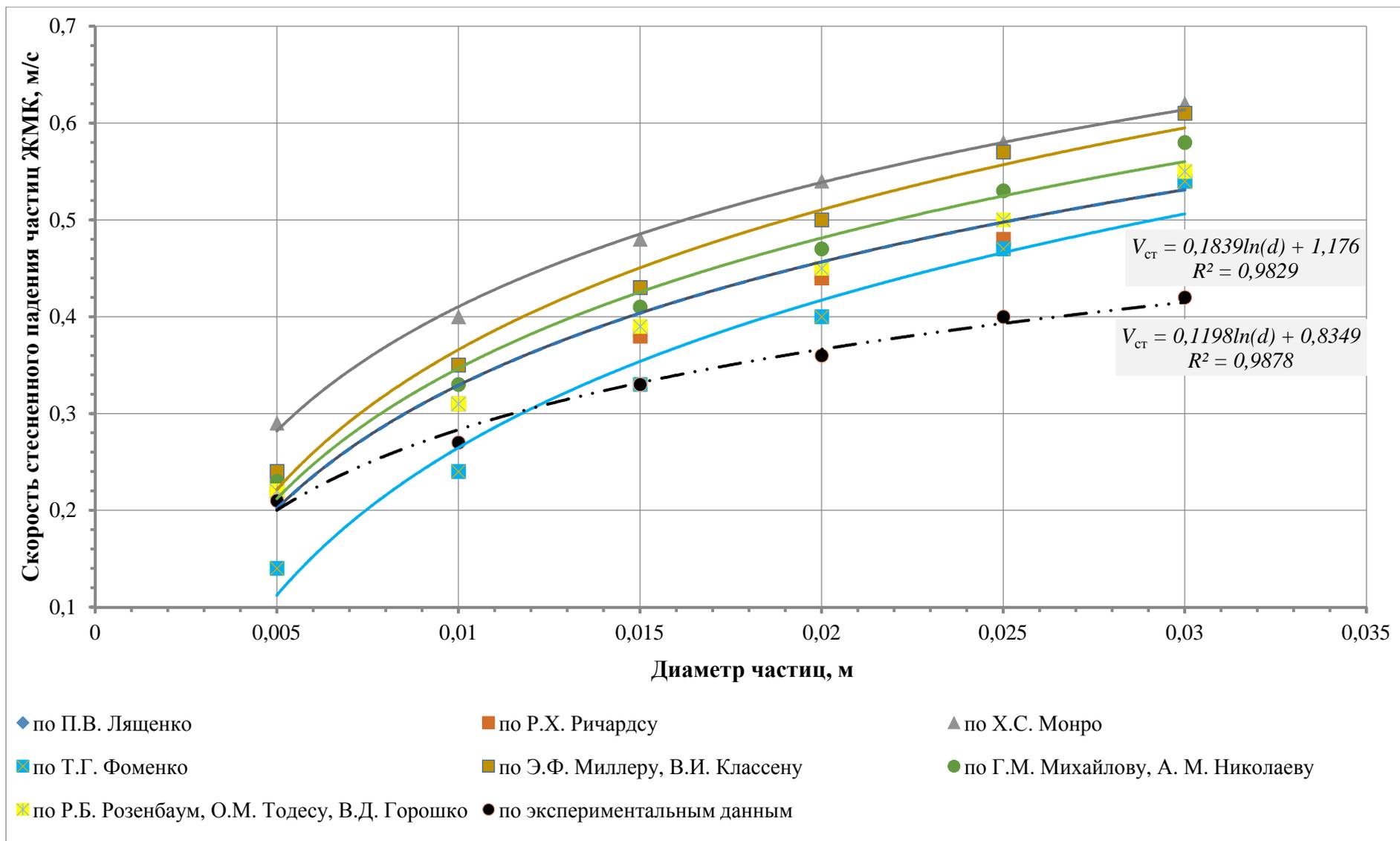


Рис. 2.15. Сравнение расчетных и фактических скоростей стесненного падения конкреций.

## Выводы по главе 2:

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

2. В результате проведенных лабораторных исследований впервые определена гидравлическая крупность ЖМК диаметром от 5 до 30 мм в свободных и стесненных условиях.

3. Анализ экспериментальных данных, и их сравнительное сопоставление с существующими расчетными уравнениями, позволил установить, 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 (2.35). Отклонение значений гидравлической крупности по предложенному уравнению не превышают в среднем 3 %.

4. По итогам проведенных опытных работ получен диапазон отклонения конечных скоростей падения частиц в воде для конкреций неправильной формы.

5. В результате проведенных лабораторных исследований выявлены закономерности и особенности изменения скорости свободного падения частиц ЖМК при изменении параметров несущей среды (воды):

– при увеличении температуры воды от 5 до 20°C гидравлическая крупность увеличивается от 3 до 8 %.

– при увеличении солёности воды от 1 до 30 ‰ скорость свободного падения частиц уменьшается от 8 до 17 %.

6. Скорости стесненного падения железомарганцевых конкреций крупностью от 5 до 30 мм определяются по уравнению (2.58), которое основано на рассмотрении падения в жидкости отдельной частицы, находящейся в массе других частиц (по П. В. Лященко) и равны произведению функциональной зависимости скорости свободного падения ( $V_0$ ) (2.35) и коэффициента снижения скорости ( $k$ ).

7. 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.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ.**

Как известно, 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. Например, попутная дезинтеграция оказывает положительное воздействие при добыче песчано-гравийных смесей, промышленных песков россыпных месторождений и др.

Однако при выемке и гидроподъеме железомарганцевых конкреций сказывается отрицательное влияние дезинтеграции, в силу морфологических, минералого-петрографических, текстурных, и определяемых ими физико-механических особенностей ЖМК как полезных ископаемых.

#### **3.1. Технологические аспекты процесса дезинтеграции ЖМК.**

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. Наиболее благоприятные условия создаются в поверхностных слоях на границе соприкосновения разрушаемой частицы с ударяющим предметом, где возникают наибольшие напряжения.

Эффективность процесса дезинтеграции зависит от физико-механических свойств и физического состояния связующего компонента и содержания связующей фракции в материале.

Железомарганцевые конкреции представляют собой многокомпонентную природную систему, состоящую из рудного вещества, цементирующего глинистый и терригенный материал вмещающего конкреции донного осадка. Таким образом, связующим материалом в железомарганцевых конкрециях являются отдельные слои рудного вещества, в различной мере обогащенные гидроокислами марганца и железа, и обладающие отличными от компонентов донного осадка физико-механическими свойствами [10, 25, 26]. Поэтому прочность конкреций зависит от соотношения количества рудного и нерудного материала, от размера и внутреннего строения. Чем больше доля терригенного материала и глинистого вещества в конкрециях, тем вероятнее высокая степень разрушения конкреций в процессе гидроподъема.

В результате исследований конкреций месторождений Финского залива, доказано, что рудная часть составляет в среднем 64 %, а нерудная – 40-36 %. Рудная часть сложена гидрооксидами и оксидами марганца и железа. Нерудная часть представлена алевропесчаными обломками кварца и полевого шпата (до 70 %), гидратированными слюдами (около 20 %) и аутогенными минералами – гипсом, вермикулитом, цеолитом, сидеритом, кальцитом [10, 61].

Прочность конкреций зависит от их крупности и внутреннего строения. Так как разрушение происходит по трещинам в рудной оболочке, в меньшей степени затрагивающих их ядро, то чем больше размер ЖМК, тем вероятнее наличие большого количества трещин, по которым может произойти разрушение. Внутреннее строение (концентрически-слоистое, радиально-дендритовое, массивное) определяет анизотропию их свойств в продольном и поперечном направлениях при упругих деформациях [26, 57].

Одним из важных условий добычи железомарганцевых конкреций является обеспечение минимальной степени их дезинтеграции, так как они достаточно хрупкие, непрочные и разрушаются при небольших механических нагрузках на них.

Таким образом, учитывая вышеприведенные особенности, можно установить некоторые процессы дезинтеграции (разрушение до минеральных зерен и их переизмельчения) при гидроподъеме ЖМК:

- отмыв конкреций от вмещающего осадка в напорном трубопроводе;
- поверхностное истирание рудного слоя при трении о твердые границы потока;
- разрушение конкреций по микрослоям, вследствие соударения конкреций между собой и с границами потока;
- дробление конкреций при прохождении через рабочие колеса и проточные части грунтового насоса;
- дробление конкреций при ударе о верхние секции воздухоотделителя эрлифта, вследствие больших скоростей движения трехфазной смеси на выходе трубного става.

Приведенные выше факторы были отмечены в 2002 году при проведении предварительных лабораторных исследований по договору №1-01н от 24.07.2002 с ООО «Современные вихревые технологии». Кроме того, были получены предварительные результаты экспериментов [7].

Экспериментальные исследования были продолжены в 2014-2015 гг. сотрудниками лаборатории «Новые гидротехнологии» уже по полному циклу гидротранспортного оборудования: для эрлифта, эжектора и грунтонасоса, основной задачей которых являлась количественная оценка выхода класса – 5+1 мм, как не товарной продукции, при вертикальном гидротранспорте.

Отмыв конкреций от вмещающего осадка, одновременно упрощает процесс обогащения полезного компонента на борту добычного судна, но усложняет задачу укладки большой массы шламовой фракции в выработанное пространство. Учитывая при этом гранулометрический состав осадков, вмещающих ЖМК, можно предположить, что при классификации горной массы на борту судна по граничному зерну 5 мм в подрешетный продукт выйдут алевро-глинистые частицы, песчаная фракция, обломки

горных пород, микроконкреции, конкреции с диаметром менее 5 мм и обломки более крупных конкреций.

### **3.2. Экспериментальные исследования по классификации и дезинтеграции железомарганцевых конкреций.**

#### **3.2.1. Технологические схемы и компоновка лабораторного оборудования гидрокомплексов.**

Стендовые испытания по дезинтеграции железомарганцевых конкреций проводились на лабораторных гидрокомплексах входящих в состав уникальной стендовой установки (УСУ), которая была разработана на кафедре геотехнологии и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых МГРИ-РГГРУ и зарегистрирована в Минобрнауки под № 4-73. Она включает:

- грунтонасосную установку с замкнутыми на кольцо коммуникациями, запорной арматурой и контрольно-измерительной аппаратурой;

- 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.3.4);

- эжекторную (гидроэлеваторную) установку, которая конструктивно работала в технологическом режиме эрлифтной системы.

Для проведения экспериментальных исследований по дезинтеграции были разработаны технологические схемы (рис. 3.1, 3.5, 3.7), включающие комплексы гидравлического оборудования с подводными коммуникациями, запорной арматурой и контрольно-измерительной аппаратурой. Они основаны на использовании непрерывной технологии с замкнутым кругооборотом гидросмеси, моделирующей динамику гидроподъема железомарганцевых конкреций с морского дна с глубин от 10 до 72 м.

### *Грунтососный экспериментальный стенд.*

Экспериментальный стенд (рис. 3.1) представляет собой песковой насос П12,5/12,5-СП-2.2 и буферную емкость с замкнутым кругооборотом гидросмеси. На сварной металлической раме закреплен насосный агрегат 1, всасывающий трубопровод 11 насоса диаметром 60 мм соединен с зумпфом 14 объем, которого равен 0,2 м<sup>3</sup>, в котором находится исходный материал 10. Напорный трубопровод 5 диаметром 50 мм (общая длина трубопровода 10 м) соединен с буферной емкостью 7, которая имеет кран для взятия проб 8 и трубопровод для слива излишков воды 13. Контрольно-измерительная аппаратура (расходомер 6, манометр 2) располагается непосредственно на нагнетательном трубопроводе насоса.

Технические характеристики основных узлов стенда приведены ниже.

Песковой насос П12,5/12,5-СП-2.2 предназначен для перекачивания продуктов обогащения руд и глиноземного производства, песчаных и других абразивных гидросмесей с водородным показателем рН от 6 до 8, температурой от 5 до 60°С, концентрацией твердых включений до 25%, максимальными размерами до 10 мм (рис. 3.2.). Его технические характеристики:

длина, мм	854
ширина, мм	355
высота, мм	392
производительность, м <sup>3</sup> /ч	12,5
напор, м. вод. ст.	12,5
мощность электродвигателя, кВт	2,2
диаметр всасывающего патрубка, мм	60
диаметр нагнетательного патрубка, мм	40

Габариты буферной емкости, мм:

высота	900
диаметр	350
объем буферной емкости (с конусом), м <sup>3</sup>	0,09

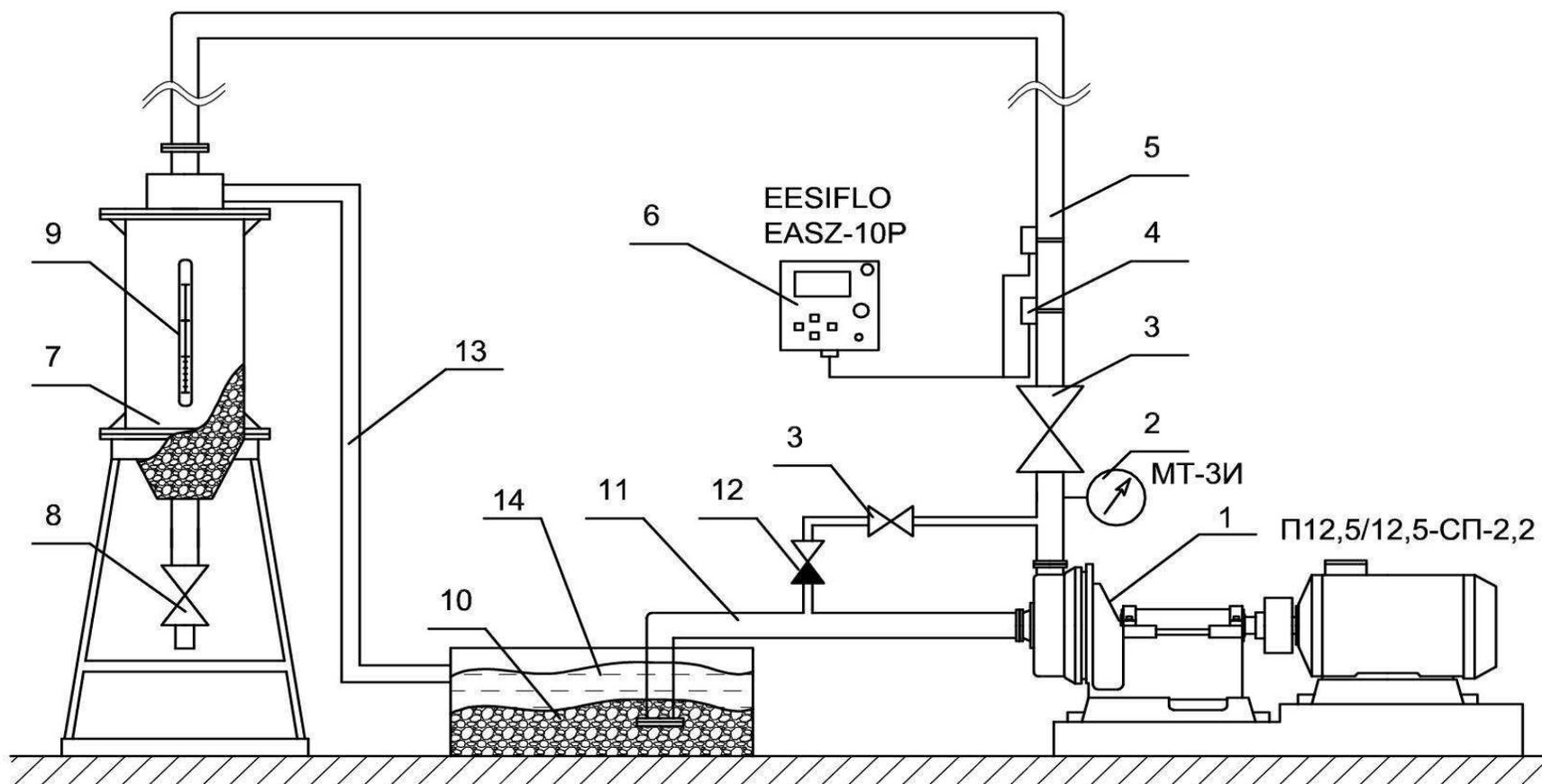


Рис. 3.1. Технологическая схема экспериментальной установки (грунтонасосная система):

1 – песковой насос (П12,5/12,5-СП-2.2); 2 – манометр (МТ-3И); 3 – кран; 4 – датчик расходомера; 5 – напорный трубопровод; 6 – расходомер; 7 – буферная емкость; 8 – кран для взятия проб; 9 – измерительная шкала; 10 – исходный материал; 11 – всасывающий трубопровод; 12 – обратный клапан; 13 – трубопровод для слива излишком воды; 14 – зумпф грунтонасоса (емкость для слива и подачи рабочей жидкости).



*Рис.3.2. Песковой насос П12,5/12,5-СП-2.2*

Для измерения расхода гидросмеси применялся портативный микропроцессорный ультразвуковой расходомер марки EESIFLO EASZ-10P (рис. 3.3), предназначенный для измерения текущего и суммарного расхода жидкостей, текущих в технологических трубопроводах. Для измерения скорости потока гидросмеси использовался бесконтактный принцип Доплера.

Технические характеристики: диапазон измерения скорости потока от 0,03 до 20 м/с; пределы допускаемой относительной погрешности измерения скорости  $\pm 1\%$  при  $v > 1$  м/с и  $\pm (1/v)\%$  при  $v < 1$  м/с, а также при использовании калибровки  $\pm 0,5\%$  при  $v > 1$  м/с и  $\pm (0,5/v)\%$  при  $v < 1$  м/с. где  $v$  – скорость потока, м/с; чувствительность по скорости 0,00025 м/с; количество измерительных каналов – 1; цифровой интерфейс RS232; аналоговые выходы 1 токовый (4...20) мА; пределы допускаемой приведенной погрешности аналогового выхода  $\pm 0,1\%$ ; условный диаметр трубопровода от 0,3 до 5000 мм; габаритные размеры электронного блока 118x229x69 мм; масса электронного блока 1,1 кг, производитель «EESIFLO» (Сингапур).



*Рис.3.3. Прибор для измерения расхода гидросмеси EESIFLO EASZ-10P.*

***Эрлифтный экспериментальный стенд.***

Экспериментальный стенд (рис. 3.4) представляет собой одноступенчатую эрлифтную установку нагнетательного типа с внешним воздухопроводом.

Для проведения экспериментов эрлифтная установка была конструктивно модернизирована, вместо воздухоотделителя был смонтирован дуговой грохот со шпальтовым ситом с размером щели (ячеек) 5 мм.

На сварной металлической раме закреплена контрольно-измерительная аппаратура (расходомер 3, манометр 5), емкость, имитирующая морскую среду (обечайка) 7 с краном для взятия проб 11 и буферная емкость 15. Подъемная труба эрлифта 8 жестко соединена с входным отверстием дугового грохота 9. Площадка грохота установлена на четырех резьбовых опорах, которые позволяют поднимать или опускать его вместе с подъемной трубой.



*Рис. 3.4. Лабораторный стенд для проведения испытаний (эрлифтная установка).*

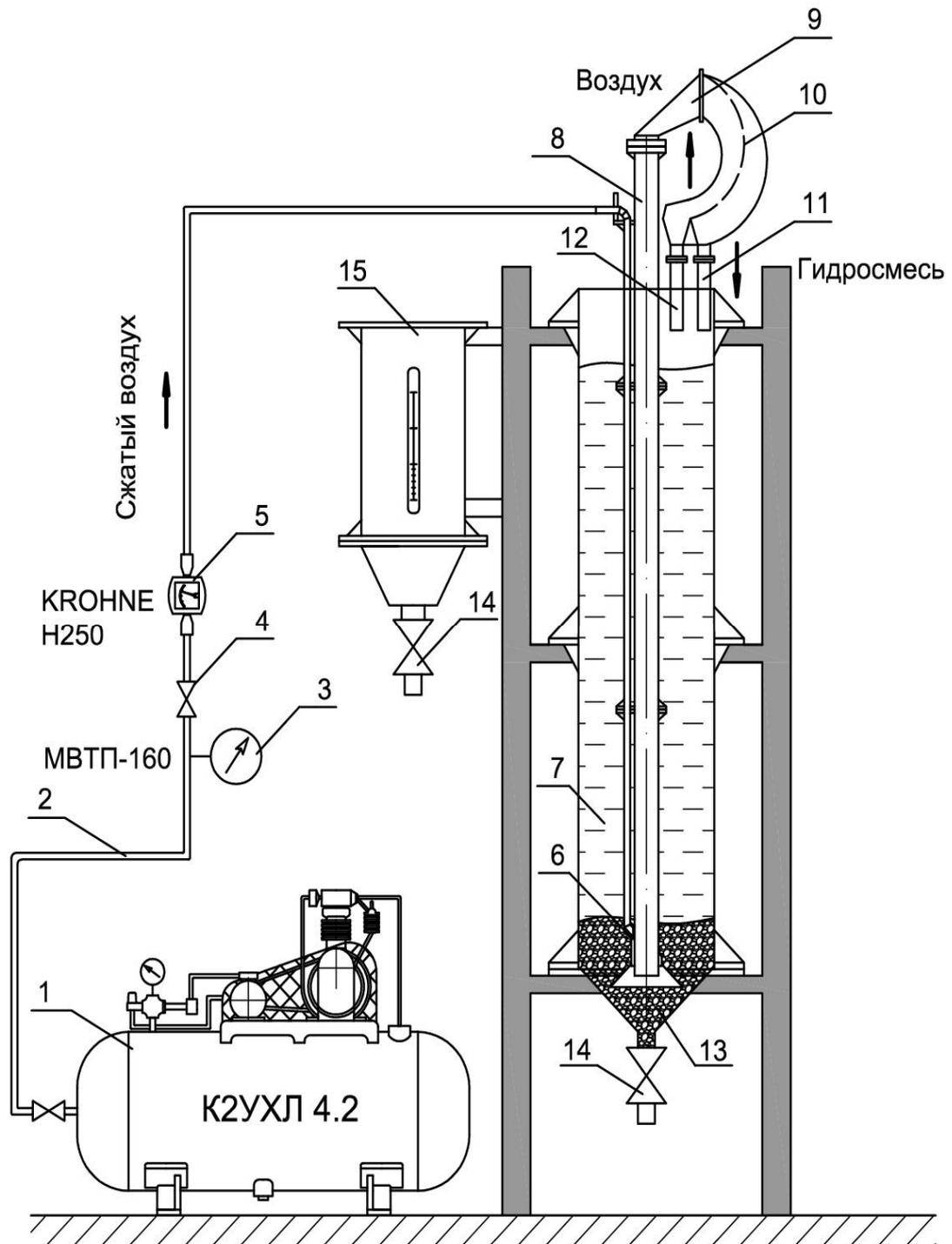


Рис. 3.5. Технологическая схема экспериментальной эрлифтной установки.

1 – компрессор К2УХЛ 4.2; 2 – воздуховод  $D = 27 \times 19$  мм,  $P = 20$  атм.;  
 3 – манометр MBTP-160; 4 – кран; 5 – расходомер KROHNE H250; 6 – смеситель; 7 – внешняя емкость (обечайка); 8 – подъемная труба; 9 – дуговой грохот; 10 – шпальтовое сито; 11 – подситовой слив; 12 – надситовой слив; 13 – исходный материал; 14 – кран для взятия проб; 15 – буферная емкость.

Подъемная труба эрлифта 8 и емкость обечайка изготовлены из органического стекла (плексигласа), что позволяет визуально наблюдать режимы работы эрлифта (барботажа, подъем гидросмеси), а также контролировать заданный коэффициент затопления  $\alpha$ . Компрессор 1 установлен около стенда и соединен со смесителем 6 напорным резиновым воздухопроводом 2 ( $D = 27 \times 19$  мм,  $P = 20$  атм.). Расход воздуха регулируется с помощью крана 4.

Технические характеристики основных узлов стенда приведены ниже:

Габариты сварной рамы, мм:

длина	3000
ширина	1200
высота эрлифтной трубы (с воздухоотделителем)	4200

Габариты емкости, имитирующей морскую среду, мм:

высота полная	2300
высота от нижнего фланца	2100
диаметр	450

Габариты подъемной трубы эрлифта, мм:

диаметр	70
длина (с конусом)	3200
длина от смесителя	3000

Габариты буферной емкости, мм:

высота	900
диаметр	350
объем буферной емкости, м <sup>3</sup>	0,09

Габариты дугового грохота, мм:

длина	550
ширина	300
высота	700
диаметр входного отверстия	70
диаметр надситового слива	80
диаметр подситового слива	80

Габариты шпальтового сита, мм:

длина	800
-------	-----

ширина	280
ячейка	5

Технические характеристики компрессора К2УХЛ 4.2:

длина, мм	1300
ширина, мм	620
высота, мм	1250
производительность, м <sup>3</sup> /мин	0,63
максимальное рабочее давление, МПа	1,00
мощность электродвигателя, кВт	5,50

Для измерения расхода воздуха при эрлифтном гидроподъеме применялся поплавковый расходомер переменного сечения KROHNE - марки H250 M9 (Air) (рис. 3.6), сохраняющий точность измерений даже при очень малых расходах – стандартный диапазон 10:1 (отношение верхнего предела измерения к нижнему), пригоден даже при низком рабочем давлении. Технические характеристики: полный диапазон (100%-ные значения шкалы), по воздуху от 0,7 до 90 м<sup>3</sup>/ч dn 25; шкала 1:10; класс точности 1,6 %; рабочее давление до 40 бар; производитель «KROHNE» (Германия).



Рис. 3.6. Прибор для измерения расхода воздуха KROHNE H250.

### *Эжекторный экспериментальный стенд.*

Гидроэлеваторный экспериментальный стенд представляет собой эжектор центрального типа с внешним водопроводом. Установка была сделана на базе эрлифтной установки (рис. 3.4), где смеситель был заменен гидроэлеватором, который через трубопровод подключен к водяному насосу.

На сварной металлической раме закреплена контрольно-измерительная аппаратура (расходомер 4, манометр 2), емкость, имитирующая морскую среду 7 с краном для взятия проб 14 и буферной емкостью 15. Подъемная труба гидроэлеватора 8 жестко соединена с входным отверстием дугового грохота 9.

Водяной насос 1 установлен около стенда и соединен с гидроэлеватором 6, напорным резиновым водоводом 2 ( $D = 30$  мм.). Расход воды регулируется с помощью крана 3.

Технические характеристики основных узлов стенда приведены ниже.

Водяной насос КМ 50-32-125 предназначен для перекачивания в стационарных условиях воды и жидкостей сходных с водой по химическим свойствам и плотности, с водородным показателем рН от 6 до 9, температурой от 5 °С до 85°С, концентрацией твердых включений до 0,1 %, максимальными размерами до 0,2 мм (рис. 3.8). Его технические характеристики:

длина, м	0,500
ширина, м	0,190
высота, м	0,25
производительность, м <sup>3</sup> /ч	12,5
напор, м. вод. ст.	20
мощность электродвигателя, кВт	2,2
диаметр всасывающего патрубка, мм	50
диаметр нагнетательного патрубка, мм	32

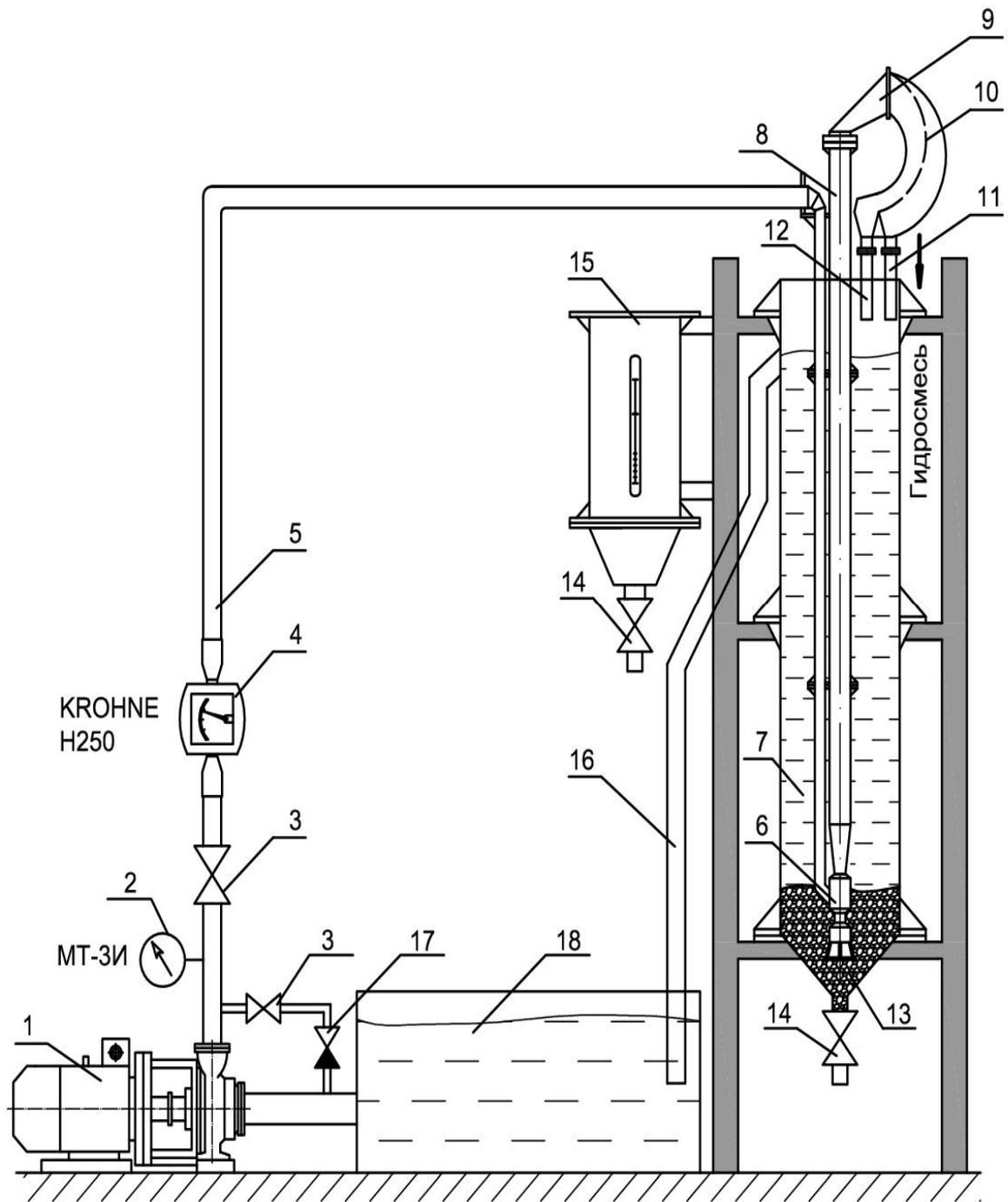


Рис. 3.7. Технологическая схема экспериментальной эжекторной установки.

1 – водяной насос КМ-50-32-125; 2 – манометр МТ-3И; 3 – кран; 4 – расходомер КРОХНЕ Н250; 5 – водовод  $D = 30$  мм; 6 – эжектор; 7 – емкость (обечайка); 8 – подъемная труба; 9 – дуговой грохот; 10 – шпальтовое сито; 11 – подситовой слив; 12 – надситовой слив; 13 – исходный материал; 14 – кран для взятия проб; 15 – буферная емкость; 16 – трубопровод для слива излишком воды; 17 – обратный клапан; 18 – зумпф насоса (емкость для слива и подачи рабочей жидкости).



*Рис.3.9. Водяной насос КМ 50-32-125.*

Для измерения расхода воды применялся поплавковый расходомер переменного сечения KROHNE - марки H250 (Water).

### **3.2.2. Методика проведения исследований.**

Целью экспериментальных работ являлось установление степени дезинтеграции железомарганцевых конкреций:

- при подъеме и классификации на дуговом грохоте эрлифтной и эжекторной установок;
- при прохождении через рабочее колесо грунтового насоса и последующем гидротранспорте.

Исследования и расчеты показали, что технологически возможно и экономически целесообразно перерабатывать ЖМК в товарную продукцию при концентрации марганца более 5 %. Промышленные испытания, проведенные ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина для ООО «Петротранс» показали, что для химического передела ЖМК самая низкая концентрация марганца не может быть ниже 5 %, а для пирометаллургического процесса нижний порог содержания марганца не может быть ниже 17 % [10, 61]. Этому условию отвечают ЖМК класса +5 мм.

Из таблицы 3.1 следует, что максимальные концентрации марганца приурочены к гранулометрическому классу +5 мм. В классе –5 мм содержание марганца падает в 3-4 раза с 17-19 % до 5-6 %.

Химический состав различных классов крупности ЖМК рудной залежи «Восточная-1».

№ п/п	Класс крупности, мм	Выход класса, %	Содержание, %			
			Mn	Fe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
1	-40+18	10,9	14,5	17,44	3,5	21,6
2	-18+10	21,2	19,0	13,5	2,4	16,7
3	-10+5	8,48	11,0	20,5	3,7	19,5
4	-5+2	3,53	6,0	23,0	4,3	22,1
5	-2+1	1,59	6,5	21,0	3,7	31,6
6	-1+0,5	2,23	5,6	19,0	3,3	35,0
7	-0,5+0,25	0,95	3,8	15,5	2,2	46,7
8	-0,25+0,125	5,04	2,5	10,0	1,3	64,8
9	-0,125+0,063	10,75	0,6	2,46	0,25	90,0
10	-0,063	35,33	0,5	5,5	0,65	73,5
Итого		100	7,38	10,94	1,83	48,9

Кроме того, класс +5 мм составляет не менее 40 % от объема промышленных отложений, в то время как класс -5+1, который сложен на 90 % микроконкрециями, не превышает 6-10 %.

Основной интерес представляет процесс дезинтеграции конкреций диаметром более 5 мм, и соответственно количественная оценка выхода продукта разрушения. С этой целью были проведены исследования в этой области для эрлифтного, эжекторного и грунтонасосного способов гидроподъема.

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.

Методика проведения экспериментов состояла в следующем:

1. Из технологической пробы были отсеяны конкреции класса  $-10+5$  мм общим объемом трех проб  $0,06 \text{ м}^3$ ;

2. Первая проба объемом  $0,02 \text{ м}^3$  перегружалась из зумпфа грунтонасосом в буферную емкость объемом  $0,09 \text{ м}^3$ , тем самым имитировался гидроподъем конкреций с глубин 10, 20, 30, 50, 60 и 70 м;

3. Вторая проба объемом  $0,02 \text{ м}^3$  загружалась в емкость (обечайку) эрлифта, и имитировался гидроподъем конкреций с глубин 12, 24, 36, 48, 60 и 72 м по времени при постоянном коэффициенте затопления  $\alpha = 0,6$  и расходе сжатого воздуха  $Q_s = 0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;

4. Третья проба объемом  $0,02 \text{ м}^3$  загружалась в емкость (обечайку) эжектора, и имитировался гидроподъем конкреций с глубин 12, 24, 36, 48, 60 и 72 м.

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

#### ***Эрлифтный экспериментальный стенд.***

Основной геометрический коэффициент эрлифта – коэффициент затопления  $\alpha$  определяется как отношение абсолютного погружения  $H_z$  к полной высоте подъема жидкости (гидросмеси)  $H_n$ .

Исходя из вышеперечисленных габаритных размеров емкости (обечайки) эрлифтной установки и подъемной трубы (от смесителя), максимально возможный коэффициент затопления для данной экспериментальной установки равен  $\alpha = 0,6$ .

Эрлифтная установка работала в циркуляционном режиме за счет смонтированного на верхнем торце подъемной трубы (диаметр 70 мм) эрлифта дугового грохота (рис. 3.5), надситовой и подситовой слив которого были с помощью трубопровода соединены с емкостью обечайкой эрлифтного стенда. За одну циркуляцию осуществлялось всасывание ЖМК в нижнем торцевом сечении трубы и их гидроподъем на высоту 3000 мм. Транспортирование по вертикальному трубопроводу осуществлялось

непрерывными циклами для моделирования глубины подъема 12, 24, 36, 48, 60 и 72 м.

Для определения степени дезинтеграции железомарганцевых конкреций в классе  $-5+1$  мм в процессе подъема с глубин от 12 до 72 м, на экспериментальном стенде была проведена серия опытов.

Необходимое число испытаний устанавливалось методом математической статистики (метод Монте-Карло) по уравнению:

$$n = t^2 \cdot \frac{K_v^2}{K_{доп.}^2} \quad (3.1)$$

где  $K_v$  – коэффициент вариации показателей выхода классов крупности разрушенных пород, %;

$K_{доп.}$  – допустимая ошибка, %;

$t$  – нормированное отклонение (аргумент функции Лапласа).

Для производственно-исследовательских работ рекомендуется принимать  $K_{доп.} = 5-10$  %;  $t = 1,65$  (при заданной надежности  $P = 90$  %) [8].

Необходимое число испытаний  $n$  для наибольшего значения  $K_v$ , вычисленного по уравнению (3.1) составило 10.

Коэффициент вариации показателей выхода классов крупности  $K_v^n$  для ЖМК рассчитывался как средневзвешенная величина коэффициентов вариации выхода классов отдельно  $K_{vi}$ , %:

$$K_v^n = \frac{\sum K_{vi} \cdot \bar{P}_i}{100}; \quad (3.2)$$

$$K_{vi} = \frac{\sigma}{\bar{P}_i} \cdot 100, \quad (3.3)$$

где  $\sigma$  – средневзвешенное квадратичное отклонение.

В емкость (обечайку) эрлифтной установки загружались приготовленные смеси класса  $-10+7$  мм в объеме  $0,02 \text{ м}^3$ . При фиксированном расходе воздуха  $Q_b = 0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$  и коэффициенте затопления  $\alpha = 0,6$  эрлифт непрерывно работал в замкнутом режиме. Для моделирования подъема всего материала ( $0,02 \text{ м}^3$ ), время работы эрлифта составило:

Моделируемая глубина, м	12	24	36	48	60	72
Время подъема	2 мин 50 с	5 мин 45 с	8 мин 37 с	11 мин 28 с	14 мин 15 с	17 мин 09 с

На шпальтовом сите эрлифта осуществлялось визуальное наблюдение и обзор проб после определенной высоты подъема гидросмеси. После окончания каждого временного интервала проба выгружалась из емкости эрлифта, подвергалась ситовому анализу мокрым способом с разделением на классы. После высушивания в электропечи ЖМК взвешивались, и определялось процентное содержание фракции  $-5+1$  мм. Характер и полнота дезинтеграции железомарганцевых конкреций определялись также визуально.

Показатель степени дезинтеграции, характеризующийся соотношением диаметров ЖМК до и после разрушения определялся по уравнению:

$$\varepsilon = \frac{D_{\text{ср.}}}{d_{\text{ср.}}} \quad (3.4)$$

где  $D_{\text{ср.}}$  – средний диаметр исходного образца;

$d_{\text{ср.}}$  – диаметр частицы, принимаемый за средний для  $i$ -ого класса крупности.

Средний диаметр транспортируемых ЖМК определялся по уравнению, мм:

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum(d_{\text{ср}i} \cdot P_{pi}\%) }{100}, \quad (3.5)$$

где  $d_{\text{ср}i}$  – средний диаметр частиц данной фракции после опыта, мм;

$P_{pi}\%$  – выход данной фракции после опыта, %.

#### ***Эжекторный экспериментальный стенд.***

Основными безразмерными параметрами водоструйного аппарата являются:

- относительный коэффициент напора  $\beta$ ;
- коэффициент эжекции  $\alpha$ .

Исходя из вышеперечисленных габаритных размеров емкости

(обечайки) для эжекторной установки и подъемной трубы (от смесителя), для данной экспериментальной установки основные безразмерные параметры водоструйного аппарата равны  $\beta=0,25, \alpha = 0,93$ .

Эжекторная установка, так же, как и эрлифтная, работала в циркуляционном режиме за счет смонтированного на верхнем торце подъемной трубы (диаметр 70 мм) дугового грохота (рис. 3.5), надситовой и подситовой слив которого были с помощью трубопровода соединены с емкостью (обечайкой) стенда. За одну циркуляцию осуществлялось всасывание ЖМК в нижнем торцевом сечении трубы и их гидроподъем на высоту 3 м.

Транспортирование по вертикальному трубопроводу осуществлялось, так же как и для эрлифтной установки, непрерывными циклами для моделирования глубины подъема 12, 24, 36, 48, 60 и 72 м.

Для моделирования подъема всего материала, время работы эжектора составило:

Моделируемая глубина, м	12	24	36	48	60	72
Время подъема	3 мин 25 с	6 мин 53 с	10 мин 17 с	13 мин 48 с	17 мин 06 с	20 мин 39 с

Затем определялся выход фракции  $-5+1$  мм и показатель степени дезинтеграции по уравнениям (3.4) и (3.5).

#### ***Грунтососный экспериментальный стенд.***

Расход пескового насоса П12,5/12,5-СП-2.2 по воде – 12,5 м<sup>3</sup>/ч; полный напор – 12,5 м. вод. ст; диаметр рабочего колеса – 190 мм; частота вращения рабочего колеса – 600 об/мин.

Для определения степени дезинтеграции конкреций при разработке рудных залежей земснарядами с грунтовыми насосами был проведен эксперимент на опытном материале. Исходный материал крупностью – 10+7 мм в объеме 0,02 м<sup>3</sup> загружался в зумпф, затем перекачивался грунтовым насосом по транспортному трубопроводу длиной 10 м в буферную емкость объемом 0,09 м<sup>3</sup> и определялся процентный выход

фракции  $-5+1$  мм, по уравнениям (3.4) и (3.5). В процессе экспериментальных исследований моделировался гидроподъем конкреций с глубин 10, 20, 30, 50, 60 и 70 м. Временной интервал подъема не учитывался.

### **3.2.3. Результаты исследований.**

Эксперименты по изучению дезинтеграции железомарганцевых конкреций в эрлифтной, эжекторной и грунтонасосной установках проводились для сопоставимых глубин (10-72 м), во всех случаях средняя рабочая скорость гидротранспортирования была постоянной и составляла  $V_p \approx 1,8$  м/с.

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.

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 (не товарной) 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 перекачивании исходного материала грунтовым насосом выход шламовой фракции  $-5+1$  мм составил от 11,5 до 15,5 %.

При разработке рудных залежей грунтовыми насосами процесс дезинтеграции (разрушения) конкреций в большей степени зависит от механического воздействия лопаток рабочего колеса на перекачиваемый материал и в меньшей от длины напорного трубопровода, так как в вертикальных трубопроводах в центре потока скорость больше, чем у стенок трубы, в результате у стенок создается жидкостный слой, иногда пробиваемый твердыми частицами, которые получают радиальное движение под действием турбулентного перемешивания.

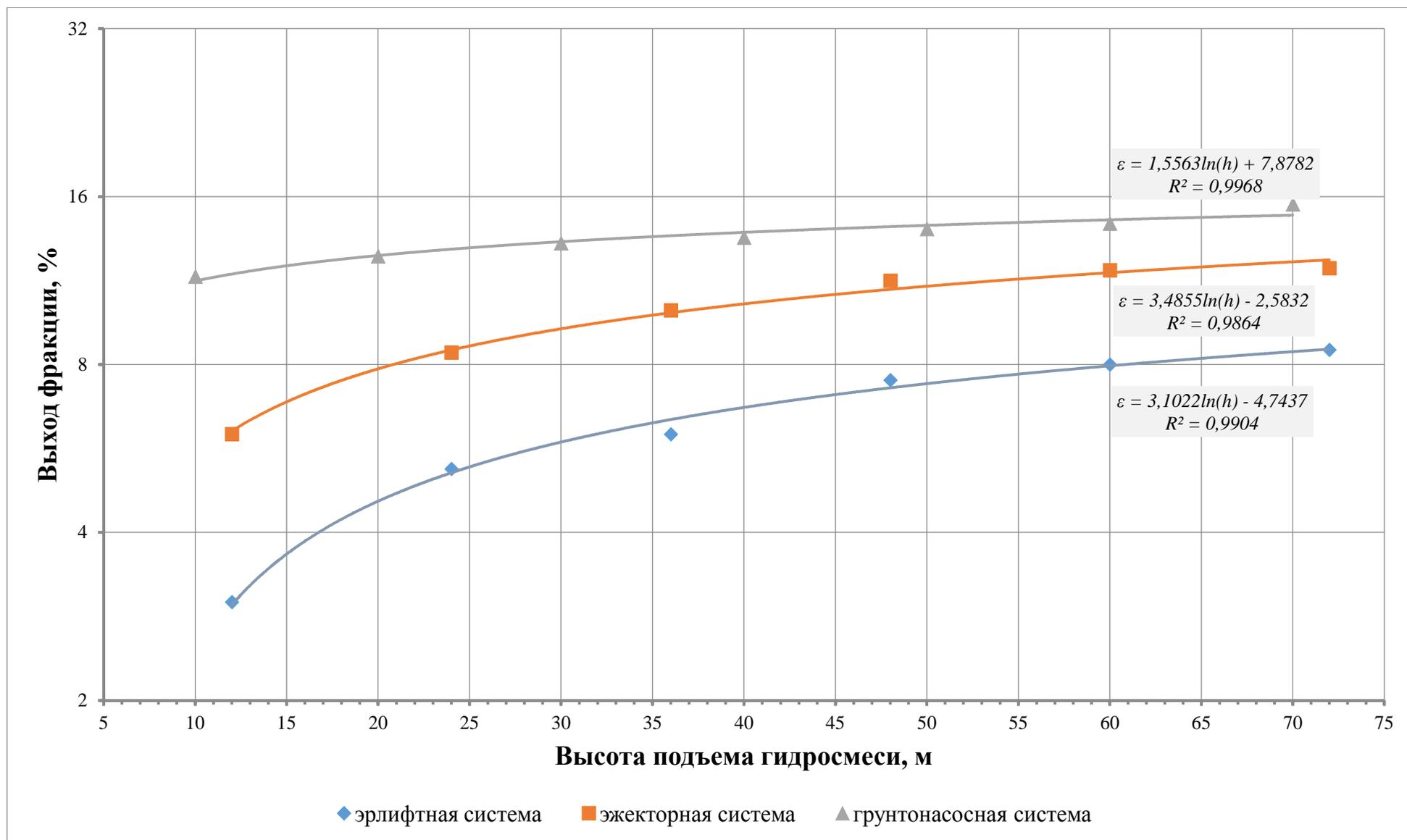


Рис. 3.9. Зависимость степени дезинтеграции ЖМК от способа гидроподъема.

Вследствие этого, существует приблизительное равенство потерь напора на трение при движении гидросмесей с зернистой твердой составляющей по вертикальным трубопроводам и при движении по ним чистой воды с тем же расходом [78].

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. 3.9).

### **Выводы по главе 3:**

1. Для проведения экспериментальных исследований были разработаны технологические схемы (рис. 3.1, 3.5, 3.7) для установления степени дезинтеграции железомарганцевых конкреций при работе различного оборудования (эжектора, эрлифта, грунтового насоса), включающие комплексы гидротранспортных устройств и контрольно измерительной аппаратуры, работающие в системе с замкнутым кругооборотом гидросмеси и моделирующие динамику гидроподъема ЖМК с глубин от 10 до 72 м.

2. В результате проведения экспериментальных исследований выявлено, что при движении гидросмеси по транспортному трубопроводу в условиях морских глубин от 10 до 72 м идет последовательный процесс дезинтеграции железомарганцевых конкреций, зависящий от специфичности конструктивных особенностей применяемого оборудования: центробежного грунтового насоса, эжекторной и эрлифтной установок; степень разрушения конкреций по классу фракций  $-5+1$  мм как нетоварной продукции соответственно изменяется от 11,5 до 15,5 %; 6-12 %; 3-8,5 % в сопоставимых условиях работы.

## ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ.

### 4.1. Основные положения инженерного метода расчета гидротранспорта.

Основной задачей при гидротранспортировании твердого материала является обеспечение оптимальной производительности оборудования с минимальными энергетическими затратами.

Как известно, основными параметрами, определяющими эффективность работы гидравлического транспорта, являются: скорость перемещаемого материала, диаметр трубопровода, плотность (консистенция) гидросмеси, удельные потери напора.

Метод расчета гидротранспорта сводится к определению основных параметров, при которых движение гидросмеси при заданных: расходе, консистенции пульпы, гранулометрическом составе транспортируемых пород осуществлялось бы при скоростях, обеспечивающих минимальные потери напора.

Известно, что минимальным потерям напора соответствует работа гидротранспорта в области критических скоростей. Поэтому расчет гидротранспорта твердых материалов сводится в основном к определению потерь напора при движении гидросмеси  $i_g$  и критической скорости  $V_{кр}$ .

Сложность расчетов заключается в том, что до настоящего времени не создано достаточно строгой теории движения взвесенесущих потоков, которая имела бы общепризнанное физическое и математическое обоснование. Поэтому для практических целей используются в основном эмпирические зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований. Кроме того, необходимо отметить, что многими авторами проводились исследования в ограниченном диапазоне изменения изучаемых параметров.

Как известно, уравнение для определения удельных потерь напора гидротранспорта имеет следующий вид [78]:

$$i_{\Gamma} = i_0 + \Delta i \quad (4.1)$$

где  $i_0$  – удельные потери напора на трение при движении гидросмеси;

$\Delta i$  – дополнительные удельные потери, обусловленные наличием в потоке твердой фракции.

Уравнение для определения удельных потерь напора для вертикального гидротранспорта имеет следующий вид [35, 36]:

$$i_{\text{в}} = i_0 + i_{\text{ст}} \quad (4.2)$$

где  $i_{\text{ст}}$  – удельные потери напора на преодоление веса столба гидросмеси.

Величина  $i_0$  в уравнении (4.1) составляет основную часть значения  $i_{\text{в}}$  и правильное определение этого члена в значительной мере обуславливает точность оценки удельных потерь напора.

В трудах А. П. Юфина [78] было отмечено, что при рассмотрении кинематической структуры горизонтального потока гидросмеси существует асимметрия по отношению к горизонтальному диаметру трубопровода, заключающаяся в увеличении концентрации твердых частиц в нижних слоях потока и, следовательно, затормаживании нижних слоев по сравнению с верхними. Действительный удельный вес гидросмеси в горизонтальных трубах больше расходного удельного веса.

Особенностью же перемещения частиц и кусков горных пород в вертикальных трубопроводах является движение всем сечением потока с практически равномерным распределением концентрации твердых частиц относительно оси потока.

В вертикальных трубопроводах поток гидросмеси симметричен. В трубах с восходящим потоком действительная консистенция гидросмеси больше расходной в результате стремления твердых частиц падать вниз. Поэтому разница между действительной и расходной консистенцией будет

тем больше, чем крупнее или тяжелее твердые частицы и чем меньше средняя скорость восходящего потока [78].

Вследствие того, что в центре потока скорость больше, чем у стенок трубы, возникает сила, отклоняющая частицы от стенок к центру. Эта сила не настолько значительна, чтобы способствовать заметному увеличению консистенции в центральной части трубы, но достаточна для того, чтобы отклонить твердые частицы от стенок. В результате у стенок создается жидкостный слой, иногда пробиваемый твердыми частицами, которые получают радиальное движение под действием турбулентного перемешивания конечных масс жидкости с содержащимися в них твердыми частицами. Это обстоятельство обуславливает приближенное равенство потерь напора на трение при движении гидросмесей с зернистой твердой составляющей по вертикальным трубам и при движении по ним чистой воды с тем же расходом.

В вертикальных трубах с нисходящим потоком частицы стремятся падать в направлении движения потока, поэтому действительная консистенция в таких трубах меньше расходной. Если твердые частицы, транспортируемые потоком воды по вертикальным трубам, имеют одинаковые размеры (равные гидравлические крупности), то они будут двигаться общим фронтом, не обгоняя друг друга.

Потери на трение  $i_0$  при движении гидросмеси в горизонтальных и вертикальных трубопроводах можно принимать равными потерям напора при движении чистой воды по гладким трубам. Вычисление  $i_0$  для гладких труб можно производить по уравнению Дарси-Вейсбаха [54, 78]:

$$i_0 = \frac{V_p^2}{2gD} \cdot \lambda_0, \quad (4.3)$$

где  $V_p$  – скорость потока смеси, м/с;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$\lambda_0$  – коэффициент гидравлических сопротивлений.

Для определения  $\lambda_0$  существуют несколько уравнений различных авторов. Н. А. Силин [78] рекомендует вычислять  $\lambda_0$  по уравнению:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg\left(\frac{Re}{10}\right)\right)^2}. \quad (4.4)$$

Уравнение П. К. Конакова имеет следующий вид [78]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg(Re) - 1,52)^2}. \quad (4.5)$$

Уравнение Альтшуля-Колебрука [4]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg \frac{Re}{7}\right)^2}. \quad (4.6)$$

Уравнение А. В. Теплова [78]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg\left(\frac{r}{D}\right) + 2,19\right)^2}. \quad (4.7)$$

Уравнение А. Д. Альтшуля [54]:

$$\lambda_0 = 0,11 \cdot \left(\frac{R_{ш}}{D} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}. \quad (4.8)$$

где  $R_{ш}$  – эквивалентная, абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы.

По результатам экспериментальных исследований вертикального гидротранспорта А. П. Юфин получил обобщенные уравнения определения потерь напора на трение:

– для восходящего потока

$$i_0 = i_{0в} \left(1 + 145 S \frac{gD}{V^2} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{gD}}\right), \quad (4.9)$$

– для нисходящего потока

$$i_0 = i_{0н} \left(1 - 250 S \frac{gD}{V^2} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{gD}}\right), \quad (4.10)$$

где  $S$  – концентрация частиц в гидросмеси;

$V$  – средняя скорость потока смеси, м/с;

$V_0$  – гидравлическая крупность частиц, м/с;

$i_{0в}$  и  $i_{0н}$  – потери напора при движении чистой воды, рекомендуется определять по формуле Дарси-Вейсбаха.

Удельные потери напора на преодоление веса столба гидросмеси определяются по уравнению [66, 67]:

$$i_{ст} = \frac{\rho_n - \rho_0}{\rho_0}, \quad (4.11)$$

где  $\rho_n, \rho_0$  – плотности гидросмеси и воды.

К настоящему времени сложились следующие практические методы расчета гидротранспорта [78]:

- основанные на опытных данных по гидротранспорту и расчетных номограммах;
- по эмпирическим формулам, полученных входе обобщения опытного материала;
- основанные на различных теоретических закономерностях движения взвесенесущих потоков.

Гидравлические сопротивления и критическая скорость при движении гидросмеси по трубопроводам наиболее часто рассчитываются по эмпирическим и полуэмпирическим уравнениям, предложенным различными авторами и организациями. Наиболее распространенные методы и уравнения представлены ниже.

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу профессора А. Е. Смолдырева [22].*

Критическая скорость  $V_{кр}$ , прежде всего, зависит от крупности твердой фракции и определяется по уравнению, м/с:

$$V_{кр} = C' \sqrt{f_1 a S g D}, \quad (4.12)$$

где  $a$  – относительная плотность твердого в среде;

$C'$  – опытная константа;

$f_1$  – коэффициент трения пород о стенку трубопровода.

Удельные потери напора при движении гидросмеси определяются по уравнению:

$$i_{\Gamma} = i_0 + f_1 a S. \quad (4.13)$$

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу профессора В. В. Трайниса [80].*

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{gD} \cdot \sqrt[3]{c \cdot \frac{\rho_{\text{п}} - \rho_0}{k\psi\lambda_0\rho_{\text{п}}}}, \quad (4.14)$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий содержание мелких частиц ( $< 2$  мм);

$k$  – эмпирический коэффициент зависящий от характера транспортируемого материала;

$\psi$  – коэффициент сопротивлений при свободном падении твердой частицы в жидкой среде.

$$i_{\Gamma} = i_0 \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_0} + \frac{\sqrt{gD}(\rho_{\text{п}} - \rho_0)c}{k\psi V \rho_{\text{п}}}. \quad (4.15)$$

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [79, 80].*

$$V_{\text{кр}} = 8,3 \cdot \sqrt[3]{D} \cdot \sqrt[6]{\varphi_{\text{ср}} S}, \quad (4.16)$$

где  $\varphi_{\text{ср}}$  – среднеарифметическое значение коэффициента транспортабельности  $i$ -го грунта.

$$i_{\Gamma} = \delta^4 \sqrt{j} \cdot \sqrt[3]{S^2} \frac{Q_{\text{см.кр.}}}{Q_{\text{см}}}, \quad (4.17)$$

где  $j$  – коэффициент разнотерности грунта;

$\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние относительной крупности частиц грунта;

$Q_{\text{см.кр.}}$ ,  $Q_{\text{см}}$  – расход гидросмеси соответственно при критической и фактической скорости, м<sup>3</sup>/ч.

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу профессора Г. А. Нурока [54].*

$$V_{кр} = \sqrt{gDa} \cdot \sqrt{k \left( \frac{S}{100} \right)^{0,5}}, \quad (4.18)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент.

$$i_r = i_0 \frac{\rho_{п}}{\rho_0} (1 + \delta_1). \quad (4.19)$$

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу профессора В. С. Кнороза [79, 80].*

$$V_{кр} = 0,855 \cdot (0,35 + 1,36 \cdot \sqrt[3]{P \cdot D^2}), \quad (4.20)$$

где  $P$  – весовая концентрация гидросмеси, %.

$$i_r = i_0 \frac{\rho_{п}}{\rho_0}. \quad (4.21)$$

*Расчет основных параметров гидротранспорта по методу профессора А. П. Юфина [78].*

$$V_{кр} = 9,8 \sqrt[3]{D} \cdot \sqrt[4]{V_0} \left( \frac{\rho_{п}}{\rho_0} - 0,4 \right). \quad (4.22)$$

Удельные потери напора при движении гидросмеси:

$$i_r = i_0 + \left[ i_{кр} - i_0 \left( \frac{V_{кр}}{v} \right)^2 \right] \cdot \sqrt[4]{\frac{V_{кр}}{v}}. \quad (4.23)$$

Представленные выше эмпирические и полуэмпирические уравнения применяются для расчета основных параметров гидротранспорта в горизонтальных трубопроводах.

Для расчета основных параметров вертикального гидротранспорта профессор А. Е. Смолдырев предложил следующую методику [22].

$$V_{кр} = V_{ст} + C \sqrt{a \cdot S \cdot g \cdot D}, \quad (4.24)$$

где  $a$  – относительная плотность твердого в среде;

$V_{ст}$  – скорость стесненного падения частиц, м/с;

$C$  – опытная константа.

Удельные потери напора на трение определяются по уравнению:

$$i = i_0 (1 + aS). \quad (4.25)$$

Из приведенного обзора видно, что в настоящее время в области

гидротранспорта накоплен большой экспериментальный и производственный опыт. Предложено большое количество расчетных зависимостей для определения основных параметров гидротранспорта. Однако ни одна из этих зависимостей не отличается универсальностью и каждая применима лишь для определенного диапазона условий, учитывающий тип транспортируемого материала или диаметр трубопровода, величины скорости или консистенции гидросмеси, либо всю совокупность этих параметров. Также стоит отметить, что данные уравнения и методики применимы только для транспортирования гидросмеси на суше, так как при морском гидротранспорте необходимо дополнительно учитывать глубину моря, потери на переподъем над уровнем моря, потери на выходе и физические свойства водной среды.

Таким образом, существующие методики расчета гидротранспорта требуют уточнения имеющихся расчетных уравнений с целью расширения диапазона их применимости, а также вывод новых, более точных зависимостей.

#### **4.2. Методические рекомендации для расчета гидротранспорта ЖМК в вертикальных трубопроводах.**

Для расчета основных гидравлических параметров, обеспечивающих эффективные режимы при скоростях  $V_p = (1,10 \div 1,15) \cdot V_{кр}$ , необходимо предварительно обосновать и выбрать важнейшие технологические параметры гидротранспортной системы.

Исходными данными для расчета обычно являются: пропускная способность системы – годовое (часовое) количество транспортируемого материала ( $Q_T$ ), расстояние транспортирования ( $H_M$ ), плотность ( $\rho_T$ ) и гранулометрический состав материала ( $d_{cp}$ ), плотность несущей жидкости ( $\rho_o$ ), объемная концентрация гидросмеси ( $S$ ). Задача состоит в определении диаметра трубопровода, мощности привода и выборе насосно-перекачного оборудования.

Общая расчетная схема гидротранспорта включает в себя [22]:

1. Определение характеристик гидросмеси.

2. Определение режимов движения и параметров потока:

– рабочей и критической скорости гидросмеси по заданной или выбранной концентрации и по предварительно выбранному диаметру трубопровода;

– окончательный выбор диаметра трубопровода по уточненной рабочей скорости гидросмеси, обеспечивающего эффективный режим транспортирования;

– потерь напора и транспортирующей способности гидротранспортной системы.

3. Выбор технологического оборудования для обеспечения заданной производительности и напора с определением мощности привода и энергоемкости гидротранспорта.

***Методика расчета вертикального гидротранспорта железомарганцевых конкреций:***

*I. Определение характеристики гидросмеси.*

1. Плотность гидросмеси определяются по уравнению [78], кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_n = S(\rho_T - \rho_0) + \rho_0, \quad (4.26)$$

*II. Определение режимов движения и параметров потока.*

2. Гидравлическую крупность ЖМК в свободных условиях рекомендуется определять по уравнению (2.35), полученному нами на основании экспериментальных исследований в разделе 2.5, м/с:

$$V_0 = \frac{\nu}{d_{cp}} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} - (0,081 \cdot \ln(d) + 0,43),$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$Ar$  – число Архимеда;

$d_{cp}$  – средневзвешенный размер частиц, подсчитанный на основании фракционного состава, м.

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i \cdot P_i}{100}. \quad (4.27)$$

3. Для частиц крупностью более 5 мм скорость стесненного падения частиц рекомендуется определять по уравнению из раздела 2.6 (2.38), м/с:

$$V_{ст} = V_0 \cdot k,$$

$k$  – коэффициент снижения скорости при стесненном падении частиц, который определяется П. В. Лященко:

$$k = m^n,$$

где  $m$  – коэффициент разрыхления слоя;

$n$  – показатель степени, зависящий от крупности зерен и определяется по уравнениям С. Ф. Ричардсона и В. Н. Заки [82] (таблица 2.7).

4. Критическую скорость  $V_{кр}$  рекомендуется определять по уравнению Е. А. Смолдырева и предварительно выбранному диаметру трубопровода (4.24), м/с:

$$V_{кр} = V_{ст} + C\sqrt{a \cdot S \cdot g \cdot D},$$

где  $a$  – относительная плотность твердого в среде;

$C$  – опытная константа.

Диаметр частиц	0-3 мм	2-10 мм	>10 мм
Значение $C$	2,5	2,5-3	3-3,5

5. Рабочая скорость гидросмеси определяется по уравнению [54], м/с:

$$V_p = \frac{Q_n}{0,785 \cdot D^2}, \quad (4.28)$$

где  $Q_n$  – расход гидросмеси, м<sup>3</sup>/с.

Окончательный диаметр трубопровода выбирается по уточненной рабочей скорости гидросмеси, обеспечивающий эффективный режим транспортирования.

Как известно, режим движения гидросмеси со скоростями, равными или несколько больше критической, однако не более  $(1,10-1,15) \cdot V_{кр}$  является наиболее эффективным [54, 67, 88].

Для режима движения гидросмесей с большими скоростями, рабочая скорость обычно на порядок больше величины  $V_{ст}$ .

6. Расход гидросмеси в нагнетательном трубопроводе равен [54], м<sup>3</sup>/ч:

$$Q_{\Pi} = \frac{Q_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} S}. \quad (4.29)$$

7. Удельные потери напора для вертикального гидротранспорта, в литературных источниках рекомендуется определять по уравнению (4.2), однако в связи со спецификой гидротранспорта с морских глубин необходимо учесть потери напора на гидростатический столб при переподемe на борт судна и на выходе гидросмеси. На основании вышеизложенного уравнение, определения удельных потерь напора примет следующий вид:

$$i_{\text{в}} = i_0 + i_{\text{ст}} + i_{\text{пер}} + i_{\text{вых}}, \quad (4.30)$$

где  $i_{\text{вых}}$  – потери напора на выходе гидросмеси;

$i_{\text{пер}}$  – потери напора на гидростатический столб при переподемe на борт судна.

8. Потери на трение в вертикальном трубопроводе определяются по уравнению [23], м. вод. ст.:

$$i_0 = \lambda_0 \frac{V_p^2}{2g} \cdot \frac{H_{\text{м}}}{D} \cdot \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_0}, \quad (4.31)$$

9. Гидравлические сопротивления определяются по уравнению А. Д. Альтшуля (4.8) [54]:

$$\lambda_0 = 0,11 \cdot \left( \frac{R_{\text{ш}}}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}.$$

10. Число Рейнольдса определяется по уравнению [78]:

$$Re = \frac{V_p D}{\nu}. \quad (4.32)$$

11. Определение гидравлических сопротивлений на изливе [23], м. вод. ст.:

$$i_{\text{в}} = \xi_{\text{вых}} \frac{V_p^2}{2g} \cdot \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_0}, \quad (4.33)$$

где  $\xi_{\text{вых}}$  – коэффициент местных сопротивлений.

12. Определение общего напора необходимого для преодоления суммарных гидравлических сопротивлений (линейных и местных) движению гидросмеси в вертикальном трубопроводе.

Напор необходимый для преодоления суммарных гидравлических сопротивлений, м. вод. ст.:

$$H = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_0} H_M + \lambda_0 \frac{V_p^2}{2g} \cdot \frac{H_M}{D} \cdot \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_0} + \xi_{\text{вых}} \frac{V_p^2}{2g} \cdot \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_0} + \rho g h_0, \quad (4.34)$$

где  $H_M$  – глубина моря, м;

$h_0$  – высота борта судна, м.

*III. Выбор технологического оборудования для обеспечения заданной производительности и напора с определением мощности привода и энергоемкости гидротранспорта.*

В результате выбора технологического оборудования определяются следующие паспортные данные насоса: подача насоса  $Q_0$  и напор  $H_0$  по воде, максимальный к.п.д.  $\eta_0$  при работе на воде.

13. Перерасчет напорно-расходной характеристики насоса с воды на гидросмесь [22], м. вод. ст.:

$$H_{\Gamma} = H_0 \left[ 1 + 0,6 \left( \frac{\rho_{\Pi} - \rho_0}{\rho_0} \right)^{0,9} \right], \quad (4.35)$$

14. К.п.д. насоса при работе на гидросмеси [54]:

$$\eta_{\Gamma} = \eta_0 (1 - 0,38S). \quad (4.36)$$

15. Мощность на валу при работе насоса на гидросмеси [22], кВт:

$$W = \frac{Q_{\Pi} \cdot H \cdot \rho_{\Pi}}{367 \cdot \eta \cdot \rho_0}. \quad (4.37)$$

16. Удельная энергоемкость гидротранспорта, кВт·ч/т:

$$q = \frac{W}{Q_T}, \quad (4.38)$$

где  $Q_T$  – производительность по твердому материалу, т/ч.

### 4.3. Удельная энергоёмкость гидравлического транспорта конкреций.

Удельная энергоёмкость гидротранспорта ( $q$ ) определяется по уравнению [22], кВт·ч/т:

$$q = \frac{3,6 \cdot W \cdot \rho_{\Pi}}{S \cdot \rho_{\Gamma} \cdot Q_{\Pi}}. \quad (4.39)$$

Как известно энергоёмкость процесса гидротранспортирования непосредственно зависит от гидравлических сопротивлений, плотности твердого и его концентрации в потоке.

В. Н. Покровская [58] на основании теоретических и экспериментальных исследований предложила определять энергоёмкость по следующему уравнению, кВт·ч/т:

$$q = \frac{i_{\text{см}} \cdot 10^6}{367,2 \cdot S \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \eta}, \quad (4.40)$$

где  $i_{\text{см}}$  – гидравлические сопротивления при движении гидросмеси, Па;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность твердых частиц, т/м<sup>3</sup>;

$\eta$  – к.п.д. системы.

Теоретические зависимости потерь напора при гидротранспорте пульпы показывают, что с увеличением концентрации их величина возрастает. Увеличение концентрации приводит к возрастанию производительности по твердому материалу. Вместе с тем рост удельных потерь напора и потребляемой мощности может снизить эффект от увеличения производительности в связи с ростом потребляемой энергии. Нахождения максимума концентрации твердого в гидросмеси, при котором происходит минимальное потребление мощности, необходимо для увеличения эффективности рабочего процесса и оборудования гидротранспортного комплекса [1].

Для определения максимума концентрации ЖМК в гидросмеси при минимальных затратах мощности для вертикального гидротранспорта воспользуемся методикой профессора В. И. Александрова [1, 2]. Удельная

энергоемкость гидротранспорта определяется по уравнению, кВт·ч/т·км:

$$q = \frac{W}{L \cdot \rho_T}, \quad (4.41)$$

где  $L$  – длина трубопровода, км.

Мощность, затрачиваемая на транспортирование гидросмеси, кВт:

$$W = \frac{Q_{\Pi} \cdot g \cdot \rho_{\Pi} \cdot H}{1000}, \quad (4.42)$$

где  $H$  – напор системы гидротранспорта, м ( $H = i_{cm} L$ );

$i_{cm}$  – удельные потери напора.

На основании зависимостей (4.41) и (4.42) удельная энергоемкость гидротранспорта определяется по уравнению [1]:

$$q = \frac{i_{cm} \cdot g \cdot \rho_{\Pi}}{3,6 \cdot S \cdot \rho_T} \quad (4.43)$$

Уравнение (4.43) показывает, что энергоемкость зависит от величины концентрации твердых частиц, в объеме транспортируемой гидросмеси, и ее можно представить в виде:

$$q = A \cdot B \quad (4.44)$$

где  $A$  – постоянный множитель, зависящий от плотности транспортируемых твердых частиц,  $A = g / 3,6 \cdot \rho_T$ ;

$B$  – параметр, величина которого определяется концентрацией твердых частиц в объеме перекачиваемой гидросмеси, который называется приведенной плотностью  $B = (\rho_n \cdot i_{cm}) / S$ .

На рис. 4.1. приведены графические зависимости изменения расхода гидросмеси и потерь напора от концентрации при фиксированной производительности гидротранспортной системы  $Q_T = 100$  т/ч,  $\rho_T = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_{cp} = 7$  мм,  $H_M = 100$  м (0,1км) которые показывают, что обе кривые имеют общую точку пересечения, которая соответствует критическому значению концентрации ( $S = 0,095$ ) и минимальному значению приведенной плотности ( $B$ ) как критерия энергоемкости.

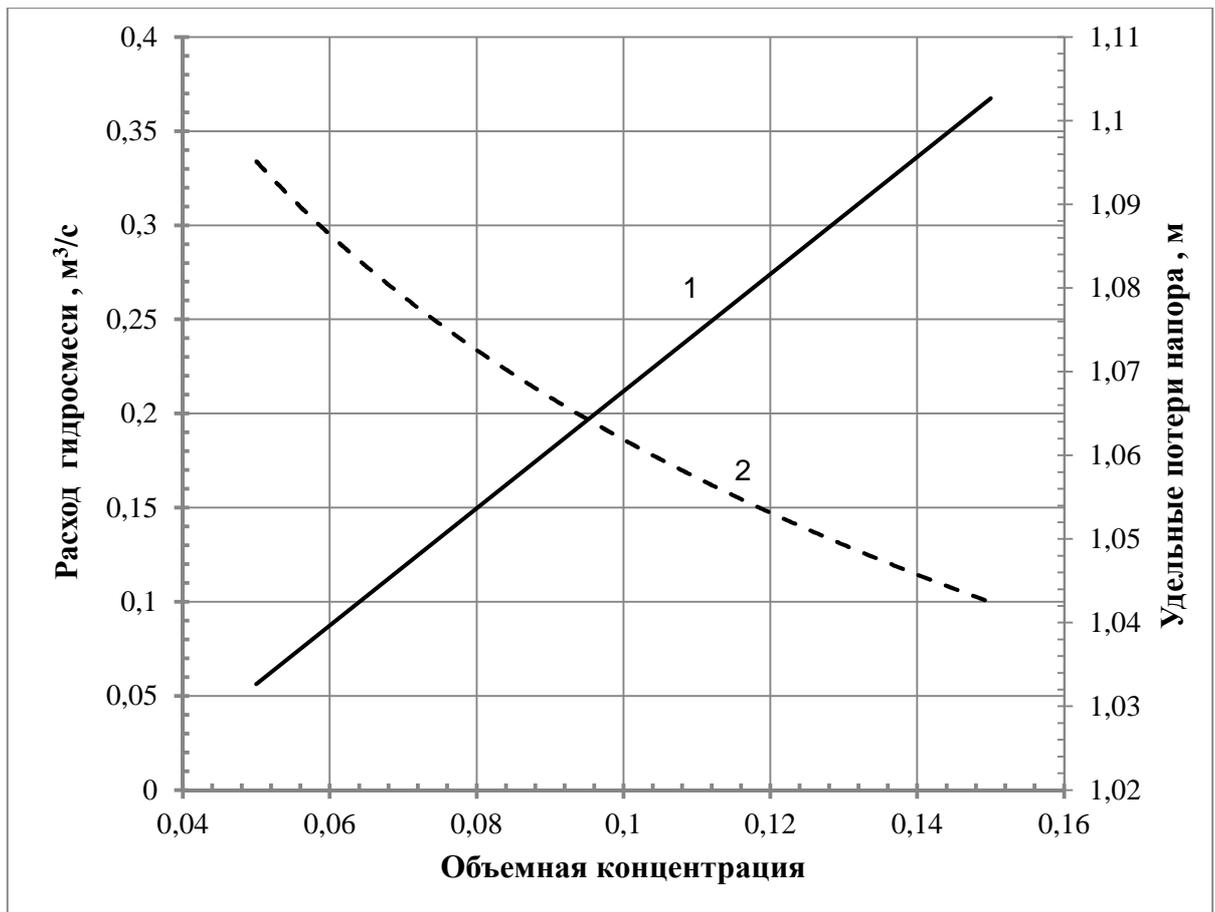


Рис.4.1. Графические зависимости расхода гидросмеси и потерь напора от концентрации для ЖМК.

1 – потери напора, 2 – расход гидросмеси.

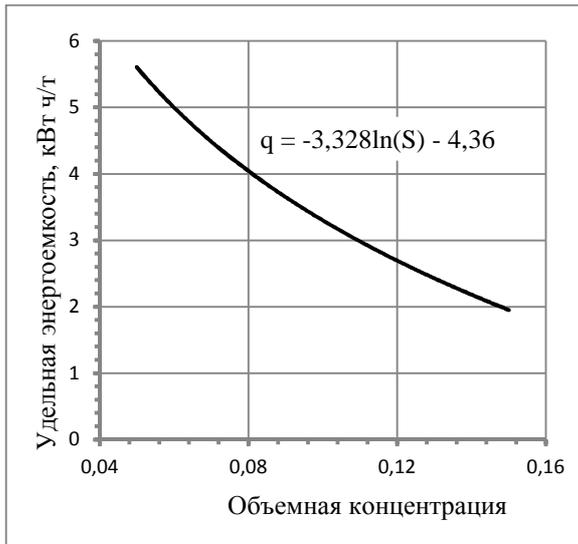
Для установления функциональной зависимости удельной энергоемкости от плотности твердого были выполнены расчеты (для плотности ЖМК от 1600 до 2400 кг/м<sup>3</sup>), которые показывают, что максимальное значение энергетических затрат соответствует наименьшей концентрации твердых частиц в объеме перекачиваемой гидросмеси.

Зависимость удельной энергоемкости от концентрации ЖМК в гидросмеси описывается следующей функцией (для плотности 1600 кг/м<sup>3</sup>) (рис. 4.2):

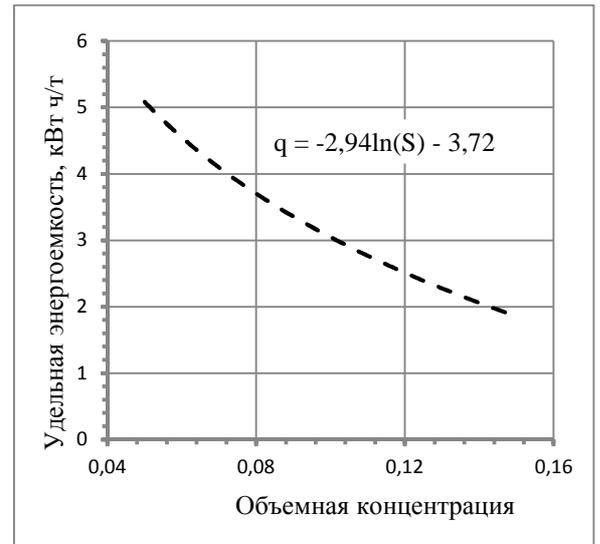
$$q = -3,328 \ln(S) - 4,36 \quad (4.45)$$

Таким образом, удельная энергоемкость гидротранспорта является сложной функцией и определяется концентрацией твердой фазы и ее плотностью.

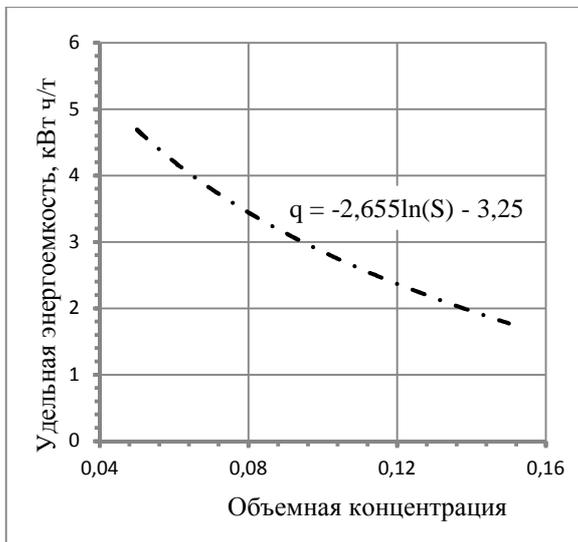
а) для плотности 1600 кг/м<sup>3</sup>



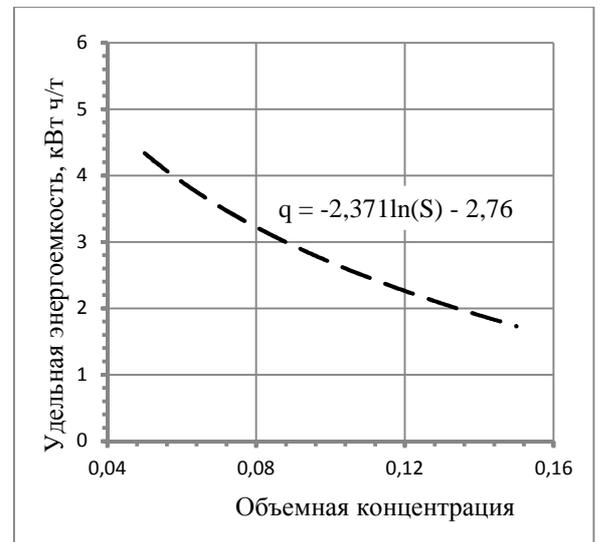
б) для плотности 1800 кг/м<sup>3</sup>



в) для плотности 2000 кг/м<sup>3</sup>



г) для плотности 2200 кг/м<sup>3</sup>



д) для плотности 2400 кг/м<sup>3</sup>

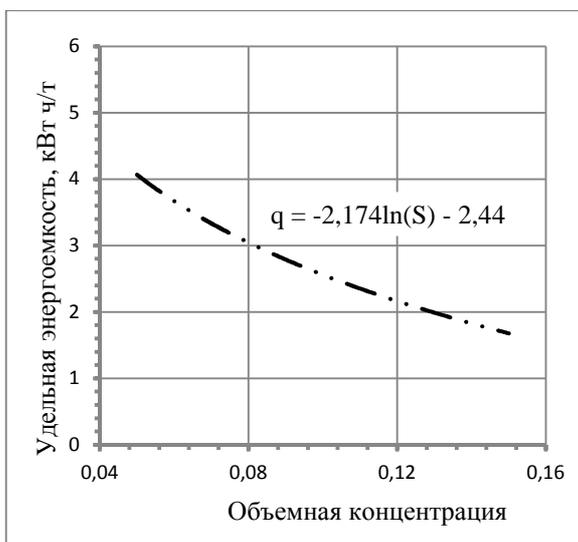


Рис. 4.2. Зависимость удельной энергоёмкости от концентрации твердых частиц в гидросмеси при различной плотности ЖМК.

#### **4.4. Техничко-энергетическая оценка технических средств добычи шельфовых ЖМК в зависимости от глубины моря.**

Для техничко-энергетической оценки технических средств (грунтовой насос, эжектор, эрлифт) добычи железомарганцевых конкреций на шельфе при изменении глубины моря были проведены расчеты для следующих исходных данных: пропускная способность системы – годовое (часовое) количество транспортируемого материала – 100 т/ч, расстояние транспортирования по вертикали – от 10 до 100 м, плотность – 1630 кг/м<sup>3</sup> и гранулометрический состав материала (таблица 2.2), плотность несущей жидкости – 1022 кг/м<sup>3</sup>.

Задача заключается в проведении сравнительного анализа эксплуатационных возможностей морских добычных установок с учетом заданных условий эксплуатации.

В таблицах 4.1-4.3 представлены расчетные значения удельной энергоемкости вертикального гидравлического транспортирования ЖМК для грунтонасосной, эжекторной и эрлифтной систем.

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 показали расчеты удельная энергоемкость процесса добычи ЖМК при эрлифтной системе до ~ 5 раз меньше, чем при эжекторной и грунтонасосной. Однако анализ результатов расчетов эрлифта показывает, что при глубине отработки  $h_m = 10$  м (ввод воздуха производится непосредственно в плоскости всасывания эрлифта), эрлифт не обеспечивает необходимую производительность по твердому  $Q_T = 100$  т/ч. Причина неработоспособности эрлифта заключается в недостаточном заглублении смесителя эрлифта (ввода воздуха) по отношению к высоте перепада (на борт судна).

Таблица 4.1.

## Грунтонасосная система.

№ п/п	$D_{тр},$ мм	$\rho_{п},$ кг/м <sup>3</sup>	$Q_{п},$ м <sup>3</sup> /ч	$V_{кр},$ м/с	$V_{р},$ м/с	$H_{м},$ м	$P_{н},$ м. вод. ст.	$W,$ кВт	$q,$ кВт·ч/т
$Q_{Г} = 100 \text{ т/ч}; d_{Г} = 7 \text{ мм}; \rho_{Г} = 1630 \text{ кг/м}^3; S = 0,05$									
1	530(514)	1052,4	1227	1,42	1,64	10	14,32	75,15	0,75
2						15	19,59	102,86	1,03
3						20	24,88	130,58	1,3
4						25	30,16	158,30	1,58
5						30	35,44	186,02	1,86
6						50	56,57	296,89	2,97
7						75	82,97	435,48	4,35
8						100	109,38	574,08	5,74
$Q_{Г} = 100 \text{ т/ч}; d_{Г} = 7 \text{ мм}; \rho_{Г} = 1630 \text{ кг/м}^3; S = 0,1$									
1	355,6(340)	1082,8	613,5	1,57	1,88	10	15,0	40,47	0,41
2						15	20,44	55,19	0,55
3						20	25,89	69,92	0,7
4						25	31,35	84,65	0,85
5						30	36,80	99,37	0,99
6						50	58,62	158,28	1,58
7						75	85,89	231,91	2,32
8						100	113,15	305,54	3,06
$Q_{Г} = 100 \text{ т/ч}; d_{Г} = 7 \text{ мм}; \rho_{Г} = 1630 \text{ кг/м}^3; S = 0,15$									
1	273(261)	1113,2	409	1,62	2,19	10	15,1	29,26	0,29
2						15	20,56	39,7	0,39
3						20	26,0	50,14	0,5
4						25	31,45	60,58	0,61
5						30	36,9	71,03	0,71
6						50	58,68	112,79	1,13
7						75	85,92	164,99	1,65
8						100	113,15	217,2	2,17

Таблица 4.2.

## Эжекторная система.

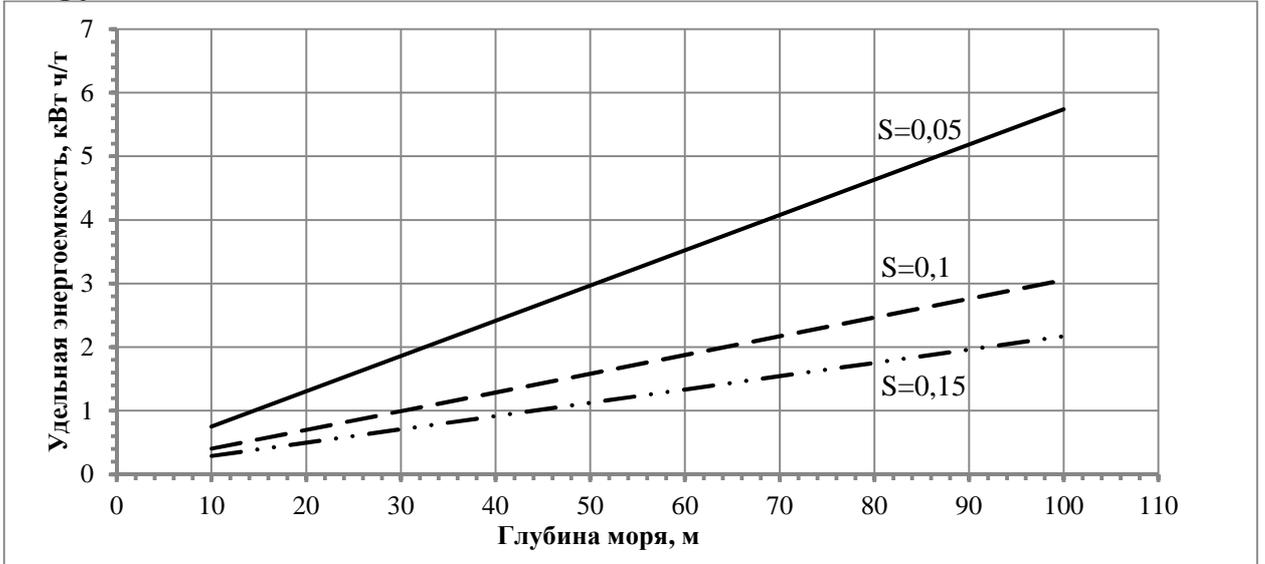
№ п/п	D <sub>тр</sub> , мм	ρ <sub>п</sub> , кг/м <sup>3</sup>	Q <sub>п</sub> , м <sup>3</sup> /ч	V <sub>кр</sub> , м/с	V <sub>р</sub> , м/с	α	β	H <sub>м</sub> , м	P <sub>н</sub> , м. вод. ст.	W, кВт	q, кВт·ч/т
$Q_0 = 630 \text{ м}^3/\text{ч}; S_{\text{вс}} = 0,1; Q_{\text{т}} = 100 \text{ т}/\text{ч}; d_{\text{т}} = 7 \text{ мм}; \rho_{\text{т}} = 1630 \text{ кг}/\text{м}^3; S = 0,05$											
1	530(514)	1052,4	1243	1,42	1,67	0,97	0,23	10	42,79	190,55	1,91
2								15	49,39	219,92	2,2
3								20	55,98	249,3	2,49
4								25	62,58	278,66	2,79
5								30	69,17	308,03	3,08
6								50	95,56	425,52	4,26
7								75	128,54	572,38	5,72
8								100	161,5	719,25	7,19
$Q_0 = 315 \text{ м}^3/\text{ч}; S_{\text{вс}} = 0,21; Q_{\text{т}} = 100 \text{ т}/\text{ч}; d_{\text{т}} = 7 \text{ мм}; \rho_{\text{т}} = 1630 \text{ кг}/\text{м}^3; S = 0,1$											
1	355,6(340)	1082,8	607,1	1,6	1,86	0,93	0,24	10	47,54	106,45	1,06
2								15	55,68	124,69	1,25
3								20	63,84	142,94	1,43
4								25	71,98	161,19	1,61
5								30	80,13	179,44	1,79
6								50	112,73	252,43	2,52
7								75	153,48	343,68	3,44
8								100	194,23	434,9	4,35
$Q_0 = 200 \text{ м}^3/\text{ч}; S_{\text{вс}} = 0,29; Q_{\text{т}} = 100 \text{ т}/\text{ч}; d_{\text{т}} = 7 \text{ мм}; \rho_{\text{т}} = 1630 \text{ кг}/\text{м}^3; S = 0,15$											
1	273(261)	1113,2	411,6	1,64	2,1	1,06	0,21	10	56,79	88,52	0,88
2								15	66,62	103,84	1,04
3								20	76,45	119,17	1,19
4								25	86,28	134,48	1,35
5								30	96,10	149,8	1,5
6								50	135,42	211,08	2,11
7								75	184,56	287,68	2,88
8								100	233,7	354,28	3,64

Таблица 4.3.

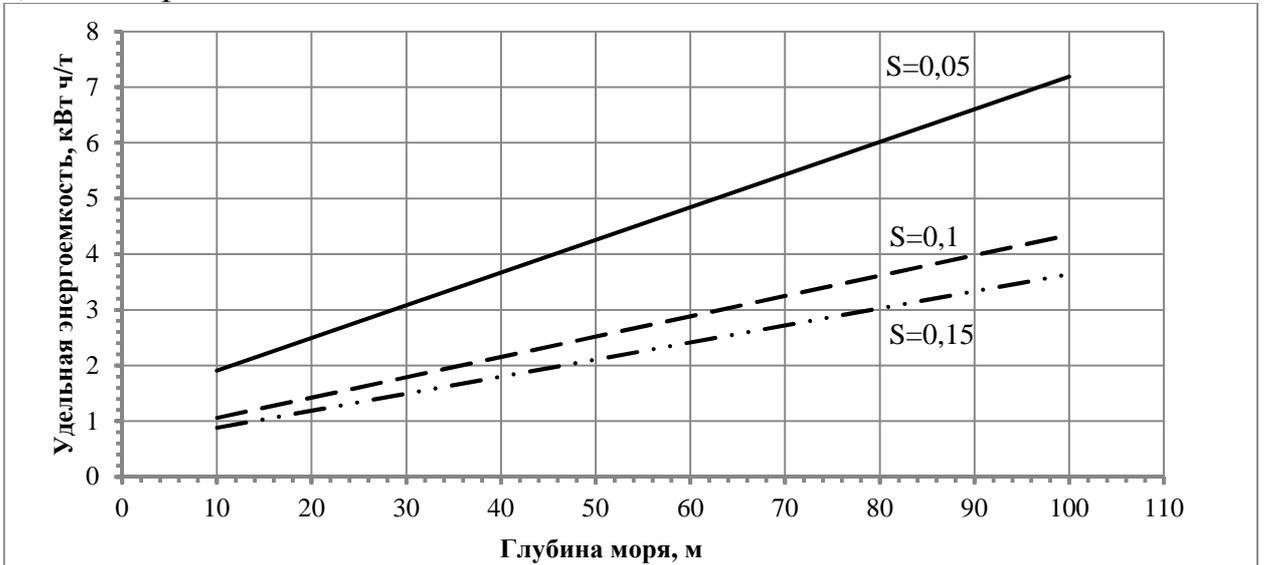
## Эрлифтная система.

№ п/п	$D_{тр},$ мм	$\rho_{п},$ кг/м <sup>3</sup>	$Q_{п},$ м <sup>3</sup> /с	$Q_{в},$ м <sup>3</sup> /с	$V_{кр},$ м/с	$V_{р},$ м/с	$V_{вых},$ м/с	$H_{м},$ м	$P_{д},$ атм.	$Q_0,$ м <sup>3</sup> /с	$W,$ кВт	$q,$ кВт·ч/т
$Q_T = 100$ т/ч; $d_T = 7$ мм; $\rho_T = 1630$ кг/м <sup>3</sup> ; $S = 0,05$												
1	530(514)	1052,4	0,341	0,324	1,4	1,6	2,1	20	2,88	0,119	49,11	0,49
2								30	3,87	0,107	70,4	0,7
3								50	5,85	0,096	80,85	0,81
4								75	8,3	0,094	100,12	1,00
5								100	10,8	0,095	123,41	1,23
$Q_T = 100$ т/ч; $d_T = 7$ мм; $\rho_T = 1630$ кг/м <sup>3</sup> ; $S = 0,1$												
1	355,6(340)	1082,8	0,17	0,153	1,57	1,88	2,7	20	2,88	0,082	45,1	0,45
2								30	3,87	0,074	65,23	0,65
3								50	5,85	0,07	75,9	0,76
4								75	8,3	0,073	95,31	0,95
5								100	10,8	0,077	115,13	1,15
$Q_T = 100$ т/ч; $d_T = 7$ мм; $\rho_T = 1630$ кг/м <sup>3</sup> ; $S = 0,15$												
1	273(261)	1113,2	0,114	0,097	1,62	2,19	3,4	20	2,88	0,071	44,18	0,44
2								30	3,87	0,064	63,13	0,63
3								50	5,85	0,065	71,92	0,72
4								75	8,3	0,071	92,21	0,92
5								100	10,8	0,078	114,13	1,14

## а) Грунтонасосная система добычи.



## б) Эжекторная система добычи.



## в) Эрлифтная система добычи.

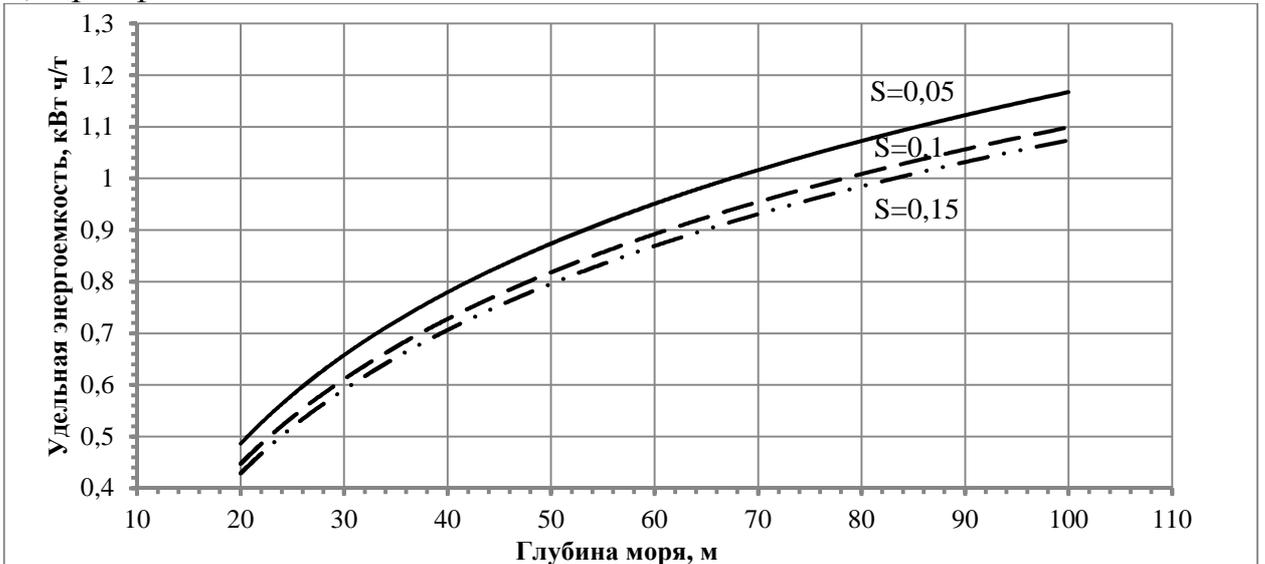


Рис. 4.3. График изменения удельной энергоёмкости в зависимости от глубины моря.

Как видно из таблиц 4.1-4.3 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  $i = f(V_p, D, d_{cp}, S, \rho_T)$ . Однако энергоемкость может быть снижена (рис. 4.3) за счет увеличения концентрации твердого в гидросмеси, путем оптимизации процессов всасывания донных отложений и пульпоприготовления.

#### **Выводы по главе 4:**

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

2. На основании результатов аналитических исследований и графических зависимостей расхода гидросмеси и потерь напора от концентрации ЖМК определено критическое значение концентрации (при фиксированной производительности гидротранспортной системы).

3. В результате аналитических исследований процесса гидротранспорта конкреций установлено, что удельная энергоемкость гидротранспорта зависит от концентрации и плотности твердого материала в гидросмеси и описывается функцией  $q = -3,328 \ln(S) - 4,36$  (для плотности ЖМК  $1600 \text{ кг/м}^3$ ).

4. Аналитически установлено, что удельная энергоемкость процесса вертикального гидроподъема ЖМК различными системами: грунтонасосной, эжекторной, эрлифтной, возрастает соответственно от 0,75 до 5,74 кВт·ч/т; 1,91-7,19 кВт·ч/т; 0,49-1,23 кВт·ч/т с увеличением глубины моря за счет роста линейных сопротивлений, но может быть снижена за счет увеличения концентрации твердого в гидросмеси путем оптимизации процессов всасывания и пульпоприготовления.

## 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 лично соискателем, 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. Годеса, 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, солености).

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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Александров В. И., Махараткин П. Н., Авксентьев С. Ю. Энергоемкость гидравлического транспортирования крупнодисперсных и мелкодисперсных гидросмесей. Известия высших учебных заведений. Горный журнал №7, 2012. С. 72-79.
2. Александров В. И. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования гидросмесей при высоких концентрациях твердой фазы. Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова, 2000.
3. Александров И. Л. и др. К вопросу о терминологии и классификации способов подъема ТПИ при добыче их со дна морей и океанов. В сб. Разработка россыпных месторождений. М.: МГРИ, 1987. С. 101-105.
4. Альтшуль А. Д. К обоснованию формулы Колебрука.- Изв. АН СССР. ОТН, 1958.-№6 С.21-29.
5. Антонычев М. Я., Нагирняк Ф. И. Аналитические и экспериментальные исследования поведения минеральных зерен в процессах классификации в водной среде. – Тр. института Уралмеханобр, вып 15,1969, с.168–211.
6. Андреев С. И., Казакова В. Е., Бабаева С. Ф., Черкашев Г. А. Твердые полезные ископаемые Мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения. Горный журнал, 2013, №11. С.65-72.
7. Арлащенко П. М. Изучение процесса разрушения железомарганцевых конкреций при трубопроводном гидроподъеме. Труды научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МГГРУ и инженерного факультета РУДН. – М.: МГГРУ, 2004.
8. Барон Л. Н. Кусковатость и методы ее измерения. М., АН СССР, 1960г., 122с.
9. Богданович А. В. Теоретические основы и методы повышения эффективности разделения при гравитационном обогащении руд.- Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2002. 342с.
10. Быховский Л. З., Терентьев В. Б., Тигунов Л. П. Железомарганцевые образования Мирового океана и морского шельфа -

минеральное сырье многоцелевого назначения. – М.: Изд-во ВИМС, 2010. 108с.

11. Васильев А. М. Оптимизация формул скорости свободного падения частиц при гравитационном обогащении руд. Маркшейдерия и недропользование, №5 2011, с. 52-54.

12. Великанов М. А. Динамика русловых потоков, т. II. 3-е изд., полностью перераб. – М: Гостехиздат, 1954-1955.

13. Великанов Н. Л., Наумов В. А., Примак Л. В. Осаждение частиц взвесей в воде. Механизация строительства, №7, 2013, с.44-48.

14. Верховский И. М., Шохин В. Н. О движении минеральных зерен в суспензиях. – Обогащение руд, 1958, №6, с. 16-20.

15. Верхотуров М. В. Гравитационные методы обогащения: учеб. для вузов. – М.: МАКС Пресс, 2006.–352с.

16. Виноградов Н. Н. Гидродинамика взвесей. – В кн.: Обогащение и комплексное использование топлива. М., 1965. С. 239-254.

17. Годэн А. М. Основы обогащения полезных ископаемых. (Перевод с англ.). Металлургиздат, М., 1946.

18. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеоиздат, 1962.

19. Горошко В. Д., Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. Приближенные закономерности гидравлики взвешенного слоя и стесненного падения. – Изв. Вузов. Нефть и газ, 1958, №1, с. 125-131.

20. Дементьев В. А. Эксплуатация обводненных месторождений. Под. ред. И.М. Ялтанца.–М.: Издательство «Горная книга», 2010.–204с.:ил.

21. Джваршеишвили А. Г. Системы трубного транспорта горно-обогатительных предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Недра, 1981, 384с.

22. Дмитриев Г. П., Махарадзе Л. И., Гочиташвили Т. Ш. Напорные гидротранспортные системы: Справочное пособ. –М.: Недра, 1991, 304с.:илл.

23. Дробаденко В. П., Калинин И. С., Малухин Н. Г. Методика и техника морских геологоразведочных и горных работ: Учеб. для студ.в. учеб заведений.– Волгоград: Изд. Дом «Ин-Фолио», 2010.–352с: илл.

24. Жарницкий Е. П. Землесосные снаряды с погружными грунтовыми насосами. –М.: Недра, 1988. 144с.

25. Железомарганцевые конкреции Центральной части Тихого океана / Под ред. Мурдмаа И. О., Скорняковой Н. С. М.: Наука, 1986, 344с.

26. Железомарганцевые конкреции Центральной котловины Индийского океана / Скорнякова Н. С., Свальнов В. Н., Мурдмаа И. О. и др. М.: Наука, 1989, 223с.

27. Зайцев В. С., Корзун В. К., Сорокин В. А. Перспективы разработки месторождений ильменит-магнетитовых песков на Курилах. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. 2006. Гидромеханизация.

28. Заря А. Н. Исследования движения твердой фракции в вертикальном пульповоде. Труды ДПИ Т46. Серия горно-механическая. Вып. 10. – Сталино, 1960.

29. Зверевич В. В., Перов В. А. Основы обогащения полезных ископаемых. М., изд-во «Недра», 1971, с.216.

30. Зегжда А. П. Падение зерен песка и гравия в стоячей воде // Изв. ВНИИГ, 1934. – Т.12. с.24-27.

31. Иванова А. М., Смирнов А. Н., Рогов В. С., Мотов А. П., Никольская Н. С., Пальшин К. В. Шельфовые железомарганцевые конкреции – новый вид минерального сырья. Минеральные ресурсы России №6, 2006. С. 14-18.

32. Иванова А. М., Смирнов А. Н., Ушаков В. И. Минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых шельфовых областей России: ресурсная значимость, перспективы наращивания и освоения. Горный журнал, 2012, №3. С.42-49.

33. Интернет ресурс. Журнал «Город-812». Когда России достанется большая часть Арктики? <http://www.online812.ru/2012/02/03/009/>. Дата добавления материала: 03.02.12г.

34. Интернет ресурс. The Arctic. Минприроды: Россия претендует на участок шельфа в Северном Ледовитом океане площадью 1,2 млн. кв. км. <http://ru.arctic.ru/geographics/20150805/121741.html>. Дата добавления материала: 05.08.15г.

35. Интернет ресурс. Российская газета. Готовится российская заявка на шельф в Арктике. <http://www.rg.ru/2014/07/15/arktika.html>. Дата добавления материала: 15.07.2014г.

36. Интернет ресурс. Вода Мирового океана. <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/voda-mirovogo-okeana.html>.

37. Интернет ресурс. Физические свойства морской воды. <http://www.highexpert.ru/content/liquids/seawater.html>.
38. Каминский В. Д., Супруненко О. И., Смирнов А. Н. Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения. Арктика: экология и экономика №3(15), 2014. С.52-61.
39. Качан И. Н. Скорости стесненного падения мелких минеральных зерен в воде. Сборник работ института Механобр., вып 88. М., Metallurgizdat, 1953.
40. Кизевальтер Б. В. Об определении скоростей свободного и стесненного падения части. –Тр. Механобра, вып. 136, 1971. с. 5-35.
41. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гидравлических гравитационных процессов обогащения полезных ископаемых: Автореферат дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. Ленингр. горный ин-т им. Г. В. Плеханова, 1973.
42. Кизевальтер Б. В. Об определении конечной скорости свободного паления частиц неправильной формы. – Обогащение руд, 1974. № 4. с. 28-32.
43. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. - М.: «Недра», 1979. - 296с.
44. Кондратенко А. В. Физико-механические свойства донных образований на глубоководных месторождениях железомарганцевых конкреций. Горный журнал, 2012, №3. С.37-41.
45. Лева М. Псевдооживление. М., Гостойтехиздат, 1961.
46. Лященко П. В. Гравитационные методы обогащения. Гостойтехиздат, М.-Л., 1940.
47. Малухин Г. Н. Обеспечение устойчиво управляемых параметров пульпоприготовления и всасывания в скважинной геотехнологии. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Моск. гос. геологоразвед. академия. - Москва, 1999.
48. Марков Ю. А., Смолдырев Л. Е. Гидравлическая крупность частиц горных пород при свободном и стесненном падении. «Горный журнал» № 3, 1960.
49. Меринов Н. Ф. Закономерности движения минеральных зерен в гравитационном поле // Обогащение руд №4 2006, с.24-29.
50. Механика в СССР за пятьдесят лет. Том 2. Механика жидкости и газа. М., 1970г., 880 стр. с илл.

51. Минц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. Изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР, М., 1955.
52. Миллер Э. Ф. Классен В. И. К расчету скорости вертикального движения минеральных зерен в жидкости. Горный журнал, № 5, М., 1955.
53. Нурок Г. А., Бубис Ю. В. и др. Перспективы подводной добычи железомарганцевых конкреций. В сб. Опыт гидромеханизации горных, строительных и мелиоративных работ. М.: МГРИ, 1972.
54. Нурок Г. А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1979. 549с.
55. Олевский В. А. О свободном падении частиц в жидкой среде. В кн.: Гравитационные методы обогащения. Metallurgizdat. Вып. 88, 1953, с.8-43.
56. Олевский В. А. Диаграмма для определения скорости свободного падения шарообразных частиц в жидкости. – Обогащение руд, 1971, №1, с.35-39.
57. Отчет по НИР. «Исследование качественно количественных параметров ЖМК после механической дезинтеграции и первичного обогащения с целью разработки требований товарной руде добычного комплекса 1-го поколения». Механобр., Л., 1989.
58. Покровская В. Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. 192с.
59. Полькин С. И., Адамов Э. В. Обогащение руд редких и цветных металлов. – М. «Недра», 1975. 461с.
60. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М., Из-во иностранной литературы, 1949.
61. Рогов В. С., Фролов В. В., Никольская Н. С., Титов А. Л. Опыт добычи и промышленного использования железомарганцевых конкреций. Горный журнал, 2012, №3. С.50-55.
62. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. Стесненные падения шара в цилиндрической трубке. ДАН СССР, т. 115, №3, 1957, с.504-507.
63. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. Движение тел в псевдооживленном слое. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. С.167.
64. Смирнов А. Н., Ушаков В. И., Крюков В. Д. Шельфовые месторождения россыпного касситерита российской Арктики. Горный журнал, 2013, №4. С.4-8.

65. Смирнов А. Н., Иванова А. М., Пашковская Е. А. Подводные месторождения твердых полезных ископаемых в шельфовых областях России. Горный журнал, 2013, №11. С.51-58.
66. Смолдырев А. Е. Рекомендуемые методы расчета гидравлического транспорта. М., 1964.
67. Смолдырев А. Е. Трубопроводный транспорт. Изд. 2-ое, переработ. и доп. М. изд-во «Недра», 1970. С.272.
68. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 108с.
69. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов. Под общей редакцией В. В. Ржевского и Г. А. Нурока. М.: «Недра», 1979. 381с.
70. Тимошенко С. В. Обоснование технологии освоения подводных россыпных месторождений с обесшламливанием минерального сырья пульсационными потоками. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. МГГРУ. - Москва, 2002.
71. Фигуровский Н. А. Современные методы седиментометрического анализа суспензий и эмульсий. Определение размеров и распределения частиц дисперсных систем по скорости их оседания. М.: Всес. хим. об-во им. Д. И. Менделеева, Моск. отд-ние, 1939.
72. Фоменко Т. Г. Определение скоростей свободного и стесненного падения минеральных частиц. Труды ВНИИ-1, выпуск №8, 1956.
73. Фоменко Т. Г. Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых. - М.: «Недра», 1966.
74. Шифрин К. С. Универсальная формула для скорости падения шара в жидкости. Изв. АН СССР, Сер. Геофизическая, 1958, №2, с. 312-317.
75. Шохин В. Н. Исследование явлений движения минеральных зерен в суспензиях, применяемых для обогащения угля. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М., МГИ, 1956.
76. Шохин В. Н., Лопатин А. Г. Гравитационные методы обогащения. - М: «Недра», 1993. - 400 с.
77. Шохин В. Н., Холодов Н. Г., Савенков В. Д. Расчет конечных скоростей падения зерен в суспензиях. – Изв. вузов. Горный журнал, 1971. 3, с.177-180.
78. Юфин А. П. Напорный гидротранспорт. Госэнергоиздат, М., 1959.

79. Ялтанец И. М. Справочник по гидромеханизации. Теория и практика открытых горных и строительных работ. – М.: Горная книга, 2011.
80. Ялтанец И. М. Гидромеханизированные и подводные горные работы: Учебник для вузов. – М.: изд-во ООО «Центр Инновационных технологий», 2012
81. Ясюкевич С. М. Обогащение руд. М; Metallurgizdat, 1953.
82. Richardson S. F., Zaki W. N. Sedimentation and fluidization. Trans. Inst. Chem. Engrs., 32, 1954, h. 35-53.