

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Шкаруба Наталья Александровна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОТБОЙКИ ПОРОД ГИДРОМОНИТОРОМ
ПРИ НАЛИЧИИ В ЕГО СТРУЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ
КРУПНОСТИ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»

Диссертация на соискание
учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Кисляков
Виктор Евгеньевич

Красноярск 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 Современное состояние изученности техники и технологии разработки месторождений, залегающих во вмещающих породах с высоким содержанием глины	13
1.1 Проблемы разработки месторождений, залегающих в породах с высоким содержанием глины, средствами гидромеханизации.....	13
1.2 Практика определения теоретических значений силы удара струи гидромонитора о забой	23
1.3 Практика определения теоретических значений максимальной длины струи гидромонитора при горизонтальной установке его ствола	25
1.4 Технические и технологические возможности увеличения производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора.....	30
1.5 Цель и задачи исследования.....	32
2. Влияние содержания твердых частиц крупностью $-0,005$ мм (тонкодисперсных грунтовых частиц) в напорной воде на силу удара струи гидромонитора о забой	34
2.1 Обоснование параметров модели исследования.....	34
2.2 Сила удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц.....	40
2.2.1 Методика проведения эксперимента для определения силы удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц	42
2.2.2 Результаты экспериментов.....	44
2.2.3 Математическая модель изменения силы удара струи гидромонитора о забой.....	46
2.2.4 Влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора на потребляемую мощность насосной установки и необходимый объем технологической воды	50

2.2.4.1 Изменение потребляемой мощности насосной установки от содержания в напорной воде гидромонитора тонкодисперсных грунтовых частиц	50
2.2.4.2 Необходимый объем технологической воды в прудах-отстойниках при увеличенном содержании в ней тонкодисперсных грунтовых частиц	53
2.2.5 Абразивный износ деталей гидромониторной установки тонкодисперсными грунтовыми частицами	55
2.3 Дальность полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц	58
2.3.1 Методика проведения эксперимента для определения дальности полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц	59
2.3.2 Результаты экспериментов	60
2.3.3 Математическая модель изменения дальности полета струи гидромонитора от наличия в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц	61
2.4 Выводы	63
3. Влияние эжектирования твердых частиц крупностью 1,5-4,1 мм (твердых абразивных частиц) в струю гидромонитора на производительность отбойки пород	66
3.1 Исследование отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием в нее твердых абразивных частиц	67
3.1.1 Методика проведения эксперимента для определения влияния эжектирования твердых абразивных частиц в струю гидромонитора на производительность отбойки пород	67
3.1.2 Результаты экспериментов	71

3.1.3 Математическая модель относительной производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора от эжектирования в нее твердых абразивных частиц	78
3.3 Абразивный износ деталей гидромониторной установки эжектируемыми твердыми абразивными частицами	82
3.4 Выводы	85
4 Технологические решения по отбойке пород гидромонитором при содержании в его струе твердых частиц	87
4.1 Технологические решения по отбойке пород с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора	87
4.1.1 Общие положения	87
4.1.2 Методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде на конец промывочного сезона при применении средств гидромеханизации	88
4.1.3 Методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде в течение промывочного сезона при применении средств гидромеханизации	91
4.2 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора	92
4.2.1 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении вскрышных работ.....	93
4.2.2 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении добычных работ.....	96
4.3 Выводы	102

5 Оценка экономической эффективности результатов исследований в условиях месторождения «Шуралинско-ключевское».....	103
5.1 Краткая характеристика месторождения «Шуралинско-ключевское».....	104
5.2.1 Расчет себестоимости добычи полезного ископаемого	109
5.2.2 Коммерческая эффективность инвестиционного проекта.....	116
5.3 Выводы	119
Заключение	120
Библиографический список.....	122
Приложение А	138
Приложение Б	140
Приложение В.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время ввиду ограниченности и исчерпаемости ресурсов в отработку вовлекаются месторождения со все более сложными горно-геологическими условиями, высоким содержанием глины во вмещающих породах и небольшим содержанием полезных компонентов. Так, для золотоносных россыпей из нераспределенного фонда объектов, по данным ФГУП ЦНИГРИ [1-3], может быть вовлечено в разработку открытым гидромеханизированным, экскаваторным, бульдозерно-скреперным способом порядка 70% запасов. Это позволит произвести увеличение добычи металла порядка 58% по всем золотодобывающим районам России по сравнению с современным уровнем годовой добычи. Большая часть этих запасов является непривлекательной в силу высокого содержания глинистых грунтов.

Разработка таких месторождений технологиями, предполагающими предварительное механическое рыхление, связана с определенными сложностями: во время работы часто наблюдается значительное налипание глины на рабочие органы машин, вызывающее простои оборудования и увеличение времени технологических операций [4].

Освоение природных, техногенных и повторная разработка россыпных месторождений, залегающих в высокоглинистых обводненных грунтах, связаны со сложностью их осушения.

Во многих случаях наиболее эффективно разрабатывать высокоглинистые россыпные месторождения средствами гидромеханизации. Однако среди них в указанных условиях тоже есть ограничения, например, образование окатышей или невозможность организации рабочего котлована при работе драгой или землесосным снарядом. Для самых неблагоприятных условий предпочтителен наиболее гибкий и нетребовательный к условиям эксплуатации способ гидромеханизации – отбойка пород гидромонитором.

Поэтому исследования, позволяющие повысить эффективность гидромеханизированной разработки высокоглинистых россыпных месторождений, направлены на решение актуальной научной задачи.

В данной области известны труды Г.А. Нурока, С.М. Шорохова, Б.Э. Фридмана, В.Ф. Хныкина, В.П. Дробаденко, И.М. Ялтанца, Ю.М. Овешникова, Е.А. Бессонова, С.И. Протасова, В.С. Литвинцева, Р.С. Серого и др.

Целью работы является обоснование технологии и параметров размыва горных пород гидромонитором, обеспечивающих повышение эффективности их отбойки.

Идея работы заключается в том, что повышение эффективности отбойки пород гидромонитором достигается путем эжектирования в его струю твердых абразивных частиц и управляемого увеличения плотности технологической воды тонкодисперсными грунтовыми частицами, накапливающимися естественным путем в прудах-отстойниках оборотного водоснабжения.

Основные задачи исследования:

1. Обзор и анализ известных технических и технологических способов увеличения производительности размыва горных пород гидромонитором и методик расчета параметров технологии.
2. Определение силы удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц при разработке высокоглинистых россыпных месторождений и разработка технологических решений применения полученных результатов.
3. Установление закономерностей изменения дальности полета струи гидромонитора от наличия в воде тонкодисперсных грунтовых частиц.
4. Оценка эффективности отбойки глинистых пород струей гидромонитора с эжектированными в нее твердыми абразивными частицами и разработка технологических решений применения полученных результатов.

5. Технико-экономическая оценка предлагаемых технологических решений на примере месторождения «Шуралинско-Ключевское» (Свердловская область).

Методы исследований:

При выполнении работы использован комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение научно-технической информации, аналитические исследования, эксперименты в лабораторных условиях путем моделирования подобия процессов и геометрических параметров гидромониторной установки, статистическая обработка экспериментальных данных, математическое моделирование, технико-экономический анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Эффективность отбойки глинистых грунтов гидромонитором при разработке месторождений в зависимости от плотности напорной воды описывается уравнением полинома и обеспечивается: диаметром насадки гидромонитора, напором воды на насадке, расстоянием от гидромонитора до забоя, управляемым увеличением плотности технологической воды за счет содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц, накапливающихся естественным путем до определенной концентрации в прудах-отстойниках оборотного водоснабжения.

2. Дальность полета струи гидромонитора имеет полиномиальную зависимость от содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде и снижается при его увеличении, что определяет максимальное расстояние установки гидромонитора до забоя.

3. Изменение производительности размыва горных пород гидромонитором обеспечивается за счет эжектирования в его струю твердых абразивных частиц и описывается уравнением второго порядка в зависимости от крупности частиц, при этом наиболее эффективно размывать породу при угле встречи струи с поверхностью забоя 25-45°.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость увеличения силы удара струи гидромонитора о забой от плотности напорной воды и содержания в ней тонкодисперсных

грунтовых частиц, реализованная в математической модели, которая позволяет определить силу давления струи гидромонитора на забой в соответствии с плотностью воды, диаметром насадки гидромонитора, напором на насадке и расстоянием его установки от забоя.

2. Выявлено снижение дальности полета струи гидромонитора от увеличения количества тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде.

3. Получена зависимость увеличения производительности размыва породы гидромонитором при эжектировании в его струю твердых абразивных частиц от их размера, диаметра насадки и угла встречи струи с поверхностью забоя с обоснованным оптимальным интервалом значений этого угла.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработаны математические модели: силы давления гидромониторной струи на забой в зависимости от плотности напорной воды, диаметра насадки гидромонитора, напора и расстояния от забоя; дальности полета струи гидромонитора от плотности технологической воды, ее напора, и диаметра насадки гидромонитора; изменения производительности отбойки пород гидромонитором от эжектирования в его струю твердых абразивных частиц в зависимости от диаметра насадки, угла встречи струи с поверхностью забоя и размера твердых абразивных частиц.

Разработаны: конструктивные решения лабораторного стенда для исследования интенсивности отбойки пород напорной струей гидромонитора (патент РФ на полезную модель № 169574); конструктивные решения оснащения гидромонитора эжектирующим приспособлением (патенты РФ на изобретение № 2608952 и № 2702442); способ формирования струи гидромонитора и устройство для его осуществления (патент РФ на изобретение № 2608591).

Технология размыва пород гидромонитором с применением эжектирования в его струю твердых абразивных частиц и отбойки пород технологической водой со взвешенными в ней тонкодисперсными грунтовыми частицами внедрена на Наровчатском месторождении песчано-гравийной смеси (ООО «Наровчатский карьер»).

Результаты исследований рекомендуется использовать при разработке месторождений с высоким содержанием глины во вмещающих породах с применением средств гидромеханизации, при составлении проектной документации, а также в учебном процессе на кафедре «Открытые горные работы» Сибирского федерального университета при подготовке специалистов по направлению «Горное дело».

Степень достоверности работы обеспечивается применением научного и технико-экономического анализа, аналитического обобщения сведений, содержащихся в научно-технической, патентной и специальной литературе, физического и математического моделирования; значительным объемом статистических данных. Достоверность полученных результатов исследований обоснована их высокой сходимостью при сопоставлении с данными натурных наблюдений и подтверждается положительной эффективностью внедрения разработанных рекомендаций на ООО «Наровчатский карьер».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 10 конференциях различного уровня, в том числе: IX Международная конференция «Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность», г. Магнитогорск, 2017 г.; XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научное творчество XXI века», г. Венеция, Италия, 2017 г.; III Международная научно-практическая конференция «Открытые горные работы в XXI веке», г. Красноярск, 2017 г.; XXVI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2018», г. Москва, 2018 г.; Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений», г. Екатеринбург, 2018 и 2019 гг.; XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля, г. Санкт-Петербург, 2019 г.; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив

Свободный», г. Красноярск, 2019 и 2020 гг.; XX Международная научно-техническая конференция «Геонауки-2020», Иркутск, 2020 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90112.

Личный вклад автора заключается в разработке новых технологических решений при отработке высокоглинистых месторождений; постановке и проведении экспериментов; обработке и интерпретации экспериментальных данных о влиянии содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на силу удара струи гидромонитора о забой, о влиянии содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на дальность полета струи гидромонитора, эффективности отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием в нее твердых абразивных частиц; технико-экономическом обосновании предлагаемых решений на примере месторождения «Шуралинско-Ключевское» (Свердловская область); внедрении результатов диссертационного исследования на ООО «Наровчатский карьер».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 печатных работ, из них 6 – в изданиях, входящих в Перечень ВАК; 3 патента РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5-ти глав, заключения и 3-х приложений, содержит 143 библиографических источника, 29 таблиц, 36 рисунков и 52 формулы.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю профессору В.Е. Кислякову, профессору А.И. Косолапову, В.Н. Морозову, В.А. Миронкину, С.А. Вохмину, аспирантам кафедры ОГР, а также сотрудникам кафедр «Открытые горные работы», «Подземной разработки месторождений им. Н.Х. Загирова», «Шахтное и подземное строительство» за советы и неоценимую помощь при выполнении работы. Автор признателен за содействие в проведении экспериментальных работ заведующему кафедрой

«Подземной разработки месторождений им. Н.Х. Загирова» А.Н. Анушенкову.
Работа посвящается памяти моего отца Александра Николаевича Шкаруба.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ЗАЛЕГАЮЩИХ ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ГЛИНЫ

1.1 Проблемы разработки месторождений, залегающих в породах с высоким содержанием глины, средствами гидромеханизации

Разработка многих россыпных месторождений осложнена высоким содержанием глины во вмещающих породах. Например, на месторождениях Дальнего Востока содержание глины в песках может достигать 60% [5], на месторождении «Шуралинско-Ключевское» выход фракции -1+0 составляет 88,9% [6]. Этот фактор имеет настолько значительный вес, что число месторождений, разведанных, но не вовлеченных в настоящее время в отработку из-за высокого содержания глины во вмещающих породах, намного превышает число отрабатываемых.

Однако общеизвестное истощение базы легкоразрабатываемых месторождений диктует необходимость разработки месторождений в сложных горно-геологических условиях, в том числе со значительным количеством глины (глинистых фракций крупностью -0,005 мм) во вмещающих породах [5].

Обоснование технологии разработки таких месторождений сопряжено с необходимостью решения задач, связанных с осложняющими их разработку свойствами глины.

Для технологий, предполагающих применение «сухой» техники, такие сложности могут проявляться в налипании глины на рабочие органы машин и механизмов; в проблемах, связанных с высокой гигроскопичностью глины, высокой обводненностью, необходимостью осушения месторождения, что усугубляется естественными условиями залегания россыпных месторождений, расположенных в руслах и долинах водоемов.

На россыпных месторождениях широко применяются технологии разработки средствами гидромеханизации, в том числе дражным и гидромониторно-землесосным способом.

Высокая гигроскопичность глины для этих способов не является препятствием, но для них могут возникать следующие сложности, связанные с наличием глины во вмещающих породах. При дражном способе: выход полезного компонента в виде примазок глины с вашгердной галей; выход окатышей со стакерной галей и эфелем. При гидромониторно-землесосном способе: накопление значительного количества взвешенных тонкодисперсных глинистых частиц в оборотной технологической воде, поступающей из прудов-отстойников и, как следствие, неполная дезинтеграция при переработке песков на промывочных установках типа ПГБ и ПКС (то же и на драгах) из-за значительных сил сцепления тонких фракций в глинистых включениях (сложности при улавливании тонкого и мелкого золота) [5].

Установлено, что в условиях гравитационного обогащения при прохождении неразмытой глины по шлюзам глубокого наполнения содержание песчаной фракции на ее поверхности увеличивается в среднем на 15 %. По данным опробования эфельных хвостов, содержание золота в глинистых окатышах изменялось от 0,4 до 10 г/м³. Это приводит к увеличению общих потерь золота, вследствие чего отработка таких месторождений становится нерентабельной. Поэтому большинство артелей производят повторную промывку эфелей для доизвлечения золота, что существенно повышает себестоимость добычи драгметалла [5].

Разработка месторождений, осложненная их залеганием в породах с высоким содержанием глины, неизбежно сопряжена с увеличением доли и роли подготовительных работ в составе производственных процессов, хотя, при отсутствии осложняющих разработку факторов, подготовительные работы занимают порядка 5-40 % в составе производственных процессов [7].

Такие условия требуют применения специальных методов подготовки массива: механического и буровзрывного рыхления, обработки экологически

безопасными реагентами, напорного и безнапорного размачивания конгломератов и песков с высоким содержанием глины [8, 9].

Известна классификация способов разупрочнения (подготовки) глинистых песков при разработке россыпных месторождений [7, 10], показанная в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация способов разупрочнения (подготовки) глинистых песков при разработке россыпных месторождений

Процессы горных работ	Краткое описание процесса	Способ разупрочнения		Структура	Место разупрочнения
горно-подготовительные	предварительная подготовка массива глинистых песков и техногенных россыпей разработке	физический	механический	рыхление	массив
				внедрение частиц	
			термический	вымораживание	
		высушивание			
		гидравлический	водонасыщение		
химический	реагенты-диспергаторы				
специальный	бактериальный				
	электроосмотический и др.				
выемка	отделение глинистых песков от массива россыпи	размыв напорной струей		гидравлический способ разработки	емкость выемочно-транспортирующего оборудования
		выемка тонкими стружками		использование фрезерных рабочих органов	
транспортирование	перемещение глинистых песков	напорный гидротранспорт		использование грунтовых насосов	
		специальный		активация воды	
подготовка к дезинтеграции (обогащению)	дополнительный (вспомогательный) процесс, включающий прямое физическое, химическое и др. воздействие на промежуточный склад глинистых песков с целью повышения эффективности при их последующей дезинтеграции	физический	механический	рыхление	промежуточный склад
				внедрение механических частиц	
			термический	вымораживание	
		высушивание			
		гидравлический	водонасыщение (избыточное увлажнение)		
химический	реагенты-диспергаторы				
специальный	бактериальный				
	электроосмотический и др.				

Продолжение таблицы 1

дезинтеграция	разупрочнение (классификация) глинистых песков	размыв напорной струей	гидровашгерд, гидроэлеватор, дражная бочка, специальные дезинтеграторы и др.	специальные аппараты
		физический	создание активизированных полей	
обогащение	извлечение полезных компонентов	физический	дезинтегрирующие устройства в обогатительных аппаратах	
отвалообразование	складирование галечных и эфельных фракций хвостов	физический	возврат глинистых окатышей в процесс дезинтеграции	отвал, техногенные месторождения
		физико-химический	складирование для повторной отработки, орошение в навале	

Проблема образования глинистых окатышей в практике разработки месторождений полезных ископаемых средствами гидромеханизации также широко распространена и обусловлена высоким содержанием глины во вмещающих породах.

Значительные технологические потери полезного ископаемого (порядка 20-40 %) при разработке глинистых россыпей из-за образования окатышей связаны также с низкой эффективностью процесса дезинтеграции в барабанных грохотах, применяемых для обогащения [11]. Причем потери глинистых песков в ряде случаев могут быть значительно меньше, чем потери полезного компонента с окатышами, так как ценные минералы налипают на поверхность окатышей, образуя «шубу», и уходят в отвал: по данным исследований ИрГТУ, на драгах, разрабатывающих алмазоносные россыпи, таким путем в галечный отвал уходило до 9 % зернистого материала [11]. При дражировании некоторых слоев с большим содержанием глины (по данным [12]) окатыши собирали на себя от 20 до 60 % зернистого материала.

В результате в отвалах месторождений могут находиться значительные запасы полезных ископаемых. Так, по экспертным данным ЦНИГРИ, прогнозные

ресурсы золота в эфельных отвалах составляют 238 т (1190 млн. м³ горной массы), в галечных отвалах 1666 т (8330 млн м³ горной массы), в торфах вскрыши 1356 т (13556 млн м³ торфов). Таким образом, общие прогнозные ресурсы в техногенных комплексах россыпей равны 3260 т. Кроме того, потери в недрах оцениваются примерно в 20 % от общего количества добытого металла из россыпей, что соответствует 1762 т. Суммарное количество золота во всех техногенных россыпных образованиях составляет 5022 т или 57 % от общего количества добытого золота за всю историю эксплуатации россыпей [13].

В результате исследований [11], проведенных с целью решения проблемы образования окатышей, установлено, что при повторной разработке верхней части техногенных отложений драгой (после воздействия современного выветривания, в том числе воздействия осадков, смены температуры воздуха, намокания-высыхания, промерзания-оттаивания) окатышей на выходе из грохота практически не остается.

Наблюдения за процессом дезинтеграции в барабанном грохоте на драгах также показали, что выход в галечный отвал глинистых окатышей при отработке целиков составляет до 10 %, а при повторной разработке – 2-3 %. Увеличение циклов повторной отработки отвалов дает положительный результат, особенно при разработке глинистых россыпей. К настоящему времени имеется опыт повторной трех- и четырехкратной дражной разработки россыпей [14, 15]. Величина среднего извлечения полезного компонента при вторичной разработке изменяется в пределах 20-50 % [11].

Таким образом, для повышения эффективности разработки глинистых россыпей авторами [11] рекомендовано: для уменьшения/исключения выхода окатышей после промывки в скруббере подсушка/снижение влажности подготовленных песков до остаточной влажности 10 % при первоначальном размере глинистого куска менее 20 % от диаметра барабана; для повышения средневзвешенного размера частиц в исходных песках добавление в них галечного материала.

Подобное рекомендуют также авторы [16-18]: для решения проблемы образования глинистых окатышей при бульдозерной разработке россыпных месторождений и использовании промывочных обогатительных установок различного типа (например, скрубберные установки в комплекте с гидровашгердом) предлагается способ подготовки глинистых песков к разработке путем внедрения в массив частиц галечной фракции размером 50-100 мм. При этом подразумевается применение схемы промывки песков с улавливанием глинистых окатышей и частиц галечной фракции с последующим их возвратом в технологический процесс, что позволяет максимально снизить потери драгоценных металлов с глинистыми окатышами. Технологически применять эту схему целесообразно при содержании глины 20-50 % на россыпных месторождениях золота.

Известны технологические решения для разработки высокоглинистых месторождений, предполагающих подсушивание глинистых грунтов. Способ разработки [19] предполагает вскрытие месторождения, послойную выемку песков на полигоне, складирование и транспортирование их на промывку, при этом складирование происходит в штабели и по мере подсушивания песков их отправляют на промывку.

С целью повышения дезинтеграции глинистых песков известно применение следующих способов [20]: промораживание и оттайка горной массы в естественных условиях в течение года, приводящая к разрушению глинистых агрегатов и высвобождению ценных компонентов; применение промывочных бочек дражного и скрубберного типа.

Известен способ разупрочнения и дезинтеграции глинистых песков россыпных месторождений [20, 21], предполагающий трехстадийную дезинтеграцию: затопление полигона водой и первичное разупрочнение нижнего слоя россыпи, находящегося ниже депрессионной поверхности; вторичное разупрочнение и дезинтеграция глинистых песков в процессе работы земснарядной установки (от забоя до кавитатора); третья стадия – прохождение глинистых песков

через кавитатор, в котором развиваются локальные давления в несколько сотен мегапаскалей.

Для повышения эффективности извлечения золота на промприборах со шлюзами глубокого и мелкого наполнения; для уменьшения размера глинистых окатышей (примерно вдвое) рекомендуется применение дезинтеграторов различных конструкций [5, 22].

Применение на горнодобывающих предприятиях схемы водоснабжения с полным оборотом технологической воды является самой эффективной по условиям охраны окружающей среды. Она позволяет сократить мутность водотоков ниже горных работ на 88 % – по сравнению с оборотно-прямоточными схемами и на 95,5 % – по сравнению с прямоточными [23].

Однако в результате применения оборотной схемы водоснабжения резко возрастает количество взвешенных частиц в технологической воде за промывочный сезон [23]: порядка 80 г/л (для сравнения: при прямоточной схеме водоснабжения этот показатель равен порядка 0,03 г/л, при оборотно-прямоточной – 9 г/л).

По результатам наблюдений [23] за динамикой мутности оборотной воды на трех отстойниках оборотного водоснабжения с естественным осветлением технологической воды в течение всего промывочного сезона выявлено, что накопление взвешенных веществ происходит постепенно с увеличением циклов водооборота и имеет нелинейную закономерность с постепенным процессом стабилизации накопления взвеси.

Для борьбы с этим явлением возможно сооружение илоотстойников больших объемов или применение экологически безопасных реагентов.

В то же время фактически для месторождений, сложенных глинистыми вмещающими породами, характерно применение в оборотной схеме воды с большим содержанием тонкодисперсных глинистых частиц (рисунок 1) несмотря на все меры борьбы с ними, так как скорость их осаждения весьма низкая, усугубляемая замкнутыми условиями пруда-отстойника.



Рисунок 1 – Качество технологической воды, фактически подаваемой на гидромонитор в процессе работы предприятий с оборотной схемой водоснабжения

Также возникают потери, связанные с плотностью воды, используемой для дезинтеграции, орошения, взмучивания и переноса золотоносного материала: плотность воды повышается на протяжении всего сезона золотодобычи, что связано с увеличением в ней илового материала, не успевающего осесть за время прохождения воды через систему отстойников. Тем самым повышается и размерность золота, которое не сможет осесть на шлюзах мелкого накопления и вместе с пульпой уйти в хвосты илового материала [24].

Так как принцип обогащения песков шлюзовым способом состоит в разделении зерен в водной среде по их удельному весу, качество воды, используемой для промывки, имеет большое значение.

Однако из-за того, что технологическая вода при оборотном водоснабжении имеет в своем составе значительное содержание тонкодисперсных грунтовых частиц, ее реологические свойства значительно отличаются от свойств чистой воды, меняются ее плотность и вязкость. От последней зависит извлечение мелкого золота ($-0,25$ мм), содержание которого может быть до 50 % [19, 23, 25-29], а в отдельных россыпях Якутии – до 90 % [30].

В различных источниках величина предельного содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде установлена на различном уровне. Так, по данным С.М. Шорохова, А.А. Зуйкова и др. [31], А.Т. Конюковой [32], В.В. Назарова, Ю.М. Чикина, В.Р. Лихачева и др. [33, 34], содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде до 30-50 г/л практически не влияет на результаты обогащения. По данным В.Д. Барабанова [35], из-за содержания этих частиц до 15-20 % снижалось извлечение на шлюзах с 90,1 до 72,6 %, а снос металла -0,2 мм в хвосты увеличивался с 7,3 до 17 %.

Исследования В.П. Мязина [36] показывают, что предельное содержание глинистых частиц в технологической воде возможно до 60 г/л. В то же время П.Е. Егупов [32, 37] на основании лабораторных исследований допускает содержание взвешенных частиц в воде, подаваемой на промывку, не более 160 г/л. Однако в этом случае минимальная крупность улавливаемых зерен золота порядка 0,11 мм, а при содержании взвешенных частиц около 70 г/л – 0,08 мм.

Данные исследований [38, 39] свидетельствуют о том, что при содержании взвешенных частиц в технологической воде до 200 г/л показатели извлечения золота не снижаются.

Кроме прямых потерь золота при обогащении на шлюзах из-за содержания взвешенных частиц в технологической воде также необходимо учитывать экономическую составляющую всего технологического процесса разработки месторождения.

Исходя из этого, основной принцип нормирования качества технологической воды, предложенный В.Е. Кисляковым [40], заключается в определении минимального значения неполученного недропользователем дохода, связанного с технологическими потерями полезного компонента при обогащении золотоносных песков по причинам изменения качества технологической воды из-за накопления значительного количества в ней тонкодисперсных грунтовых частиц и суммарных затрат, связанных с ее очисткой.

По данным исследований предложена методика, позволяющая определить максимально возможное содержание мелкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде драг и промывочных установок с учетом извлечения золота различной крупности при гравитационном обогащении песков.

Таким образом, можно заключить, что разработка месторождений, горно-геологические условия которых значительно осложнены наличием глины во вмещающих породах, связана с различными технологическими проблемами, обусловленными специфическими свойствами глинистого материала, основные из которых можно охарактеризовать как необходимость максимально дезинтегрировать глинистый массив в воде и необходимость удаления тонкодисперсных глинистых частиц крупностью 0,005 мм из технологического процесса. А также то, что фактически большинство горнодобывающих предприятий при работе по схеме оборотного водоснабжения из прудов-отстойников применяют технологическую воду со значительным содержанием взвешенных тонкодисперсных частиц глины.

Исходя из этого логично предположить, что такие месторождения целесообразно разрабатывать средствами гидромеханизации. При этом наиболее эффективным из них в указанных условиях является отбойка пород напорной струей гидромонитора [41].

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность разработки месторождений при помощи гидромонитора, является производительность отбойки напорной струей и, в свою очередь, описывается различными показателями, в том числе силой воздействия струи на забой и длиной струи.

Эти величины возможно рассчитать по известным уравнениям, однако наличие глины во вмещающих породах при разработке месторождений и оборотной схеме водоснабжения из специальных прудов-отстойников в значительной степени оказывает влияние на их значения, вызывая расхождение реальных и расчетных результатов.

1.2 Практика определения теоретических значений силы удара струи гидромонитора о забой

Производительность отбойки пород при помощи гидромонитора зависит от способности напорной струи воды разрушать горный массив и характеризуется, в том числе, силой воздействия струи гидромонитора на забой (или, как ее иногда называют, силой удара струи) [42, 43].

Для определения теоретической силы воздействия струи на забой P_o (кг/см²), в соответствии с законом изменения количества движения, часто используется общеизвестная формула И. Ньютона [44]:

$$P_o = \frac{\rho}{g} Q \cdot v_o = \rho \frac{v_o^2}{g} \omega, \quad (1)$$

где Q – расход жидкости через насадку, м³/с; v_o – скорость истечения струи, м/с; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ω – площадь сечения струи, м².

Кроме уравнения (1) возможно производить расчет силы удара струи гидромонитора о забой при помощи известных уравнений (2)-(3) [43, 44]:

$$P_o = \frac{0,1 \cdot \rho}{g} \cdot Q_B \cdot v_o \cdot \sin \alpha_{пр}, \quad (2)$$

где Q_B – расход жидкости через насадку, м³/с; $\alpha_{пр}$ – угол между плоскостью преграды и осью струи, град,

$$P/P_o = 1,046 - 0,00037 \cdot \frac{L}{d_o}, \quad (3)$$

где P – сила воздействия гидромониторной струи на плоскую преграду в сечении струи, удаленном от насадки на расстояние L , м; P_o – теоретическая величина силы

воздействия струи идеальной жидкости на плоскую преграду, кгс; d_0 – диаметр насадки, м.

Для исследования силы воздействия струи жидкости на преграду необходимо знать величину P в плоскости забоя, а уравнения (1) и (2) описывают силу воздействия жидкости на преграду в точке истечения струи из насадки гидромонитора и из этих уравнений можно сделать вывод, что бесконечное увеличение плотности воды приведет к бесконечному увеличению силы удара струи о преграду, чего фактически быть не может.

Уравнение (3) определяет необходимую величину P в плоскости забоя, но зависимо от уравнений, определяющих P_0 (уравнения (1) и (2)), и имеет то же свойство: при увеличении плотности воды сила удара струи бесконечно возрастает.

На современных предприятиях обеспечение гидромониторов напорной водой происходит посредством оборотного водоснабжения из специальных прудов-отстойников [23, 45]. Скорость осаждения тонкодисперсных грунтовых частиц в воде очень низкая и фактически на гидромонитор подается вода с большим содержанием этих частиц. Плотность такой воды будет больше плотности чистой воды ($\rho \geq 1,0 \text{ т/м}^3$) [46].

В связи с этим напорную воду следует относить к неоднородным (гетерогенным) смесям, в которых гипотеза вязкостного трения Ньютона (пропорциональность напряжений градиенту скорости относительного движения жидкости) неприменима, и такие жидкости принято называть неньютоновскими жидкостями [46].

Исходя из вышесказанного, приходим к выводу, что известные уравнения, используемые для расчета силы удара струи гидромонитора о забой, основанные на законе изменения количества движения И. Ньютона, в условиях обеспечения средств гидромеханизации напорной водой с применением схемы оборотного водоснабжения из специальных прудов-отстойников, не обеспечивают необходимый уровень достоверности расчетов.

Известна расчетная модель гидромониторной струи, описывающая ее динамические характеристики в зависимости от конструкции гидромонитора, предназначенная для определения производительности гидравлического разрушения угля по длине струи в различных горно-геологических условиях [47].

В исследовании [47] предлагается для установления связи между параметрами струи и угольного массива использовать минимальную величину динамического давления струи P_{\min} в точке контакта струи с массивом, при превышении которой начинается процесс разрушения.

Однако в указанной работе определяют влияние характеристик самой струи гидромонитора на производительность отбойки (ее плотность, скорость и другие), но нет данных о влиянии плотности технологической воды или содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц на этот технологический параметр.

Также в этой работе рассматривается разрушение угольного массива, который существенно отличается по своим свойствам от глинистого массива.

Известно исследование [48], где предложена технология, позволяющая уменьшить затраты на гидротранспорт за счет увеличения твердого в гидросмеси, в рамках которой предполагается подача в гидромонитор напорной воды с содержанием отбитого массива из внутрizaбойных установок водоснабжения.

В работе основное внимание уделено снижению затрат на гидротранспорт, но о влиянии содержания в напорной воде гидромонитора грунтовых частиц, неизбежно присутствующих в воде в результате применения этой технологии, на производительность отбойки данных не обнаружено.

1.3 Практика определения теоретических значений максимальной длины струи гидромонитора при горизонтальной установке его ствола

Наибольшей разрушающей способностью струя гидромонитора обладает в сечении, максимально приближенном к насадке, поэтому для наиболее интенсивного размыва пород гидромонитор должен быть расположен как можно ближе к забою. Однако минимальное расстояние установки гидромонитора от

забоя ограничивается правилами безопасности, и сохранение такого расстояния сопряжено с частыми перестановками гидромонитора, что экономически невыгодно.

Поэтому рациональное удаление гидромонитора от забоя определяется, в том числе, максимальной дальностью полета напорной струи.

Для расчета длины струи l_c в различных источниках предлагаются следующие варианты.

В гидромеханизации [49-52] максимальную длину струи гидромонитора (l_c , м) чаще всего определяют из выражения:

$$l_c = \frac{k_{\text{воз}} \cdot v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}, \quad (4)$$

где $k_{\text{воз}}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление воздуха; v_0 – скорость истечения струи из насадки, м/с; α – угол наклона струи (ствола гидромонитора) к горизонту, град; g – ускорение свободного падения, м/с².

При этом в [50] и [52] даны ограничения применения выражения (4): $\alpha=20-30^\circ$, $k_{\text{воз}}=0,85-0,95$. Поэтому для условий, когда угол $\alpha=\pm 20^\circ$ (например, при подрезке уступа), расчет при помощи выражения (4) невозможен. К тому же $\sin 0^\circ=0$, то есть l_c в таком случае тоже равна 0 м, чего не наблюдается в реальных условиях.

Авторы [53] и [54] без ограничений предлагают использовать для определения теоретической дальности полета (боя) струи гидромонитора выражение (5), которое, как и уравнение (4), содержит среди множителей $\sin \alpha$, при $\alpha=0^\circ$, дающей значение $l_c=0$ м

$$l_c = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{g}. \quad (5)$$

Кроме того, в уравнении (2) не учтено влияние сопротивления воздуха и, скорее всего, допущена опечатка, так как в процессе математического

преобразования получается следующее. Уравнение траектории струи в параметрической форме: $x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$, $y = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$. Исключая время

получим: $y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha}$. Полагая $y = 0$, а $x = l_c$, получим:

$$l_c = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}.$$

Авторами [55-57] предложена функция, описывающая более сложную траекторию истечения струи из насадки, а в [56] и [57], кроме того, предлагается для определения именно горизонтальной дальности полета струи, но при $\alpha=0^\circ$, также дающей значение $l_c=0$ м:

$$l_c = \frac{v_0 \cdot \sin 2\alpha}{2g}. \quad (6)$$

В источниках [58] и [59] максимальную длину струи гидромонитора предлагают определять исходя из того, что насадка является малым отверстием, то есть диаметр насадки $d_n < 0,1H_0$, применив законы истечения жидкостей из малых отверстий, исключая из уравнения угол α и определяя дальность полета струи только исходя из напора и высоты установки ствола над землей:

$$l_c = 2 \sqrt{H_0 \cdot h_y}, \quad (7)$$

где φ – коэффициент скорости, $\varphi=0,935$; H_0 – напор перед насадкой, м; h_y – высота установки ствола гидромонитора, м.

В источнике [60] для определения дальности полета струи l_c предложено выражение:

$$l_c = \frac{2H_0 \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{1 + \frac{k_{\text{воз}}}{d_n} \cdot H_0}, \quad (8)$$

где d_n – диаметр насадки, м,

а в источнике [61] – уравнение (9), описывающее траекторию струи h_c , м

$$h_c = \frac{g \cdot l_c^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} \pm l_c \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

По эмпирическим данным, полученным в результате экспериментов, Н.П. Гавыриным [62] получено уравнение длины струи (10), предлагаемое авторами работ [55-57] и [63-65] для определения наиболее эффективной длины струи без ограничений, а в источнике [61] – при условии, что $\alpha=5-30^\circ$, $d_H=5-50$ мм, $H_0=10-80$ м, в [63] и [64] ограничения похожи: $\alpha=5-32^\circ$, $d_H=5-50$ мм, $H_0=30-80$ м. Введение ограничений справедливо, так как Н.П. Гавырин проводил эксперименты на дождевальных установках.

$$l_c = 0,415 \sqrt[3]{\alpha \cdot d_H \cdot H_0^2}. \quad (10)$$

В [53] присутствуют те же ограничения, но выражение (10) представлено в интерпретации (8), а в [66] оно показано в виде уравнения (9), но с ограничениями, как в [61]:

$$l_c = 0,415 \sqrt{\alpha \cdot d_H \cdot H_0^2}, \quad (11)$$

$$l_c = 0,415 H_0 \sqrt{\alpha \cdot d_H}. \quad (12)$$

Однако значения, получаемые при расчете с помощью уравнений (11) и (12), дают завышенный, несравнимый с натурными наблюдениями результат, из чего можно сделать вывод, что в источниках [53] и [66] допущена опечатка.

В [55] различают дальность полета струи и предельную дальность полета струи, первую из которых определяют из выражения (6), а вторую – из выражения (13), из которого также можно вычислить необходимый напор (14). Следует отметить, что для условий отрицательных значений угла α выражение (13) не имеет решения.

$$l_c = 1,27 \cdot d_H^{0,94} \cdot \sqrt[4]{\alpha} \approx d_H \sqrt[4]{\alpha}, \quad (13)$$

где d_H – диаметр насадки, м.

$$H_0 = \frac{3,75 \cdot d_H}{\sqrt[3]{\alpha}}. \quad (14)$$

Графики уравнений (4), (6), (8), (10), (13) показаны на рисунке 2 для условий перемещения ствола большинства гидромониторов: $\alpha = \pm 35^\circ$ ($H_0 = 60$ м, $d_H = 76$ мм).

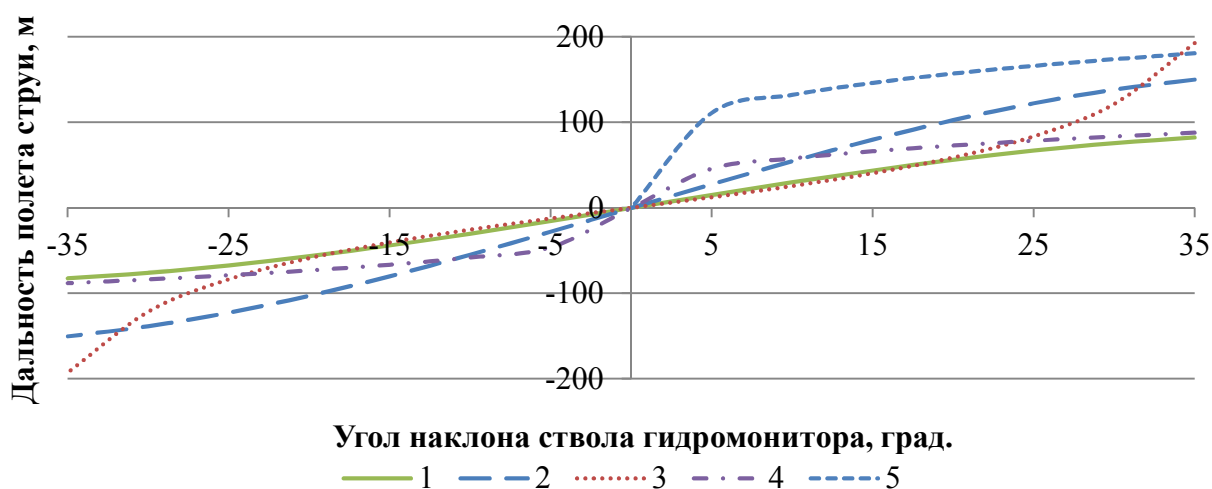


Рисунок 2 – Дальность полета струи l_c , определенная из уравнений:

1 – уравнения (4); 2 – уравнения (6); 3 – уравнения (8); 4 – уравнения (10); 5 – уравнения (13)

Для значений высоты основных типов гидромониторов [67] при угле наклона ствола $\alpha = 0^\circ$ максимальная длина струи l_c по выражению (7) ($H_0 = 60$ м, $d_H = 76$ мм) при высоте установки ствола гидромонитора $h_y = 1-5$ м составит: $l_c = 14,5-32,4$ м.

Сопоставляя данные рисунка 2 и полученные значения, возможно предположить, что наиболее достоверно длина струи может быть вычислена при помощи уравнения (10).

В связи с вышеизложенным очевидно, что большинство указанных уравнений имеют существенные ограничения в применении, для расчета длины струи l_c при угле наклона ствола гидромонитора $\alpha = 0^\circ$ приемлемый результат дает только уравнение (7). Кроме того, при отрицательных значениях угла α (рисунок 2) выражения (4), (8), (10) дают в качестве результата отрицательные значения длины струи; из-за небольшого интервала условий применения рассмотренных выше

формул некоторые технологические операции отбойки пород напорной струей гидромонитора фактически не могут быть рассчитаны. Кроме того, ни одна из обозначенных зависимостей не учитывает влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде или ее плотность.

1.4 Технические и технологические возможности увеличения производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора

Гидромониторная разработка – одна из самых низкочатратных технологий разработки месторождений и наиболее эффективная в условиях месторождений, сложенных глинистыми вмещающими породами.

Тем не менее КПД самой установки далек от 100%. Известно множество возможностей увеличения производительности гидромониторной установки по отбойке пород.

Технологически увеличить производительность отбойки осуществимо при помощи предварительных операций: рыхления механическим или буровзрывным способом, водонасыщения пород [68]. Но эти мероприятия неизбежно приведут к увеличению себестоимости и времени отработки месторождения.

Увеличение производительности отбойки за счет конструктивных изменений достижимо, например, при помощи успокоителей различных конструкций, применении наиболее энергоэффективных форм насадок, оптимизации и уменьшении потерь напора в гидромониторной установке, придании подвижности самоходным гидромониторам во время гидроотбойки [44, 69-72].

Также установлено, что наличие в напорной воде твердых частиц дает положительный эффект.

Наиболее часто здесь упоминаются различные приспособления для гидроабразивной резки [73-76]. В горном деле этот принцип предлагается применять в буровых машинах, совмещая механическое и абразивное воздействие на горный массив [77-86].

В области изучения взаимодействия напорной струи с поверхностью горных пород известны исследования В.Г. Мерзлякова [77-80], S. Liu, X. Liu, J. Chen, M. Lin и др. [87-92], теорию разрушения различных материалов гидроабразивной струей исследовали такие ученые, как A.G. Evans, K. Faber, I. Finnie, J.J Griffiths, H. Oweinah, M. Hashish, G.L. Sheldon, M. Hessling и другие.

Известны исследования [93], где для разрушения массива горных пород применена напорная струя гидромонитора с эжектированием в нее воздуха. Эффективность способа подтверждена натурными экспериментами – возможно повышение разрушающей способности гидромониторной струи на 25-30%.

Исследования воздействия двухфазного потока показаны в [81-86], где для резания породного массива авторами предложено и испытано в лабораторных условиях эжектирование в напорный поток твердых абразивных частиц, показавшее свою значительную эффективность.

Сказанное выше показывает эффективность применения двухфазных потоков. Однако область применения полученных результатов ограничена применением весьма высоких напоров (давление от 10-70 до более 400 МПа), малых диаметров сопел (от 0,6-1,2 до 2-3 мм), незначительных расстояний до обрабатываемого объекта (не более 15-25 мм), струи, направленной вертикально вниз. Анализ разрушаемости производился для хрупких пород, свойства которых существенно отличаются от свойств глинистых пород. Между тем, большинство россыпных месторождений полезных ископаемых представлены вязкими глинистыми породами, механизм разрушения которых значительно отличается от механизма разрушения твердых (хрупких) пород.

Таким образом, в результате проведенного обзора исследований, позволяющих определить производительность отбойки гидромонитором пород с высоким содержанием глины от применения абразивной струи (в результате эжектирования твердых абразивных частиц в его струю), не выявлено.

1.5 Цель и задачи исследования

В результате проведенного анализа выявлено, что разработка значительного количества месторождений осложнена высоким содержанием глинистых грунтов. Этот фактор оказывает существенное влияние на эффективность горнодобывающего производства.

Известно много технологических решений, но разработка месторождений, залегающих в породах с высоким содержанием глины, технологиями, предполагающими предварительное механическое рыхление, связана с определенными сложностями: во время работы часто наблюдается значительное налипание глины на рабочие органы машин, вызывающее простои оборудования и увеличение времени технологических операций.

Поэтому наиболее эффективно разрабатывать высокоглинистые месторождения средствами гидромеханизации. Однако здесь тоже есть ограничения, например, образование окатышей или невозможность организации рабочего котлована при работе драгой или землесосным снарядом. Для самых неблагоприятных условий предпочтителен наиболее гибкий и нетребовательный к условиям эксплуатации способ гидромеханизации – гидромониторная отбойка.

Поэтому разработка технических и технологических решений повышения производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора глинистых грунтов при разработке месторождений полезных ископаемых является актуальной научной задачей.

В связи с вышеизложенным **целью работы** является обоснование технологии и параметров размыва горных пород гидромонитором, обеспечивающих повышение эффективности их отбойки.

Это может быть достигнуто путём решения следующих **задач**:

1. Обзор и анализ известных технических и технологических способов увеличения производительности размыва горных пород гидромонитором и методик расчета параметров технологии.

2. Определение силы удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц при разработке высокоглинистых россыпных месторождений и разработка технологических решений применения полученных результатов.

3. Установление закономерностей изменения дальности полета струи гидромонитора от наличия в воде тонкодисперсных грунтовых частиц.

4. Оценка эффективности отбойки глинистых пород струей гидромонитора с эжектированными в нее твердыми абразивными частицами и разработка технологических решений применения полученных результатов.

5. Технико-экономическая оценка предлагаемых технологических решений на примере месторождения «Шуралинско-Ключевское» (Свердловская область).

2 ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ КРУПНОСТЬЮ -0,005 ММ (ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВЫХ ЧАСТИЦ) В НАПОРНОЙ ВОДЕ НА СИЛУ УДАРА СТРУИ ГИДРОМОНИТОРА О ЗАБОЙ

Значительное количество запасов ценных полезных ископаемых (например, золота и сопутствующих металлов) сосредоточено в месторождениях, сложенных вмещающими породами со значительным содержанием глины. Для отработки таких месторождений часто применяют средства гидромеханизации. Одним из способов гидромеханизированной разработки месторождений является отбойка пород при помощи гидромонитора, использующая энергию напорной струи.

2.1 Обоснование параметров модели исследования

Исследования по теме диссертации проведены при помощи лабораторной установки, показанной на рисунках 3 и 4 [94], в масштабе 1:10.

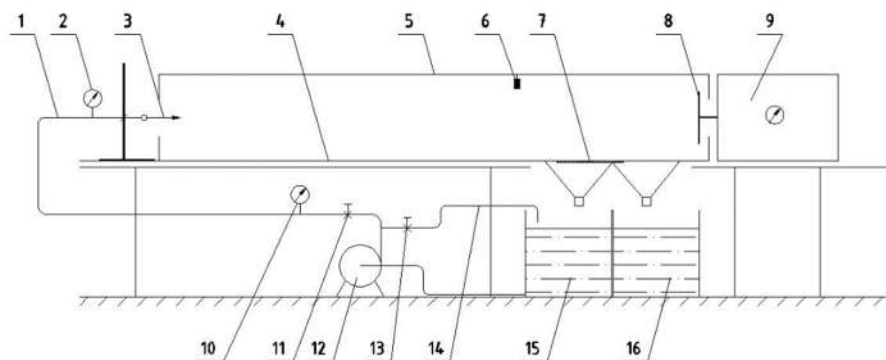


Рисунок 3 – Стенд для исследования интенсивности отбойки пород напорной струей гидромонитора:

1 – подводный трубопровод; 2 – манометр гидромонитора; 3 – гидромонитор со сменными насадками (рисунок 4); 4 – направляющие гидромонитора; 5 – защитный прозрачный корпус; 6 – видеокамера; 7 – шиберная заслонка; 8 – пластина с установленными на ней тензодатчиками, подключенными к ЭВМ 9; 10 – манометр насоса; 11 – кран на подводном трубопроводе; 12 – насос; 13 – вентиль; 14 – отводящий трубопровод; 15 – расходная емкость, оборудованная ареометром и термометром; 16 – мерная емкость

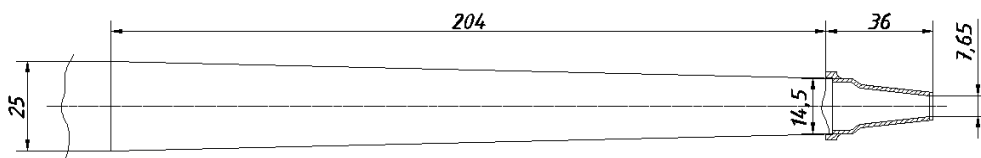


Рисунок 4 – Конструкция модели ствола гидромонитора

При моделировании соблюдено геометрическое подобие элементов, а также подобие процессов, протекающих в системах реального и модельного образца [95]. Исходные данные показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные моделирования гидромониторной установки

Диаметры насадок [96], мм	d_n	5,2
		7,6
		10,2
Подаваемый напор, м	H_0	10-20
Расстояние от насадки гидромонитора до забоя, м	L	1,5-3,5
Плотность технологической воды ρ , т/м ³ , исходя из содержания тонкодисперсных грунтовых частиц c , г/л соответственно	$\rho_1(c_1)$	1,0(0)
	$\rho_2(c_2)$	1,011(30)
	$\rho_3(c_3)$	1,023(60)
	$\rho_4(c_4)$	1,034(90)
	$\rho_5(c_5)$	1,038(100)

Геометрическим подобием установлены линейные размеры модели. Параметры, зависящие от гидравлических характеристик установки, принимались исходя из критериев подобия процессов, протекающих при работе гидромониторной установки [97].

Плотность чистой воды принята $\rho=1000$ кг/м³, так как при работе в реальных условиях в зависимости от температуры она будет меняться незначительно: при изменении температуры от -10 до +10°C минимальная плотность воды составит 998,15 кг/м³ [98, 99]. Значение температуры к изменяемым факторам не относим, так как ее влияние как фактора уже учтено в изменении плотности воды (ρ).

Соотношение содержания твердых частиц (c) в воде и ее плотности (ρ) произведено для случая, когда удельный вес глинистых частиц составил $\gamma=1,6$ т/м³.

Размеры забоя приняты также в масштабе 1:10 и составят 3×3 м для натуре и 0,3×0,3 м – для модели.

Практикой установлено, что размыв в целике целесообразно осуществлять при расстоянии от забоя до насадки гидромонитора, не превышающем 0,25-0,30 величины напора [100]. Таким образом, максимальное расстояние от насадки гидромонитора до забоя в натурном варианте при $H_0=100$ м составит $L_n=25-30$ м, для модельного образца это расстояние будет принято в соответствии с числом Фруда, расчет которого показан ниже, и составит $L_m=2,5-3$ м.

Здесь и далее индексами «н» и «м» обозначены натурный (реальный) и модельный объект соответственно.

Минимально возможное расстояние установки гидромонитора от забоя определяется как $a_k=0,5-1,2$ от высоты уступа [100], и для эксперимента составит $L_{\min}=0,3 \cdot 0,5=0,15$ м.

Потери напора в модельной установке незначительны и в расчетах не учитываются.

Обобщение результатов экспериментальных исследований для получения конкретных расчетных зависимостей произведено на основе выводов теории подобия [97, 101].

«Если известно, что две системы подобны, то, вычислив коэффициенты подобия, по поведению одной системы (модели) можно судить и о том, как будет вести себя реальный объект» [97].

Для исследуемой модели установлены критерии подобия: Рейнольдса (Re), характеризующий соотношение между силами вязкости и инерционными силами, Фруда (Fr), показывающий подобие гидравлических качеств струи и влияние силы тяжести на свободную часть гидромониторной струи (от насадки до забоя) и Ньютона (Ne), определяющий, что сила удара о забой в натурном и модельном образце будет подобна.

Критерий Рейнольдса Re [97] характеризует соотношение между силами вязкости и инерционными силами:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \text{idem}, \quad (15)$$

характеристическое число Λ (индикатор подобия):

$$\Lambda = 1 = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot l_c}{\mu_c} = \frac{v_c \cdot l_c}{\nu_c}, \quad (16)$$

где l – линейный размер, м; μ – динамическая вязкость воды, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

В рассматриваемом случае (15) выглядит следующим образом:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}. \quad (17)$$

Гидравлический диаметр для трубы круглого сечения, полностью (без пустот) заполненной жидкостью, равен геометрическому диаметру. Тогда число Рейнольдса для натуре и модели составит:

$$Re_{n1} = 1073701 ; Re_{n2} = 1610552 ; Re_{n3} = 2147403 ;$$

$$Re_{m1} = 43840 ; Re_{m2} = 65761 ; Re_{m3} = 87681 ;$$

$$\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = 24,49.$$

Как видно из значений критерия Рейнольдса (Re), поток воды в стволе гидромонитора будет турбулентен и для модели, и для реального объекта, но характеристическое число Λ указывает, что подобия в этих потоках не будет, так как $\Lambda \neq 1$.

При турбулентном режиме движения и шероховатых трубах все опытные точки (значения λ – коэффициента Дарси) располагаются на прямых, параллельных оси абсцисс и соответствующих определенным значениям относительной шероховатости (зона IV вполне шероховатых труб), т. е. λ перестает зависеть от Re

и является функцией только относительной шероховатости [102]. Область, в которой λ , α , следовательно, и сопротивление трубы или тела не зависят от Re , носит название автомодельной.

Определим шероховатость ствола гидромонитора для натурального и модельного образцов. Обозначим высоту выступов шероховатости буквой Δ . Величину Δ называют абсолютной шероховатостью.

С целью упрощения расчетов вводят понятие эквивалентной шероховатости $\Delta_э$, для рассматриваемых вариантов значения $\Delta_э = 0,09$ мм.

Тогда соотношение Δ и d для реальной системы составит $\Delta_э/d_n = 0,09/250 = 0,00036$, а для модели – $\Delta_э/d_n = 0,09/25 = 0,0036$.

Воспользовавшись номограммой для определения коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса (Re) при различных отношениях эквивалентной шероховатости трубы $\Delta_э$ к её внутреннему диаметру d (по данным исследований Г.А. Мурина [102], показывающим границы автомодельной зоны) видим, что все значения числа Re попадают в автомодельную зону, а это значит, что движение частиц потока воды внутри реального и моделируемого гидромониторов будет подобно.

Нахождение сил давления струи гидромонитора на забой для натурной и модели определяется критерием подобия Ньютона (Ne) [97], т.е. случай обтекания неподвижного тела жидкой средой:

$$Ne = \frac{F}{\rho \cdot l^2 \cdot v^2} = idem, \quad (18)$$

$$\Lambda = 1 = \frac{F_c}{\rho_c \cdot l_c^2 \cdot v_c^2}, \quad (19)$$

где F – сила давления на твердое тело движущейся жидкости, $кг \cdot м/с^2$.

Тогда для рассматриваемого случая моделирования (18) примет вид:

$$Ne = \frac{F}{\rho \cdot S \cdot v^2}, \quad (20)$$

где S – площадь сечения насадки.

По результатам расчета для модели и реального объекта $Ne=1$, характеристическое число $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 \approx 1$.

Таким образом, критерий подобия Ньютона (Ne) и его характеристическое число показывают, что силы давления струи гидромонитора для реального объекта и модели на забой будут подобны – пропорциональны масштабу подобия.

Для определения подобия некоторых геометрических размеров природы и модели, таких как расстояние от насадки до забоя, воспользуемся критерием подобия Фруда [97], который характеризует соотношение инерционных сил и сил тяжести (эти силы в подобных системах пропорциональны):

$$Fr = \frac{v^2}{l \cdot g} = idem, \quad (21)$$

$$\Lambda = 1 = \frac{v^2}{g_c \cdot l_c}. \quad (22)$$

Как сказано выше, линейный размер l (в исследуемом случае – расстояние от насадки гидромонитора до забоя) при $H_{он}=100$ м и $H_{ом}=10$ м будет равен: для натурального образца $L_n=30$ м, для модельного – $L_m=3$ м. Тогда:

$$Fr_n = \frac{(40,75)^2}{30 \cdot 9,81} = 5,6; Fr_m = \frac{(12,89)^2}{3 \cdot 9,81} = 5,6;$$

$$\Lambda = 1.$$

Таким образом, критерий подобия Фруда и его характеристическое число (индикатор подобия Λ) показывают, что соотношение инерционных сил и сил тяжести в рассматриваемых системах пропорционально.

Данные, полученные в результате экспериментов, проведенных на рассмотренном стенде, сконструированном с учетом рассчитанных выше параметров и критериев подобия, будут соответствовать натурным значениям с учетом масштаба (1:10).

2.2 Сила удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Производительность отбойки пород при помощи гидромонитора зависит от способности напорной струи воды разрушать горный массив и характеризуется, в том числе, силой воздействия гидромониторной струи на забой (или, как ее иногда называют, силой удара струи). Для определения теоретических значений этой силы (P_0) используется общеизвестная формула И. Ньютона, основанная на законе изменения количества движения (1).

Однако на горнодобывающих предприятиях применяется обратная схема водоснабжения гидромеханизированных работ из специальных прудов-отстойников и, из-за того, что тонкодисперсные частицы пород имеют очень низкую способность к осаждению, за время промывочного сезона в воде, подаваемой на гидромонитор, скапливается значительное количество этих частиц, увеличивающих плотность напорной воды.

Кроме того, воду с содержанием твердых частиц необходимо относить к неньютоновским жидкостям, обладающим специфическими свойствами и для такой воды уравнение (1) не обеспечивает необходимой точности.

Ниже показаны результаты экспериментальных исследований влияния содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на силу удара струи гидромонитора о забой [103-105]. Работы проведены при помощи лабораторного стенда [94] в масштабе 1:10 (рисунки 3 и 5).

В расчетах используются значения плотности воды в пересчете от содержания взвешенных тонкодисперсных грунтовых частиц. Это сделано для того, чтобы исключить неточности, связанные с различной плотностью частиц в

зависимости от индивидуальных особенностей строения и пород, слагающих каждое месторождение.

Исходные данные экспериментов показаны в таблице 3 с учетом геометрического подобия элементов и подобия процессов, протекающих в системах натурального и модельного образцов, согласно главе 2.1.



Рисунок 5 – Общий вид лабораторного стенда (фото)

Таблица 3 – Исходные данные исследования силы удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Диаметры насадок, мм	d_n	5,2
		7,6
		10,2
Подаваемый напор, м	H_0	10-20
Расстояние от насадки гидромонитора до забоя, м	L	1,5-3,5
Плотность технологической воды ρ , т/м ³ , (содержание тонкодисперсных грунтовых частиц c , г/л)	$\rho_1(c_1)$	1,0(0)
	$\rho_2(c_2)$	1,011(30)
	$\rho_3(c_3)$	1,023(60)
	$\rho_4(c_4)$	1,034(90)
	$\rho_5(c_5)$	1,038(100)

Нормирование содержания тонкодисперсных грунтовых частиц, ограниченное величиной 100 г/л, обусловлено суммарным доходом от неполученного недропользователем дохода за счет технологических потерь металла при обогащении в зависимости от содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде и затрат на повышение качества технологической воды (очистка с использованием реагентов, дополнительные объемы гидротехнических сооружений организация поверхностного водозабора, устройство фильтров, увеличение рабочей зоны отстойника и др.). Предельно допустимое содержание мелкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде по данным [40] должно составлять от 60 до 90 г/л.

2.2.1 Методика проведения эксперимента для определения силы удара струи гидромонитора о забой при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Исследования с помощью стенда (рисунки 3-5) осуществлялись следующим образом. В соответствии с исходными данными, указанными в таблице 3, на модель гидромонитора устанавливается насадка определенного диаметра. Замеряются исходные характеристики воды: плотность, температура. Гидромонитор по направляющим перемещается на заданное условиями исследования расстояние от пластины. В момент включения насоса шиберная заслонка находится в положении рециркуляции воды. При помощи вентиля на отводящем трубопроводе устанавливается необходимый напор воды в подводящем трубопроводе, который контролируется манометром. Затем открывается кран на подводящем трубопроводе, струя направляется в центр пластины. При помощи манометра фиксируется напор воды у насоса. После этого шиберная заслонка перекрывает доступ воды в расходную емкость и вода поступает в мерную емкость, фиксируется время начала и завершения эксперимента, в течение которого программой ПК записываются показания тензодатчиков, установленных на пластине. По истечении

времени эксперимента шиберная заслонка переводится в положение рециркуляции воды в установке, определяется расход воды при помощи мерной емкости.

Объект исследования имеет четыре входные переменные: содержание взвешенных частиц c и взаимосвязанная с этим плотность воды ρ , которая контролируется ареометром и регулируется добавлением тонкой фракции грунтовых частиц, расстояние от насадки гидромонитора до забоя L , напор воды H_0 , контролируемый манометрами, и диаметр насадки гидромонитора d_n (таблица 3). Выходным параметром объекта является сила давления гидромониторной струи на забой P . Таким образом, сила давления гидромониторной струи на забой может быть представлена в виде функции: $P = f(\rho, L, H_0, d_n)$.

Опыты выполнены в случайной последовательности, чтобы исключить влияние неучтенных систематических ошибок (согласно теории случайных чисел). Значения выходной величины P (сила давления струи гидромонитора на забой, кг/см²) в процессе проведения экспериментов фиксируются ПК один раз в секунду. В результате камеральной обработки результатов вычисляется средневзвешенное значение величины P для каждого варианта опыта.

2.2.2 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов показаны на графиках (рисунки 6-8) для значений напора $H_0=10,0$ м и в таблице Приложения А. По результатам анализа полученных данных можно сказать, что изменение плотности напорной воды для гидромонитора $\rho=1,0-1,038$ т/м³ ($c=0-100$ г/л) приведет к увеличению силы давления струи на забой в пределах 1-10 % для условий таблицы 3.

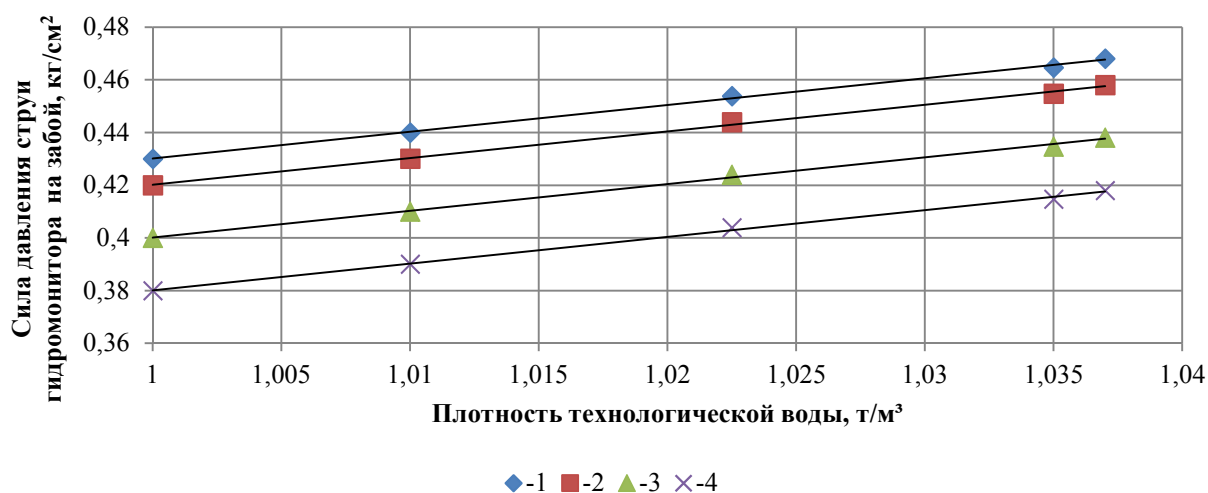


Рисунок 6 – Зависимость силы давления гидромониторной струи на забой от плотности напорной воды и расстояния до забоя (при $d_n=5,2$ мм, $H_0=10,0$ м):

1 – 1,5 м, 2 – 2,5 м, 3 – 3,0 м, 4 – 3,5 м

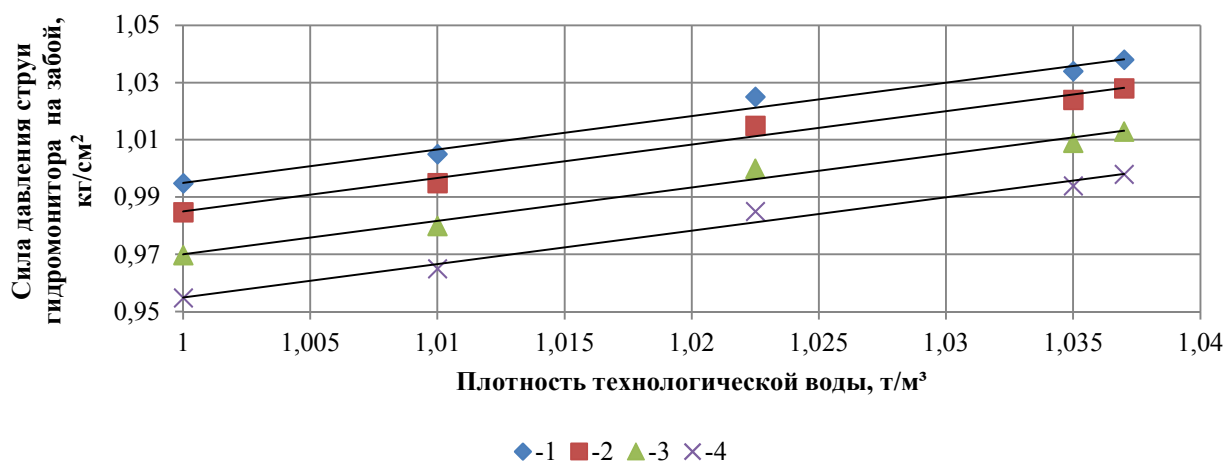


Рисунок 7 – Зависимость силы давления гидромониторной струи на забой от плотности напорной воды и расстояния до забоя (при $d_n=7,6$ мм, $H_0=10,0$ м):

1 – 1,5 м, 2 – 2,5 м, 3 – 3,0 м, 4 – 3,5 м

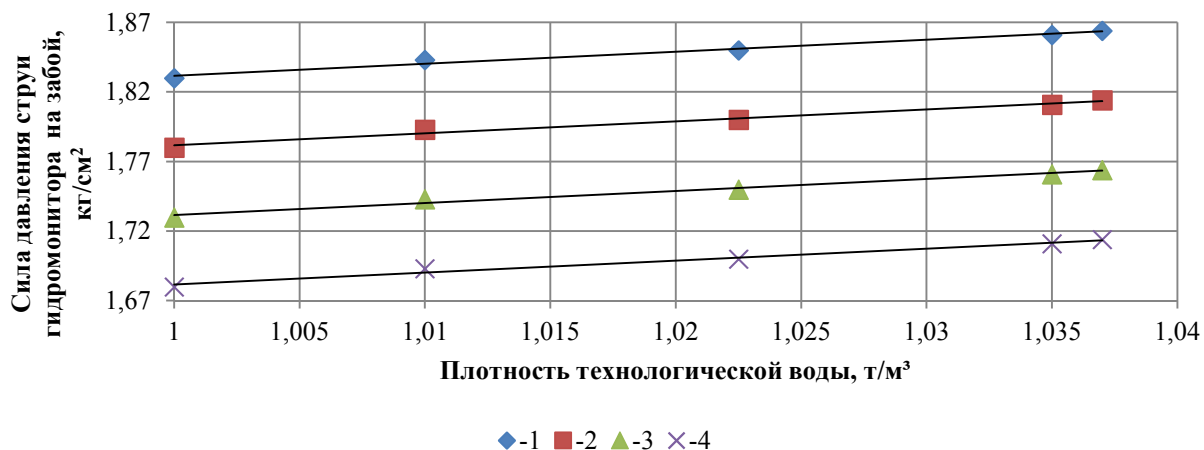


Рисунок 8 – Зависимость силы давления гидромониторной струи на забой от плотности напорной воды и расстояния до забоя (при $d_n=10,2$ мм, $H_0=10,0$ м):

1 – 1,5 м, 2 – 2,5 м, 3 – 3,0 м, 4 – 3,5 м

При этом наибольшее изменение силы давления на забой от изменения плотности напорной воды наблюдается при увеличении расстояния от забоя (рисунки 6-8). Также по результатам экспериментов выявлено, что сила давления струи гидромонитора на забой при наличии в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц от диаметра насадки гидромонитора возрастает нелинейно. Причем интенсивность ее приращения падает при увеличении диаметра насадки.

Очевидно, это происходит из-за большего воздействия на струю гидромонитора силы тяжести, так как при увеличении диаметра насадки возрастает масса воды, находящейся в воздушном пространстве между гидромонитором и забоем. Увеличение напора на насадке не дает ожидаемой положительной динамики.

Исходя из вышесказанного можно заключить, что наибольший положительный эффект от наличия в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц наблюдается при малых насадках гидромонитора и небольших напорах. Расстояние до забоя может быть максимально допустимым по технологическим условиям.

2.2.3 Математическая модель изменения силы удара струи гидромонитора о забой

Для прогнозирования и анализа исследуемых процессов по результатам проведенных экспериментов возможно составить математическую модель.

Изменение силы удара гидромониторной струи о забой P от изменения плотности напорной воды ρ за счет содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц, диаметра насадки d_n , напора воды на насадке гидромонитора H_0 и расстояния до забоя L представляет собой зависимость, принципиальный вид которой показан на рисунках 6-8.

Исследуя полученные графики, можно сделать вывод, что отклонение производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора зависит от плотности напорной воды и может быть определено по уравнению:

$$P = a \cdot \rho + b, \text{ кгс}, \quad (23)$$

где ρ – плотность напорной воды, т/м^3 ; a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора, напора воды на насадке гидромонитора и расстояния до забоя (таблица 4).

Таблица 4 – Значения эмпирических коэффициентов уравнения (23)

Исходные параметры			Эмпирический коэффициент	
d_n , мм	H_0 , м	L , м	a	b
52	100	15	1,013	0,583
		25		0,613
		30		0,593
		35		0,633
	150	15		0,363
		25		0,393
		30		0,413
		35		0,433
	200	15		0,163
		25		0,193
		30		0,213
		35		0,233

Продолжение таблицы 4

76	100	15	1,166	0,171
		25		0,181
		30		0,196
		35		0,211
	150	15		0,353
		25		0,313
		30		0,303
		35		0,293
	200	15		0,753
		25		0,733
		30		0,703
		35		0,673
102	100	15	0,860	0,970
		25		0,920
		30		0,870
		35		0,820
	150	15		1,600
		25		1,590
		30		1,570
		35		1,550
	200	15		2,570
		25		2,460
		30		2,420
		35		2,380

Изменение коэффициента a прослеживается по полиномиальной зависимости и обусловлено диаметром насадки гидромонитора:

$$a = -0,036 \cdot d_n^2 + 0,531 \cdot d_n - 0,763, \quad (24)$$

где d_n – диаметр насадки гидромонитора, мм.

Изменение коэффициента b имеет вид линейного уравнения и зависит от расстояния до забоя:

$$b = 10^{-3} \cdot c \cdot L + d, \quad (25)$$

где c и d – эмпирические коэффициенты; L – расстояние до забоя, м.

Коэффициенты c и d описывают силу давления струи гидромонитора на забой при различных значениях напора (H_0 , м). Изменение эмпирического

коэффициента c прослеживается по полиномиальной зависимости второго порядка и описывается уравнением:

$$c = x_1 \cdot H_0^2 + x_2 \cdot H_0 + x_3, \quad (26)$$

где H_0 – напор воды на насадке гидромонитора, м; $x_1 \dots x_3$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора:

$$x_1 \dots x_3 = z_1 d_H^2 + z_2 d_H + z_3, \quad (27)$$

где $z_1 \dots z_2$ – эмпирические коэффициенты, таблица 5.

Таблица 5 – Эмпирические коэффициенты уравнения (27)

Определяемый коэффициент уравнения (27)	z_1	z_2	z_3
x_1	-0,179	2,246	-6,616
x_2	5,47	-68,74	202,5
x_3	-41,43	525,5	-1586

Изменение эмпирического коэффициента d описывается линейной зависимостью:

$$d = e \cdot H_0 + f, \quad (28)$$

где e и f – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора.

Изменение эмпирического коэффициента e описывается также линейной зависимостью:

$$e = 0,023 \cdot d_H - 0,081. \quad (29)$$

Изменение эмпирического коэффициента f – полиномиальная функция второго порядка:

$$f = 0,045 \cdot d_H^2 - 0,625 \cdot d_H + 1,062. \quad (30)$$

Преобразуя уравнения (23)-(30), получим математическую модель изменения силы удара гидромониторной струи о забой от изменения плотности напорной воды за счет содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц:

$$P = A \cdot \rho + \frac{L}{10} \cdot 100^{-3} \cdot (B \cdot \frac{H_o^2}{100} + C \cdot \frac{H_o}{10} + D) + E + F, \quad (31)$$

где A, B, C, D, E, F – коэффициенты математической модели (31), учитывающие диаметр насадки гидромонитора:

$$A, B, C, D, E = a \cdot \frac{d_H^2}{100} + b \cdot \frac{d_H}{10} + c; \quad (32)$$

$$F = \frac{H_o}{10} \cdot (0,23 \cdot \frac{d_H}{10} - 0,81), \quad (33)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты, таблица 6.

Таблица 6 – Эмпирические коэффициенты уравнения (32)

Определяемый коэффициент уравнения (31)	a	b	c
A	-0,36	5,31	-7,63
B	-1,79	22,46	-66,16
C	54,7	-687,4	2025
D	-414,3	525,5	15860
E	0,45	-6,25	10,62

Полученная математическая модель (31) позволяет прогнозировать влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц на производительность отбойки пород напорной струей гидромонитора с достаточной степенью достоверности. Погрешность составляет 5-10 % для значений: $d_H=52-102$ мм, $H_o=100-200$ м, $L=15-35$ м, $\rho=1-1,038$ т/м³.

2.2.4 Влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора на потребляемую мощность насосной установки и необходимый объем технологической воды

2.2.4.1 Изменение потребляемой мощности насосной установки от содержания в напорной воде гидромонитора тонкодисперсных грунтовых частиц

Как показали вышеприведенные экспериментальные исследования, наличие тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде в пределах от 0 до 100 г/л дает определенный положительный эффект при отбойке пород напорной струей гидромонитора [106, 107]. Однако увеличение плотности напорной воды, вызванное наличием в ней этих частиц, безусловно, скажется на работе насосной установки обратного водоснабжения средств гидромеханизации.

Прежде всего, это приведет к увеличению потребляемой мощности насосов (N , Вт), которую определим при помощи известного уравнения [43, 56]:

$$N = \rho \cdot Q \cdot H_0 \cdot g / \eta_p \quad (34)$$

где ρ – плотность перекачиваемой воды, т/м³; Q – подача насоса, м³/с; H_0 – напор, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для сравнения влияния тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на силу давления струи на забой и на потребляемую мощность насосной установки в зависимости от напора и диаметра насадки гидромонитора воспользуемся полученными экспериментальными данными, описанными выше и в работах [106, 107]. Результаты сравнения, представленные в виде графиков, показаны на рисунках 9-11, из которых видно, что с увеличением плотности напорной воды увеличиваются как сила давления гидромониторной струи на забой, так и потребляемая мощность насосной установки.

При этом чем больший объем воды истекает из насадки гидромонитора за единицу времени (то есть чем больше диаметр насадки), тем меньше отклонение показателей силы давления гидромониторной струи на забой ΔP , напор в данном случае имеет меньшее значение, чем диаметр насадки.

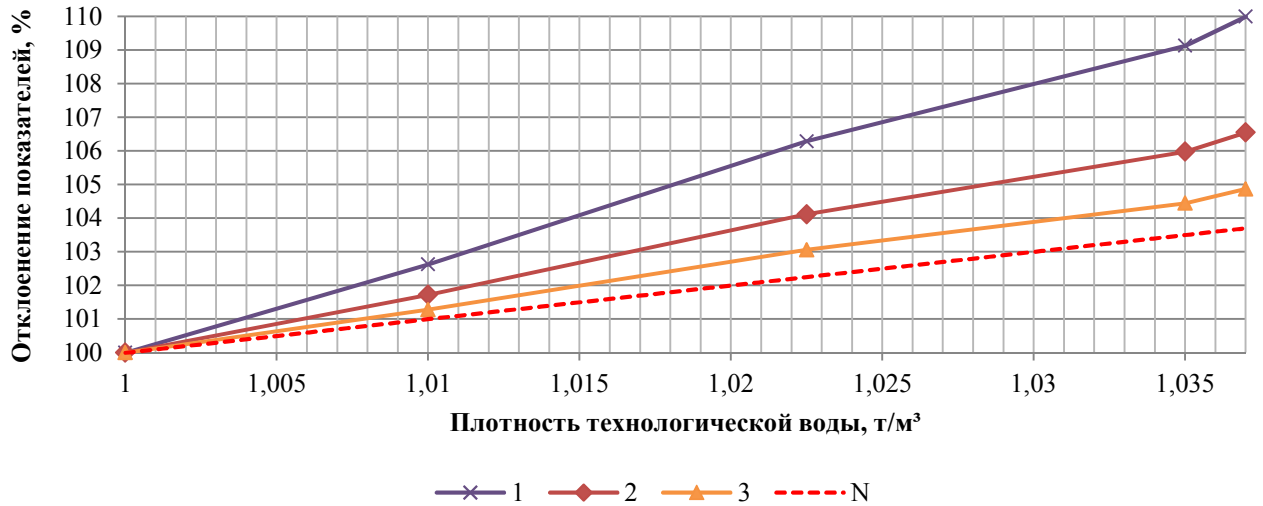


Рисунок 9 – Отклонение показателей силы давления гидромониторной струи на забой и потребляемой мощности насосной установки (N) при диаметре насадки гидромонитора $d_n=5,2$ мм в зависимости от плотности технологической воды и ее напора:

1 – 10 м; 2 – 15 м; 3 – 20 м

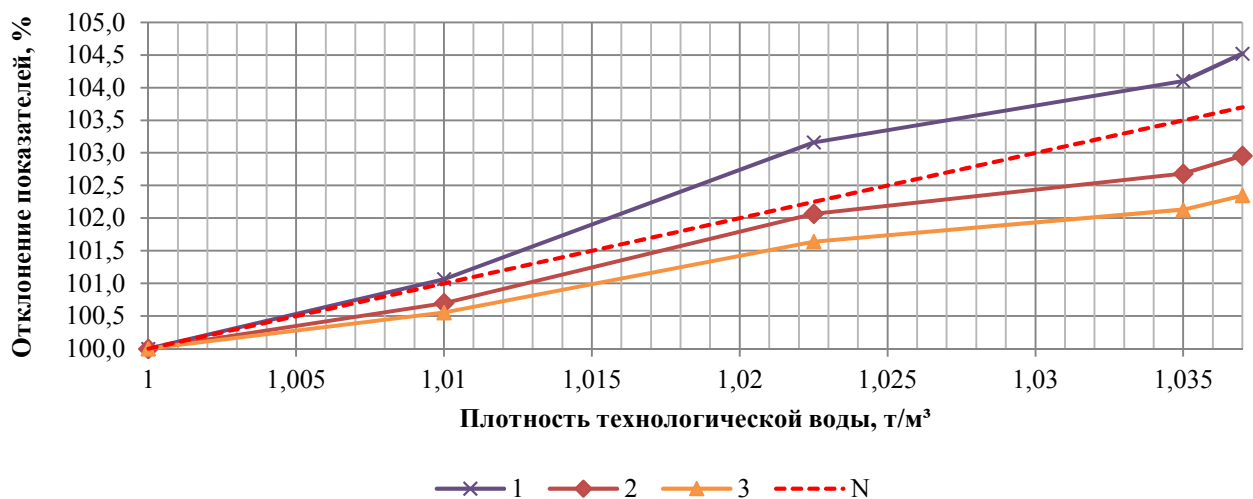


Рисунок 10 – Отклонение показателей силы давления гидромониторной струи на забой и потребляемой мощности насоса (N) при диаметре насадки $d_n=7,6$ мм в зависимости от плотности технологической воды и ее напора:

1 – 10 м; 2 – 15 м; 3 – 20 м

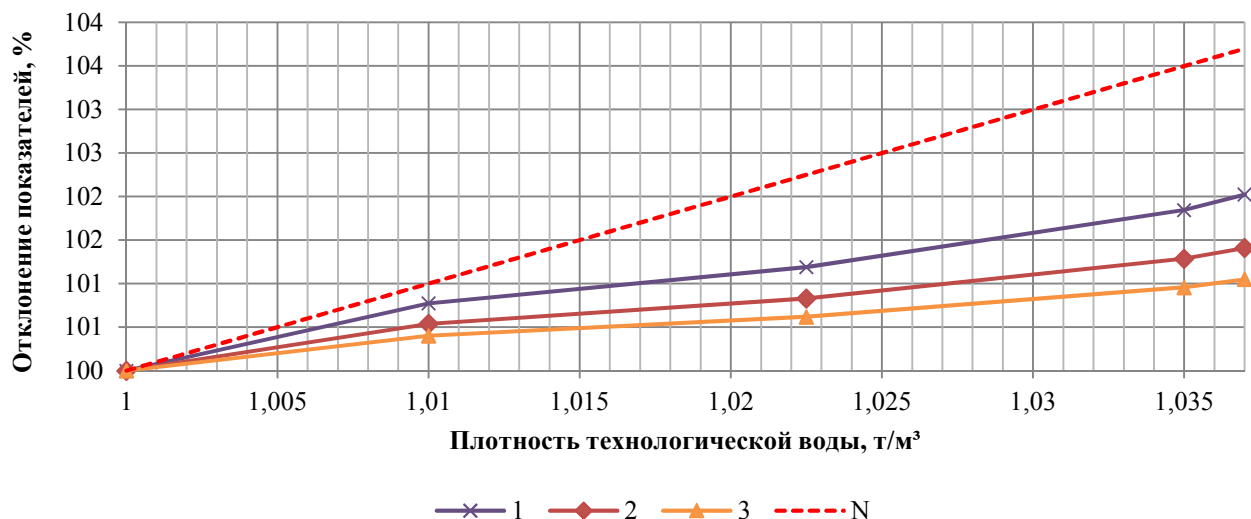


Рисунок 11 – Отклонение показателей силы давления гидромониторной струи на забой и необходимой потребляемой мощности насоса (N) при диаметре насадки $d_n=10,2$ мм в зависимости от плотности технологической воды и ее напора:

1 – 10 м; 2 – 15 м; 3 – 20 м

В процессе анализа значений потребляемой мощности насоса N, полученных при помощи уравнения (34), видно, что повышение плотности напорной воды от 1 до $1,038$ т/м³ ведет к увеличению потребляемой мощности на 3,7%.

Исходя из данных графиков (рисунки 9-11) можно предположить, что говорить об увеличении эффективности отбойки пород напорной струей гидромонитора в указанных условиях целесообразно при изменении этого давления на величину, превышающую значения потребляемой мощности насосной установки.

Такие показатели достигаются при небольших диаметрах насадки гидромонитора, рисунки 9 и 10 ($d_n=5,2$ и $7,6$ мм). При $d_n=10,2$ мм (рисунок 11) очевидно, что увеличения эффективности отбойки не происходит, так как сила давления на забой возрастает в значительно меньшей степени, чем потребляемая мощность насоса.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что экспериментальным путем обнаружено увеличение эффективности отбойки пород напорной струей гидромонитора, обусловленное возрастанием силы давления гидромониторной

струи на забой при увеличении плотности напорной воды из-за содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц. Однако, исходя из возрастания в таких условиях потребляемой мощности насосной установки, целесообразно говорить об увеличении эффективности отбойки только в случаях, когда значения повышения силы давления гидромониторной струи превышают значения увеличения потребляемой мощности насосной установки.

В проведенных исследованиях выявлено, что такое сочетание значений рассматриваемых показателей наблюдается при небольших диаметрах насадки гидромонитора и по мере их увеличения снижается: при $d_n=5,2$ мм эффективность отбойки при увеличении плотности напорной воды с учетом потребляемой мощности насоса возрастает во всех предложенных условиях, при $d_n=7,6$ мм – только при напоре $H_0 \leq 10$ м.

Однако достоверная оценка эффективности работы гидромониторной установки в условиях увеличения плотности напорной воды и потребляемой мощности насоса возможна только с учетом экономических показателей.

2.2.4.2 Необходимый объем технологической воды в прудах-отстойниках при увеличенном содержании в ней тонкодисперсных грунтовых частиц

Кроме увеличения производительности отбойки пород струей гидромонитора большее содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде приведет к возможности сокращения сроков осветления воды в специальных прудах-отстойниках и, как следствие, уменьшению объема прудов, площади, выделяемой для их размещения, и снижению экологической нагрузки в целом. Особенное значение это имеет при невозможности разместить пруды-отстойники в выработанном пространстве и необходимости дополнительных площадей горного отвода.

Изменение требуемого объема воды (рисунок 12) в пруду-отстойнике от содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц возможно определить,

ориентируясь на содержание глинистых частиц в технологической воде на конец эксплуатации пруда-отстойника C_{ϕ} (г/л), из уравнения [23]:

$$C_{\phi} = 10 \cdot V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{T}} \cdot \frac{b}{V_0}, \quad (35)$$

где $V_{\text{п}}$ – количество промытых грунтов (хвостов), поступающих в гидравлический отвал в породной массе за весь период его эксплуатации, м^3 ; ρ_{T} – плотность самых мелких фракций, $\text{т}/\text{м}^3$; b – суммарный выход фракций менее предельного размера, %; V_0 – объем воды в отстойнике, м^3 .

Тогда для условий $V_{\text{п}} = 406153,8 \text{ м}^3$, $\rho_{\text{T}} = 1,6 \text{ т}/\text{м}^3$; $b = 20 \%$, $V_0 = 4307799 \text{ м}^3$ получим изменение необходимого объема воды в пруду-отстойнике при изменении содержания тонкодисперсных грунтовых частиц 20-100 г/л, показанное на рисунке 12. Содержание $C_{\phi} = 20 \text{ г}/\text{л}$ соответствует значениям, принимаемым при традиционной технологии.

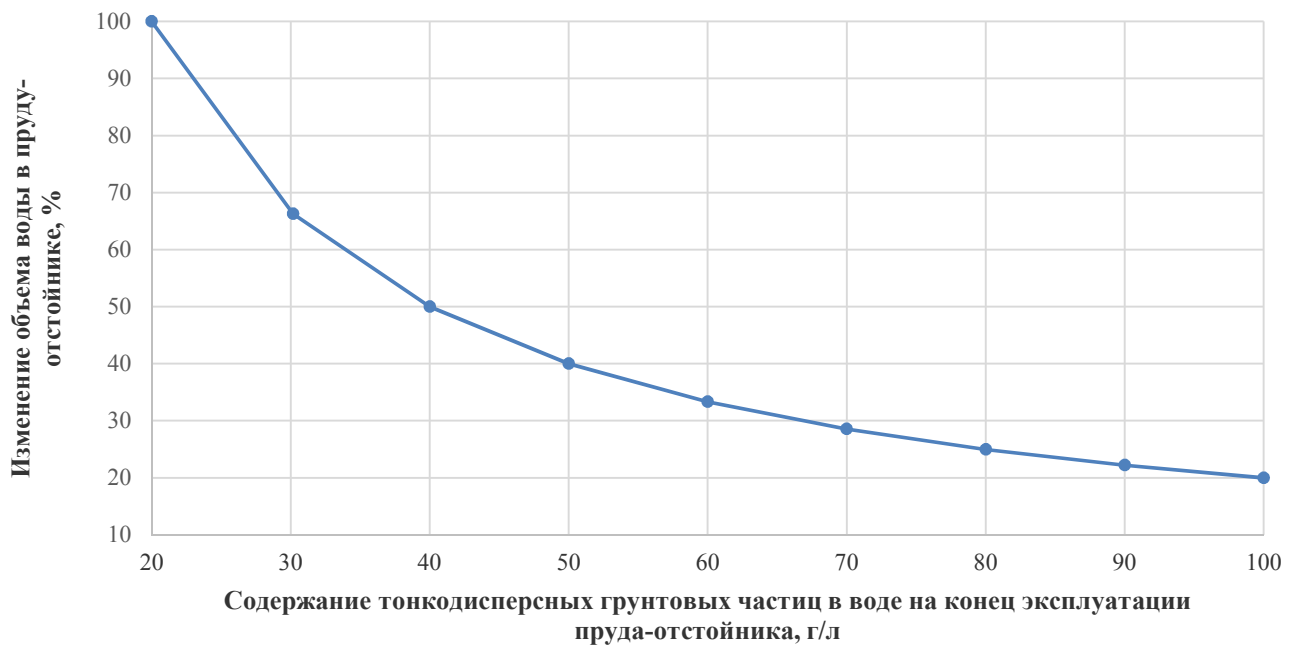


Рисунок 12 – Изменение необходимого объема воды в пруду-отстойнике на конец его эксплуатации за счет увеличения содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде

Из графика (рисунок 12) видно, что при содержании тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде $c=50-100$ г/л объем воды сокращается только на 21,8 %, в то время как основная динамика наблюдается на отрезке, соответствующем $c=20-50$ г/л, и составляет 60 %.

Также, согласно рекомендациям [40] предельно допустимое содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде при ведении добычных работ должно составлять 60-90 г/л.

Таким образом, при сопоставлении данных, полученных в результате исследования влияния содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора на производительность отбойки, можно рекомендовать применение технологической воды с содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц до 50-60 г/л при добычных работах и до 100 г/л – при ведении вскрышных работ.

Более подробная оценка экономических показателей приведена в главе 5 для условий россыпного месторождения «Шуралинско-Ключевское» (Свердловская область).

2.2.5 Абразивный износ деталей гидромониторной установки тонкодисперсными грунтовыми частицами

При работе гидромониторной установки необходимо учитывать дополнительный абразивный износ деталей гидромонитора, обусловленный содержанием в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц.

Известны различные способы расчета и определения абразивного износа, но в конечном итоге они дают качественную оценку или сводятся к необходимости определения того или иного количества показателей экспериментальным путем.

В целом интенсивность абразивного истирания (абразивного износа) частей и деталей гидромонитора зависит от массы и скорости абразивных частиц, угла их направления относительно изнашиваемой поверхности (по теории Биттера) [108],

а также абразивности горных пород, то есть прочности породы, твердости, остроты вершин, размеров и формы минеральных зерен, из которых они состоят [109, 110].

Согласно [111], «абразивные свойства пород зависят от их петрографических характеристик, основными из которых являются: 1) твердость зерен пород, увеличивающая абразивность пород (например, высокоабразивными являются кварц- и корундсодержащие породы); 2) форма зерен (остроугольные более абразивны, чем окатанные); 3) размер зерен (влияет на степень шероховатости, крупные зерна вызывают повышенный абразивный износ); 5) влажность (способствует понижению абразивности некоторых осадочных пород)».

Абразивность определяется путем оценки износа материала, контактирующего с перемещаемой по отношению к нему горной породой по методу Л.И. Барона и А.В. Кузнецова (ИГД им. А.А. Скочинского). Все горные породы по абразивности разделяются согласно этому методу на 8 классов [109].

Помимо показателя абразивности при проведении работ необходимо также учитывать соотношение Т:Ж, поскольку от него напрямую зависит износ деталей гидромонитора – чем меньше концентрация твердого в напорной воде, тем меньше износ, наименьшее истирание будет при работе с использованием глинистого раствора [110].

При сравнении взаимодействующих материалов (металла гидромонитора и взвешенных в напорной воде частиц горных пород) с точки зрения твердости по шкале Мооса, можно сказать, что наименьший износ будет от глин, так как их твердость равна 1. Для сравнения: сталь: 4-4,5, железо: 4,5, титан: 6, укрепленная сталь: 7-8 [112]. Твердость кварца 7. То есть металл гидромонитора может испытывать абразивный износ только от пород твердостью более 4. Минералы типа глин, гипсов, кальцита не обладают достаточной твердостью.

Согласно [108], «Анализ результатов экспериментальных исследований по изучению влияния крупности твердых частиц на интенсивность гидроабразивного изнашивания показывает, что повышение размеров очень мелких (<0,05-0,08 мм) частиц ведет к медленному возрастанию износа. В дальнейшем увеличение крупности абразивного материала до 2,5-3,0 мм вызывает приблизительно

пропорциональное увеличение интенсивности износа. Повышение крупности выше указанного предела приводит к снижению интенсивности возрастания процесса».

В настоящей работе показаны исследования, связанные с содержанием в напорной воде гидромонитора тонкодисперсных грунтовых частиц. Таковыми принято считать частицы, распределение которых по глубине напорного потока равномерное практически в любом режиме движения [108] и их крупность не превышает 0,005 мм.

Обычно говорят о значительном абразивном износе насадок гидромонитора и рабочего колеса насоса песчаными частицами разрабатываемых горных пород и стремятся исключить их попадание в водяной насос. Но, например, в технической характеристике водяного насоса Д4000-95 определены требования к содержанию твердых частиц, которые могут находиться в перекачиваемой воде: «...Если вязкость жидкости равна 36 сСт, а абразивных частиц в общей массе не более 0,05 %, то насос сможет осуществить перекачку любой другой субстанции. Также важным параметром является температура, которая не должна превышать 85 °С. Размер твёрдых частиц в потоке не более 0,2 мм».

Таким образом, можно сказать, что при работе гидромонитора на частично осветленной воде из прудов-отстойников оборотного водоснабжения при концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде менее 0,05%, то есть до 50 г/л, насосное и гидромониторное оборудование практически не изнашивается, его износ будет аналогичен износу оборудования на технически чистой воде. При увеличении концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц до 100 г/л необходимо учитывать также их состав, так как рекомендации по износу оборудования даны для наиболее неблагоприятных условий и наиболее абразивных пород. В настоящей работе рассматриваются месторождения, залегающие в глинистых вмещающих породах, относящихся к малоабразивным и весьма малоабразивным, а в технологии бурения раствор таких пород (глиняный раствор) применяется для уменьшения абразивности бурения. То есть можно

предположить, что износ гидромониторной установки также будет примерно равен износу при работе на технически чистой воде.

Таким образом, можно сделать вывод, что при работе гидромонитора на частично осветленной воде с содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц до 100 г/л при разработке глинистых месторождений абразивный износ гидромониторной установки будет незначителен и сравним с износом при работе на технически чистой воде.

2.3 Дальность полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Высота и дальность полета гидромониторных струй имеют большое практическое значение при определении местоположения гидромонитора в карьере по отношению к забою.

По результатам проведенного обзора выявлено, что большинство известных уравнений имеют существенные ограничения в применении, и рассчитать значение длины струи гидромонитора для условий некоторых технологических операций, например, подрезки уступа, практически невозможно. Кроме того, ни одна из обозначенных зависимостей не учитывает влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде.

Для определения влияния содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц на дальность полета струи гидромонитора при подрезке уступа, когда угол наклона ствола гидромонитора к горизонту составляет порядка ноль градусов, проведена серия экспериментов [113, 114] в масштабе 1:10 при помощи лабораторной установки [94], исходные данные показаны в таблице 7.

Таблица 7 – Исходные данные моделирования дальности полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Диаметры насадок, мм	d_n	5,2
		7,6
		10,2
Напор на насадке, м водяного столба	H_0	2-15
Плотность технологической воды ρ , т/м ³ , (содержание тонкодисперсных грунтовых частиц c , г/л)	$\rho_1(c_1)$	1,0(0)
	$\rho_2(c_2)$	1,01(25)
	$\rho_3(c_3)$	1,02(50)
	$\rho_4(c_4)$	1,028(75)
	$\rho_5(c_5)$	1,038(100)
	$\rho_6(c_6)$	1,047(125)

Эксперименты проведены в случайной последовательности, при соблюдении геометрического подобия и подобия процессов, протекающих в системах модели и натурального образца согласно главе 2.1.

Содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде соотнесено с плотностью воды, так как вмещающие породы на месторождениях различны (имеют различную плотность), и при одинаковом содержании тонкодисперсных грунтовых частиц в воде ее плотность будет различна. Содержание твердых частиц в воде c и ее плотности ρ произведено для случая, когда удельный вес грунтовых частиц $\gamma=1,6$ т/м³ (таблица 7).

2.3.1 Методика проведения эксперимента для определения дальности полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц

Эксперимент проводился следующим образом. После замера высоты установки гидромонитора в расходную емкость подают воду необходимой по условиям опыта плотности. Контроль плотности осуществляют при помощи ареометра. На гидромониторе устанавливают насадку определенного диаметра (таблица 7). После включения насоса устанавливают напор, согласно исходным данным. Контроль напора осуществляют при помощи манометров. После

достижения установившегося режима работы гидромонитора измеряют максимальную дальность полета струи гидромонитора.

2.3.2 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов показаны на рисунках 13 и 14 (для условий, когда $d_n=7,6$ мм), из которых видно, что изменение дальности полета струи гидромонитора при наличии в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц от напора происходит по нелинейной зависимости и снижает дальность полета струи гидромонитора на 5-9 %.

При этом наибольшее значение наличие в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц имеет при высоких напорах (порядка 9-10 %), при малых напорах изменение длины струи менее значительно – порядка 6-7 %. Увеличение диаметра насадки гидромонитора также ведет к уменьшению максимальной длины струи.

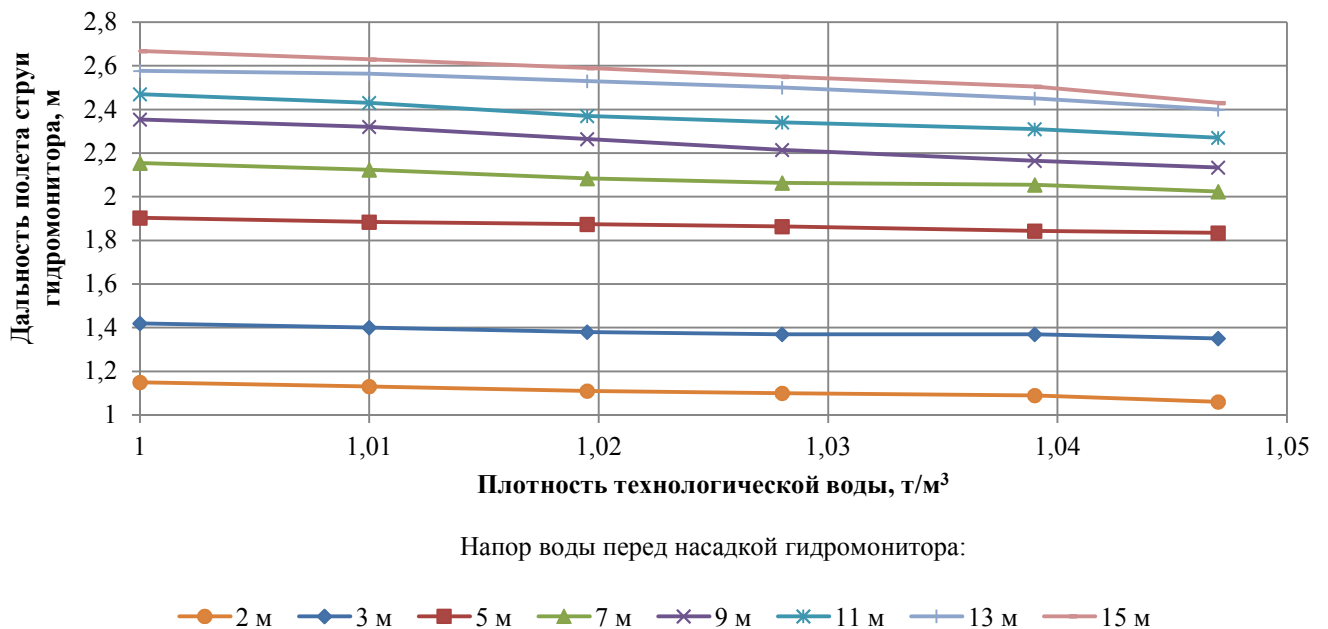


Рисунок 13 – Зависимость дальности полета струи гидромонитора при установке его ствола под углом $\alpha=0^\circ$ к горизонту от плотности (содержания тонкодисперсных грунтовых частиц) технологической воды $\rho(c)$ и напора при диаметре насадки гидромонитора 7,6 мм

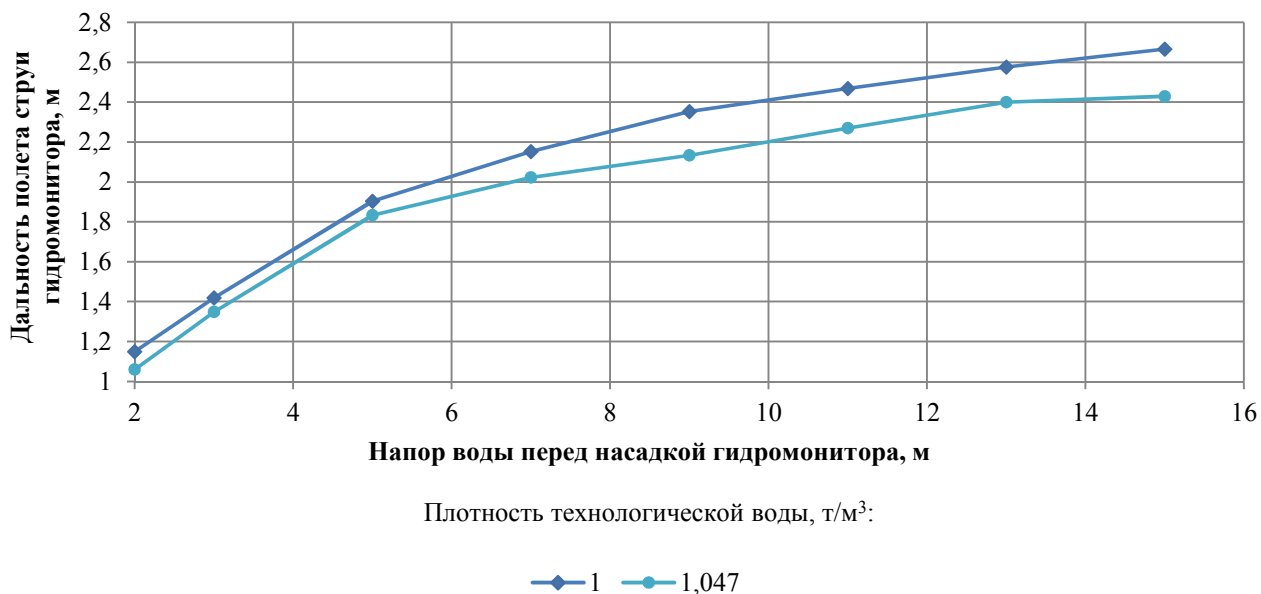


Рисунок 14 – Зависимость дальности полета струи гидромонитора от напора воды перед его насадкой при ее плотности 1 и 1,047 т/м³ при диаметре насадки гидромонитора 7,6 мм

В то же время предыдущие исследования (глава 2.2) показывают, что в тех же условиях с увеличением содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц, сила давления на забой (P , кг/см²) увеличивается [107].

Очевидно, такие результаты объясняются увеличением массы единицы объема воды (то есть ее плотности): влияние ускорения свободного падения увеличивается, сокращая длину струи, но при этом увеличивается инерция и масса воды, воздействующей на забой.

2.3.3 Математическая модель изменения дальности полета струи гидромонитора от наличия в технологической воде тонкодисперсных грунтовых частиц

На основе полученных данных методами статистической обработки возможно составить уравнение вида $l_c = f(H_o, d_n, \rho)$.

Для получения такой зависимости выборка экспериментальных данных, содержащая 161 наблюдение ($n=161$), одну зависимую переменную l_c и три

независимых переменных d_n , ρ и H_o , обработана методами корреляционного и регрессионного анализов.

Из корреляционной матрицы (таблица 8) видно, что максимальную линейную связь с дальностью полета струи гидромонитора со статистической точки зрения имеет напор ($r=0,89$), исследуемые параметры (H_o , d_n , ρ) являются независимыми между собой.

Таблица 8 – Корреляционная матрица данных эксперимента (глава 2.3.2)

Параметр	d_n	H_o	ρ	l_c
d_n	1	0	0	0,066
H_o	0	1	0	0,891
ρ	0	0	1	-0,058
l_c	0,066	0,891	-0,058	1

Диаграммы рассеяния независимых переменных от зависимой представлены на рисунках 13-14, из которых видно, что все независимые переменные, кроме H_o , имеют с зависимой переменной линейную (или близкую к ней) связь. Для учета нелинейной зависимости в уравнение модели намеренно включено слагаемое, содержащее квадрат переменной H_o . В настоящей работе решался вопрос только параметрической идентификации модели [115] со следующей структурой:

$$l_c = b_0 + b_1 \cdot d_n + b_2 \cdot \rho + b_3 \cdot H_o + b_4 \cdot H_o^2. \quad (36)$$

Для построения модели с вышеописанной структурой (36) использован метод регрессионного анализа [116]. Обработка экспериментальных данных проводилась в MSExcel, с использованием инструмента «пакет анализа» [117]. В результате получена регрессионная модель:

$$l_c = 29,4041 + 0,0254 \cdot d_n - 28,5575 \cdot \rho + H_o (0,3842 - 0,0016 \cdot H_o). \quad (37)$$

Линейные коэффициенты модели адекватно отражают физическую картину: с увеличением диаметра насадки и напора увеличивается дальность полета струи, а с увеличением плотности жидкости – дальность полета струи уменьшается.

Коэффициент детерминации и скорректированный с учетом числа независимых переменных коэффициент детерминации модели равны соответственно $R^2=0,9618$ и $R^2_{\text{скорр}}=0,9608$. Данные показатели свидетельствуют о том, что модель хорошо описывает дисперсию в исходных данных.

Модель является статистически значимой по F -критерию, $F > F_{\text{кр}}$ (расчетное значение $F=988,78$; $F_{\text{кр}}(0,95, 4, 157)=0,1769$).

Для определения статистической значимости коэффициентов модели, использован T -критерий, $T_{\text{кр}}(0,05,157)=1,9752$, наблюдаемые значения представлены в таблице 9. Так как $|T| > T_{\text{кр}}$, коэффициенты модели являются статистически значимыми.

Таблица 9 – T -статистики для коэффициентов математической модели (37)

Коэффициент	b_0	$b_1(d_n)$	$b_2(\rho)$	$b_3(H_0)$	$b_4(H_0^2)$
T -статистика	3,7569	4,2141	-3,7453	39,8314	-25,7325

Математическая модель (37) позволяет прогнозировать дальность полета струи гидромонитора с достаточной степенью достоверности для значений: $d_n=52-102$ мм, $H_0=20-150$ м, $\rho=1-1,047$ т/м³.

2.4 Выводы

Определено, что так как напорная вода, подаваемая на гидромонитор при обратном водоснабжении гидромониторной установки, является неоднородной смесью – неньютоновской жидкостью, то расчеты при помощи известных уравнений, основанных на законе изменения количества движения И. Ньютона, для нее не обеспечивают необходимой точности.

Выявлено, что увеличение плотности технологической воды за счет включения в нее тонкодисперсных грунтовых частиц оказывает влияние на характеристики гидромониторной струи и влечет за собой увеличение силы ее давления на забой, которая колеблется в пределах 1-10 % при изменении плотности технологической воды от 1000 до 1,038 т/м³ (соответствует изменению содержания тонкодисперсных грунтовых частиц от 0 до 100 г/л при плотности частиц 1,6 т/м³), то есть влечет за собой увеличение производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора.

Разработана математическая модель, которая позволяет определить и спрогнозировать значение силы давления гидромониторной струи на забой для различных условий технологии отработки месторождений: плотности напорной воды, напора, диаметра насадки гидромонитора и расстояния от забоя. Модель описывает результаты экспериментов с точностью 90-95 %.

Установлено, что применение напорной воды с содержанием в ней тонкодисперсных грунтовых частиц до 100 г/л при отбойке струей гидромонитора дает возможность сокращения необходимого объема воды в пруду-отстойнике оборотного водоснабжения до 78,6 %.

Установлено, что при работе гидромонитора на частично осветленной воде с содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц до 100 г/л при разработке глинистых месторождений абразивный износ гидромониторной установки незначителен и сравним с износом при работе на технически чистой воде.

Выявлено, что наличие тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде оказывает негативное влияние на дальность полета струи при установке ствола гидромонитора под углом порядка ноль градусов, возрастающее с увеличением напора.

Определено, что изменение дальности полета струи гидромонитора от содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц происходит по нелинейной зависимости и описывается полиномиальным уравнением.

Получена математическая модель, позволяющая определить изменение дальности полета струи гидромонитора от наличия в технологической воде

тонкодисперсных грунтовых частиц, диаметра насадки и напора, которая описывает результаты опытов с точностью более 96%.

3 ВЛИЯНИЕ ЭЖЕКТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ КРУПНОСТЬЮ 1,5-4,1 ММ (ТВЕРДЫХ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ) В СТРУЮ ГИДРОМОНИТОРА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОТБОЙКИ ПОРОД

Разработка россыпных месторождений, залегающих в породах с высоким содержанием глины, технологиями, предполагающими предварительное механическое рыхление, связана с определенными сложностями: во время работы часто наблюдается значительное налипание глины на рабочие органы машин, вызывающее простои оборудования и увеличение времени технологических операций [45]. В связи с этим наиболее эффективным способом разработки высокоглинистых россыпных месторождений является отбойка пород струей гидромонитора [41].

При сравнении способов разработки месторождений со вскрышными работами бульдозерным способом и со вскрышей гидравлическим способом с применением бульдозера в качестве вспомогательной техники экономически более эффективным (рентабельным) является второй способ. Кроме того, при работе с большой толщиной илов возможны значительные трудности со вскрышей неплотных, насыщенных водой, иловатых отложений тяжелой бульдозерной техникой. Гидротранспорт илов, напротив, облегчен за счет их хорошей размывистости.

Также в условиях значительного водопритока и обводненности пород обоснована целесообразность применения гидромониторов на вскрышных работах угольных месторождений [118-119], позволяющего значительно сократить не только расходы за счет исключения необходимости осушения месторождения, но и экологическую нагрузку на окружающую среду.

3.1 Исследование отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием в нее твердых абразивных частиц

Увеличение производительности отбойки пород струей гидромонитора возможно различными известными конструктивными и технологическими способами [44, 68, 70-72, 120, 121]. В области обработки материалов известны технологии работы двухфазными струями, состоящими из воды и твердых абразивов, например, станки гидроабразивной резки [73-76]. В горном деле известно применение двухфазных струй [77-84, 93], но для гидромониторов рассмотрено только эжектирование воздуха в напорную струю.

Таким образом, применение двухфазных струй эффективно, но исследований, направленных на изучение влияния эжектирования твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора на производительность отбойки глинистого массива, выявлено не было.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения эжектирования твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора для разработки месторождений, сложенных вмещающими породами с высоким содержанием глин [122-125].

3.1.1 Методика проведения эксперимента для определения влияния эжектирования твердых абразивных частиц в струю гидромонитора на производительность отбойки пород

Эксперименты выполнены с учетом критериев подобия (глава 2.1) при помощи лабораторного стенда [94] (рисунки 3-5) в масштабе 1:10. Исходные данные экспериментов показаны в таблице 10. Для осуществления поставленной задачи разработана конструкция устройства для отбойки пород двухфазным напорным потоком при помощи гидромонитора [126], приведенная на рисунках 15 и 16.

Таблица 10 – Условия проведения экспериментов для определения влияния эжектирования твердых абразивных частиц в струю гидромонитора на производительность отбойки пород

Диаметр насадки гидромонитора, мм	d_n	5,2
		7,6
Напор на насадке гидромонитора, м	H_o	5
Величина разряжения в эжекторе, м	$H_{эж}$	-3,5
Расстояние до забоя, м	L	2,5
Плотность напорной воды, т/м ³	ρ	1,0
Диаметр сопла эжектора, мм	d_c	2,3
Средняя крупность твердых абразивных частиц, мм	$d_{т.ч.}$	0,15
		0,20
		0,26
		0,33
		0,41
Угол между осью гидромониторной струи и линией забоя, град	α	5
		15
		35
		55
		75
		90
Расход твердых абразивных частиц, г/л	$C_{тач}$	5
		10
		15
		20
		23

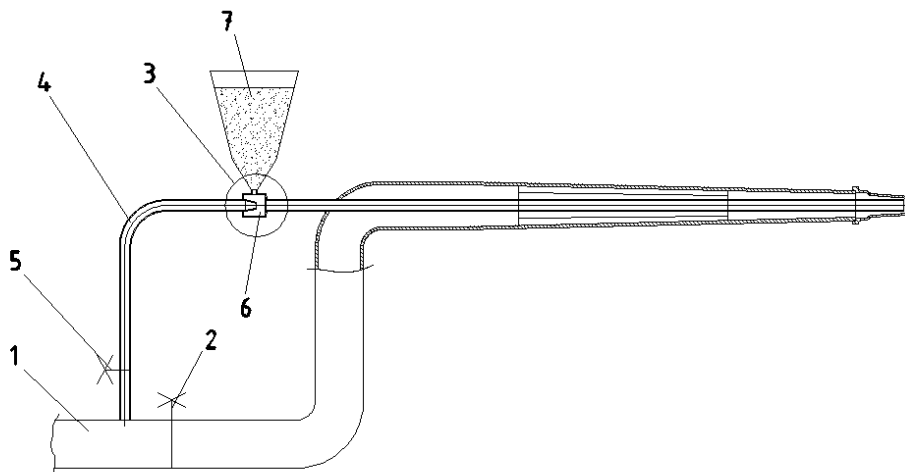


Рисунок 15 – Гидромонитор с эжектирующим приспособлением:

1 – подводный трубопровод; 2 – основная задвижка; 3 – эжектирующее устройство; 4 – водовод; 5 – вентиль; 6 – камера смешивания; 7 – накопитель твердых абразивных частиц

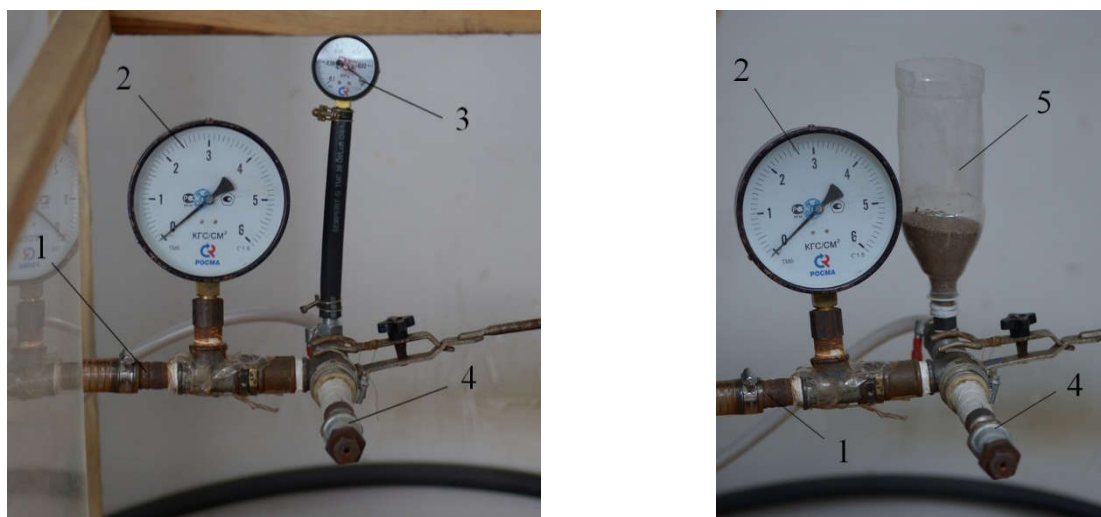


Рисунок 16 – Модель гидромонитора с эжектирующим приспособлением:

1 – подводящий трубопровод; 2 – манометр; 3 – вакуумметр; 4 – ствол модели гидромонитора с насадкой; 5 – накопитель твердых абразивных частиц

Осуществление процесса эжектирования твердых абразивных частиц в камеру смешивания за пределами ствола гидромонитора и подача готовой смеси воды и этих частиц в напорную струю гидромонитора при помощи устройства, показанного на рисунках 15 и 16 [126], позволяет стабилизировать процесс эжектирования, увеличить разрежение в эжектирующем устройстве и не мешает управлению гидромонитором. Готовая смесь эжектированных твердых абразивных частиц с напорной водой подается в напорную струю по трубке, входящей по оси ствола гидромонитора.

При таком варианте достигается наибольшая эффективность подачи частиц в струю гидромонитора, что подтверждается исследованиями, проведенными для устройств гидроабразивной резки [127]: чем ближе к центру, тем больше энергии струя воды передает твердым абразивным частицам, тем больше эффективность работы.

Для чистоты эксперимента выбран образец без примесей, состоящий только из глины. Материал образца – лонтоваские глины кембрия, так называемые синие, или голубые, глины, добываемые в Ленинградской области на Чкаловском месторождении с глубины порядка 80 м. По физическим свойствам синие глины

характеризуются как уплотненные и поэтому имеют сравнительно малую естественную влажность (около 16%); плотность глин $2,25 \text{ т/м}^3$, пористость – порядка 30%, предел текучести при растяжении – 1,8 МПа, модуль Юнга – $4,4 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона – 0,35, предел прочности при сжатии – 15,38 МПа.

По гранулометрическому составу синие глины классифицируются как глины пылеватые. Содержание глинистых фракций изменяется от 30 до 60%, пылеватых фракций — от 40 до 50%, песчаных фракций – нет.

По своему минеральному составу синие глины полиминеральны: в их составе обнаружено 18 минералов. Основное их число — легкие минералы, такие, как кварц (74%), полевошпат, хлорит, глауконит, слюда и др. Среди минералов тяжелой фракции глин встречаются пирит, турмалин, роговая обманка и некоторые другие. Тонкая фракция представлена типичными глинистыми минералами (в порядке преобладания) – гидрослюдой, каолинитом, монтмориллонитом. Таким образом, лонтоваские глины кембрия можно отнести к типу монтмориллонитово-гидрослюдистых.

Следует отметить, что такие грунты, с точки зрения технологии разработки месторождений, относятся к весьма трудноразмываемым.

Размер эжектируемых частиц (таблица 10) обусловлен обеспечением эффективного действия и стабильного истечения струи из эжектора и принимается по общепринятым нормам порядка 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора.

В [128] отмечаются различия при разрушении абразивной струей хрупких и вязких материалов: при хрупких – предпочтительно использование шарообразных (например, свинцовая дробь или стеклянные шарики) абразивов, которые как бы раскалывают материал в месте реза. При вязких материалах целесообразно применение частиц заостренной формы, которые действуют как «острозаточенное плоское лезвие». Хеслинг [129], обстоятельно исследовав применение различных видов абразивов для разрушения большого числа материалов, приходит к выводу, что для разрушения горных пород лучше всего подходит кварцевый песок. Исходя

из этого, в работе приняты твердые абразивные частицы неправильной формы плотностью $\gamma=1,7 \text{ т/м}^3$ (кварцевый песок).

Методика проведения экспериментов при помощи гидромонитора (рисунок 15) следующая: через кран 5 подают воду на эжектор 3. После стабилизации режима потока замеряют величину разряжения (вакуумметр 3, рисунок 16), затем подают основной поток на гидромонитор, используя кран 2, устанавливая необходимый напор на насадке гидромонитора согласно таблице 10, контролируя его манометром 2 (рисунок 16). Заменяют вакуумметр 3 на накопитель для твердых абразивных частиц 7.

Твердые абразивные частицы подаются в эжектор через загрузочное отверстие диаметром 7 мм. Навеску твердых абразивных частиц (таблица 10) помещают в накопитель 7 (рисунок 15), замеряют время ее истечения. Одновременно за этот же период замеряют силу воздействия струи на забой. Для определения количества горной массы, отбиваемой за время каждого опыта, образец горной массы взвешивают, устанавливают на место забоя, размывают, еще раз взвешивают, определяют разницу в весе – количество отбитой горной массы.

3.1.2 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов показаны в таблице 11 и на графиках (рисунки 17-18). По результатам анализа полученных данных можно сказать, что применение эжектирования твердых абразивных частиц в гидромониторную струю позволяет увеличить производительность отбойки от 2,11 до 2,98 раза при напоре 5,0 м и диаметрах насадки 5,2 и 7,6 мм соответственно и содержании твердых абразивных частиц 6,5 г/л.

При этом сила воздействия на забой (рисунок 18) увеличивается относительно незначительно (6,8-15,2 %).

Таблица 11 – Результаты экспериментов

Диаметр насадки, d_n , мм	Размер твердых абразивных частиц, $d_{тч}$, мм	Относительная производительность отбойки пород гидромонитором ΔQ , %					
		Угол между осью струи и линией забоя α , град					
		5	15	35	55	75	90
5,2	0,15	171,4	195,7	201,0	197,5	194,8	189,2
	0,20	179,4	203,7	209,0	205,5	202,8	197,1
	0,26	187,1	211,4	216,8	213,3	210,6	204,9
	0,33	191,9	216,2	221,5	218,0	215,4	209,7
	0,41	193,7	218,0	223,3	219,8	217,2	211,5
7,6	0,15	229,6	282,2	292,7	285,3	279,7	269,9
	0,20	238,5	291,1	301,6	294,2	288,6	278,7
	0,26	248,9	301,5	312,0	304,6	299,0	289,1
	0,33	253,9	306,5	317,0	309,6	304,0	294,2
	0,41	256,6	309,2	319,7	312,3	306,7	296,9

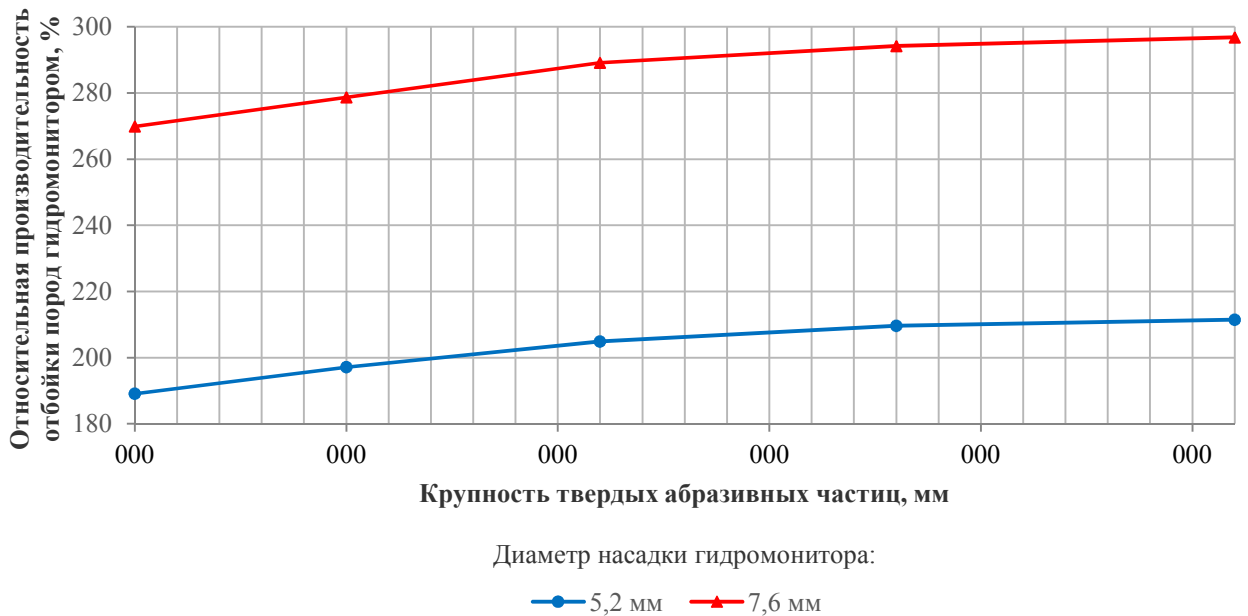


Рисунок 17 – Отклонение производительности отбойки пород гидромонитором в зависимости от крупности эжектируемых твердых абразивных частиц и диаметра насадки (за 100 % принята производительность отбойки пород гидромонитором при использовании напорной воды без добавления твердых абразивных частиц)

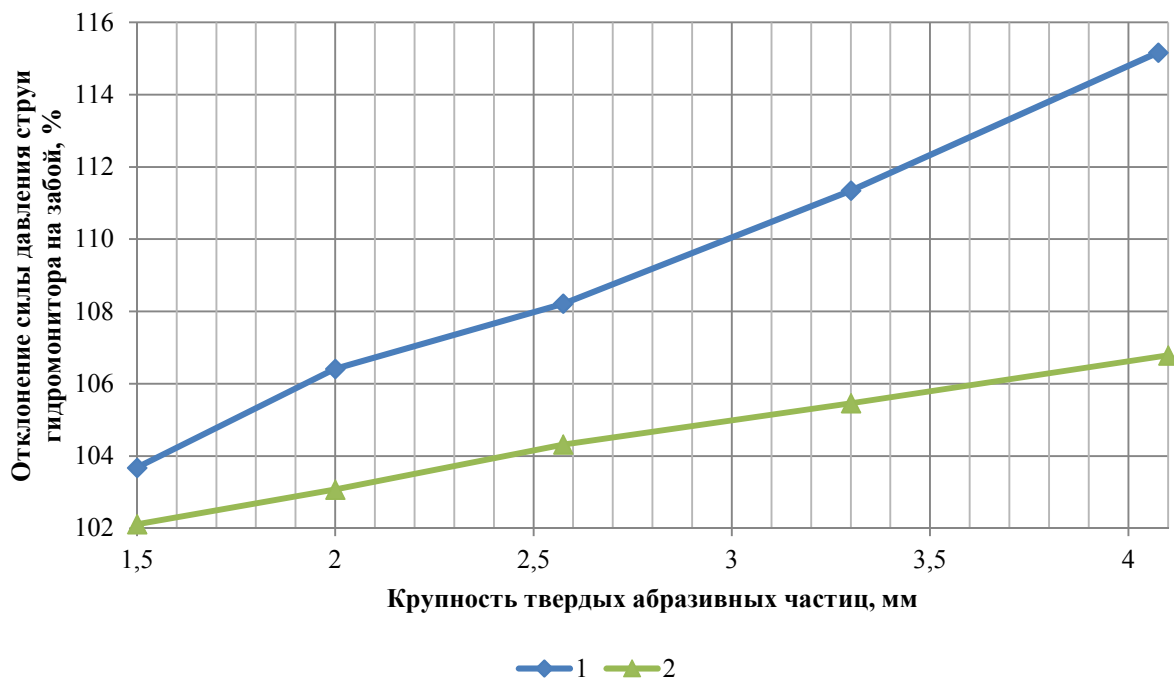


Рисунок 18 – Отклонение силы давления струи гидромонитора на забой (Р, %) в зависимости от размера эжектируемых твердых абразивных частиц и диаметра насадки гидромонитора (за 100% принята производительность гидромонитора при использовании напорной воды без добавления твердых абразивных частиц):

1 – 7,6 мм, 2 – 5,2 мм

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что в основе увеличения производительности отбойки в условиях эжектирования твердых абразивных частиц в напорный поток в стволе гидромонитора в большей степени лежит абразивное воздействие гидромониторной струи.

Механизм этого воздействия может быть описан следующим образом: внедряясь в мягкий глинистый массив, твердые абразивные частицы нарушают трудноразрываемую сплошность (монолитность) глины, образуют лунки и места концентрации напорного воздействия и проникновения водной струи в глубь массива [44, 130]. Чем больше в массиве вмещающих горных пород твердых несцементированных частиц, тем выше его размываемость.

Рассмотренный эффект значительно различается в зависимости от применяемого диаметра насадки гидромонитора – при большей насадке производительность отбойки выше.

При возрастании размера твердых частиц наблюдается снижение динамики увеличения производительности отбойки. Этот эффект также отмечает в своих исследованиях Гриффитс [131] и объясняет это невозможностью для данной конструкции гидроабразивного инструмента ускорять частицу абразива до необходимой скорости. То же обнаружили Фабер и Оувенах [132]. Тихомиров и Гуенко [133], кроме этого, отмечают необходимость концентрации абразива в струе от 10 до 50 %.

Также из графиков, показанных на рисунке 17, очевидно, что эжектирование твердых абразивных частиц в гидромониторную струю дает резкий скачок увеличения производительности отбойки (2 и 3 раза при содержании твердых абразивных частиц 6,5 г/л и в зависимости от диаметра насадки гидромонитора). При этом эффект от увеличения размера частиц менее выражен.

Поэтому при разработке месторождений при помощи предложенного устройства [126] (рисунки 15 и 16) соблюдение крупности твердых абразивных частиц, подаваемых в струю гидромонитора, не требуется. Достаточно не превышать максимальный размер частиц, исходя из размеров эжектирующего приспособления и критериев его работы. Этот размер, по общепринятым нормам, составляет порядка 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора.

Коэффициент эжекции, характеризующий работу эжектора и представляющий собой отношение массового расхода эжектируемых твердых абразивных частиц к массовому расходу воды, показан на графике (рисунок 19), где видно, что массовая доля твердых абразивных частиц по отношению к массовой доле воды увеличивается. При этом интенсивность увеличения выше для меньшего диаметра насадки. В то же время объемный расход твердых абразивных частиц с увеличением крупности, определенный из коэффициента эжекции, остается прежним. Однако инерция более крупных частиц выше и, как видно на графике (рисунок 17), производительность отбойки струей гидромонитора растет.

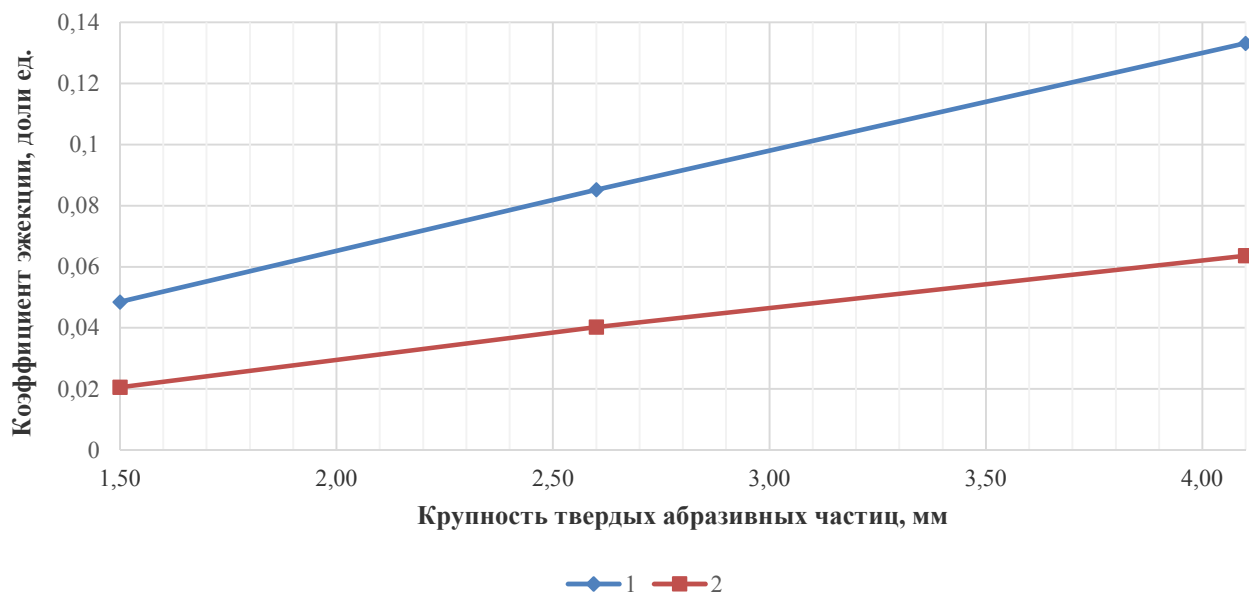


Рисунок 19 – Значения коэффициента эжекции в зависимости от крупности твердых абразивных частиц и диаметра насадки:
1 – 5,2 мм, 2 – 7,6 мм

В [134] отмечается, что эффективная передача количества движения от водной струи к абразивным частицам обеспечивается при отношении массовых расходов абразивных частиц к воде в диапазоне 0,1-0,3. При этом условия конструктивные параметры устройства не влияют на производительность отбойки. В [135] этот параметр устанавливается равным 0,19, а в [136] – 0,33.

В то же время в [137] установлено, что не существует никакой фиксированной оптимальной величины расхода абразива для резания какого-либо конкретного материала, так как она является функцией несущей способности водяной струи, поступающей в смесительную камеру, и эффективности, с которой энергия воды может быть передана абразиву. Коэффициент эжекции – параметр, характеризующий каждый конкретный инструмент и применяемый в работе абразив [138].

Из графика, показанного на рисунке 19, видно, что коэффициент эжекции гидромонитора с эжектирующим приспособлением, при помощи которого проведены исследования в настоящей работе, равен 0,02-0,13, что вполне

соотносится с известными наблюдениями, выполненными для инструментов гидроабразивной резки.

Авторами [132] указывается, что при разрушении абразивной струей хрупких материалов предпочтительно использование абразивных струй, подаваемых под прямым углом к обрабатываемому материалу, а при вязких материалах – под острым углом: в таком случае действие частиц абразива более эффективно, они создают борозды в разрушаемом материале, вынося с собой его часть.

В связи с этим проведена серия экспериментов с целью определения зависимости производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора от угла встречи струи с поверхностью забоя (α). Для исследования приняты углы 5, 15, 35, 55, 75, 90 град. Результаты показаны на графике (рисунок 20) и в таблице 11.

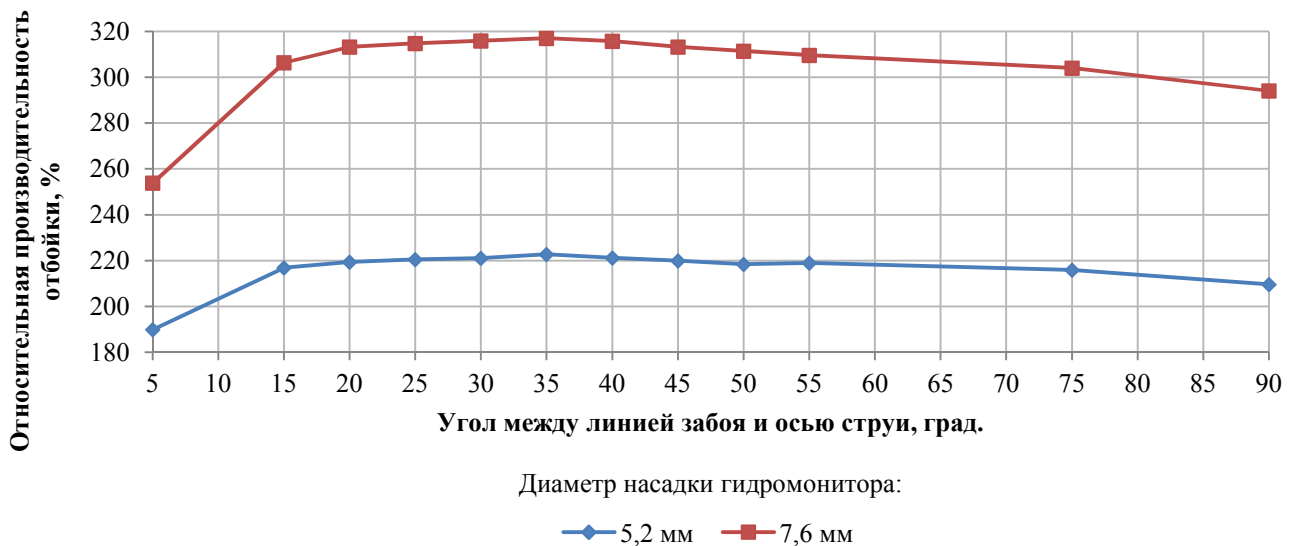


Рисунок 20 – Относительная производительность отбойки пород гидромонитором в зависимости от угла встречи струи с поверхностью забоя и диаметра его насадки при крупности эжектируемых твердых абразивных частиц 0,33 мм (за 100 % принята производительность гидромонитора при использовании напорной воды без добавления твердых абразивных частиц)

Исходя из полученных результатов можно заключить, что максимальная производительность отбойки достигается при направлении гидромониторной струи на забой под углом порядка 35°.

Поэтому для разработки глинистого массива целесообразно применять отбойку напорной струей гидромонитора с эжектированием твердых абразивных частиц при размыве уступа боковым или попутным забоем. В то же время при размыве уступа встречным забоем применение абразивной гидромониторной струи также приведет к ощутимому увеличению производительности отбойки.

Содержание твердых абразивных частиц в напорной струе гидромонитора оказывает значительное влияние на интенсивность отбойки пород. Вышеприведенные данные справедливы для содержания этих частиц в струе гидромонитора 6,5 г/л для диаметра насадки 5,2 мм и 7,6 мм.

Значения производительности отбойки при других содержаниях твердых абразивных частиц, по данным проведенных экспериментов, показаны на графике (рисунок 21 и Приложение Б), где видно, что содержание твердых абразивных частиц в струе гидромонитора оказывает существенное влияние на производительность отбойки пород.

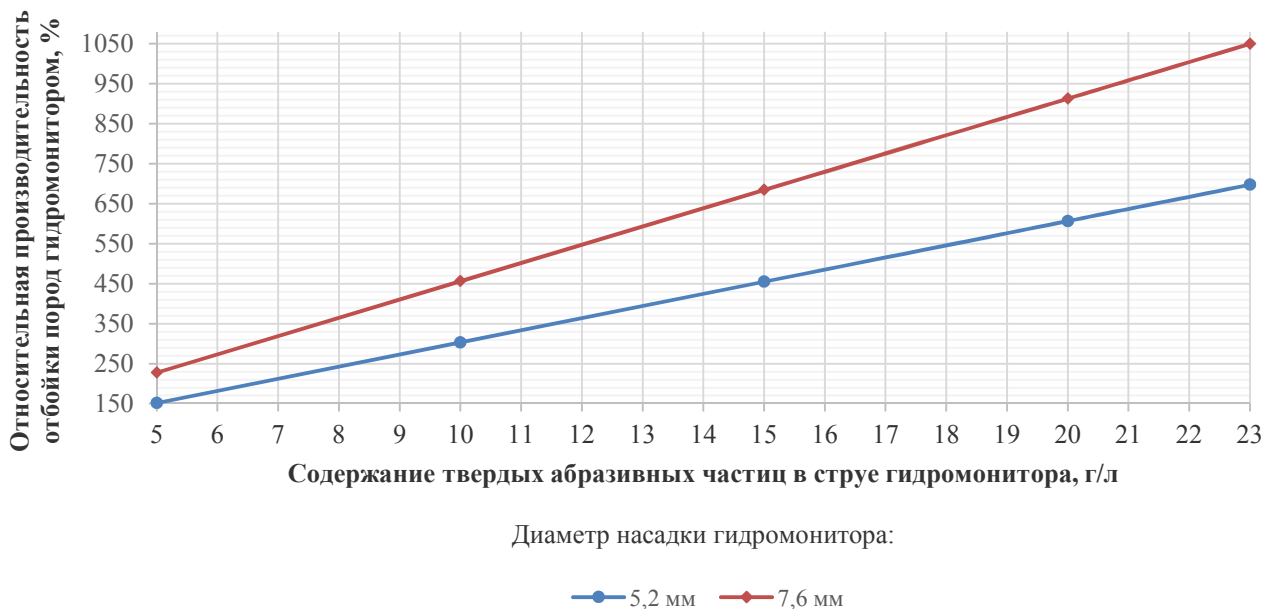


Рисунок 21 – Относительная производительность отбойки пород от содержания твердых абразивных частиц в струе гидромонитора при различных диаметрах насадки (за 100 % принята производительность при использовании чистой воды)

Однако высокие значения производительности отбойки сопряжены со значительным расходом твердых абразивных частиц, ведущим к удорожанию всей технологии.

В связи с этим оптимальные значения содержания твердых абразивных частиц в напорной струе гидромонитора целесообразно находить исходя из необходимой производительности отбойки и экономической целесообразности.

3.1.3 Математическая модель относительной производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора от эжектирования в нее твердых абразивных частиц

Для прогнозирования и анализа исследуемых процессов по результатам проведенных экспериментов (глава 3.1.2) составлена математическая модель.

Изменение производительности отбойки пород гидромонитором от размера твердых абразивных частиц, угла встречи струи с поверхностью забоя и диаметра насадки гидромонитора представляет собой полиномиальную зависимость и показано на рисунках 22-23.

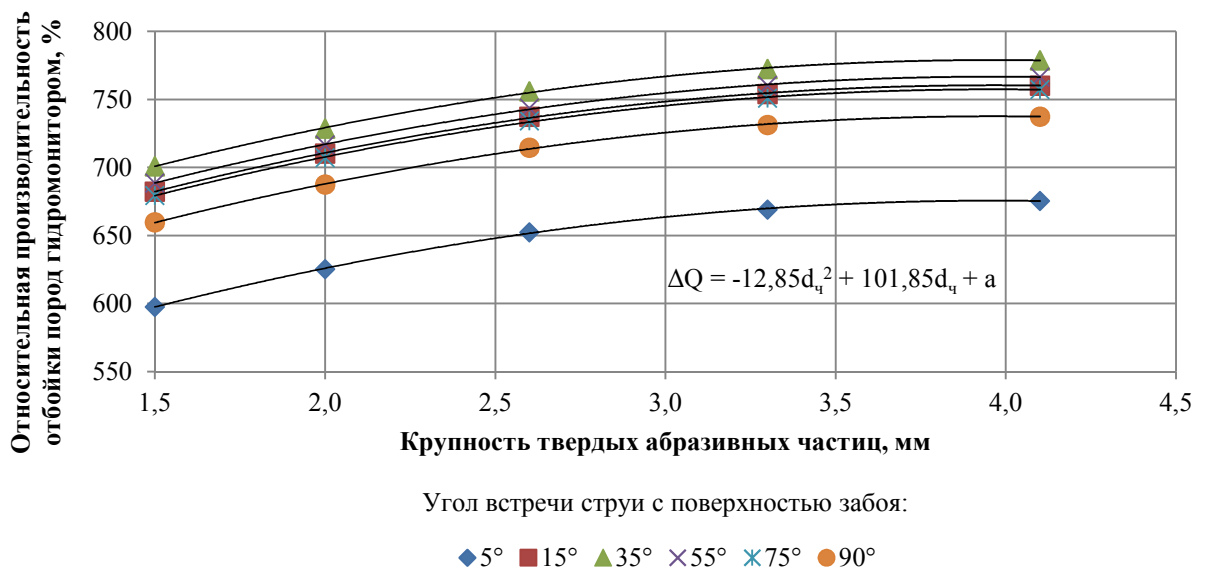


Рисунок 22 – Отклонение производительности отбойки пород гидромонитором от крупности твердых абразивных частиц при углах встречи струи с поверхностью забоя 5-90 градусов и диаметре насадки 52 мм

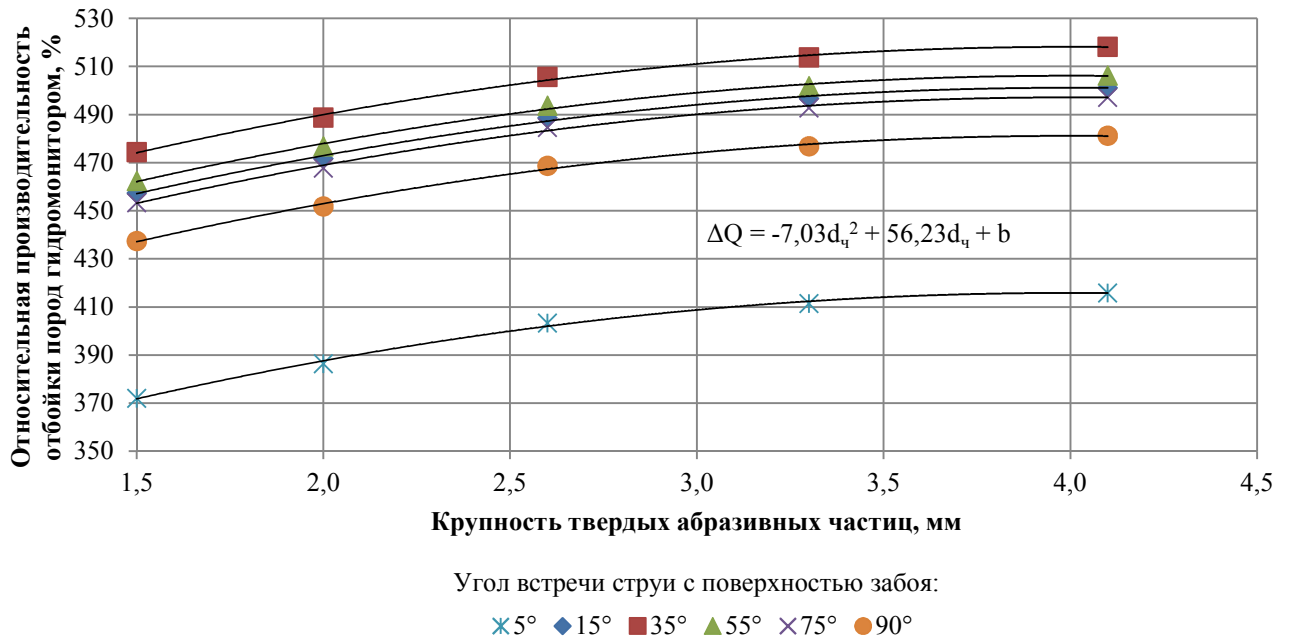


Рисунок 23 – Отклонение производительности отбойки пород гидромонитором от крупности твердых абразивных частиц при углах встречи струи с поверхностью забоя 5-90° и диаметре насадки 76 мм

Исследуя полученные графики, можно сделать вывод, что отклонение производительности отбойки пород струей гидромонитора зависит от размера твердых абразивных частиц и может быть определено по уравнению:

$$\Delta Q = (a \cdot d_{\text{ч}}^2 + b \cdot d_{\text{ч}} + C) \cdot 1,05, \% \quad (38)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора (уравнения (39)-(40)); $d_{\text{тч}}$ – размер твердых абразивных частиц, мм; C – эмпирический коэффициент, зависящий от диаметра насадки гидромонитора и угла между осью струи и линией забоя (уравнение (40), рисунок 24).

Изменение коэффициентов a и b прослеживается по линейной зависимости:

$$a = 0,290 \cdot d_{\text{тч}} - 27,37; \quad (39)$$

$$b = -0,265 \cdot d_{\text{тч}} + 83,29. \quad (40)$$

Коэффициент C описывает интенсивность размыва при различных углах между осью гидромониторной струи и линией забоя (α , град). При этом определено, что производительность размыва постепенно возрастает с увеличением угла α и достигает наибольшей эффективности при α порядка 35° . Затем следует снижение эффективности размыва. Закономерность, описываемая коэффициентом C при разных диаметрах насадки, показана на графиках (рисунок 24).

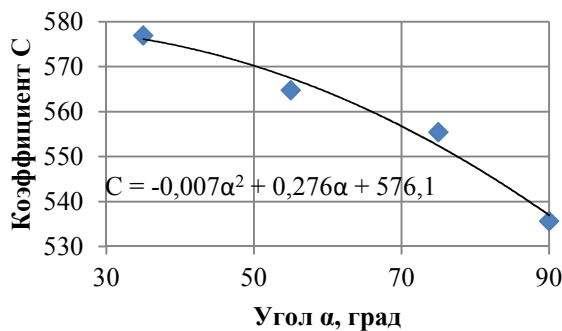
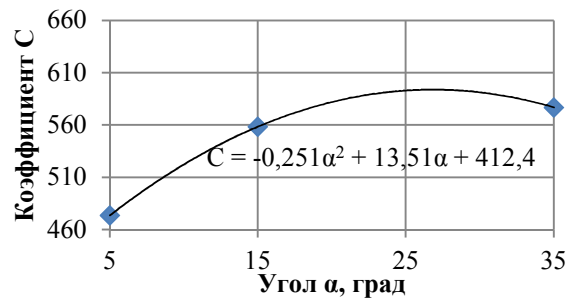
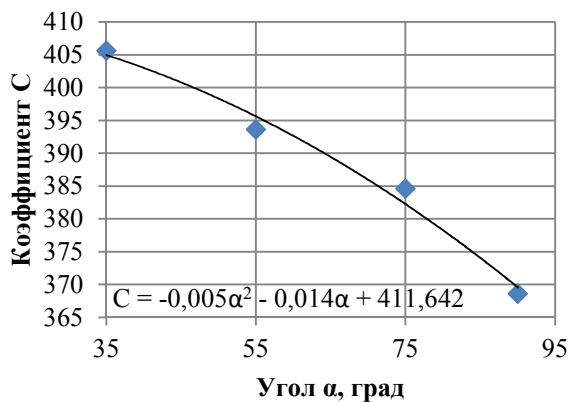
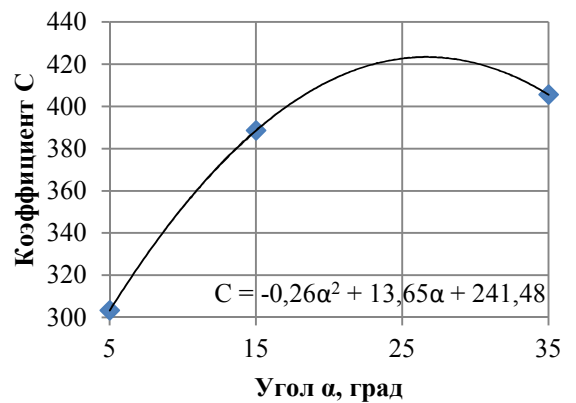
а) при диаметре насадки 52 мм и $\alpha \geq 19^\circ$ б) при диаметре насадки 52 мм и $\alpha < 19^\circ$ в) при диаметре насадки 76 мм и $\alpha \geq 19^\circ$ г) при диаметре насадки 76 мм и $\alpha < 19^\circ$

Рисунок 24 – График зависимости коэффициента C от угла между осью струи и линией забоя (α)

Изменение эмпирического коэффициента C от угла между осью гидромониторной струи и линией забоя прослеживается по полиномиальной зависимости второго порядка и описывается уравнением:

$$C = a_1 \cdot \alpha^2 + a_2 \cdot \alpha + a_3, \quad (41)$$

где α – угол между осью гидромониторной струи и линией забоя, град;
 $a_1 \dots a_3$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора и угла между осью гидромониторной струи и линией забоя (40).

$$a_1 \dots a_3 = A \cdot d_H + B, \quad (42)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от угла между осью гидромониторной струи и линией забоя, показанные в таблице 12.

Таблица 12 – Значения эмпирических коэффициентов A и B уравнения (42)

Определяемый коэффициент уравнения (41)	$\alpha < 19^\circ$		$\alpha \geq 19^\circ$	
	A	B	A	B
a_1	-0,00025	-0,23850	0,00010	-0,01193
a_2	0,00700	13,16000	-0,01450	1,00108
a_3	-8,54620	839,71010	-8,22290	987,24477

Преобразуя уравнения (37)-(41), получим математическую модель относительной производительности отбойки пород от эжектирования в струю гидромонитора твердых абразивных частиц:

$$\Delta Q = ((0,290 \cdot d_H - 27,37) \cdot d_{тч}^2 + (-0,265 \cdot d_H + 83,29) \cdot d_{тч} + C) \cdot 1,05, \% \quad (43)$$

где коэффициент C зависит от угла между линией забоя и осью струи гидромонитора α :

$$C = (-0,00025 \cdot d_H - 0,23850) \cdot \alpha^2 + (0,00700 \cdot d_H + 13,16) \cdot \alpha + (-8,5462 \cdot d_H + 839,71010) \quad \text{при } \alpha < 19^\circ; \quad (44)$$

$$C = (0,00010 \cdot d_H - 0,01193) \cdot \alpha^2 + (-0,01450 \cdot d_H + 1,00108) \cdot \alpha + (-8,22290 \cdot d_H + 987,24477) \quad \text{при } \alpha \geq 19^\circ. \quad (45)$$

Полученная математическая модель позволяет прогнозировать влияние эжектирования твердых абразивных частиц в струю гидромонитора на производительность отбойки пород напорной струей гидромонитора с достаточной степенью достоверности. Погрешность составляет 5-10 % для значений: $d_H=52-76$ мм, $H_0=50$ м, $H_{эж}=35$ м, $L=25$ м, $d_c=23$ мм, $d_{т.ч.}=1,5-4,1$ мм, $\alpha=5-90^\circ$.

Результаты лабораторных исследований сопоставлены с натурными, следует отметить их высокую сходимость, что подтверждено внедрением на ООО «Наровчатский карьер» (Приложение В).

3.3 Абразивный износ деталей гидромониторной установки эжектированными твердыми абразивными частицами

В настоящем исследовании при работе гидромонитора с применением эжектирования твердых абразивных частиц в струю гидромонитора в качестве этих частиц используется кварцевый песок крупностью 1,5-4,1 мм. Такой материал относится к среднеабразивным (IV класс – мелкозернистые песчаники, жильный кварц), в зависимости от крупности может быть отнесен к III классу – ниже средней абразивности (кварцевые песчаники) или к V классу – выше средней абразивности (кварцевые крупнозернистые песчаники).

Кроме абразивности на износ оборудования значительное влияние оказывает скорость движения потока напорной воды в гидромониторе. Исходя из этого, наибольшему износу будет подвергаться насадка гидромонитора, так как скорость воды в ней максимальна, а процесс износа ствола гидромонитора будет подобен процессу гидроабразивного износа в трубах [48].

С явлениями значительного абразивного износа сталкиваются также и при гидроструйной цементации горных пород [139], когда насадка гидромонитора подвергается износу водоцементной суспензией плотностью $\rho=2,0 \text{ т/м}^3$, соответствующей массовому соотношению воды и цемента 1:1. Проблему быстрого износа в данном случае решают путем изготовления насадки из твердого сплава ВК8.

При работе гидромонитора с эжектированием твердых абразивных частиц, в случае использования стандартных насадок, их износ возможно принимать, как 20% за ≤ 100 часов работы (по данным [140]).

В настоящем диссертационном исследовании рассмотрено устройство, показанное на рисунке 15 [126], где торец трубки эжектирующего приспособления расположен в непосредственной близости от внешнего края насадки гидромонитора. Отношение их диаметров составляет 0,5-0,57 (согласно [141]). Исходя из такого расположения эжектирующей трубки следует, что абразивная струя с твердыми абразивными частицами, истекающая из этой трубки, не будет достигать насадки гидромонитора, так как ее диаметр на этом расстоянии будет значительно меньше диаметра насадки [44]:

$$D = d_0 + 0,0054 \cdot v_0^{1,5} \cdot d_0^{1,15} \cdot l^{0,6}, \text{ м} \quad (46)$$

где d_0 – диаметр трубки эжектирующего устройства, м; v_0 – скорость истечения струи из насадки, м/с; l – расстояние от насадки, м.

$$D = 0,023 + 0,0054 \cdot 29,75^{1,5} \cdot 0,023^{1,15} \cdot 0,05^{0,6} = 0,025, \text{ м}. \quad (47)$$

Расчет при помощи уравнения (46) показывает, что при выходе из насадки диаметр абразивной струи, истекающей из трубки эжектирующего устройства, составит 25 мм (47) при диаметре насадки гидромонитора 52 мм. Таким образом, при эжектировании твердых абразивных частиц с применением рассмотренного устройства (рисунок 15, [126]) абразивный износ насадки гидромонитора наблюдаться не будет, так как абразивные частицы при расположении трубки

эжектирующего устройства в непосредственной близости от внешнего края насадки гидромонитора не будут соприкасаться с насадкой.

3.4 Выводы

Установлено, что эжектирование твердых абразивных частиц при отбойке пород струей гидромонитора для разработки глинистых месторождений практически возможно и эффективно.

Установлено, что применение предлагаемого устройства [126] (обустройство эжектора за пределами ствола гидромонитора и внедрение готовой смеси воды и твердых абразивных частиц в центр струи гидромонитора) позволяет наиболее эффективно передавать энергию воды твердым абразивным частицам, стабилизировать эжекцию, предупредить дополнительную эрозию твердыми частицами внутренних стенок ствола гидромонитора.

Определено, что эжектирование твердых абразивных частиц в напорную воду посредством указанного устройства позволяет размывать грунты, относящиеся к трудноразмываемым, с меньшим, чем рекомендовано традиционной технологией, напором (более чем в 2 раза), что, в свою очередь, ведет к сокращению удельного расхода напорной воды и электроэнергии, площади, занимаемой прудами-отстойниками оборотного водоснабжения, и, как следствие, увеличению экологичности отбойки.

Установлено, что увеличение производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора по горной массе за счет эжектирования в напорный поток твердых абразивных частиц возможно в 4,8-7,4 раза (при содержании твердых абразивных частиц 23 г/л).

Определено, что относительная производительность отбойки пород при эжектировании твердых абразивных частиц в струю гидромонитора в значительной степени зависит от количественных значений содержания этих частиц в струе.

Определено, что размер эжектируемых частиц не имеет большого значения для производительности отбойки. Такое условие делает предлагаемые решения технологичными: в условиях горнодобывающего предприятия отпадает необходимость классификации твердых абразивных частиц по размеру (достаточно соблюдать крупность, отвечающую общепринятым нормам: порядка 10-30%

диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора), что в том числе снижает трудозатратность и необходимое время, а в конечном итоге себестоимость технологических решений с применением эжектирования твердых абразивных частиц относительно традиционной технологии ведения горных работ.

Предложено расход твердых абразивных частиц определять исходя из необходимой (принятой) производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора (рисунок 21 и Приложение Б). Размер и количество эжектируемых частиц ограничены эжектирующей способностью устройства. При этом оптимальные параметры работы зависят от конструктивных параметров применяемого устройства и свойств твердых абразивных частиц.

Установлено, что применение предлагаемых технологических решений наиболее эффективно в случае отбойки пород напорной струей гидромонитора при размыве уступа попутным или боковым забоем с углом встречи струи с поверхностью забоя порядка 35° , но не исключает применение других вариантов отбойки, которые также позволяют достичь высоких результатов по сравнению с традиционной технологией.

Предложена математическая модель, посредством применения которой возможно прогнозирование и анализ увеличения производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора от применения эжектирования твердых абразивных частиц для изменяющихся диаметра насадки и угла встречи струи с поверхностью забоя. Полученная математическая модель описывает выявленные закономерности с достаточной степенью достоверности. Погрешность составляет 5-10 %.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОТБОЙКЕ ПОРОД ГИДРОМОНИТОРОМ ПРИ СОДЕРЖАНИИ В ЕГО СТРУЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

4.1 Технологические решения по отбойке пород с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора

4.1.1 Общие положения

На основе проведенных исследований (глава 2) предложены решения, применимые для разработки месторождений с использованием отбойки пород гидромонитором, оборотной схемой водоснабжения из прудов-отстойников и значительным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в разрабатываемых грунтах.

Отбойку пород, исходя из полученных решений (глава 2), возможно вести как на вскрышных, так и на добычных работах. Однако, как показывают исследования (глава 1, [31-36, 40]), большие содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде негативно сказываются на процессе обогащения с применением гравитационных методов (шлюзов). Поэтому для добычных работ рекомендуется ограничивать содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде до 60 г/л [40].

Для проведения вскрышных работ содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде рекомендуется ограничивать значениями 100 г/л, что обусловлено в основном резким увеличением абразивного износа деталей машин и механизмов (главы 1.1 и 2.2.5).

Отличительной особенностью указанных технологических решений является подача технологической воды на гидромонитор с заданным количеством тонкодисперсных грунтовых частиц в ее составе. Накопление этих частиц в

технологической воде происходит естественным путем в течение промывочного сезона.

4.1.2 Методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде на конец промывочного сезона при применении средств гидромеханизации

Применение результатов исследований (глава 2) на горном предприятии возможно путем реализации следующей методики.

На стадии планирования горных работ изучают данные месторождения: гранулометрический состав либо данные наблюдений за накоплением тонкодисперсных грунтовых частиц в пруду-отстойнике в предыдущие сезоны (используют уже имеющиеся сведения или специально проводят замеры).

Пример изменения содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника в течение промывочного сезона, который равен 200 дней, показан на рисунке 25, где видно, что изменение содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника происходит нелинейно.

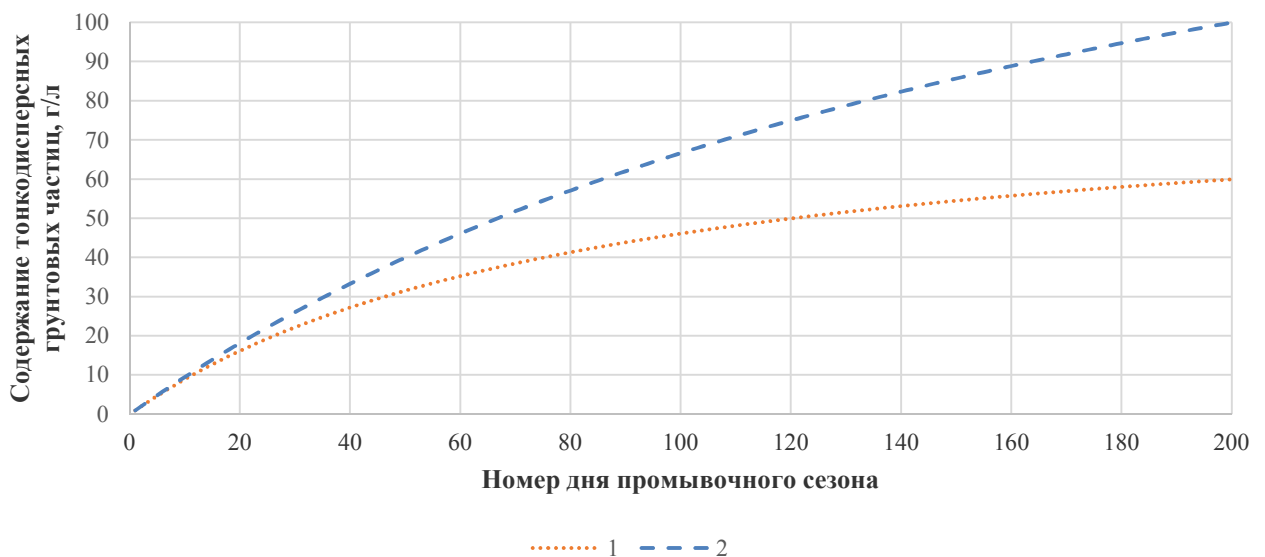


Рисунок 25 – Изменение содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника в течение промывочного сезона при ограничении их содержания:

1 – до 60 г/л; 2 – до 100 г/л

При помощи уравнения (31) строят график изменения производительности отбойки пород за промывочный сезон, выбирают приемлемое для предприятия соотношение производительности отбойки и содержания тонкодисперсных грунтовых частиц.

На графике (рисунок 26) показан пример рассчитанной при помощи уравнения (31) зависимости производительности отбойки пород струей гидромонитора от содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц. На графике видна область изменения производительности отбойки пород струей гидромонитора для добычных работ – при ограничении содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц до 60 г/л и для вскрышных работ – до 100 г/л (выделено штриховкой).

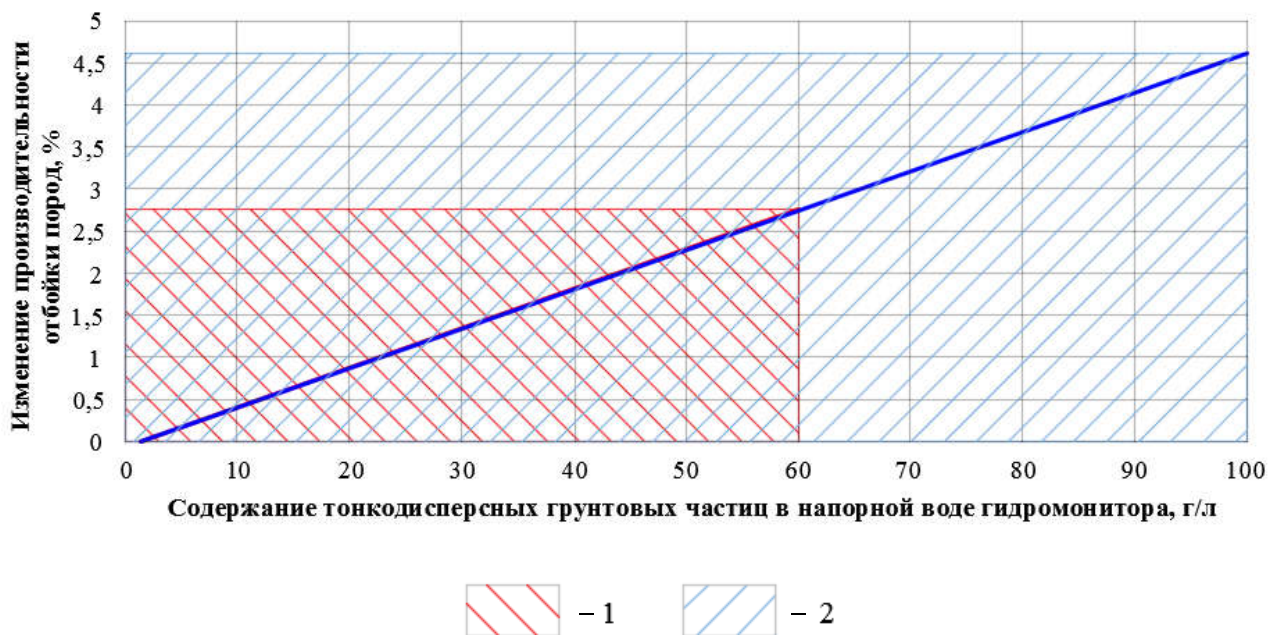


Рисунок 26 – Изменение производительности отбойки пород гидромонитором от содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде (за 100 % принята производительность отбойки пород гидромонитором технически чистой водой). Содержание тонкодисперсных грунтовых частиц:
1 – до 60 г/л (область производства добычных работ); 2 – до 100 г/л (область производства вскрышных работ)

Так как накопление тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде пруда-отстойника происходит постепенно и естественным путем, содержание в ней тонкодисперсных грунтовых частиц будет увеличиваться в течение промывочного сезона и достигнет максимальных значений в конце него. Пропорционально будет увеличиваться производительность отбойки пород. В связи с этим целесообразно говорить о средней за сезон производительности отбойки.

Управление содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде возможно корректированием объема воды в пруду-отстойнике.

После определения (при помощи традиционной методики, но с учетом большего содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде) необходимого объема пруда-отстойника принимается, каким образом будет размещен рассчитанный объем технологической воды. На стадии проектирования предприятия – задаются необходимые размеры пруда-отстойника. В случае, когда технологию предполагается применять на действующем предприятии, возможно неполное заполнение имеющегося пруда-отстойника.

Изменение необходимого объема воды в пруду-отстойнике (что приведет и к изменению его размеров) для обеспечения заданного содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде показано на рисунке 12, глава 2.2.4.2.

Определить необходимое количество воды можно при помощи уравнения (35), учитывающего содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника на конец промывочного сезона.

Установление более высоких предельных значений содержания тонкодисперсных грунтовых частиц приведет к уменьшению необходимого объема воды в пруду-отстойнике.

Таким образом, положительный эффект от реализации предлагаемой методики заключается в сокращении необходимого объема воды (глава 2.2.4.2), влекущего за собой уменьшение площади пруда-отстойника и отчуждаемых для

этого земель; повышении производительности отбойки пород и сокращении удельного расхода воды на отбойку пород.

4.1.3 Методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде в течение промывочного сезона при применении средств гидромеханизации

Также возможно производить отбойку пород напорной водой с заданным содержанием в ней тонкодисперсных грунтовых частиц на протяжении всего промывочного сезона. Для этого, как и в главе 4.1.2, необходимо при помощи уравнения (31) определить соотношение содержания тонкодисперсных грунтовых частиц и производительности отбойки пород для рассматриваемого предприятия.

Оперируя полученными данными и данными гранулометрического состава либо наблюдениями за накоплением тонкодисперсных грунтовых частиц в прудах-отстойниках предприятия, определить минимальное время накопления заданного содержания тонкодисперсных грунтовых частиц и соорудить пруд-отстойник с этими параметрами.

Для поддержания заданного содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в пруду-отстойнике его выполняют двухсекционным – с секцией для чистой воды, из которой по мере необходимости пополняют пруд-отстойник.

Необходимый объем воды и периодичность пополнения пруда-отстойника чистой водой определяют при помощи уравнения (35), сравнивая показатель фактического количества тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника и необходимого заданного, либо натурными замерами.

Регулирование количества тонкодисперсных грунтовых частиц также может производиться доступными на горнодобывающем предприятии средствами, например, применением экологически безопасных реагентов для сокращения количества взвеси в технологической воде; шандорных колодцев или трубного слива для увеличения объема чистой воды в пруду-отстойнике.

Так как применение предлагаемой технологии приведет к увеличению нагрузки на насосное оборудование из-за увеличения плотности технологической воды и, как результат, увеличению потребляемой мощности, ее необходимо определить, воспользовавшись уравнением (34), глава 2.2.4.1.

4.2 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора

По результатам проведенных исследований (глава 3) разработана технология отбойки пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц.

Указанная технология позволяет увеличить производительность отбойки струей гидромонитора пород, в том числе представленных трудноразмываемыми глинистыми массивами с минимальным количеством или отсутствием других пород.

Наибольшей эффективности предлагаемая технология достигает при угле встречи струи с поверхностью забоя порядка $25-45^\circ$, то есть при размыве уступа попутным или боковым забоем (глава 3).

Отбойка пород с применением предлагаемой технологии возможна при ведении как вскрышных, так и добычных работ.

Для осуществления работ с применением технологии отбойки пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц гидромонитор необходимо оборудовать эжектирующим приспособлением (патент №2702442 [126], рисунок 27). Подача твердых абразивных частиц в эжектор осуществляется из специальной емкости (накопителя твердых абразивных частиц). Размер твердых абразивных частиц (по общепринятым нормам, глава 3.1.1) не должен превышать 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора. Классификация твердых абразивных частиц производится с помощью грохота.

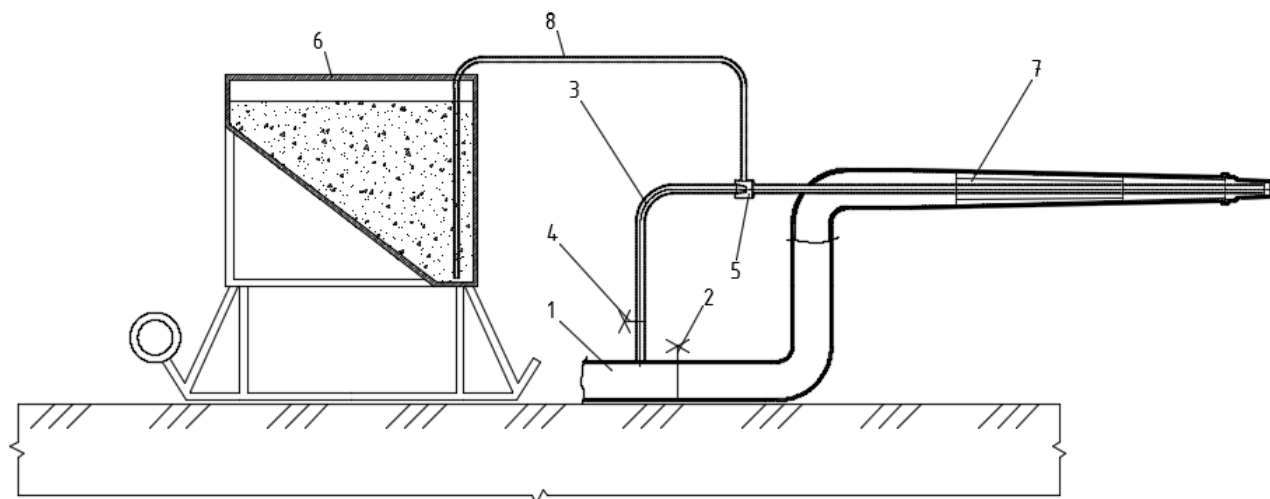


Рисунок 27 – Схема гидромонитора с эжектирующим приспособлением

- 1 – подводный трубопровод; 2 – основная задвижка; 3 – водовод; 4 – вентиль; 5 – камера смешивания; 6 – емкость твердых абразивных частиц, установленная на салазках; 7 – успокоитель потока воды в стволе гидромонитора; 8 – гибкий шланг

Снабжение твердыми абразивными частицами осуществляется: при вскрышных работах – из зумпфа гидромонитора; при добычных работах – из эфельного отвала промывочной установки обогащения.

Расход твердых абразивных частиц принимают исходя из данных графика (рисунок 21 и приложение Б) в зависимости от требуемой производительности отбойки пород струей гидромонитора.

Изменение производительности отбойки пород струей гидромонитора определяют при помощи уравнения (43).

4.2.1 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении вскрышных работ

При производстве вскрышных работ (рисунки 28, 29) размытый массив горных пород самотеком поступает в виде пульпы в зумпф. Из зумпфа часть размытой горной массы направляется на грохот, где отбирается подрешетный продукт – твердые абразивные частицы размером $-4+0$, а надрешетный продукт

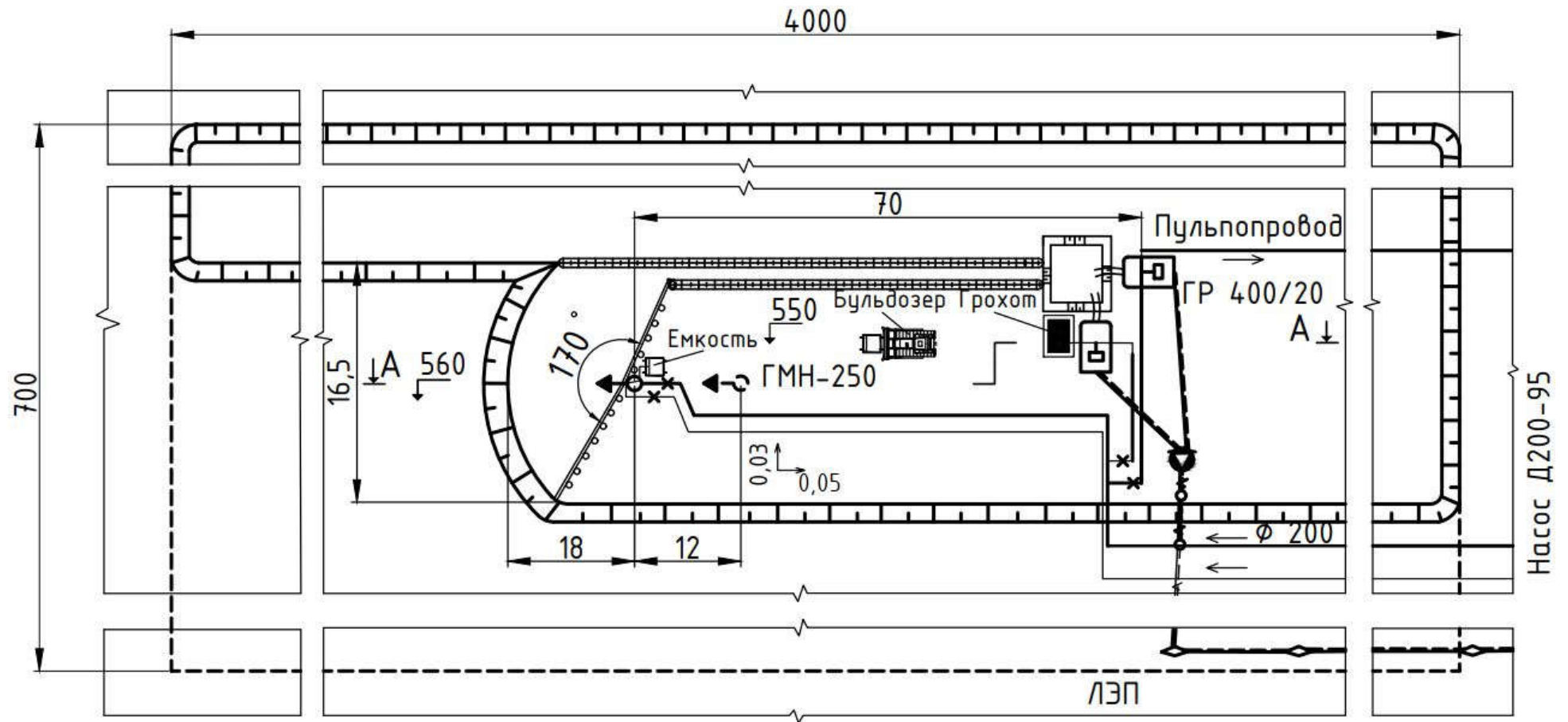


Рисунок 28 – Технологическая схема отбойки пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении вскрышных работ

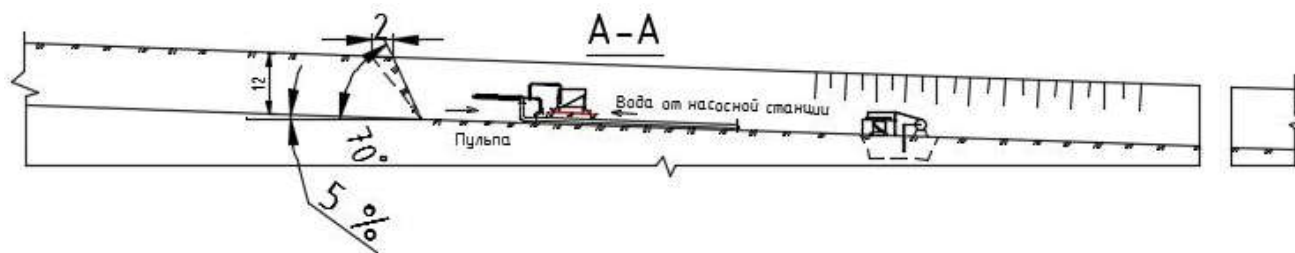


Рисунок 29 – Технологическая схема отбойки пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении вскрышных работ (вид в разрезе)

сбрасывается обратно в зумпф и далее транспортируется землесосом в гидроотвал (рисунок 30).

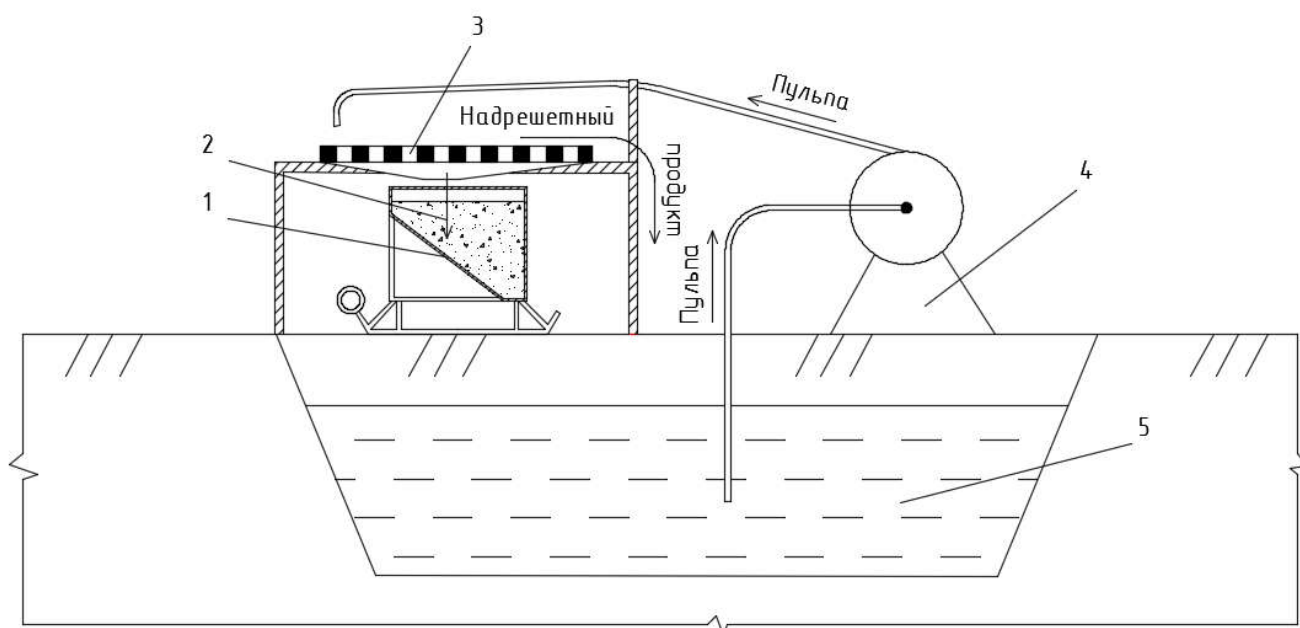


Рисунок 30 – Схема получения твердых абразивных частиц:

1 – емкость твердых абразивных частиц; 2 – твердые абразивные частицы (подрешетный продукт); 3 – грохот; 4 – грунтовый насос; 5 - зумпф

Грохот устанавливается на эстакаде, под которой располагают емкость твердых абразивных частиц – емкость для подрешетного продукта грохота, установленную на салазки и имеющую устройство крепления к бульдозеру, при помощи которого транспортируется из-под эстакады в забой.

Для работы по предлагаемой технологии минимальное количество емкостей твердых абразивных частиц составляет три единицы: одна из емкостей находится

в забое, вторая – под грохотом на загрузке твердых абразивных частиц, третья – на транспортировке между забоем и грохотом.

Необходимый объем емкости твердых абразивных частиц определяют исходя из производительности отбойки пород (рисунок 21) и непосредственно связанного с этим расхода твердых абразивных частиц, производительности грохота и мощности вспомогательного бульдозера, работающего в добычном забое.

Так как эжектирующее приспособление гидромонитора (рисунок 15, позиция 3) представляет собой струйный насос, необходимо обеспечить подачу напорной воды на него.

Это возможно осуществлять при помощи дополнительного насоса, обеспечивающего равный или больший напор, чем напор, подаваемый на гидромонитор. Либо возможно подавать воду из трубопровода гидромонитора, но только в случае, когда подающий насос обеспечивает заданный напор на два устройства.

Емкость твердых абразивных частиц выполняется со скошенным дном для концентрации твердых абразивных частиц в месте их забора эжектирующим приспособлением.

Из емкости твердых абразивных частиц, доставленной при помощи бульдозера в забой, отобранная фракция забирается эжектирующим приспособлением гидромонитора (так как оно является по своей сути струйным насосом) и подается в струю гидромонитора.

4.2.2 Технологические решения по отбойке пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении добычных работ

При производстве добычных работ (рисунки 31-33) размытый массив горных пород от забоя самотеком поступает в зумпф гидромонитора, откуда при помощи землесосной установки подается на промывку, например, на ПГШ (согласно традиционной схеме ведения работ).

Из хвостов ПГШ производится снабжение эжектирующего приспособления гидромонитора твердыми абразивными частицами. Выполняется это следующим образом (рисунок 34): в нижней части эстакады ПГШ делается отвод части эфельной фракции хвостов, которая направляется на грохот, где классифицируется до фракции $-4+0$ и складывается в специальную емкость, расположенную под эстакадой, на которой установлен грохот. Надрешетный продукт с грохота сбрасывается в эфельный отвал ПГШ.

Указанный грохот устанавливается на эстакаде, под которой располагают емкость твердых абразивных частиц – емкость для подрешетного продукта грохота, установленную на салазки и имеющую устройство крепления к бульдозеру, при помощи которого транспортируется из-под эстакады в забой (рисунок 35).

Для работы по предлагаемой технологии минимальное количество емкостей твердых абразивных частиц составляет три единицы: одна из емкостей находится в забое, вторая – под грохотом на загрузке твердых абразивных частиц, третья – транспортируется.

Необходимый объем емкости твердых абразивных частиц определяют исходя из производительности отбойки пород (рисунок 21) и непосредственно связанного с этим расхода твердых абразивных частиц, производительности грохота и мощности вспомогательного бульдозера, работающего в добычном забое.

Емкость твердых абразивных частиц выполняется со скошенным дном для концентрации твердых абразивных частиц в месте их забора эжектирующим приспособлением.

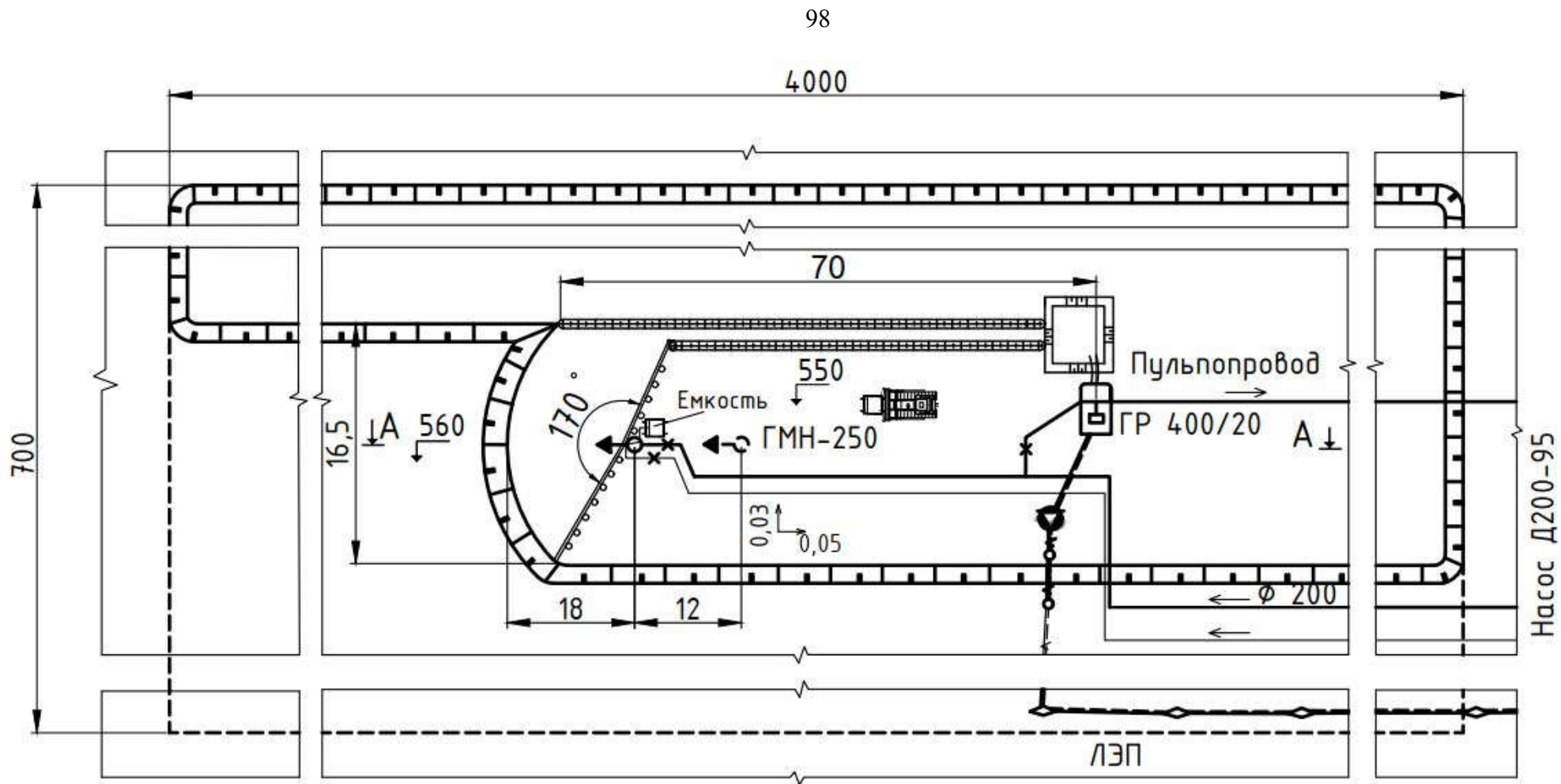


Рисунок 31 – Технологическая схема отбойки пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении добычных работ

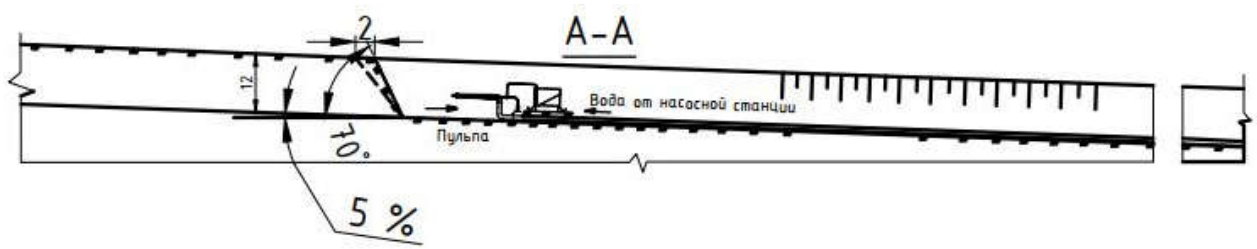


Рисунок 32 – Технологическая схема отбойки пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора при ведении добычных работ (вид в разрезе)

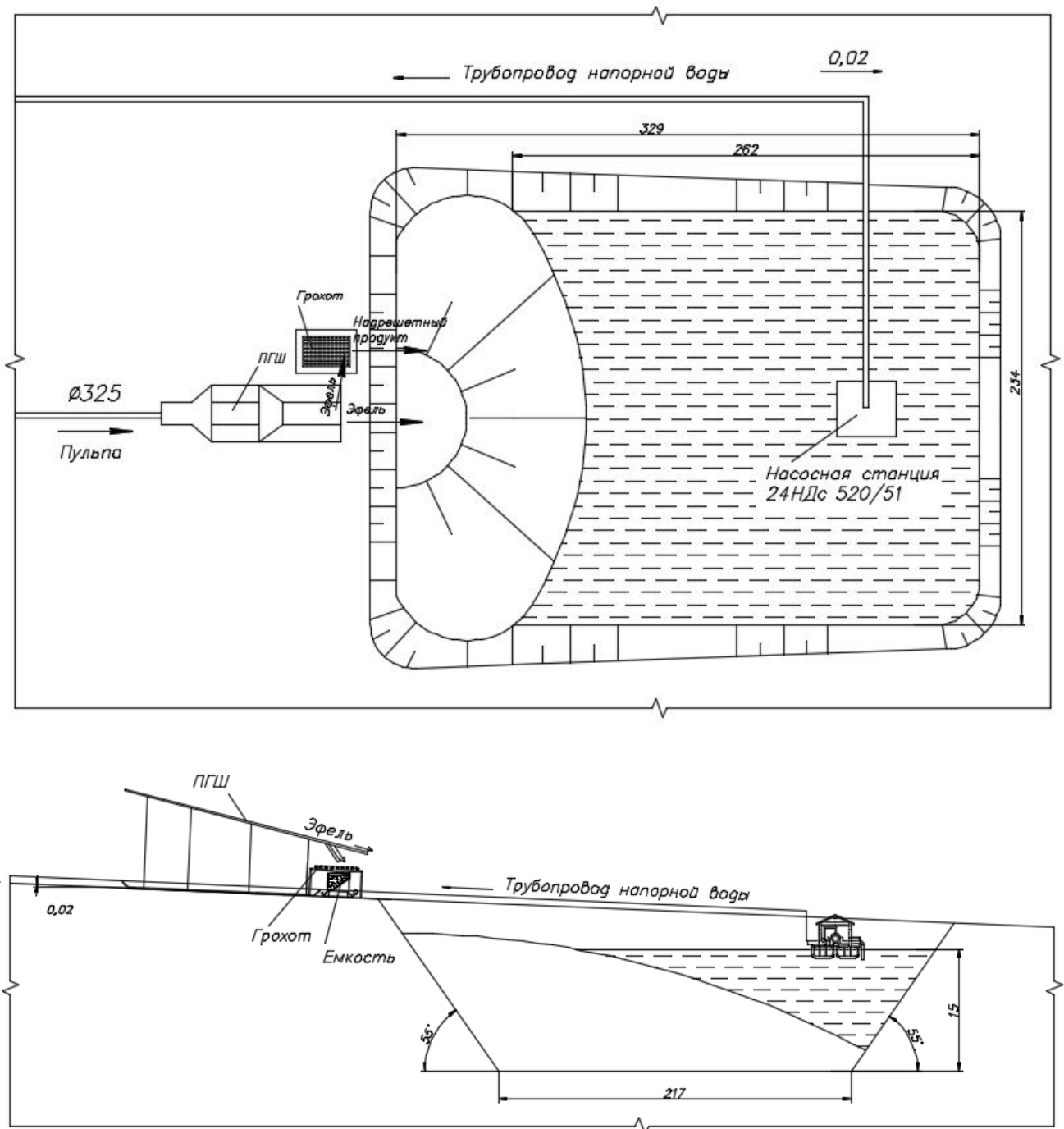


Рисунок 33 – Технологическая схема гидроотвала и пруда-отстойника

Из емкости твердых абразивных частиц, доставленной при помощи бульдозера в забой, отобранная фракция забирается эжектирующим приспособлением гидромонитора (так как оно является по своей сути струйным насосом) и подается в струю гидромонитора.

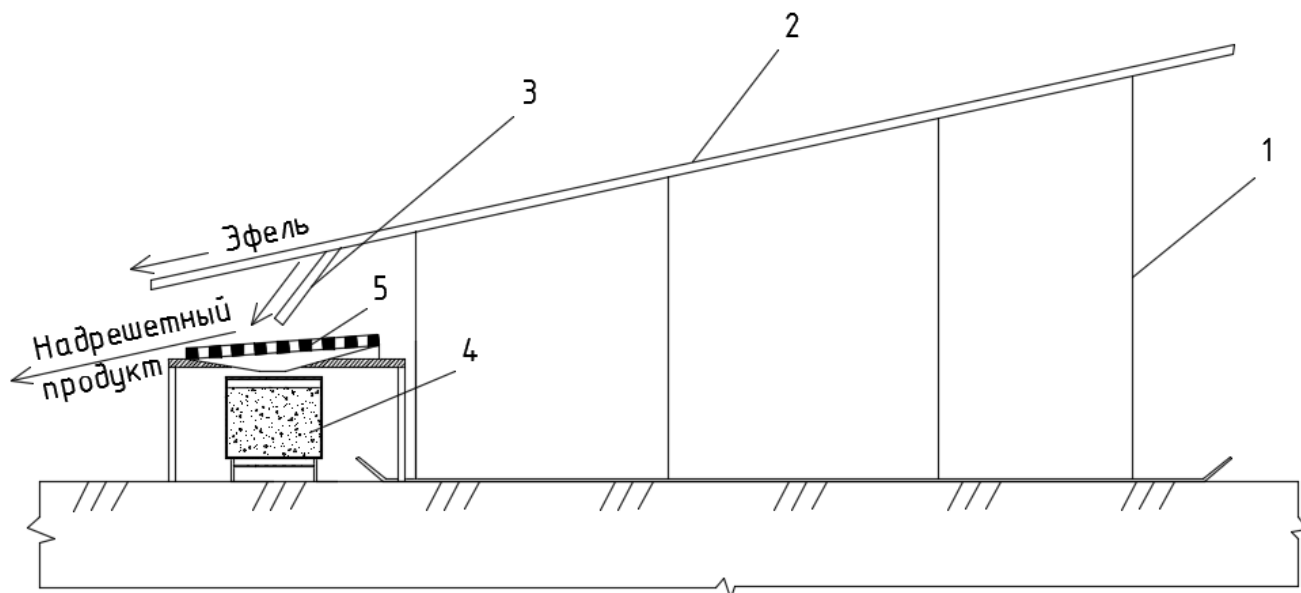


Рисунок 34 – Схема отвода эфельной части хвостов ПГШ и расположения грохота и емкости твердых абразивных частиц:

1 – эстакада ПГШ; 2 – ПГШ; 3 – отводок эфельной части хвостов; 4 – емкость твердых абразивных частиц, установленная на салазках; 5 – грохот

При расположении ПГШ на возвышении и небольшом расстоянии от производства добычных работ возможна самотечная подача твердых абразивных частиц на грохот, который в этом случае устанавливается в забое, и передвижения емкости твердых абразивных частиц не требуется.

При значительных расстояниях, когда транспортирование бульдозером неэффективно, возможно применение транспортирования твердых абразивных частиц в забой при помощи насосного оборудования.

Так как эжектирующее приспособление гидромонитора (рисунок 15, позиция 3) представляет собой струйный насос, необходимо обеспечить подачу напорной воды на него.

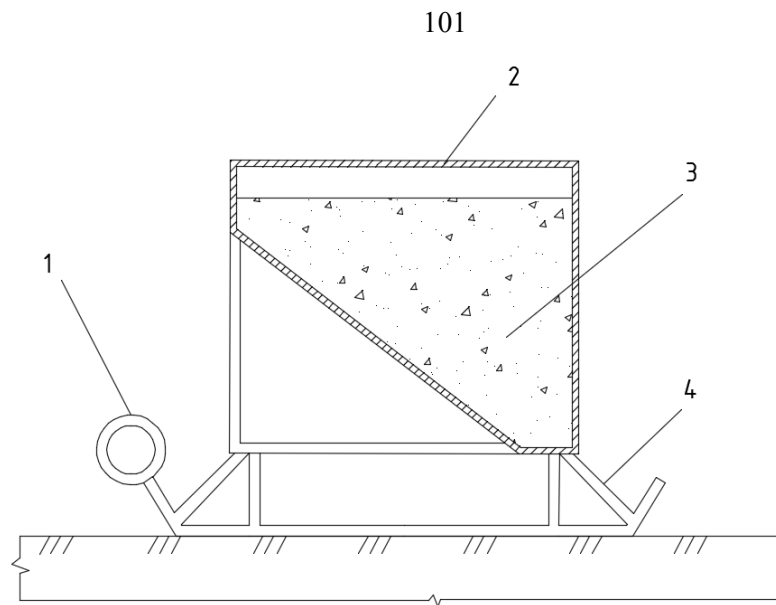


Рисунок 35 – Емкость твердых абразивных частиц:

- 1 – устройство крепления к бульдозеру; 2 – емкость твердых абразивных частиц;
3 – твердые абразивные частицы (подрешетный продукт); 4 – салазки

Это возможно осуществлять при помощи дополнительного насоса, обеспечивающего равный или больший напор, чем напор, подаваемый на гидромонитор. Либо возможно подавать воду из трубопровода гидромонитора, но только в случае, когда подающий насос обеспечивает заданный напор на два устройства.

Перечень дополнительного оборудования, необходимого для осуществления работ по предлагаемой технологии (относительно традиционной), показан в таблице 13, технологическая схема – на рисунках 31-33.

Таблица 13 – Перечень дополнительно необходимого оборудования для применения предлагаемой технологии

Наименование оборудования	Количество, ед.
Эжектирующее приспособление гидромонитора	1
Грунтовый насос (только для вскрышных работ)	1
Грохот, установленный на эстакаду	1
Емкость твердых абразивных частиц	3
Насос эжектирующего приспособления	1

4.3 Выводы

Предложена методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде при применении средств гидромеханизации, позволяющая сократить необходимый объем воды в пруду-отстойнике, что влечет за собой уменьшение его площади и отчуждаемых для этого земель; повысить производительность отбойки пород и сократить удельный расход воды на отбойку пород.

Обосновано, что управление содержанием накапливающихся естественным путем тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде пруда-отстойника возможно ограничением его максимального значения на конец промывочного сезона на стадии проектирования пруда-отстойника за счет уменьшения его площади или объема воды в нем (для уже имеющегося пруда-отстойника).

Доказана возможность производить отбойку пород напорной водой с заданным содержанием в ней тонкодисперсных грунтовых частиц на протяжении всего промывочного сезона. Для этого пруд-отстойник выполняют двухсекционным – с секцией для чистой воды, из которой по мере необходимости пополняют пруд-отстойник для поддержания заданного содержания тонкодисперсных грунтовых частиц. Либо используют доступные на горнодобывающем предприятии средства: например, экологически безопасные реагенты для сокращения количества взвеси в технологической воде; шандорные колодцы или трубный слив – для увеличения объема чистой воды в пруду-отстойнике.

5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ШУРАЛИНСКО-КЛЮЧЕВСКОЕ»

Экономическое сравнение вариантов технологических решений, предложенных в диссертационном исследовании произведено на основе данных россыпного месторождения золота, залегающего в породах с высоким содержанием глины (глава 5.1).

В таких условиях возникают сложности с осаждением тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде гидромонитора и сложности, связанные с отбойкой глинистого массива (возрастает удельный расход напорной воды).

Исходя из результатов исследований, показанных в данной работе, возможно предложить два варианта увеличения производительности отбойки на предприятии (главы 4.1 и 4.2).

Применение методики, подразумевающей заданное содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде (больше, чем предусмотрено традиционной технологией), позволит:

- увеличить производительность отбойки песков гидромонитором;
- уменьшить объем воды в пруду-отстойнике оборотного водоснабжения;
- уменьшить удельный расход напорной воды.

Недостатками этого варианта технологических решений является увеличение количества потребляемой насосной установкой электроэнергии (глава 2.2.4.1).

Применение технологии отбойки горных пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц позволит:

- значительно увеличить производительность отбойки песков (за счет абразивного воздействия гидромониторной струи, получаемой в результате реализации технологии);

- применять меньший, по сравнению с традиционной технологией, диаметр насадки гидромонитора;

- применять меньший, по сравнению с традиционной технологией, напор.

Недостатками предлагаемого варианта технологии является увеличение расходов, вызванное необходимостью приобретения дополнительного оборудования, выполнения дополнительных технологических операций, большего числа сотрудников. Увеличение объема отбитых песков приведет к необходимости сооружения больших объемов отстойников, то есть к увеличению объема горно-капитальных и вскрышных работ.

В то же время применение технологии отбойки горных пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц дает возможность увеличения производительности отбойки более 100%, поэтому для сравнения также рассмотрен вариант отработки месторождения одним забоем с двумя гидромониторами (против традиционной схемы, применяемой на предприятии: двумя забоями и суммарным количеством гидромониторов, равным четырем).

5.1 Краткая характеристика месторождения «Шуралинско-Ключевское»

Россыпное месторождение золота «Шуралинско-Ключевское» (рисунок 36) входит в состав Северной группы Невьянских россыпей и расположено на территории Невьянского и Кировградского городских округов Свердловской области в 8,0 км к западу от г. Невьянска [6].

Гранулометрический состав песков и усредненный геологический разрез месторождения показаны в таблицах 14 и 15. На месторождении применяется гидравлический способ отработки с замкнутым циклом водоснабжения.

Технология разработки гидравлическим способом на месторождении «Шуралинско-Ключевское» следующая. С площади разведанных запасов месторождения предварительно вырубается лесорастительность, снимается и

складируется во временные отвалы почвенно-плодородный слой. Землесос устанавливается в пионерный котлован, пройденный до плотика россыпи.



Рисунок 36 – Гидродобыча на месторождении «Шуралинско-Ключевское» [142, 143]

Таблица 14 – Гранулометрический состав песков

Крупность фракции, мм	+100	-100 +50	-50 +10	-10 +2	-2 +1	-1+0
Выход фракции, %	0,1	0,5	3,6	5,0	1,9	88,9

Таблица 15 – Усредненный геологический разрез

№	Описание пород	Мощность, м	Категория
1	Глины иловатые и песчанистые, вскрышные отвалы, глины бурые	1,3	III
2	Галечники полимиктовые песчаные и глинистые, глины галечниковатые зеленовато-серые и бурые	3,8	IV
3	Глины красно-буроцветные, галечники глинистые	1,0	III
4	Глины буровато-желтые и светлые с кварцевой галькой и песком	2,3	IV
5	Плотик – глинисто-щебнистые, щебнистые, щебнисто-глыбовые коры выветривания	0,3	IV
	Всего	8,7	

На месторождении применяется классическая веерная попутно-боковая система разработки. Землесос устанавливается в середине обрабатываемого контура в выработанном пространстве. Гидромониторы располагают по обеим сторонам землесоса и обрабатывают заходки попутно-боковыми веерными

забоями. На один землесос предусмотрена установка двух гидромониторов.

Проектом предполагается использование забойных гидромониторов ГМН-250 с дистанционным управлением с насадками диаметром 90 мм. Общее количество мониторов – 4 ед. Подаваемый напор – 70 м.

Забои разделены межзабойным целиком, который отрабатывается в последнюю очередь, перед задиркой плотика.

После отработки забоев на расстояние 70 м от землесоса производится сбойка забоев. С этого момента отработка ведется бульдозерно-гидравлическим способом с применением экскаваторов и бульдозеров. Бульдозеры осуществляют окучивание оставленных на плотике песков (недомыва), задирку плотика, а подачу песков из западин производят экскаватором под бульдозер. Окученные пески располагаются вблизи зумпфа землесоса, где происходит их размыв гидромониторами. Среднее расстояние транспортировки – 50 м, горные породы IV категории. После зачистки зумпфа землесос переставляется вперед на новую позицию.

Параметры системы разработки показаны в таблице 16.

Таблица 16 – Параметры системы разработки месторождения «Шуралинско-Ключевское»

Средняя ширина заходки	140 м
Средняя ширина забоя	70 м
Уходка забоев на 1 стоянку ЗГМ-2М	70 до 17 м
Высота забоя	3 м
Минимальный размер рабочей площадки	6,6 м
Берма безопасности	4,7 м
Минимальное расстояние от транспортного и горного оборудования	20,4 м

Ввиду того, что плотик имеет незначительный уклон, общий порядок отработки россыпи принят снизу вверх с последовательной отработкой блоков. Для исключения потерь металла вследствие его просадки в плотик при гидромониторном размыве проектом предусматривается оставление на плотике недомыва из песков мощностью 0,3 м, который подается на промывку бульдозерами одновременно с задиркой плотика. Задирку плотика проектом

предусматривается производить мощностью 0,3 м.

Размытая горная порода в виде пульпы (смесь твердого и жидкого в соотношении 1:17) самотеком поступает в зумпф землесоса, откуда по трубопроводу диаметром 426 мм подается на обогатительную установку. Здесь производится извлечение драгоценных металлов по принципу разделения минеральных зерен по плотности в наклонно текущем потоке воды. Тяжелые минералы и драгметаллы оседают на дне шлюзов, а легкие сносятся потоком воды в гидроотвал (хвостохранилище), который оборудуется на специальной площадке, или в выработанном пространстве.

Складирование хвостов промывки производится в хвостохранилища, располагаемые на борту россыпи и в выработанном пространстве.

Далее вода отстаивается и поступает в зумпф насосной станции, откуда насосами по трубопроводу диаметром 530 мм снова подается в разрез для размыва.

Гидравлики работают по замкнутой оборотной системе водоснабжения без сброса производственных сточных вод в окружающую гидросеть. Замкнутый цикл осуществляется по следующей схеме:

- из зумпфа насосной станции технологическими насосами вода по водоводу подается в разрез для размыва;
- после использования энергии вода вместе с размытыми песками (пульпа) по пульповоду подается на обогатительную установку;
- с обогатительной установки пульпа самотеком сбрасывается в хвостохранилище, где происходит осаждение галечной и глинистой фракции и осветление воды.

Закачка воды в оборотную систему производится из рек в весенний паводок. Принятая схема оборотного водоснабжения гидравлики исключает сброс производственных сточных вод в существующую гидросеть района работ.

Первоначально (в начале отработки) для оборотной системы водоснабжения используется искусственный водоём. В дальнейшем под оборотную систему водоснабжения используют отработанные участки полигона.

После отработки месторождения производится рекультивация нарушенных

земель, основное направление – лесохозяйственное: под лесоугодья, сенокосы и проточные водоемы.

Добычные работы ведутся сезонно по скользящему графику при 12-часовой рабочей смене. Начало сезона – апрель, окончание – ноябрь. В межсезонный период ведутся подготовительные работы: строительство дамб хвостохранилищ, горно-подготовительные работы (вскрыша, пионерные котлованы и др.), ремонт и восстановление техники.

Технологические параметры разработки месторождения «Шуралинско-Ключевское» показаны в таблице 17.

Таблица 17 – Технологические параметры разработки месторождения «Шуралинско-Ключевское»

Параметр	Единицы измерения	Значение параметра
Производительность объекта по твердому	тыс.м ³ /год (сезон)	750
Удельный расход технологической воды на отбойку песков	м ³ /м ³	20,6
Удельный расход электроэнергии	кВт·ч/м ³	10
Продолжительность сезона для ведения гидромеханизированных работ	сутки	225
Число рабочих смен в сутках и их продолжительность	смен / часов	2 / 12
Количество землесосов в работе	ед.	2
Количество гидромониторов в работе	ед.	4
Мощность пород вскрыши	м	1
Мощность песков	м	3
Расстояние от границы карьера до гидроотвала	м	1000
Высота гидроотвала	м	до 6
Количество транспортных полос по гребню плотины		2
Площадь полигона	га	15
Коэффициент разрыхления пород в массиве	к _р	1,30
Уклоны по месторождению:		
поперечные борта	‰	0,003
продольный	‰	0,001
Минимальная отметка поверхности обрабатываемого месторождения	м	200
Уклон долины реки	‰	0,001
Содержание глины в грунтах	%	88,9

Применяемое технологическое оборудование:

1. На разработке и транспортировке песков – гидромониторы ГМН-250;
2. На доработке недомыва и зачистке плотика – бульдозеры Т-11;
3. Подача пульпы на обогатительные установки – землесосы ЗГМ-2М с электродвигателями 630 кВт, со скоростью вращения 750 об/мин.;
4. Обогащение производится на шлюзах типа 4А1, установленных на передвижную металлическую эстакаду;
5. Подача технологической воды производится насосами 22 НДС с мощностью электродвигателя 630 кВт;

5.2.1 Расчет себестоимости добычи полезного ископаемого

Экономическая оценка предложенных технологических решений производится путем сопоставления их с традиционной схемой ведения горных работ.

Технологические параметры сравниваемых вариантов для условий месторождения «Шуралинско-Ключевское» показаны в таблице 18.

В экономическом сравнении не участвуют показатели, одинаковые для всех рассматриваемых вариантов.

Расчет затрат на технологии ведения горных работ (таблицы 19-27) показан для условий работы двумя забоями по два гидромонитора в каждом: с традиционной схемой ведения горных работ; со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде (**ТГЧ**); со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм (**ТАЧ**) и со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм одним забоем (два гидромонитора) (**ТАЧ 2**).

Таблица 18 – Технологические параметры сравниваемых вариантов

Наименование	Ед. изм.	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Количество гидромониторов	ед.	4	4	4	2
Количество забоев	ед.	2	2	2	1
Объем вскрыши	тыс. м ³	150	152,85	445,70	222,85
Площадь полигона, га	га	15,00	15,28	44,57	22,29
Количество шлюзов типа А1 на все забои	ед.	2	2	5	3
Годовая производительность предприятия по пескам	тыс. м ³	750	764	2229	1114
Суточная производительность предприятия по пескам (на один гидромонитор)	м ³	784,5	799,41	2331,07	2331,07
Суточная производительность предприятия по пескам (на все гидромониторы)	м ³	3138	3197,62	9324,27	4662,14
Удельный расход воды	м ³ /м ³	20,60	20,21	3,07	3,07
на отбойку	м ³ /м ³	19,5	19,14	1,87	1,87
на выгонку	м ³ /м ³	1,10	1,08	1,19	1,19
Секундный расход воды у насадки гидромонитора	м ³ /с	0,23	0,23	0,10	0,10
на отбойку	м ³ /с	0,22	0,22	0,06	0,06
на выгонку	м ³ /с	0,01	0,01	0,04	0,04
Диаметр насадки гидромонитора	мм	90	90	52	52
Действительный рабочий напор	м	68	68	50	50
Шаг передвижки гидромонитора	м	17	17	17	17
Ширина заходки гидромонитора	м	33	33	33	33
Расстояние установки землесосной станции от забоя и шаг ее передвижки (при недомыве)	м	70	70	70	70
Объем песков, разрабатываемый с одной стоянки гидромонитора (на один гидромонитор)	м ³	2777,48	2777,48	2777,48	2777,48
Объем песков, разрабатываемый с одной стоянки землесосной станции	м ³	22873,37	22873,37	22873,37	22873,37
Продолжительность цикла с одной стоянки	ч	79,08	80,37	27,85	27,85
Сменная производительность гидромонитора по твердому	м ³ /см	490,31	499,63	1456,92	1456,92
Объем накопившихся горных пород в гидроотвале на конец его эксплуатации (объем гидроотвала)	тыс. м ³	95,19	97,00	282,85	141,42
Площадь гидроотвала по продольному сечению	м ²	654,55	654,55	654,55	654,55
длина	м	218,18	218,18	218,18	218,18
ширина	м	145,43	148,19	432,13	216,06
Пруд-отстойник					
Объем отвала мелкодисперсных пород (глинистых частиц) в пруде-отстойнике на конец его эксплуатации	тыс. м ³	512,88	522,62	1523,95	761,98

Площадь отвала глинистых частиц по продольному сечению	м ²	3526,61	3526,61	3526,61	3526,61
Длина отвала глинистых частиц в пруду-отстойнике	м	1028,58	1028,58	1028,58	1028,58
Высота отвала глинистых частиц в пруду-отстойнике	м	6,86	6,86	6,86	6,86
Минимальная длина пруда-отстойника на конец его эксплуатации	м	910,72	910,72	910,72	910,72
Концентрация глинистых частиц в воде на конец эксплуатации пруда-отстойника	г/л	0,86	60	0,67	0,70
Объем воды в отстойнике	тыс. м ³	298,01	4,33	885,49	442,74
Суммарный объем отстойника и гидроотвала	тыс. м ³	810,89	526,95	2409,44	1204,72
Удельный расход электроэнергии	кВт*ч/м ³	10,04	10,00	1,73	1,75
Извлечение золота	%	85	85	85	85
Общий объем добычи золота	кг	104,25	106,23	309,76	154,88
Дополнительное оборудование					
Эжектирующее приспособление	ед.	-	-	4	2
Содержание твердых частиц в струе гидромонитора	г/л	-	60	6,5	6,5
Расход твердых абразивных частиц на один гидромонитор	м ³ /ч	-	-	0,87	0,87
Расход твердых абразивных частиц на все гидромониторы	м ³ /ч	-	-	3,48	1,74
Расход твердых абразивных частиц на все гидромониторы	м ³ /сут.	-	-	66,80	33,40
Удельный расход твердых абразивных частиц на все гидромониторы в сутки	м ³ /м ³	-	-	0,007	0,007
Землесосов в забое	ед.	1	1	1	1
Землесосов всего	ед.	2	2	2	1

Таблица 19 – Расчет капитальных затрат на сооружения

Наименование	Ед. изм.	Объем работ			
		Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Очистка полигона от лесорастительности и снега	га	15,00	15,29	44,57	22,29
Прочие работы	тыс.м ³	96,10	67,99	285,54	142,77
Сооружение прудов-отстойников	тыс.м ³	810,99	527,05	2409,72	1204,86
ИТОГО:					
Общая стоимость	тыс. руб.	82 838	54 776	246 139	123 070
Амортизационные отчисления всего в год	тыс. руб.	16 568	10 955	49 228	24 614
Амортизационные отчисления на 1м ³ . в год	руб.	22	14	22	22

Таблица 20 – Смета капитальных затрат на оборудование

Наименование	Количество единиц с учетом резерва			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Бульдозер Т-11 на вскрыше	4	4	4	4
Бульдозер Т-11 в забое	-	-	2	1
Гидромонитор ГМН-250	4	4	4	2
Эжектор	-	-	4	2
Насос эжектора КМ80-50-200	-	-	4	2
Емкость ТАЧ	-	-	8	4
Насос 22НДС	1	1	-	-
Насос 1Д1250-63	-	-	1	-
Насос 1Д630-90а	-	-	-	1
Землесос ЗГМ-2М	2	2	2	1
Грохот Вибросито В32	-	-	2	1
Эстакада ТАЧ	-	-	2	1
Шлюзы типа 4А1	2	2	5	3
ИТОГО:				
Общая сумма капитальных затрат, тыс. руб.	24869	24869	39301,6	30005,3
Годовой фонд амортизационных отчислений, тыс. руб.	4810	4810	7860,32	6001,06

Производство гидромеханизированных работ отличается обычно значительным потреблением электроэнергии. Сравнение затрат на этот показатель по вариантам технологических решений показано в таблице 21. Тариф за потребляемую электроэнергию равен 2,4 руб./кВт·ч.

Применение напорной воды гидромонитора с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в ней на отбойке песков приведет к увеличению расхода электроэнергии (глава 2.2.4.1) и, как следствие, затрат на ее покупку (таблица 21).

Применение технологии отбойки горных пород струей гидромонитора с эжектированием твердых абразивных частиц в его струю подразумевает применение дополнительного электромеханического оборудования, то есть увеличение количества потребляемой электроэнергии. Но в то же время реализация

этой технологии требует применения меньшего диаметра насадки гидромонитора и напора, чем при использовании традиционной технологии. Влияние этих параметров на потребление электроэнергии показано в таблице 21.

Таблица 21 – Смета затрат на электроэнергию

Потребители электроэнергии	Расход электроэнергии в год, кВт*ч			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Насос эжектора КМ80-50-200	-	-	258120	129060
Насос 22НДС	4758510,699	4865577,189	-	-
Насос 1Д1250-63	-	-	986138,7303	-
Насос 1Д630-90а	-	-	-	509661,5406
Землесос ЗГМ-2М	2774860,394	2774860,394	2601431,619	1300715,81
Грохот Вибросито В32	-	-	12906	6453
ИТОГО:				
Расход эл. энергии в год, кВт*ч	7 533 371,09	7 640 437,58	3 858 596,35	1 945 890,35
Общие затраты, тыс. руб.	180 800,91	183 370,50	92 606,31	46 701,37

Затраты на вспомогательные материалы показаны в таблице 22.

Таблица 22 – Смета затрат на вспомогательные материалы

Наименование	Потребность на годовой объем, тыс. руб.			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Решетки грохота	-	-	0,16	0,08
Насадки гидромонитора	53,46	53,46	53,46	26,73
ИТОГО:	53,46	53,46	53,62	26,81

Сводная смета затрат по содержанию и эксплуатации оборудования показана в таблице 23.

Таблица 23 – Сводная смета затрат по содержанию и эксплуатации оборудования

Статьи затрат	Сумма, тыс. руб.			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Эксплуатация оборудования, в т.ч. смазочные и обтирочные материалы, тыс. руб.	746,07	746,07	1179,05	900,16
Основная и дополнительная заработная плата вспомогательных рабочих, тыс. руб.	13 61	13 611	28 14	16 756
Отчисление на социальные нужды, тыс. руб.	4777,47	4777,47	9875,99	5881,51
Текущий ремонт оборудования, тыс. руб.	1492,14	1492,14	2358,10	1800,32
Прочие затраты, тыс. руб.	223,82	223,82	353,71	270,05
ИТОГО:	20850,53	20850,53	41903,57	25608,48

Сравнение фонда заработной платы по вариантам технологических решений приведено в таблице 24, расчет численности рабочих – в таблице 25. Смета цеховых расходов показана в таблице 26.

Таблица 24 – Сводная смета затрат по содержанию и эксплуатации оборудования

Наименование профессии	Всего фонд заработной платы, тыс. руб.			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Бульдозер Т-11				
Машинист	4346,81	4346,81	4346,81	4346,81
Бульдозер Т-11 в забое				
Машинист	-	-	2173,40	1086,70
ГМН-250				
Рабочий	4117,43	4117,43	4117,43	2058,72
Эжектор				
Рабочий	-	-	4117,43	2058,72
Насосы				
Рабочий	1029,36	1029,36	3088,07	2058,72
Землесос ЗГМ-2М				
Рабочий	2058,72	2058,72	2058,72	1029,36
Грохот Вибросито В 32				
Рабочий	-	-	2058,72	1029,36
Шлюзы типа 4А1				
Рабочий	2058,72	2058,72	6176,15	3088,07
ИТОГО:	13 611	13 611	28 137	16 756

Таблица 25 – Численность рабочих

Наименование профессии	Численность списочная			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Бульдозер Т-11				
Машинист	10	10	10	10
Бульдозер Т-11 в забое				
Машинист	-	-	5	3
ГМН-250				
Рабочий	10	10	10	5
Эжектор				
Рабочий	-	-	10	5
Насосы				
Рабочий	3	3	8	5
Землесос ЗГМ-2М				
Рабочий	5	5	5	3
Грохот Вибросито В 32				
Рабочий	-	-	5	3
Шлюзы типа 4А1				
Рабочий	5	5	15	8
ИТОГО:	33	33	69	41

Таблица 26 – Смета цеховых расходов

Наименование элементов	Сумма, тыс. руб.			
	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Заработная плата цехового персонала (руководителей и специалистов)	13 611	13 611	28 137	16 756
Отчисления на социальное страхование	4083,31	4083,31	8441,02	5026,93
Охрана труда и техника безопасности	272,22	272,22	562,73	335,13
Содержание зданий и сооружений	12425,69	8216,41	3692,09	1846,05
Текущий ремонт зданий и сооружений	16567,58	10955,22	4922,79	2461,39
Амортизация зданий и сооружений	16 568	10 955	49 228	24 614
ИТОГО:	63 527	48 093	94 983	51 040

Сводная калькуляция себестоимости добычи 1 г золота показана в таблице 27.

Таблица 27 – Сводная калькуляция себестоимости добычи 1 г золота

Статьи расхода	Сумма, тыс. руб.			
	Традицион ная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Вспомогательные материалы на технологические цели, тыс. руб.	0,0005	0,0005	0,0002	0,0002
Энергия на технологические цели, тыс. руб.	1,73	1,73	0,30	0,30
Топливо на технологические цели, тыс. руб. (на вскрышу)	0,05	0,05	0,05	0,05
Основная заработная плата производственных рабочих, тыс. руб.	0,11	0,11	0,08	0,09
Дополнительная заработная плата производственных рабочих, тыс. руб.	0,02	0,02	0,01	0,01
Отчисления на социальные нужды, тыс. руб.	0,05	0,04	0,03	0,04
Амортизация	0,21	0,15	0,18	0,20
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	0,20	0,20	0,14	0,17
Погашение вскрышных работ (ПГР)	0,07	0,07	0,07	0,07
Цеховые расходы	0,61	0,45	0,31	0,33
Себестоимость, тыс. руб./г (%)	3,04 (100)	2,81 (92,43)	1,16 (38,16)	1,26 (41,45)

5.2.2 Коммерческая эффективность инвестиционного проекта

Для относительного сравнения способов разработки проведены расчеты статистических (рентабельности капитальных вложений) и динамических (чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности) данных.

Рентабельность капитальных вложений определена по уравнению (48):

$$R_k = \frac{\text{Чистая прибыль}}{\text{Кап. вложения}} \cdot 100 \%. \quad (48)$$

Чистый дисконтированный доход (ЧДД):

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Pi_t \cdot \beta_t - K_t \cdot \beta_t + A_t \cdot \beta_t), \quad (49)$$

где Π_t – прибыль, полученная в результате реализации проекта в t -ом году расчётного периода, тыс. руб.; K_t – капитальные вложения, t -го года, тыс. руб.; A_t – сумма амортизационных отчислений t -го года, тыс. руб.; β_t – коэффициент дисконтирования в t -ом году, уравнение (50).

$$\beta_t = (1 + E_H)^{t_p - t}, \quad (50)$$

где E_H - норма дисконта, 10%; t_p – год, к которому приводятся результаты; t – текущий год расчётного периода.

Внутренняя норма доходности (ВНД):

$$\sum_{t=0}^T \frac{(\Pi_t + A_t)}{(1 + E_H)^{t_p - t}} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E_H)^{t_p - t}}. \quad (51)$$

Индекс доходности (ИД):

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^T (\Pi + A)_t \cdot \beta_t}{\sum_{t=0}^T K_t \cdot \beta_t} > 1. \quad (52)$$

Результаты расчетов показаны в таблице 28.

Таблица 28 – Коммерческая эффективность инвестиционного проекта

Статьи расхода	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Рентабельность капитальных вложений, %	1323,69	1420,39	3432,53	3180,30
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн руб./%	2 421, 37/100	2 469, 85/102	7 370, 35/ 304,39	3 634, 52/ 150,1
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	103700,38	103700,38	163882,38	125118,06
Индекс доходности (ИД), доли ед.	16,95	17,27	31,72	20,84

Сравнение показателей по рассмотренным вариантам представлено в таблице 29.

Таблица 29 – Сравнение технологических показателей

Наименование	Традиционная схема	ТГЧ	ТАЧ	ТАЧ 2
Производительность отбойки песков, %	100	101,9	297,1	148,6
Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/м ³ / %	10,04 / 100	10 / 99,53	1,73 / 17,3	1,75 / 17,5
Удельный расход напорной воды, м ³ /м ³	20,6	20,2	3,07	3,07
Себестоимость технологии, тыс. руб., %	3,04 / 100	2,81 / 92,4	1,16 / 38,16	1,26 / 41,45
Насос	22НДС	22НДС	1Д1250-63	1Д630-90а
Необходимый напор, м	70	70	50	50
Диаметр насадки гидромонитора, мм	90	90	52	52
Дополнительное оборудование, необходимое для реализации технологии, ед.				
Грохот вибросито В32, ед.	-	-	2	1
Емкость твердых абразивных частиц, ед.	-	-	8	4
Эжектирующее приспособление, ед.	-	-	4	2
Землесос, ед.	-	-	2	1
ЧДД, млн руб.	2 421,37	2 469,85	7 370,35	3 634,52

Экономическое сравнение производственных затрат по приведенным вариантам технологических решений выявило снижение производственной себестоимости одного грамма полезного ископаемого (относительно традиционной схемы ведения работ):

- для варианта со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде (ТГЧ) – на 7,6%;

- для варианта со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм (ТАЧ) – на 61,84%;

- для варианта и со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм одним забоем (два гидромонитора) (ТАЧ 2) – на 58,55%.

Таким образом, применение предложенных технологических решений экономически эффективно в условиях месторождения «Шуралинско-Ключевское».

5.3 Выводы

Установлено, что (в сравнении с традиционной технологией ведения горных работ) применение предлагаемых технологических решений со схемой ведения горных работ с отбойкой горных пород с заданным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде (ТГЧ) в условиях месторождения «Шуралинско-Ключевское» позволит снизить себестоимость добычи полезного ископаемого на 7,6%. При этом удельный расход напорной воды составит $20,21 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (98,14%); удельный расход электроэнергии – $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (99,53%). ЧДД составит 2 469,85 млн. руб. (102%). Производительность отбойки песков струей гидромонитора составит $3198 \text{ м}^3/\text{сут}$ (101,9%); объем песков на сезон – 764,2 тыс. м^3 (101,9%).

Установлено, что (в сравнении с традиционной технологией ведения горных работ) применение предлагаемой технологии ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм (ТАЧ) в условиях месторождения «Шуралинско-Ключевское» позволит снизить себестоимость добычи полезного ископаемого на 61,84%. При этом удельный расход напорной воды составит $3,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (14,89%); удельный расход электроэнергии – $1,73 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (17,23%). ЧДД составит 7 370,35 млн. руб. (304,39%). Производительность отбойки песков струей гидромонитора составит $9324 \text{ м}^3/\text{сут}$. (297,14%); объем песков на сезон – 2228,5 тыс. м^3 (297,14%).

Установлено, что (в сравнении с традиционной технологией ведения горных работ) применение предлагаемой технологии ведения горных работ с отбойкой горных пород при добавлении в струю гидромонитора твердых абразивных частиц крупностью до 4,1 мм одним забоем (два гидромонитора) (ТАЧ 2) в условиях месторождения «Шуралинско-Ключевское» позволит снизить себестоимость добычи полезного ископаемого на 58,55%. При этом удельный расход напорной воды составит $3,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (14,89%); удельный расход электроэнергии – $1,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (17,39 %). ЧДД составит 3 634,52 млн. руб. (150,1%). Производительность отбойки песков струей гидромонитора составит $4662 \text{ м}^3/\text{сут}$ (148,6%); объем песков на сезон – 1114,25 тыс. м^3 (148,6%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-практическая задача обоснования технологии отбойки пород гидромонитором при разработке россыпных месторождений на основе изыскания возможностей увеличения производительности гидромониторной разработки глинистых грунтов путем эжектирования в струю твердых абразивных частиц и учета изменения плотности напорной воды тонкодисперсными грунтовыми частицами, накапливающимися естественным путем в прудах-отстойниках оборотного водоснабжения с обоснованными технологическими параметрами, что имеет важное значение для развития горнодобывающей отрасли России.

Наиболее важные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Доказано, что увеличение плотности воды за счет включения в нее тонкодисперсных грунтовых частиц оказывает влияние на характеристики гидромониторной струи и влечет за собой увеличение силы ее давления на забой, которая колеблется в пределах от 1 до 10 % при изменении плотности воды от 1,0 до 1,038 т/м³ (соответствует изменению содержания тонкодисперсных грунтовых частиц от 0 до 100 г/л).

2. Разработана на основе результатов экспериментов математическая модель, увязывающая силу давления гидромониторной струи на забой с плотностью напорной воды, диаметром насадки гидромонитора, напором на насадке и расстоянием его установки от забоя, что позволяет определить значение силы давления гидромониторной струи на забой для различных условий эксплуатации месторождений.

3. Показано, что наличие тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде оказывает негативное влияние на дальность полета струи при установке

ствола гидромонитора с углом $\pm 30^\circ$, интенсивность этого влияния возрастает с увеличением напора. Полученная математическая модель позволяет более точно определить дальность полета струи гидромонитора.

4. Установлено, что увеличение производительности отбойки пород гидромонитором с насадками 5,2 и 7,6 мм за счет эжектирования в его струю твердых абразивных частиц возможно до 2,11 и 2,98 раза соответственно, при содержании твердых абразивных частиц 6,5 г/л увеличение силы воздействия струи гидромонитора на забой – на 6,8-15,2%. Размер эжектируемых частиц не оказывает значительного влияния на производительность отбойки.

5. Доказано, что применение предлагаемых технологических решений наиболее эффективно при размыве горных пород гидромонитором попутным или боковым забоем при угле встречи струи с поверхностью забоя порядка $25-45^\circ$, но не исключает применения других способов размыва.

6. Экономическая оценка полученных результатов показала, что применение предлагаемых технологических решений позволит сократить себестоимость добычи полезного ископаемого, в частности для условий месторождения «Шуралинско-Ключевское», за счет увеличения производительности отбойки пород: от повышения плотности напорной воды и сокращения ее объема в пруду-отстойнике – на 7,6%; от эжектирования твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора – на 58,55%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куторгин, В. И. Резервный фонд минерально-сырьевой базы россыпного золота и его роль в лицензировании и объеме добычи в перспективе / В. И. Куторгин, В. А. Джобадзе, А. А. Сапрыкин, А. С. Тарасов // Маркшейдерский вестник. – 2008. – № 2. – С. 29-33.
2. Кисляков, В. Е. Основные направления развития открытой разработки россыпных месторождений / В. Е. Кисляков // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. трудов. – 2003. – С. 122-123.
3. Модели месторождений золота Енисейской Сибири / под ред. С. С. Сердюка. – Красноярск, 2010. – 584 с.
4. Могилина, В. А. Сравнительная эффективность гидромеханизированной разработки вскрышных пород на разрезах Кузбасса / В. А. Могилина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 10. – С. 66-67.
5. Серый, Р. С. О необходимости комплексного подхода к решению вопроса дезинтеграции труднопромывистых песков россыпей / Р. С. Серый, В. В. Нечаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S4. – С. 268-274.
6. Разработка месторождения золота «Шуралинско-Ключевское» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://knowledge.allbest.ru/manufacture/3c0b65625a2ad69a5c43b88421316c26_0.html (дата обращения: 8.06.2020).
7. Кисляков, В. Е. Систематика способов разупрочнения глинистых песков при разработке россыпных месторождений / В. Е. Кисляков, А. В. Никитин // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 1 (25). – С. 13-16.
8. Потемкин, С. В. Разработка россыпных месторождений : учебник для вузов / С. В. Потемкин. – М.: Недра, 1995. – 128 с.

9. Ялтанец, И. М. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Ч. 3. Гидромеханизация и подводные горные работы. Кн. 1: Разработка пород гидромониторами и землесосными снарядами : учебник для вузов / И. М. Ялтанец. – М.: Горная книга, 2006. – 546 с.
10. Кисляков, В. Е. Технология разупрочнения глинистых песков при разработке россыпных месторождений / В. Е. Кисляков // Золотоносные коры выветривания Сибири : сб. науч. тр. / КНИИГиМС. – Красноярск, 2002. – С. 110-114.
11. Тальгамер, Б. Л. Повышение эффективности разработки глинистых россыпей / Б. Л. Тальгамер, С. А. Дементьев, Н. В. Красноштанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : Горная книга, 2007. – №. 5 – С. 261-267.
12. Чемезов, В. В. Сокращение потерь полезного ископаемого при повторной разработке глинистых россыпей драгами / В. В. Чемезов, С. А. Дементьев, Б. Л. Тальгамер // Ресурсосберегающие технологии при открытой разработке полезных ископаемых Севера. – Якутск, 1990. – С. 57-60.
13. Шемякин, С. А. Новые технологии открытой разработки месторождений / С. А. Шемякин, Ю. А. Мамаев, С. Н. Иванченко – Хабаровск : Приамурское географическое общество, 2003. – 130 с.
14. Мязин, В. П. Выбор целесообразного варианта повторной отработки глинистых участков россыпи драгой / В. П. Мязин // Разработка месторождений полезных ископаемых Сибири и Северо-Востока. – Иркутск, 1980. – С. 100-105.
15. Шеин, А. А. Вторичная переработка дражных отвалов на Урале / А. А. Шеин // Важные вопросы развития дражного флота. – Якутск, 1962.
16. Патент РФ № 2212945 Способ извлечения полезных компонентов из песков / В. Е. Кисляков, А. В. Карепанов // Оpubл. 27.09.2003. – Бюл. № 27.
17. Кисляков, В. Е. Подготовка глинистых песков россыпных месторождений к обогащению / В. Е. Кисляков, А. В. Карепанов // Современные технологии освоения минеральных ресурсов : сб. науч. тр. / Гос. образоват. учреждение «ГАЦМиЗ». – Красноярск, 2003. – С. 109-112.

18. Кисляков, В. Е. Технология предварительной подготовки глинистых песков при бульдозерной разработке россыпных месторождений / В. Е. Кисляков, А. В. Карепанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 52-60.
19. Исследование влияния плава хлоридов металлов на очистку сточных вод и дезинтеграцию песков при оборотном водоснабжении промприборов: отчет о НИР / Рук. Потапова Т. С. – Красноярск : Красноярский институт цветных металлов. Тема 447-ГО-12. Рег. № 76013850., 1977. – 129 с.
20. Корнеева, С. И. Повышение эффективности разупрочнения и дезинтеграции глинистых песков в процессе гидротранспорта при разработке россыпных месторождений подводным способом / С. И. Корнеева, А. М. Пуляевский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 12. – С. 262-266.
21. Патент РФ № 2288361 Способ разупрочнения и дезинтеграции глинистых песков россыпных месторождений / А. М. Пуляевский, С. И. Корнеева, В. С. Литвинцев и [др.] // Оpubл. 27.11.2006. – Бюл. № 33.
22. Еремеева, Н. Г. Промывка высокоглинистых песков / Н. Г. Еремеева, А. И. Матвеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 9. – С. 35-36.
23. Кисляков, В. Е. Расчет отстойников оборотного водоснабжения при разработке россыпей / В. Е. Кисляков. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1988. – 176 с.
24. Подчезерцев, Н. О. Структура технологических потерь золота при разработке одной из россыпей Урала / Н. О. Подчезерцев, Г. В. Курнаков, В. А. Наумов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2019. – № 2 (39). С. 108-111.
25. Исследование влияния плава хлоридов металлов на очистку сточных вод и дезинтеграцию песков при оборотном водоснабжении промприборов: Разработка и промышленное внедрение схем оборотного водоснабжения промприборов ш. Омолой : отчет о НИР / Рук. Потапова Т. С. – Красноярск :

Красноярский институт цветных металлов. Тема 447-ГО-12. Рег. № 76013850, 1978. – 54 с.

26. Исследование влияния плава хлоридов металлов на очистку сточных вод и дезинтеграцию песков при оборотном водоснабжении промприборов: Разработать и провести испытание технологических схем водоподготовки и водоснабжения с учетом особенностей методов обогащения песков : отчет о НИР / Рук. Потапова Т. С. – Красноярск : Красноярский институт цветных металлов. Тема 447-ГО-12. Рег. № 76013850, 1979. – 124 с.

27. Исследование влияния плава хлоридов металлов на очистку сточных вод и дезинтеграцию песков при оборотном водоснабжении промприборов: Внедрение бессточных оборотных схем водоснабжения промприборов с применением плава хлоридов металлов : отчет о НИР / Рук. Потапова Т. С. – Красноярск : Красноярский институт цветных металлов. Тема 447-ГО-12. Рег. № 76013850, 1980. – 71 с.

28. Шорохов, С. М. Исследование возможности осветления воды в дражном разрезе и улучшения промывки глинистых песков / С. М. Шорохов, Т. С. Кабакова, Я. И. Иващенко и др. // Колыма. – 1972. – № 4. – С. 14-16.

29. Исследование и испытание бессточных схем водоснабжения промприборов с использованием в качестве коагулянта плава хлоридов металлов : отчет по НИР / Рук. Потапова Т. С. – Красноярск : Красноярский институт цветных металлов. Тема 447-ГО-12. Рег. № 76013850, 1980. – 102 с.

30. Маньков, В. М. Проблема мелкого золота в россыпях Сибири и Дальнего Востока и пути его извлечения / В. М. Маньков, А. Г. Лопатин, О. В. Замятин // Колыма. – 1980. – № 11. – С. 16-19.

31. Шорохов, С. М. О контроле мутности технологической воды на драгах и способе осветления воды в дражном разрезе при бессточной схеме водоснабжения / С. М. Шорохов, А. А. Зуйков, В. М. Селезнев и др. // Колыма. – 1973. – № 11. – С. 27-28.

32. Замятин, О. В. Обогащение золотосодержащих песков и конгломератов / О. В. Замятин, А. Г. Лопатин, Н. П. Санникова и др. – М. : Недра, 1975. – 264 с.
33. Назаров, В. В. Водоснабжение и очистка сточных вод при разработке россыпных месторождений / В. В. Назаров, Ю. М. Чикин, В. Р. Личаев и др. – М. : Недра, 1975. – 184 с.
34. Назаров, В. В. Работа драги в «глухом» забое / В. В. Назаров, А. Т. Конюкова // Колыма. – 1969. – № 8. – С. 7-8.
35. Барабанов, В. Д. Совершенствование технологии извлечения золота и платины из россыпных месторождений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.322 / В. Д. Барабанов. – Свердловск, 1971. – 26 с.
36. Мязин, В. П. Изыскание эффективных способов снижения мутности воды в дражном разрезе при разработке глинистых россыпей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Мязин. – Красноярск, 1975. – 24 с.
37. Егупов, П. Е. Влияние загрязненности оборотной воды на процесс улавливания полезного минерала при обогащении песков / П. Е. Егупов // Колыма. – 1955. – № 3. – С. 16-17.
38. Курылев, А. П. Нормативы качества технологической воды при разработке россыпей драгами / А. П. Курылев, В. В. Назаров, Ю. М. Чикин // Колыма. – 1974. – № 10. – С. 30-31.
39. Назаров, В. В. Результаты научно-исследовательских работ по охране рек от загрязнения / В. В. Назаров, А. П. Курылев, Ю. М. Чикин и др. // Разработка россыпных месторождений. – 1977. – С. 30-33.
40. Кисляков, В. Е. Предельная загрязненность технологической воды при разработке россыпных месторождений золота / В. Е. Кисляков // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 148-156.
41. Батугин, С. А. Геотехнологии открытой добычи минерального сырья на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / С. А. Батугин, Н. С. Батугина, А. М. Бураков и др. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2013. – 307 с.

42. Лешков, В. Г. Разработка россыпных месторождений : учебник для вузов / В. Г. Лешков. – М. : Горная книга, Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 906 с.
43. Ялтанец, И. М. Гидромеханизация : справочный материал / И. М. Ялтанец, В. К. Егоров. – М. : МГГУ, 2003. – 338 с.
44. Хныкин, В. Ф. Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках / В. Ф. Хныкин. – М. : Наука, 1969. – 150 с.
45. Шелоганов, В. И. Типизация схем систем водоснабжения и гидротранспортирования гидромониторно-землесосных комплексов на разрезах / В. И. Шелоганов, Е. А. Кононенко, В. В. Ермошкин, А. А. Романов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 11. – С. 183-193.
46. Многокомпонентные жидкости [Электронный ресурс]. // Гидравлика. – Режим доступа: <http://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=74> (дата обращения 27.04.2016).
47. Бартышев, А. В. Гидромониторная струя и модель разрушения угля / А. В. Бартышев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 6. – С. 5 – 13.
48. Каштанов, П. Б. Обоснование параметров гидромониторно-землесосных комплексов с дополнительным внутривойным циклом водоснабжения гидромониторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Каштанов Павел Борисович. – М., 1994. – 21 с.
49. Шорохов, С. М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений / С. М. Шорохов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1973. – 768 с.
50. Березин, В. П. Справочник по разработке россыпей / под. ред. В. П. Березина, В. Г. Лешкова, Л. П. Мацуева, С. В. Потемкина. – М. : Недра, 1973. – 589 с.
51. Нурок, Г. А. Гидромеханизация горных работ / Г. А. Нурок. – М. : Госгортехиздат, 1959. – 392 с.

52. Потемкин, С. В. Разработка россыпных месторождений / С. В. Потемкин. – М. : Недра, 1995. – 337 с.
53. Большаков, В. А. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – Киев : Вища школа, 1977. – 279 с.
54. Большаков, В. А. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища школа, головное изд-во, 1984. – 344 с.
55. Иванов, Е. Н. Противопожарное водоснабжение / Е. Н. Иванов. – М. : Стройиздат, 1986. – 316 с.
56. Бессонов, Е. А. Энциклопедия гидромеханизированных работ : словарь-справочник / Е. А. Бессонов. – М. : 1989.ру, 2005. – 520 с.
57. Юфин, А. П. Гидромеханизация / А. П. Юфин. – М. : Стройиздат, 1974. – 223 с.
58. Фридман, Б. Э. Разработка россыпных месторождений гидромеханизацией / Б. Э. Фридман. – М. : Metallurgizdat, 1957. – 472 с.
59. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп – М. : Энергия, 1972. – 312 с.
60. Тимофеева, С. С. Противопожарное водоснабжение / С. С. Тимофеева, О. М. Кустов. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 69 с.
61. Курганов, А. М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения : справочник / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ие, 1986. – 440 с.
62. Гавырин, Н. П. Исследование работы гидромониторов : диссертация / Н. П. Гавырин. – М. : архив МГМИ, 1939. – 244 с.
63. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. – 4-ое изд., перераб. и доп. – М.-Л. : Энергия, 1964. – 352 с.
64. Некрасов, Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / под ред. Б. Б. Некрасова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Вышэйшая школа, 1985. – 385 с.

65. Дерюшева, Н. Л. Оптимизация работы снегоплавильных сооружений / Н. Л. Дерюшева // Вестник РУДН. Серия : Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 1. – С. 46 - 51.
66. Прозоров, И. В. Гидравлика, водоснабжение и канализация / И. В. Прозоров, Г. И. Николадзе, А. В. Минаев. – М. : Высшая школа, 1990. – 447 с.
67. Ялтанец, И. М. Гидромеханизация : справочный материал / И. М. Ялтанец, В. К. Егоров. – М. : Издательство МГГУ, 1999. – 338 с.
68. Ялтанец, И. М. Гидромеханизация открытых горных работ / И. М. Ялтанец, В. И. Кулигин. – М. : Издательство МГГУ, 1996. – 739 с.
69. Савченко, Н. В. Влияние параметров струеформирующих устройств на компактность струи / Н. В. Савченко, О. М. Яхно, Н. Г. Шкарабура // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2006. – № 3. – С. 232 – 244.
70. Поклонов, Д. А. Определение необходимых диаметров насадок гидромониторов с учетом режима работы насосной станции / Д. А. Поклонов, Ю. И. Литвин, С. И. Протасов // Вестник Кузбасского государственного технического университета : научно-технический журнал. – 2004. – № 3 (40). – С. 52 - 55.
71. Мизурев, В. Ю. Теоретический анализ средств водоснабжения высоконапорных самоходных гидромониторов / В. Ю. Мизурев // Записки Горного института. – 2003. – Т. 155. Часть 2. – С. 113 - 115.
72. Ялтанец, И. М. Гидромеханизация : справочный материал / И. М. Ялтанец, В. К. Егоров. – М. : МГГУ, 1999. – 338 с.
73. Патент РФ № 2508189 Установка гидроабразивной резки / Ю. П. Астахов, А. Н. Королев, М. Б. Жихарев, С. М. Волков // Оpubл. 27.02.2014. – Бюл. № 6.
74. Патент DE № 2813499 Fluidstrahl-vorrichtung zum schneiden von flachmaterial / David R Pearl // Оpubл. 12.04.1979.
75. Патент РФ № 2466008 Способ формирования струи жидкости для резания материалов и устройство для его реализации / В. В. Шпилев,

- М. К. Решетников, С. И. Капульник, Н. Н. Берёда, А. С. Кутин // Опул. 10.11.2012. – Бюл. № 31.
76. Сазонов, Д. Ю. Определение рациональных диапазонов изменения режимов гидроабразивного резания материалов / Д. Ю. Сазонов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – № 2-2. – С. 16 - 23.
77. Мерзляков, В. Г. Гидроструйные технологии в горном деле: основные результаты научно-исследовательских работ / В. Г. Мерзляков // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 6-11.
78. Мерзляков, В. Г. Опыт применения гидравлических струй высокого давления при создании эффективных средств разрушения горных пород / В. Г. Мерзляков, В. Е. Бафтатовский, В. Н. Бейдинов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(4). – С. 1522 - 1524.
79. Мерзляков, В. Г. Установление рациональных параметров, разработка и создание инструментов для гидроабразивного резания твердых материалов / В. Г. Мерзляков, В. Е. Бафтатовский // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 4. – С. 27 - 31.
80. Мерзляков, В. Г. Гидромеханическое разрушение горных пород / В. Г. Мерзляков, И. А. Кузьмин, И. В. Иванушкин // ГИФБ. – 1999. – № 1. – С. 137 - 140.
81. Жабин, А. Б. Разрушение горючих сланцев высокоскоростными струями воды / А. Б. Жабин, А. В. Поляков, В. И. Сарычев, В. Г. Хачатурян // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 7. – С. 9-13.
82. Жабин, А. Б. Систематизация параметров процесса эрозии горных пород под действием гидроабразивных струй / А. Б. Жабин, Е. А. Аверин // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 41-44.
83. Аверин, Е. А. Анализ и доработка аналитического метода расчета гидроабразивной эрозии горных пород / Е. А. Аверин, А. Б. Жабин, В. А. Поляков, М. М. Щеголевский // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 17-25.

84. Жабин, А. Б. Простейший аналитический метод расчета эрозии горных пород под действием гидроабразивной струи / А. Б. Жабин, Е. А. Аверин // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 5. – С. 44-48.

85. Пушкарев, А. Е. Выбор метода обоснования характеристик источников воды высокого давления / А. Е. Пушкарев, К. А. Головин, Ю. Н. Наумов // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Центрального региона Российской Федерации: тез. докл. 1-й Региональной конф. – Тула, 1998. – С. 79.

86. Пушкарев, А. Е. Исследование влияния расстояния от среза коллиматора гидроабразивного резака до поверхности разрушаемой породы на эффективность процесса щелеобразования / А. Е. Пушкарев, А. Б. Жабин, К. А. Головин // Наука и экологическое образование. Практика и перспективы: тез. докл. 1-й Международной конференции по проблемам экологии и безопасности жизнедеятельности. – Тула, 1997. – С. 189.

87. Liu, S. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes / S. Liu, X. Liu, J. Chen, M. Lin // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 28. № 3. – P. 607-617. – Doi: 10.3901/CJME.2015.0305.023.

88. Liu, X. Experiment on conical pick cutting rock material assisted with front and rear water jet [Электронный ресурс] / X. Liu, S. Liu, L. Li, X. Cui // Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 506579. Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/506579/> (дата обращения: 8.06.2019). – DOI 10.1155/2015/506579.

89. Liu, S. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet [Электронный ресурс] / S. Liu, J. Chen, X. Liu // Advances in Mechanical Engineering. – 2014. Режим доступа: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2014/868041> (дата обращения: 8.06.2019). – DOI 10.1155/2014/868041.

90. Song, D. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting / D. Song, E. Wang, Z. Liu, X. Liu, R. Shen // International Journal of Rock

Mechanics & Mining Sciences. – 2014. – Vol. 70. – P. 318-331. – DOI 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015.

91. Song, D. Numerical simulation of pressure relief in hard coal seam by water jet cutting / D. Song, E. Wang, J. Xu, X. Liu, R. Shen, W. Xu. // Geomechanics and Engineering. – 2015. – Vol. 8(4). – p. 495-510. – DOI 10.12989/gae.2015.8.4.495.

92. Wen-tao, L. Study on flow field characteristics of nozzle water jet in hydraulic cutting / L. Wen-tao, D. Xiao-yu. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 81, 2nd International Conference on Materials Science, Energy Technology and Environmental Engineering (MSETEE 2017). Zhuhai, China. – 28-30 April 2017. – DOI 10.1088/1755-1315/81/1/012167.

93. Малухин, Н. Г. Повышение эффективности работы гидромонитора ГМД-350 при добыче янтаросодержащих глин / Н. Г. Малухин, Н. Г. Дробаденко, Н. Н. Ключков, С. В. Тимошенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 12. – С. 236-241.

94. Патент РФ № 169574 на полезную модель Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, М. В. Калмаков и др. // Оpubл. 23.03.2017. – Бюл. № 9.

95. Шкаруба, Н. А. Особенности обоснования параметров моделирования размыва горных пород напорной струей гидромонитора / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков, Ф. И. Борисов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25. № 4. – С. 32-38.

96. Фридман, Б. Э. Гидромонитор ГМН-250 / Б. Э. Фридман. – М. : Специальное главное управление «Главспеццветмет», Отраслевое бюро технической информации, 1951. – 76 с.

97. Алабужев, П. М. Теории подобия и размерностей. Моделирование / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич и др. – М. : Высшая школа, 1968. – 208 с.

98. Chemport.ru [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.chemport.ru/data/data35.shtml> (дата обращения 27.04.2016).

99. Справочник химика 21. Химия и химическая технология [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://chem21.info> (дата обращения 27.04.2016).
100. Кисляков, В. Е. Разработка месторождений полезных ископаемых средствами гидромеханизации : учеб. пособие / В. Е. Кисляков. – Красноярск : ГАЦМиЗ, 2000. – 156 с.
101. Молоканов, Ю. К. Химия и химическая технология. Процессы и аппараты нефтегазопереработки : учебник для техникумов / Ю. К. Молоканов. – 2-е изд. – М. : Химия, 1987, – 368 с.
102. Гейер, В. Г. Гидравлика и гидропривод : учебник для вузов / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Г. Боруменский, А. Н. Заря. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1981. – 295 с.
103. Кисляков, В. Е. Исследование интенсивности гидромониторной отбойки пород / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, П. В. Катышев // В мире научных открытий. – 2017. – Т. 9. № 4. – С. 230-233.
104. Шкаруба, Н. А. Сила удара струи гидромонитора о забой / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S38. – С. 188-192.
105. Кисляков, В. Е. Влияние тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на производительность и энергоэффективность гидромониторной установки / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба // Тр. Междунар. научно-техн. конф. «Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность». – 2017. – С. 147-148.
106. Кисляков, В. Е. Влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на силу удара струи гидромонитора о забой / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, П. В. Катышев // Маркшейдерия и Недропользование. – 2017. – № 6 (92). – С. 52-54.
107. Кисляков, В. Е. Исследование силы удара струи гидромонитора о забой / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, П. В. Катышев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. – 2018. – № 1. – С. 268-275.

108. Рекомендации по расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и насосов систем гидрозолоудаления ТЭС. П 09-83, ВНИИГ. – Л., 1984. – 75 с.
109. Майнингэкспо [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.miningexpo.ru/useful/144> (дата обращения 15.04.2018 г.).
110. Абразивность горной породы [Электронный ресурс] // Российское промышленное бурение. – Режим доступа: <http://rosprombur.ru/abrazivnost-gornoj-porody.html> (дата обращения 15.04.2018 г.)
111. Абразивность [Электронный ресурс] // Все о горном деле. Добывающая промышленность. – Режим доступа: <http://industry-portal24.ru/gornorazvedochnye-raboty/1283-abrazivnost.html> (дата обращения 15.04.2018 г.)
112. Что такое шкала твердости по Моосу для металлов и минералов [Электронный ресурс] // DragMag.ru. – Режим доступа: <http://dragmag.ru/chto-takoe-shkala-tverdosti-po-moosu-dlja-metallov/> (дата обращения 15.04.2018 г.)
113. Шкаруба, Н. А. Определение длины струи гидромонитора при наличии в воде тонкодисперсных грунтовых частиц / Н. А. Шкаруба, Н. А. Шарыпов, В. Е. Кисляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 275-286.
114. Шкаруба, Н. А. Длина струи гидромонитора при наличии в воде тонкодисперсных грунтовых частиц / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков, Н. А. Шарыпов // Тр. VII Междунар. научно-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – 2018. – С. 193-197.
115. Советов, Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с.
116. Девис, Дж. С. Статистический анализ данных в геологии / Дж. С. Девис. – Кн. 1. – М. : Недра, 1990. – 319с.
117. Воскобойников, Ю. Е. Эконометрика в Excel: парные и множественные регрессионные модели / Ю. Е. Воскобойников. – СПб. : Лань, 2016. – 260 с.
118. Резник, А. В. Технология открытой разработки обводненных бурогольных месторождений Канско-Ачинского бассейна / А. В. Резник,

В. И. Ческидов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 106-115.

119. Резник, А. В. Обоснование технологии открытой разработки обводненного пологопадающего бурогоугольного месторождения без осушения продуктивной толщи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Резник Александр Владиславович. – Новосибирск, 2019. – 24 с.

120. Патент РФ № 2608591 Способ формирования струи гидромонитора и устройство для его осуществления / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, М. В. Калмаков // Оpubл. 23.01.2017. – Бюл. № 3.

121. Патент РФ № 2608592 Успокоитель потока воды в стволе гидромонитора / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкаруба, М. В. Калмаков и др. // Оpubл. 23.01.2017. – Бюл. № 3.

122. Шкаруба, Н. А. Моделирование отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием твердых абразивных частиц / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков, П. В. Катышев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 10. – С. 79-89.

123. Шкаруба, Н. А. Эффективность отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием твердых абразивных частиц / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков // Тр. VIII Междунар. научно-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – 2019. – С. 126-131.

124. Шкаруба, Н. А. Влияние эжектирования твердых абразивных частиц на производительность гидромониторной отбойки глинистого массива / Н. А. Шкаруба // XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля : тезисы докладов. – 2019. – С. 231.

125. Шкаруба, Н. А. Производительность отбойки глинистого массива при использовании двухфазной гидромониторной струи / Н. А. Шкаруба // Материалы

XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной Международному году Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева. – 2019. – С. 1597-1599.

126. Патент РФ № 2702442 Гидромонитор / Н. А. Шкаруба, В. Е. Кисляков, Р. З. Нафиков // Опубл. 08.10.2019. – Бюл. № 28.

127. Hashish, M. Abrasive Jets / M. Hashish // Fundamentals and Applications, Waterjet Technology Association, Section 4, in Fluid Jet Technology. – 1991.

128. Sheldon, G. L. The Mechanism of Material Removal in the Erosive Cutting of Brittle Material / G. L. Sheldon, I. Finnie // J. Eng. Ind. – 1966. – P. 393 – 400.

129. Hessling, M Recent Examination Relating to the Effects of the Abrasive Material, Operating Parameters and Rock Properties on the Depth of Cut Obtainable with Abrasive High Presser Water Jets when Cutting Rock / M Hessling // 9th International Symposium on Jet Cutting Technology. – 1988. – paper G3. – P. 357 – 376.

130. Нурок, Г. А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ / Г. А. Нурок. – М. : Недра, 1985. – 471 с.

131. Griffiths, J. J. Abrasive Injection in the United Kingdom / J. J. Griffiths // 2nd U.S. Waterjet Conference. – 1983. – P. 423-432.

132. Faber, K. Influence of Process Parameters on Blasting Performance with the Abrasive Jet / K. Faber, H. Oweinah // 10th Int. Sump. on Jet Cutting Technology. – 1990. – P. 365-384.

133. Тихомиров, Р. А. Гидрорезание неметаллических материалов / Р. А. Тихомиров, В. С. Гуенко. – Киев : Техника, 1984. – 149 с.

134. Бреннер, В. А. Исследование гидроабразивного разрушения горных пород / В. А. Бреннер, А. Е. Пушкарев, К. А. Головин // Известия Тульского гос. ун-та. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. – 1997. – Вып. 3. – С. 342-345.

135. Chalmers, E. J. Effect of Parameter Selection on Abrasive Waterjet Performance / E. J. Chalmers // 6th American Water Jet Conference, Houston, Texas. – 1991. – P. 345-354.

136. Laurinat, A. A Model for Milling with Abrasive Water Jets / A. Laurinat, H. Louis, G. Meier-Wiechert // 7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington. – 1993. – P. 119-139.

137. Yasici, S Abrasive Jet Cutting and Drilling of Rock : Ph. D. Dissertation in Mining Engineering, University of Missouri / Yasici Sina. – Rolla, Missouri, 1989. – 203 p.

138. Бреннер, В. А. Гидроабразивное резание горных пород / В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, А. Е. Пушкарев, М. М. Щеголевский. – М. : Изд-во МГГУ, 2003. – 279 с.

139. Жабин, А. Б. Гидроструйные технологии в горном деле : практикум / под ред. А. Б. Жабина, Ан. В. Полякова, М. М. Щеголевского. – М. : Горная книга, 2013. – 399 с.

140. Патент РФ № 2046954 Насадок гидромонитора / П. И. Германский, В. И. Медведков, В. М. Титов // Оpubл. 27.10.1995.

141. Патент РФ № 2272143 Гидромонитор / Н. И. Бабичев, А. Е. Дворовенко, А. Ю. Фильчуков // Оpubл. 20.03.2006. – Бюл. № 8.

142. Информационное агентство ura.ru [Электронный ресурс] // Информационное агентство ura.ru. – Режим доступа: <https://ura.news/upload/DSC02009.JPG> (дата обращения 16.05.2019 г.)

143. Артель старателей Нейва [Электронный ресурс] // eRUDA.ru Рейтинг золотодобывающих компаний. Золотодобывающие компании свердловской области. Артель старателей Нейва. – Режим доступа: http://www.eruda.ru/job/au/sverdlovskaya_oblast_gold/neiva_artel_starateley.htm (дата обращения 16.05.2019 г.)

Таблица – Результаты проведения экспериментов по определению зависимости силы давления струи гидромонитора на забой от плотности напорной воды из-за содержания в ней тонкодисперсных грунтовых частиц

Плотность воды, т/м ³	Расстояние до забоя, м	Напор воды перед насадкой, м	Давление на забой, кг/см ²	Напор воды перед насадкой, м	Давление на забой, кг/см ²	Напор воды перед насадкой, м	Давление на забой, кг/см ²
При диаметре насадки $d_n=5,2$ мм							
1	1,5	10	0,43	15	0,65	20	0,85
1,01	1,5	10	0,44	15	0,66	20	0,86
1,0225	1,5	10	0,4539	15	0,6739	20	0,8739
1,035	1,5	10	0,4647	15	0,6847	20	0,8847
1,038	1,5	10	0,468	15	0,688	20	0,888
1	2,5	10	0,42	15	0,62	20	0,82
1,01	2,5	10	0,43	15	0,63	20	0,83
1,0225	2,5	10	0,4439	15	0,6439	20	0,8439
1,035	2,5	10	0,4547	15	0,6547	20	0,8547
1,038	2,5	10	0,458	15	0,658	20	0,858
1	3	10	0,4	15	0,6	20	0,8
1,01	3	10	0,41	15	0,61	20	0,81
1,0225	3	10	0,4239	15	0,6239	20	0,8239
1,035	3	10	0,4347	15	0,6347	20	0,8347
1,038	3	10	0,438	15	0,638	20	0,838
1	3,5	10	0,38	15	0,58	20	0,78
1,01	3,5	10	0,39	15	0,59	20	0,79
1,0225	3,5	10	0,4039	15	0,6039	20	0,8039
1,035	3,5	10	0,4147	15	0,6147	20	0,8147
1,038	3,5	10	0,418	15	0,618	20	0,818

При диаметре насадки $d_H=7,6$ мм							
1	1,5	10	0,9948	15	1,5198	20	1,9198
1,01	1,5	10	1,005	15	1,53	20	1,93
1,0225	1,5	10	1,025	15	1,55	20	1,95
1,035	1,5	10	1,034	15	1,559	20	1,959
1,038	1,5	10	1,038	15	1,563	20	1,963
1	2,5	10	0,9848	15	1,4798	20	1,8998
1,01	2,5	10	0,995	15	1,49	20	1,91
1,0225	2,5	10	1,015	15	1,51	20	1,93
1,035	2,5	10	1,024	15	1,519	20	1,939
1,038	2,5	10	1,028	15	1,523	20	1,943
1	3	10	0,9698	15	1,4698	20	1,8698
1,01	3	10	0,98	15	1,48	20	1,88
1,0225	3	10	1	15	1,5	20	1,9
1,035	3	10	1,009	15	1,509	20	1,909
1,038	3	10	1,013	15	1,513	20	1,913
1	3,5	10	0,9548	15	1,4598	20	1,8398
1,01	3,5	10	0,965	15	1,47	20	1,85
1,0225	3,5	10	0,985	15	1,49	20	1,87
1,035	3,5	10	0,994	15	1,499	20	1,879
1,038	3,5	10	0,998	15	1,503	20	1,883
При диаметре насадки $d_H=10,2$ мм							
1	1,5	10	1,83	15	2,46	20	3,43
1,01	1,5	10	1,843	15	2,473	20	3,443
1,0225	1,5	10	1,85	15	2,48	20	3,45
1,035	1,5	10	1,861	15	2,491	20	3,461
1,038	1,5	10	1,864	15	2,494	20	3,464
1	2,5	10	1,78	15	2,45	20	3,32
1,01	2,5	10	1,793	15	2,463	20	3,333
1,0225	2,5	10	1,8	15	2,47	20	3,34
1,035	2,5	10	1,811	15	2,481	20	3,351
1,038	2,5	10	1,814	15	2,484	20	3,354
1	3	10	1,73	15	2,43	20	3,28
1,01	3	10	1,743	15	2,443	20	3,293
1,0225	3	10	1,75	15	2,45	20	3,3
1,035	3	10	1,761	15	2,461	20	3,311
1,038	3	10	1,764	15	2,464	20	3,314
1	3,5	10	1,68	15	2,41	20	3,24
1,01	3,5	10	1,693	15	2,423	20	3,253
1,0225	3,5	10	1,7	15	2,43	20	3,26
1,035	3,5	10	1,711	15	2,441	20	3,271
1,038	3,5	10	1,714	15	2,444	20	3,274

Приложение Б

Таблица – Отклонение производительности отбойки пород гидромонитором в зависимости от расхода твердых абразивных частиц

Расход твердых абразивных частиц $c_{\text{тач}}$, г/л	Отклонение производительности и гидромонитора ΔQ , %	Расход твердых абразивных частиц $c_{\text{тач}}$, г/л	Отклонение производительности гидромонитора ΔQ , %
При диаметре насадки гидромонитора 5,2 мм			
0,5	15,16	12	363,95
1	30,33	12,5	379,12
1,5	45,49	13	394,28
2	60,66	13,5	409,45
2,5	75,82	14	424,61
3	90,99	14,5	439,78
3,5	106,15	15	454,94
4	121,32	15,5	470,10
4,5	136,48	16	485,27
5	151,65	16,5	500,43
5,5	166,81	17	515,60
6	181,98	17,5	530,76
6,5	197,14	18	545,93
7	212,31	18,5	561,09
7,5	227,47	19	576,26
8	242,63	19,5	591,42
8,5	257,80	20	606,59
9	272,96	20,5	621,75
9,5	288,13	21	636,92
10	303,29	21,5	652,08
10,5	318,46	22	667,25
10,54	319,67	22,5	682,41
11	333,62	23	697,57
11,5	348,79		
При диаметре насадки гидромонитора 7,6 мм			
0,5	22,83539	1,5	68,50617
1	45,67078	2	91,34156

2,5	114,1769	13	593,7201
3	137,0123	13,5	616,5555
3,5	159,8477	14	639,3909
4	182,6831	14,5	662,2263
4,5	205,5185	15	685,0617
5	228,3539	15,5	707,8971
5,5	251,1893	16	730,7324
6	274,0247	16,5	753,5678
6,5	296,8601	17	776,4032
7	319,6954	17,5	799,2386
7,5	342,5308	18	822,074
8	365,3662	18,5	844,9094
8,5	388,2016	19	867,7448
9	411,037	19,5	890,5802
9,5	433,8724	20	913,4156
10	456,7078	20,5	936,2509
10,5	479,5432	21	959,0863
10,54	481,37	21,5	981,9217
11	502,3786	22	1004,757
11,5	525,2139	22,5	1027,593
12	548,0493	23	1050,428
12,5	570,8847		

ООО «Наровчатский Карьер»

Магнитогорское отделение №1693
 Сбербанк России ОАО
 Р/сч. 40702810772330008550
 Челябинское ОСБ №8597 г. Челябинск
 БИК 047501602, к/сч. 30101810700000000602

455049, г. Магнитогорск, ул. Советская, 160/а
 ИНН 7445044301, КПП 744501001
 Тел./факс: 8 (3519) 39-55-68
 e-mail: werty71@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор
 ООО «Наровчатский карьер»

Васильев П. Б.

2020 г.



АКТ

внедрения результатов диссертации Шкаруба Натальи Александровны
 на ООО "Наровчатский карьер"

1. Наименование результатов диссертационной работы

Методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде при применении средств гидромеханизации;

Технология отбойки пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц.

2. Новизна технологических решений

Разработана методика определения максимально возможной концентрации тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде при применении средств гидромеханизации, предусматривающая подачу технологической воды на гидромонитор с известным количеством тонкодисперсных грунтовых частиц в ее составе. Накопление этих частиц в технологической воде происходит естественным путем в течение промывочного сезона.

За счет управляемого содержания в напорной воде гидромонитора тонкодисперсных грунтовых частиц, предлагаемая технология позволяет увеличить производительность отбойки пород, сократить необходимый объем технологической воды для работы гидромонитора, а также удельный расход воды на процесс отбойки массива горных пород.

Разработана технология ведения горных работ, предусматривающая отбойку пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц.

Указанная технология позволяет увеличить производительность отбойки пород струей гидромонитора за счет абразивного воздействия на разрабатываемый массив горных пород гидромониторной струи, подготовленной согласно предложенным решениям.

Предлагаемая технология обеспечивает отбойку пород при ведении как вскрышных, так и добычных работ.

Технология позволяет размывать грунты с меньшим, чем рекомендовано традиционной технологией, напором, что, в свою очередь, ведет к сокращению расхода напорной воды и электроэнергии, площади, занимаемой прудами-отстойниками оборотного водоснабжения, и, как следствие, увеличению экологичности отбойки.

3. Место внедрения

Наровчатское месторождение песчано-гравийной смеси (ООО "Наровчатский карьер")

4. Время работы после внедрения

Начало внедрения работ по использованию природных ресурсов с целью формирования техногенных георесурсов – апрель 2019 года.

Окончание работ по совокупному использованию техногенных георесурсов при переработке природных ресурсов – ноябрь 2020 года.

Директор ООО «Наровчатский карьер»



Васильев П. Б.