

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск, 2020

Работа выполнена на кафедре открытых горных работ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: *Кисляков Виктор Евгеньевич*
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: *Овешников Юрий Михайлович*
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», кафедра открытых горных работ, заведующий кафедрой

Протасов Сергей Иванович
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра открытых горных работ, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится «14» января 2021 года в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.02 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38, аудитория 231.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте университета: www.magtu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



С.Н. Корнилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время наблюдается истощение базы легкоразрабатываемых месторождений. В связи с этим в отработку вовлекаются запасы, характеризующиеся сложными горно-геологическими условиями, высоким содержанием глины во вмещающих породах и небольшим содержанием полезных компонентов.

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

Освоение природных, техногенных и повторная разработка россыпных месторождений, залегающих в высокоглинистых обводненных грунтах, связана с трудностью 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 предпочтительнее наиболее гибкий и нетребовательный к условиям эксплуатации способ гидромеханизации – отбойка пород гидромонитором.

Поэтому исследования, ориентированные на выявление зависимости производительности отбойки пород гидромонитором от наличия в его струе твердых частиц различной крупности, позволят повысить эффективность гидромеханизированной разработки высокоглинистых россыпных месторождений и 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 «Перспективныи», 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.

Объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор и анализ современного состояния изученности техники и технологии разработки месторождений, залегающих во вмещающих породах с высоким содержанием глины. На основе разработанной научно-методической базы в области повышения эффективности разработки месторождений средствами гидромеханизации выдающимися зарубежными и отечественными учеными: Г.А. Нуроком, С.М. Шороховым, Б.Э. Фридманом, В.Ф. Хныкиным, В.П. Дробаденко, И.М. Ялтанцом, Ю.М. Овешниковым,

Е.А. Бессоновым, С.И. Протасовым, В.С. Литвинцевым, Р.С. Серым, К. Faber, H. Oweinah и др. сформулированы цели, задачи и методика исследований.

Во второй главе произведено обоснование параметров модели отбойки пород гидромонитором, описан лабораторный стенд. Обоснованы параметры геометрического подобия и подобия процессов.

Исследовано влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на силу удара струи гидромонитора о забой при помощи лабораторных экспериментов.

Предложена математическая модель изменения силы удара струи гидромонитора о забой, произведена ее оценка. Описано влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде гидромонитора на потребляемую мощность насосной установки и ее абразивный износ. Показано изменение необходимого объема воды в пруду-отстойнике.

Изучено влияние тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на дальность полета струи гидромонитора. Описаны лабораторные эксперименты и их результаты. Предложена математическая модель определения дальности полета струи гидромонитора. Произведена статистическая оценка коэффициентов модели.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований эффективности отбойки глинистых грунтов гидромониторной струей с эжектированием в нее твердых абразивных частиц; описаны лабораторные эксперименты и представлены их результаты. Определена степень абразивного износа гидромонитора эжектированными твердыми абразивными частицами. Предложена математическая модель изменения производительности отбойки пород напорной струей гидромонитора от эжектирования в нее твердых абразивных частиц.

В четвертой главе предложены: технологические решения отбойки пород гидромонитором с содержанием в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц и технологические решения отбойки пород с эжектированием твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора и параметры наиболее эффективного их применения.

Пятая глава содержит технико-экономическую оценку предлагаемых технологических решений при отработке месторождений с высоким содержанием глины на примере россыпи «Шуралинско-Ключевская» (Свердловская область).

Основные результаты проведенных исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

Производительность размыва горных пород гидромонитором зависит от способности напорной струи воды разрушать горный массив и характеризуется, в том числе, силой воздействия гидромониторной струи на забой (или, как ее называют в ряде источников, силой удара струи).

Однако поскольку на современных предприятиях гидромониторы обеспечивают напорной водой посредством оборотного водоснабжения из прудов-отстойников, а скорость осаждения тонкодисперсных грунтовых частиц в воде весьма низкая, то фактически на гидромонитор подается вода с большим

содержанием этих частиц, особенно для месторождений со значительным содержанием глины (рис 1). Плотность такой воды будет больше плотности чистой воды, в связи с чем напорную воду следует относить к неоднородным (гетерогенным) смесям (неньютоновским жидкостям).

В результате анализа современной научно-методической базы в области разработки месторождений средствами гидромеханизации установлено, что в недостаточной мере проработан вопрос определения силы удара струи гидромонитора о забой с учетом применения схемы оборотного водоснабжения из прудов-отстойников, то есть не обеспечен необходимый уровень достоверности расчетов.

Для определения воздействия содержания в напорной воде гидромонитора тонкодисперсных грунтовых частиц на силу удара его струи проведены лабораторные эксперименты при помощи стенда, выполненного в масштабе 1:10 (рис. 2).

Соотношение содержания твердых частиц (c) в воде и ее плотности (ρ) приведено для случая, когда удельный вес тонкодисперсных грунтовых частиц составляет $\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$.



Рисунок 1 – Разрыв пород гидромонитором со значительным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц при оборотном водоснабжении



Рисунок 2 – Общий вид стенда для исследования интенсивности гидромониторной отбойки

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что увеличение плотности напорной воды гидромонитора (ρ) от 1,0 до 1,038 т/м^3 (соответствует содержанию грунтовых частиц от 0 до 100 г/л) приводит к росту силы давления струи на забой в пределах 1-10%. Соответствующий график при напоре воды $H_0=10 \text{ м}$, диаметре насадки гидромонитора $d_n=5,2 \text{ мм}$ и расстоянии до забоя $L=1,5-3,5 \text{ м}$ показан на рис. 3.

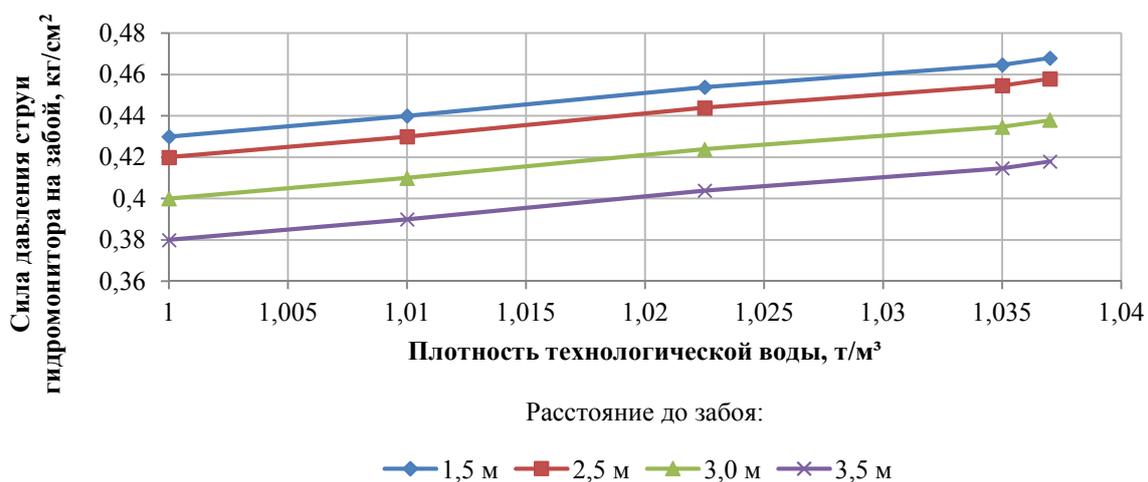


Рисунок 3 – Зависимость силы давления гидромониторной струи на породу от плотности напорной воды и расстояния до забоя (при $d_n=5,2$ мм, $H_0=10$ м)

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.

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 диаметрах насадок гидромонитора. При этом расстояние от забоя может быть максимально допустимым по технологическим условиям.

По результатам проведенных исследований выявлено, что сила удара гидромониторной струи о забой P изменяется от 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 по полиномиальной зависимости:

$$P = A \cdot \rho + 100^{-4} \cdot L \cdot (10^{-2} \cdot B \cdot H_0^2 + 10^{-1} \cdot C \cdot H_0 + D) + E + F, \quad (1)$$

где A, B, C, D, E, F – коэффициенты математической модели:

$$A, B, C, D, E = 10^{-2} \cdot a \cdot d_n^2 + 10^{-1} \cdot b \cdot d_n + c; \quad (2)$$

$$F = H_0 \cdot (0,023 \cdot d_n - 0,081), \quad (3)$$

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

Таблица – Эмпирические коэффициенты уравнения (2)

Определяемый коэффициент	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	5255	15860
E	0,45	-6,25	10,62

Математическая модель (1) позволяет прогнозировать производительность отбойки с достаточной степенью достоверности для значений: $d_n=52-102$ мм, $H_0=100-200$ м, $L=15-35$ м, $\rho=1-1,038$ т/м³.

Вышеизложенное является доказательством первого научного положения, выносимого на защиту, а именно: 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.

Одним из важных показателей работы гидромонитора является дальность полета его струи. Известно значительное количество методик ее расчета. Однако большинство из них имеют существенные ограничения для применения. Так, при угле наклона ствола гидромонитора $\alpha=0^\circ$, приемлемый результат дает только одна методика, а при отрицательных значениях – три выражения показывают отрицательные значения длины струи. При этом имеющиеся зависимости не учитывают влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде или ее плотность.

Так как, большинство предприятий, разрабатывающих месторождения средствами гидромеханизации, применяют обратную схему водоснабжения, то на гидромонитор подается напорная вода со значительным содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц. Особенно это характерно для месторождений с высоким содержанием глины во вмещающих породах.

Для определения влияния содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц на максимальную дальность полета струи гидромонитора при углах наклона его ствола к горизонту в интервале $\pm 30^\circ$ (например, при подрезке уступа) проведена серия экспериментов, которые осуществлялись на модели при диаметре насадок 5,2-7,6-10,2 мм, напоре на насадке 2-15 м, плотности технологической воды от 1,0 до 1,047 т/м³.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 4 (для условий $d_n=7,6$ мм) свидетельствуют, что увеличение плотности напорной воды снижает дальность полета струи гидромонитора на 5-9%. При этом, по мере роста напора, дальность полета возрастает, а ее интенсивность обуславливается плотностью напорной воды.

Таким образом, на основе анализа результатов проведенных экспериментов установлено, что содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде снижает максимальную дальность полета струи, которая, в свою очередь, определяется диаметром насадки гидромонитора и величиной напора, имеющего превалирующее значение.

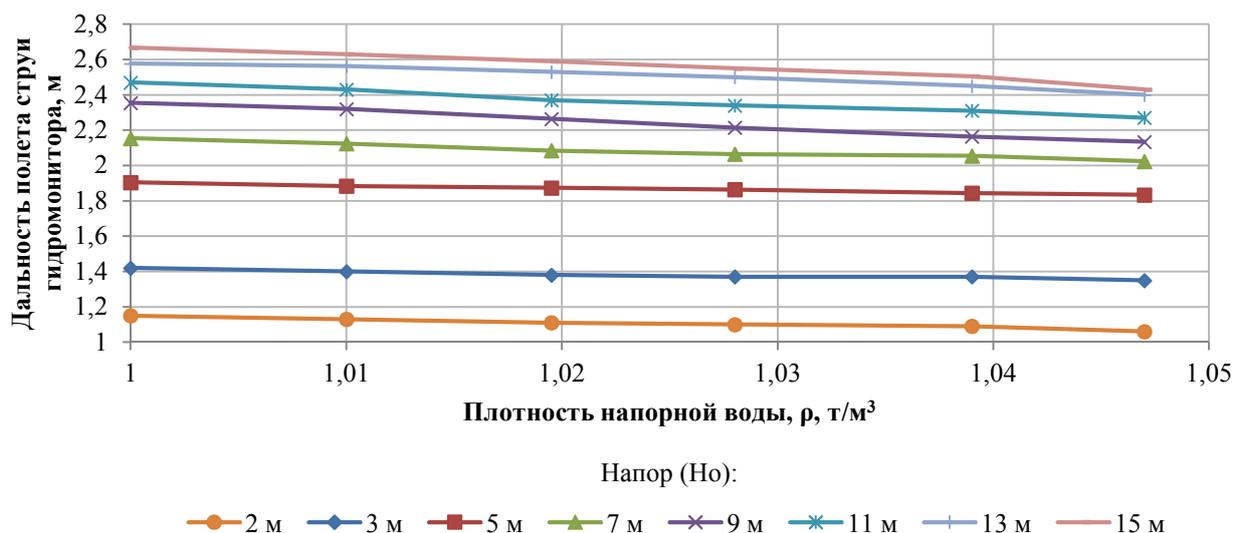


Рисунок 4 – Зависимость дальности полета струи гидромонитора при установке его ствола под углом $\alpha=0^\circ$ к горизонту от напора и содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде $\rho(c)$

На основе обработки экспериментальных данных получено уравнение для расчета дальности полета струи гидромонитора l_c от плотности технологической воды ρ (содержания тонкодисперсных грунтовых частиц), диаметра насадки гидромонитора d_H и напора воды H_0 следующего вида:

$$l_c = 29,4041 + 0,0254 \cdot d_H - 28,5575 \cdot \rho + H_0 (0,3842 - 0,0016 \cdot H_0). \quad (3)$$

Математическая модель (3) позволяет прогнозировать дальность полета струи гидромонитора с достаточной степенью достоверности для значений: $d_H=52-102$ мм, $H_0=20-150$ м, $\rho=1-1,047$ т/м³.

Вышеизложенное является доказательством второго научного положения, выносимого на защиту, а именно: 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.

На практике повышение производительности гидромониторной отбойки достигается за счет рыхления механическим или буровзрывным способом, водонасыщения пород и др. Однако данные мероприятия неизбежно приводят к росту затрат на разработку месторождения.

Кроме того, увеличить производительность отбойки возможно за счет конструктивных изменений гидромониторной установки или добавления в напорную воду твердых частиц (чаще всего используем для гидроабразивной резки твердых пород).

В результате анализа существующих исследований выявлено отсутствие таковых применительно к условиям разрушения глинистых массивов гидромониторными струями с наличием в них твердых абразивных частиц.

В ходе настоящей работы оценивалась производительность отбойки пород гидромонитором при эжектировании твердых абразивных частиц в его струю.

Поставленная задача решена конструкцией устройства для гидромониторной отбойки двухфазным напорным потоком. Эксперименты выполняли при следующих параметрах: диаметр насадок (d_n) 5,2 и 7,6 мм; напор на насадке (H_0) 5 м; величина разряжения в эжекторе ($H_{эж}$) 3,5 м; расстояние от забоя (L) 2,5 м; диаметр сопла эжектора (d_c) 2,3 мм; средняя крупность твердых абразивных частиц ($d_{т.ч.}$) 0,15, 0,20, 0,26, 0,33, 0,41 мм.

Для чистоты эксперимента размываемый образец состоял только из глины. Материал образца – лонтоваские глины кембрия, по физическим свойствам характеризуемые как уплотненные, по гранулометрическому составу – как пылеватые. Следует отметить, что такие грунты, с точки зрения технологии разработки месторождений, относятся к весьма трудноразмываемым.

Размер эжектируемых частиц принят порядка 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора (по общепринятым нормам), что обусловлено обеспечением эффективного действия и стабильного истечения струи из эжектора. Использованы твердые абразивные частицы неправильной формы плотностью $\gamma=1,7$ т/м³ (кварцевый песок).

По итогам обработки экспериментальных данных установлено, что эжектирование твердых абразивных частиц в гидромониторную струю позволяет увеличить производительность отбойки до 2,11 и 2,98 раза при содержании твердых абразивных частиц 6,5 г/л, напоре 5 м и диаметрах насадки 5,2 и 7,6 мм соответственно (рис. 5). Характер влияния содержания твердых абразивных частиц на производительность отбойки показан на рис. 6.

При этом сила воздействия струи гидромонитора на забой увеличивается в диапазоне (6,8-15,2%).

В связи с этим можно сделать вывод, что в основе увеличения производительности отбойки в условиях эжектирования твердых абразивных частиц в напорную струю гидромонитора в большей степени лежит абразивное воздействие гидромониторной струи.

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

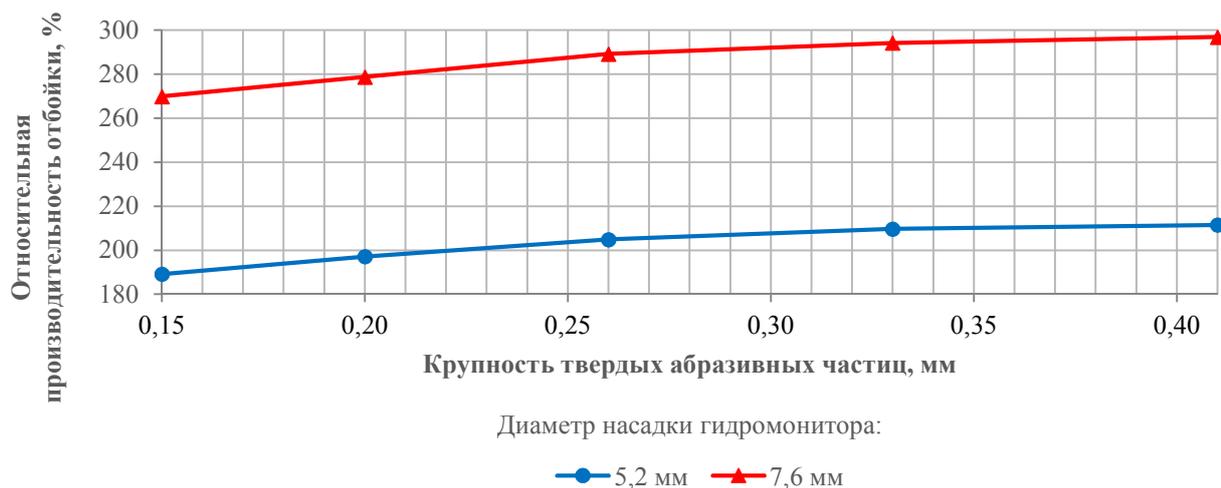


Рисунок 5 – Влияние крупности твердых абразивных частиц на относительную производительность отбойки пород гидромонитором при угле встречи струи с поверхностью забоя $\alpha=90^\circ$ и содержании абразивных частиц 6,5 г/л (за 100% принята производительность гидромонитора при использовании напорной воды без добавления твердых абразивных частиц)

При увеличении размера твердых частиц наблюдается снижение приращения производительности отбойки.

Также по результатам исследования определено, что эжектирование твердых абразивных частиц в гидромониторную струю дает резкий скачок увеличения производительности отбойки. При этом эффект от увеличения размера частиц менее выражен (1,1 и 1,16 раза при содержании твердых абразивных частиц 6,5 г/л и диаметрах насадок 5,2 и 7,6 мм соответственно).

Поэтому 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, который по общепринятым нормам составляет порядка 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора.

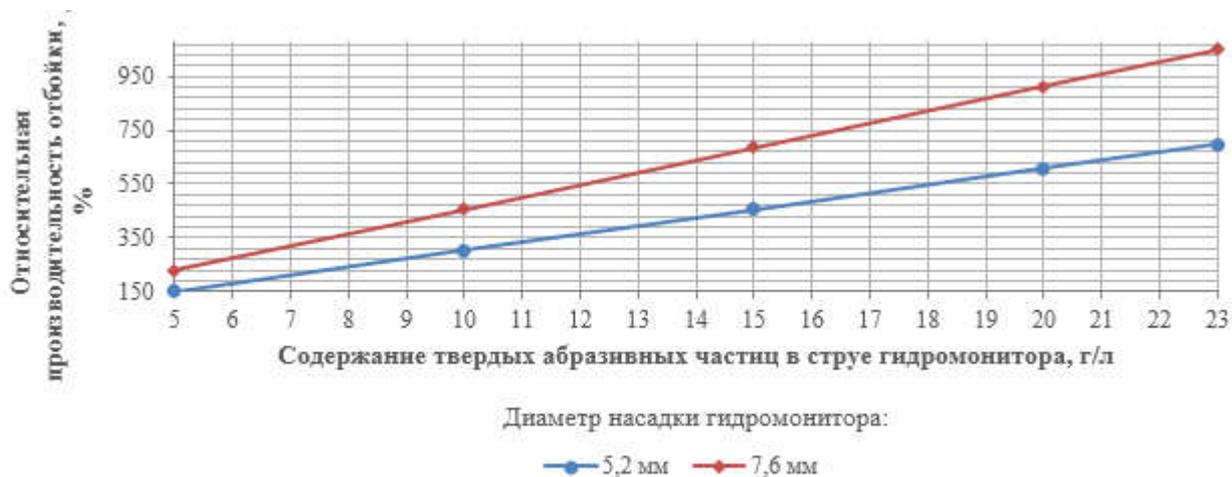


Рисунок 6 – Относительная производительность отбойки пород гидромонитором от содержания твердых абразивных частиц крупностью 0,33 мм в его струе при различных диаметрах насадки (за 100% принята производительность при использовании чистой воды)

С целью определения зависимости производительности гидромониторной отбойки от угла встречи струи с поверхностью забоя (α) проведена серия экспериментов. Величина угла α изменялась от 5° до 90° с шагом 5° . Результаты соответствующих экспериментов приведены на графиках (рис. 7).

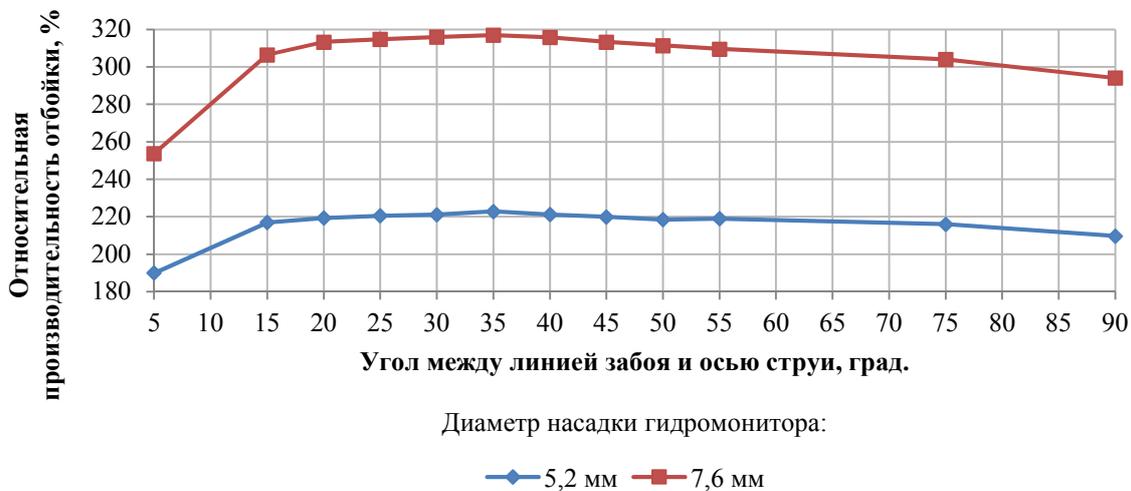


Рисунок 7 – Относительная производительность отбойки пород гидромонитором при содержании эжектируемых твердых абразивных частиц 6,5 г/л и их крупности 0,33 мм в зависимости от угла встречи струи с поверхностью забоя и диаметра насадки

Исходя из полученных результатов выявлено, что максимальная производительность отбойки достигается при встрече струи гидромонитора с поверхностью забоя под углом $25-45^\circ$.

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

Изменение производительности размыва горных пород гидромонитором от размера твердых абразивных частиц ($d_{тч}$) в его струе, угла встречи струи с поверхностью забоя (α), а также диаметра насадки (d_H) представляет собой полиномиальную зависимость:

$$\Delta Q = [(0,290 \cdot d_H - 27,37) \cdot d_{тч}^2 + (-0,265 \cdot d_H + 83,29) \cdot d_{тч} + C] \cdot 1,05, \% \quad (6)$$

где коэффициент C зависит от угла встречи струи с поверхностью забоя α :

$$C = (-0,00025 \cdot d_H - 0,2385) \cdot \alpha^2 + (0,007 \cdot d_H + 13,16) \cdot \alpha + (-8,5462 \cdot d_H + 839,7101) \quad \text{при } \alpha < 19^\circ; \quad (7)$$

$$C = (0,0001 \cdot d_H - 0,01193) \cdot \alpha^2 + (-0,0145 \cdot d_H + 1,00108) \cdot \alpha + (-8,2229 \cdot d_H + 987,24477) \quad \text{при } \alpha \geq 19^\circ. \quad (8)$$

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать влияние эжектирования твердых абразивных частиц в напорную струю на производительность отбойки пород гидромонитором с достаточной степенью достоверности. Погрешность составляет 5-10% для значений: $d_n=52-76$ 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 высокую сходимость, что подтверждено внедрением на ООО «Наровчатский карьер».

Вышеизложенное является доказательством третьего научного положения, выносимого на защиту, а именно: 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°.

В рамках первого научного положения доказана эффективность размыва пород гидромонитором при содержании в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц. На основе разработанной методики отбойку пород можно вести как на вскрышных, так и на добычных работах. Однако в первом случае рекомендуется ограничивать содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде до 60 г/л, а во втором – до 100 г/л. Поэтому в процессе разработки месторождения при использовании оборотной схемы водоснабжения и значительном содержании тонкодисперсных грунтовых частиц в разрабатываемых грунтах необходимо рационально определять их концентрацию в технологической воде. Это позволит осуществлять подачу 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.

С целью регулирования плотности технологической воды на практике необходимо выполнить следующее: первое – изучить гранулометрический состав вскрышных пород и песков; второе – исследовать характер накопления тонкодисперсных грунтовых частиц в пруду-отстойнике; третье – определить объем пруда-отстойника с заданной концентрацией тонкодисперсных грунтовых частиц в месте забора технологической воды (для вскрышных или добычных работ).

Управление содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц в технологической воде обеспечивается корректированием объема воды в отстойнике.

При этом, для увеличения содержания тонкодисперсных грунтовых частиц необходимо уменьшать объем воды в отстойнике, а для уменьшения – увеличивать.

Поэтому производительность отбойки пород струей гидромонитора будет изменяться постепенно в течение промывочного сезона соответственно

изменению содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде пруда-отстойника.

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

По результатам исследований, являющихся доказательством третьего научного положения, разработана технология отбойки пород струей гидромонитора с эжектированием в нее твердых абразивных частиц.

Для ее реализации гидромонитор необходимо оборудовать эжектирующим приспособлением (патент №2702442). Подача твердых абразивных частиц в эжектор осуществляется из специальной емкости (накопителя твердых абразивных частиц). Размер твердых абразивных частиц (по общепринятым нормам) не должен превышать 10-30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора. Классификация твердых абразивных частиц производится с помощью грохота.

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

При производстве вскрышных работ 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 мм, а надрешетный продукт сбрасывается обратно в зумпф и далее транспортируется землесосом в гидроотвал.

Из емкости твердых абразивных частиц, доставленной при помощи бульдозера в забой, отобранная фракция забирается эжектирующим приспособлением гидромонитора и подается в струю гидромонитора.

При производстве добычных работ размытые горные породы от забоя самотеком поступают в зумпф гидромонитора, откуда землесосомой установкой подаются на промывку, например, на прибор гидроэлеваторный шлюзовый (ПГШ) (традиционная схема ведения работ).

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

Грохот при вскрышных и добычных работах размещается 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.

Разработанная технология позволяет увеличить производительность отбойки струей гидромонитора пород, в том числе, представленных трудноразмываемыми глинистыми массивами. Наибольшей эффективности она достигает при угле встречи струи с поверхностью забоя порядка $25-45^\circ$, то есть при размыве уступа попутным или боковым забоем.

Отбойка пород с применением предлагаемой технологии обеспечивает ведение как вскрышных, так и добычных работ.

Технико-экономическими расчетами определено, 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%.

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%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и приравненные к ним публикации:

1. 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.

2. 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.

3. 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. – 2018. – № 1. – С. 268-275. (Web of Science).

4. 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. (Web of Science).

5. 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.

6. 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. (Scopus).

Патенты:

7. Патент № 2608591 РФ Способ формирования струи гидромонитора и устройство для его осуществления / В. Е. Кисляков, **Н. А. Шкаруба**, М. В. Калмаков. – 2017. – Бюл. № 3.

8. Патент № 2608592 РФ Успокоитель потока воды в стволе гидромонитора / В. Е. Кисляков, **Н. А. Шкаруба**, М. В. Калмаков и др. – 2017. – Бюл. № 3.

9. Патент № 169574 РФ на полезную модель Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки / В. Е. Кисляков, **Н. А. Шкаруба**, М. В. Калмаков и др. – 2017. – Бюл. № 9.

10. Патент № 2702442 РФ Гидромонитор / **Н. А. Шкаруба**, В. Е. Кисляков, Р. З. Нафиков. – 2019. – Бюл. № 28.

Другие издания:

11. Кисляков, В. Е. Влияние тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на производительность и энергоэффективность гидромониторной установки / В. Е. Кисляков, **Н. А. Шкаруба** // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность». – Магнитогорск: 2017 г. – С. 147-148.

12. 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.

13. 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. науч.-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – Екатеринбург: 2018 г. – С. 193-196.

14. Шкаруба, Н. А. Эффективность отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием твердых абразивных частиц / **Н. А. Шкаруба**, В. Е. Кисляков // Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – Екатеринбург: 2019 г. – С. 126-130.

15. Шкаруба, Н. А. Влияние эжектирования твердых абразивных частиц на производительность гидромониторной отбойки глинистого массива / **Н. А. Шкаруба** // Тезисы докладов XVII Всерос. конф.-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля. – СПб: 2019 г. – С. 231.

16. Шкаруба, Н. А. Производительность отбойки глинистого массива при использовании двухфазной гидромониторной струи / **Шкаруба Н.А.** //

Материалы XV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной Международному году Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева. – Красноярск: 2019 г. – С. 1597-1599.