

На правах рукописи

Кудряшов Руслан Валерьевич

Развитие технологии скважинной гидродобычи глубокозалегающих месторождений при совершенствовании процесса всасывания.

АВТОРЕФЕРАТ

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

**диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе” МГРИ-РГГРУ

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Маркелов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: Доктор геолого-минералогических наук, профессор, учёный секретарь
ОАО «ВНИПИпромтехнология»
Камнев Евгений Николаевич

Кандидат технических наук, зам. директора
Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение, город Москва, школа №2065
Тимошенко Сергей Владимирович

Ведущая организация: *Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу (ОАО «ВНОГЕМ»)*

Защита состоится « **15** » *октября 2015 года в 14 ч. 35 мин.* На заседании диссертационного совета Д 212.121.08 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе*» (МГРИ-РГГРУ) по адресу: *117997, г Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

Автореферат разослан « » 2015г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Холобаев Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ.

Актуальность работы. Скважинная гидродобыча является одним из перспективных скважинных способов добычи полезных ископаемых.

Освоение ресурсов богатых руд Белгородского рудного района Курской магнитной аномалии является важной социально-экономической задачей, как для Белгородской области, так и для железорудной отрасли России в целом, что было отмечено в ряде федеральных целевых программ, учитывая общие оцененные ресурсы богатых железных руд до 40 млрд. тонн. Качество добываемой руды (практически концентрат) весьма высок, до 62-69% Fe, SiC – (1.5-2.0)% (в среднем по России Fe-30%), содержание меняющихся примесей для металлургического передела весьма незначительно.

Работы по СГД проводились Белгородской экспедицией в соответствии с приказом Мингео СССР № 200 от 26.04.1982 г. Анализ результатов выполненных работ по СГД и принятых технических и технологических решений показал отсутствие на предприятии системного подхода к освоению технологии, недостаточное научное сопровождение и, в конечном итоге, отсутствие систем инженерных расчетов процессов СГД, что является причиной низких показателей эффективности добычи. Что показало необходимость переоснащения эксплуатационных скважин на принципиально новую идею СГД на КМА, основанную на совершенно иных научно-практических предпосылках.

Особую актуальность вовлечение в хозяйственный оборот России ресурсов богатых руд Белгородского рудного района приобрело в силу выработки ряда крупных месторождений на Урале, износа основных фондов действующих предприятий, невозможности строительства новых карьеров и подземных рудников из-за экологических проблем дефицита ценных земель, необходимых для сельского хозяйства, больших капитальных затратах и сроках освоения.

Цель работы – совершенствование процесса всасывания в развитии технологии скважинной гидродобычи глубокозалегающих месторождений.

Идея работы – использование свободных затопленных спутных и отраженных водяных струй для направленного гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания.

Задачи исследования:

- обоснование условий для эффективного ведения гидроразмыва затопленными водяными струями;
- обоснование условий для рационального размещения водоводов, воздухопроводов и пульповода по длине гидродобычного агрегата;
- аналитическое определение текущей осевой и средней скоростей по длине затопленной струи;
- выявление гидравлической связи между гидравлической крупности твердого, составляющей всасываемую горную массу и текущей скорости затопленных струй.
- разработка методики расчёта процесса гидровзвешивания частиц горной массы в плоскости всасывания

Методы исследования:

- анализ и обобщение практического опыта и литературных данных по технологии скважинной гидродобычи и распространения затопленных водяных струй;
- аналитическое обоснование взаимосвязи гидравлической крупности и текущей скорости затопленной водяной струи.

Основные защищаемые научные положения

1. Формирование затопленной струи с необходимой разрушающей способностью возможно только при эксцентричном размещении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата.
2. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи может быть связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью струи и конечным диаметром её начального участка, причём сумма всех корректирующих коэффициентов в знаменателе расчётного выражения должна соответствовать единице при любых их сочетаниях.
3. Текущая средняя скорость отражённой затопленной гидромониторной струи должна быть взаимосвязана с закономерностью её перемещения в воде, в горной массе и отражённой при гидровзвешивании твёрдого в плоскости всасывания.
4. Гидровзвешивающая способность струи должна определяться взаимодействием текущих параметров искомой струи и гидравлической крупностью взвешиваемых частиц в плоскости всасывания с учётом конкретных исходных эксплуатационных параметров эрлифта.

Научная новизна работы

1. Формирование затопленной струи с необходимой разрушающей (гидровзвешивающей) способностью возможно только при эксцентричном независимом расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата, обеспечивающем как минимум, потерь напора в водоводе, так и значительное снижение усилий, необходимых для отклонения ствола гидромонитора.
2. Текущая средняя скорость движения жидкости по длине затопленной гидромониторной струи аналитически связана через постоянный коэффициент с осевой и начальной скоростью, и конечным диаметром начального участка струи.
3. Текущая средняя и осевая скорости по длине затопленной гидромониторной струи соотносятся, как начальный и переходный диаметр струи, причём сумма коэффициентов в знаменателе искомого расчетного выражения должна быть равна единице при любых их сочетаниях.
4. Текущая скорость распространения затопленной струи в горной массе прямопропорциональна корню квадратному из соотношения плотностей жидкости напорной струи и окружающей среды.
5. Выражения текущих скоростей по длине затопленной струи, распространяющейся в горной массе, структурно подобны и имеют конкретный корректирующий коэффициент для начального, переходного и основного участков.
6. Аналитически обоснован процесс гидровзвешивания горной массы затопленной гидромониторной струей, который непосредственно связан с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песок).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы основаны на использовании научных методов исследований, включающих анализ и обобщения теоретических и экспериментальных работ, проведение полевых исследований и достаточной сходимостью расчётных и практических данных.

Практическая ценность работы заключается в оценке эффективности процесса всасывания при СГД при использовании гидравлических струй в целях интенсификации процесса гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания.

Реализация результатов работы. Разработанные технологические решения, предложения и рекомендации используются проектной организацией Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу» (ОАО «ВИОГЕМ») и ООО «Союзруда» при проектировании технологии СГД на Гостищевском участке КМА.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Геотехнологии и комплексного освоения МПИ» РГГГУ им. Орджоникидзе, на международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» МГРИ-РГГРУ 2013г. Москва, на научной конференции «Физико-химическая геотехнология» МГГУ Москва 2013 г.

Публикация. По результатам выполненных работ опубликовано 6 печатных работ, 4 из которых являются изданиями ВАК.

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения; изложена на 108 страницах машинописного текста, списка использованных источников из 111 наименований, содержит 19 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Техникой и технологией СГД занимались многие ученые и отдельные научные лаборатории и отделы: Аренс В.Ж., Хчеян Г.Х., Хрулев А.Е., Бабичев Н.И., Пинчук А.В., Дмитриев В.А., Шпак Д.Н, Фролов П.А., Новиков А.А., Назаркин В.В. и др.

С 1988 года велись работы по скважинной гидродобыче железных руд Белгородской ГРЭ на Шамраевском месторождении Белгородского рудного района КМА. Гидродобычный агрегат состоял из гидромониторной секции с тремя насадками у забоя (диаметром 5 мм) и одной для размыва (с диаметром 13мм). Подвод напорной воды к насадкам осуществляется по центральной трубе диаметром 114 мм, а диаметр гидродобычного агрегата составлял 219 мм. Воздух подавался по межтрубному кольцевому пространству на глубину 377 м при общей глубине разработки 750м.

Следует заметить, что гидроразмыв затопленными струями при принятой технологии СГД на участке практически не реален при радиусе размыва более 0,5 – 1,0 м, а ввод воздуха на глубине 377 м при общей

глубине разработки 750 – 800 м крайне неэффективен, а расчёт производительности эрлифта по твердому требует особого аналитического подхода при оценке движения с начала 2-х фазного потока (воздух+твердое), а затем 3-х фазного (вода+твердое+воздух).

В итоге, несмотря на продолжительный период проведения научно-внедренческих работ по технологии скважинной гидродобычи (с 1961 года в целом и с 1987 года, в частности, КМА) и огромное количество публикаций по СГД в статьях, патентах, монографиях и докладах, до сих пор способ СГД изучался не в комплексе, а лишь как совокупность ряда отвлеченных технологических процессов. Причем в существующих работах эти процессы либо не были раскрыты совсем, либо рассматривались неверно или на недопустимо упрощённом уровне, что крайне усложнило освоение метода СГД на КМА. Кроме того, процесс скважинной гидродобычи невозможно проконтролировать визуально, а это значит, что необходим совершенно иной уровень научного и практического потенциала исследователей.

И, прежде всего, комплексный подход к этой важной востребованной практикой научной проблеме.

В первой главе диссертации дан анализ современного состояния и проблем освоения скважинной гидродобычи богатых рыхлых руд КМА. Представлена реальная технологическая схема СГД, на основе анализа опыта работ по этой технологии почти за 30-летний период на участках месторождение КМА.

Обосновано, что формирование затопленной струи с необходимой разрушающей способностью возможно только при эксцентричном расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата.

Во второй главе обоснована реальная технология гидроразмыва и необходимость гидровзвешивания разуплотненной горной массы, при всасывании независимыми потоками. Аналитически обоснованы расходно-напорные параметры распространения затопленных струй в массе жидкости.

В третьей главе расширены основные рабочие параметры распространения отраженных струй в водной среде и в массе всасываемого материала, представленные в аналитической форме и подтвержденные опытом.

В четвертой главе проведено исследование аналитической связи расходно-напорных параметров потока струи и гидравлической крупности твердого. Обоснована и разработана методика расчёта процесса гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания гидродобычного агрегата.

В заключении диссертационной работы излагаются основные выводы и определяются перспективы дальнейшего исследования по изучаемой проблематике.

Основные результаты исследований отражены в научных защищаемых положениях.

Первое защищаемое научное положение. Формирование затопленной струи с необходимой разрушающей способностью возможно только при эксцентричном размещении рабочих коммуникации гидродобычного агрегата.

Непосредственно, добычной участок рудника «Гостищевский» состоит из насосной станции (2 насоса УНС 300-710), компрессорный (3 компрессора 305ВЛ - 16/70), воздушный, водяных коммуникаций и пульповода. Конструктивная схема добычного агрегата выполнена в двух вариантах в зависимости от степени разуплотнения продуктивного массива:

- для водонасыщенного массива с проявлениями пльвунных свойств используется гидродобычной агрегат с ведением процесса гидроразмыва встроенным гидромонитором (не выходящего за габариты агрегата) (рис.1)

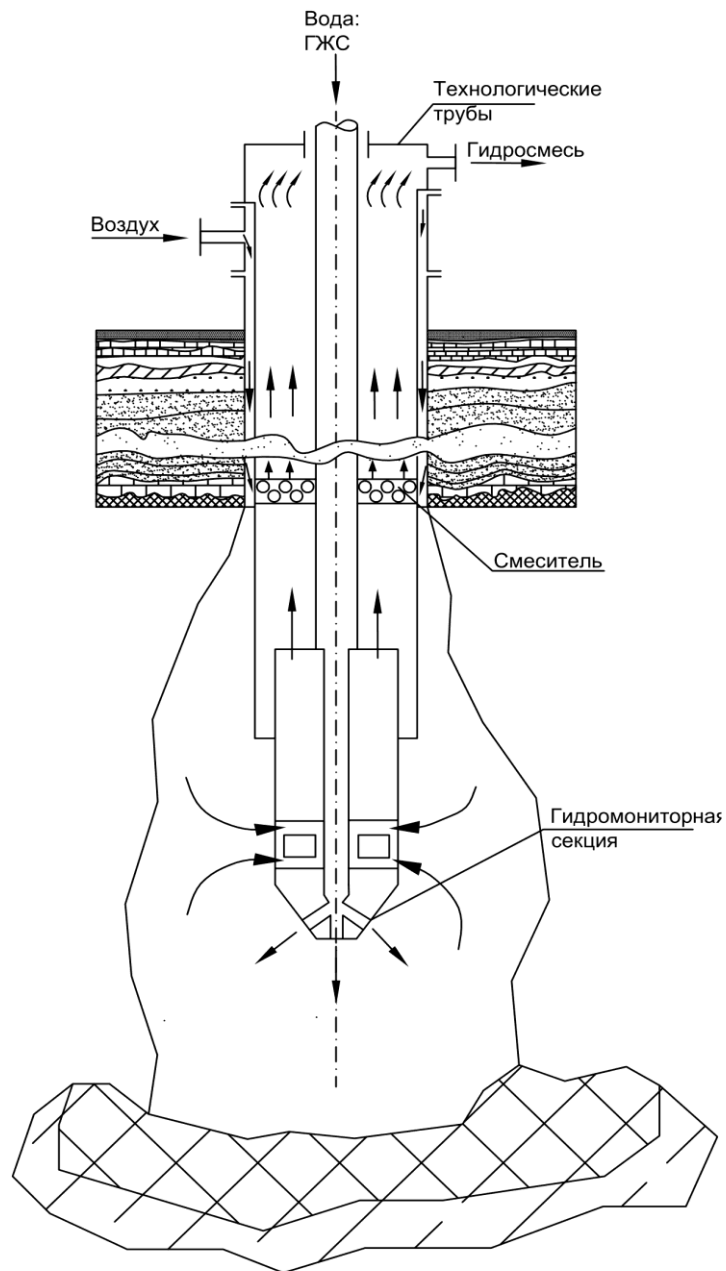


Рис 1. Схема пульпоподъёмной установки гидродобычного агрегата
 - для относительно сцементированного массива используется гидродобычный агрегат с выдвигным гидромонитором (рис 2)

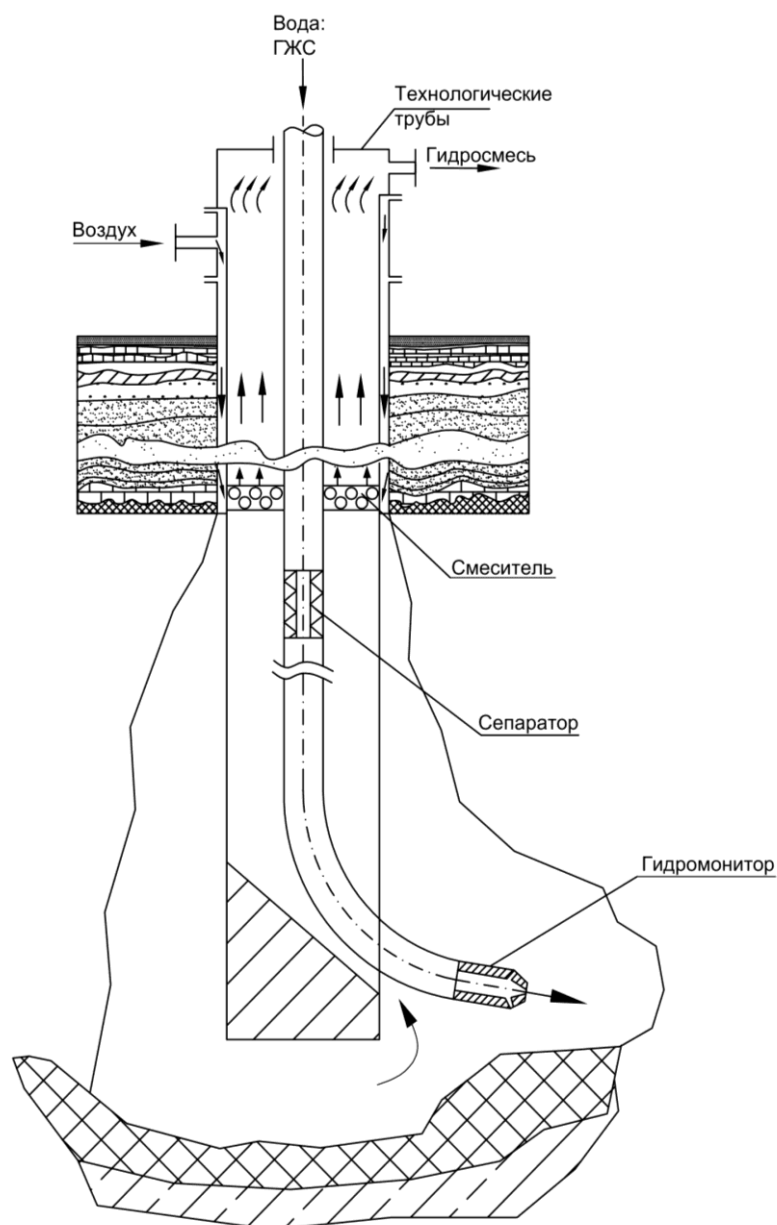


Рис 2. Схема пульпоподъёмной установки гидродобычного агрегата

Основные работы в эксплуатационной скважине проводятся «снизу-вверх». Плоскость всасывания эрлифта всегда находится выше уровня горной массы, что не позволяет участвовать твердому в процессе всасывания. С другой стороны, процесс гидроразмыва (гидроразрушения) является первым звеном всей технологической цепи технологии скважинной гидродобычи. Максимально возможную производительность добычи через скважины определяет именно процесс гидроразмыва. Так, гидромониторная струя характеризуется своей мощностью, как функция производительности гидроразмыва

$$W = \rho Q \cdot H \quad (1)$$

Где W – мощность струи, кг м/с;

ρ - плотность рабочей жидкости (воды), кг/м³;

Q – расход воды через рабочую насадку, м³/с;

H – напор на насадки, м.вод.ст

Выражение (1) можно представить в более значимом виде

$$w = \frac{\rho}{2g} \left(\frac{4}{\pi d^2 \cdot \varphi} \right) \cdot Q^3 \quad (2)$$

Где d – диаметр насадки, м;

φ - коэффициент скорости насадки

Таким образом доставить достаточное количество воды на насадку гидромонитора для глубоких скважин сложно, т.к. в значительной степени возрастают потери на трение.

Так, согласно существующей схеме размещения оборудования и коммуникаций рудника «Гостищевский», потери напора рабочей воды по трубопроводу диаметром $D=127$ мм, (внутренний 109 мм) по эксплуатационной скважине к насадке до глубины 750 м составляет 327 м.вод.ст. Изменить существующее положение при данной конструкции гидродобычного агрегата достаточно сложно. Соосная концентрическая конструкция напорного водовода в проточной части пульповода эрлифта крайне неудачная по следующим причинам:

- из практики работы вертикального гидроподъёма твердого известно, что при размещении по оси подъемного пульповода труб, в значительной степени увеличивает гидравлические сопротивления;

- увеличение диаметра напорного водовода (например, с диаметра 127 мм до диаметра 168 мм) значительно уменьшает эквивалентный диаметр подъемного пульповода эрлифта, а, следовательно, и его производительность (в степени 2,5 от диаметра);

- увеличение диаметра водовода повышает усилия по изгибу ствола гидромонитора клиновым отклонением.

Таким образом, сформировать затопленную струю с необходимой разрушающей способностью с концентрическим расположением труб (рис 3б.) на значительных расстояниях от эксплуатационной скважины при больших глубинах разработки является задачей трудной, т.к. подать по

системе труб (в стесненных условиях скважины) достаточное количество гидравлической энергии практически невозможно.

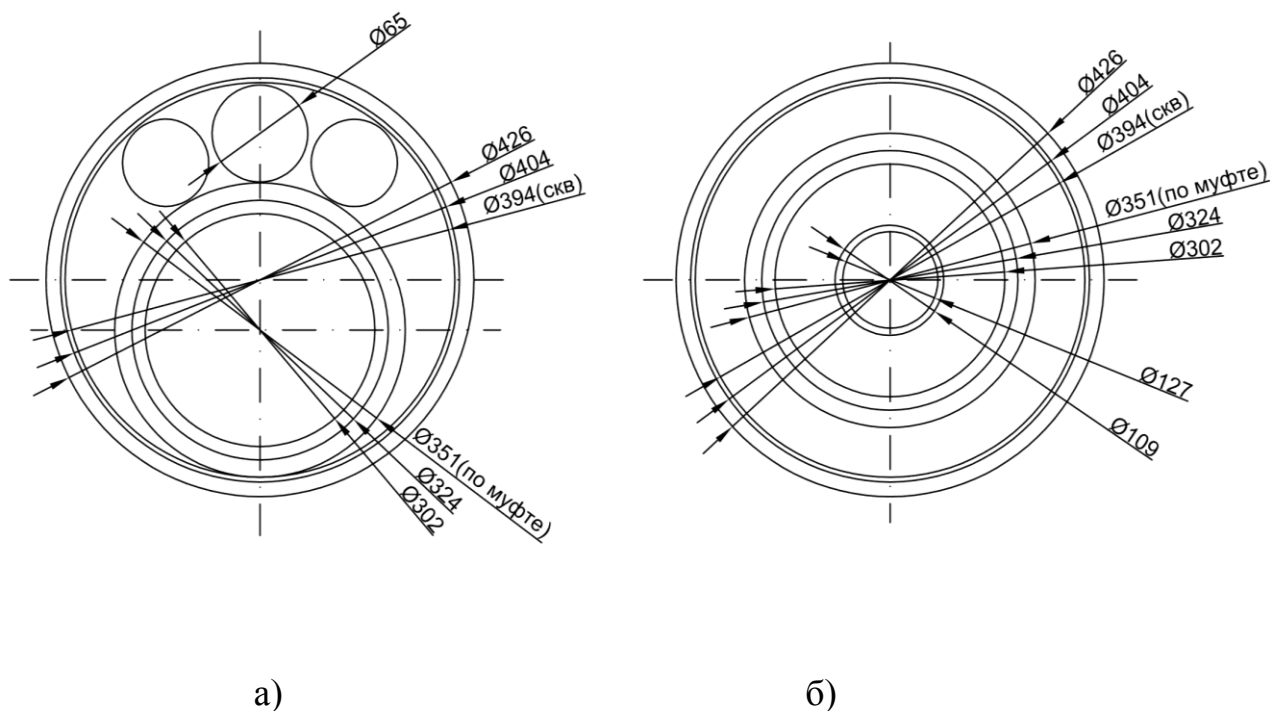


Рис 3. Схема эксцентричного и концентричного размещения рабочих коммуникаций в гидродобычном агрегате.

В связи с этим, предлагается использовать вариант эксцентричного (рис 3а) размещения рабочих коммуникаций по поперечному сечению эксплуатационной скважины.

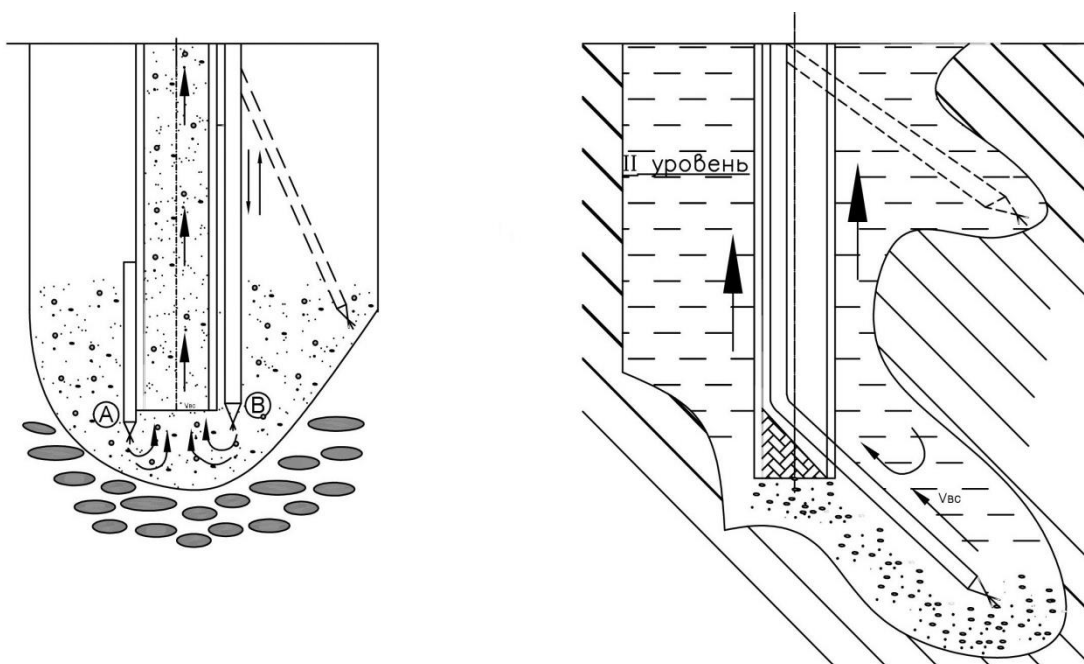
При размещении нескольких труб для водовода меньшего диаметра в межтрубном пространстве при эксцентричном расположении эрлифтной и обходной труб, позволяет не только увеличить площадь поперечного сечения проточной части, но и значительно снизить усилия, необходимые для отклонения ствола гидромонитора.

Второе защищаемое научное положение. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи может быть связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скорости струи и конечным диаметром её начального участка, причем сумма всех корректирующих коэффициентов в знаменателе расчётного выражения должна соответствовать единице при любом их сочетании.

Одним из основных технологических процессов СГД является процесс пульпоприготовления и всасывания.

В то же время одним из слабых узлов используемых гидродобычных агрегатов является почти полное отсутствие устройств, управляющих поступлением во всасывающее отверстие твердого и недостаточная зона захвата последнего. Всё это вызывает необходимость комплексного решения вопроса схемы отработки продуктивного массива, доставки размытого (разрушенного) твердого к зумпфу эрлифта, создание подвижного состояния горной массы, окружающей всас (струйное псевдооживление – пульпоприготовление), с учетом заданной (или планируемой) производительности эрлифта по горной массе.

При добыче разумно использовать технологию всасывания «из-под слоя». Гидравлическое рыхление (гидровзвешивание) горной массы вокруг всасывающего отверстия эффективно осуществлять через отдельный напорный водовод, механически не связанный с эрлифтным пульповодом (рис4а), что возможно только при эксцентричном расположении рабочих трубопроводов в поперечном сечении гидродобычного агрегата. Напротив, при концентричном расположении водоводов, гидродобычный агрегат представляет собой ансамбль, где процессы гидровзвешивания и всасывания разобщены и не связаны между собой (рис4б)



а) всасывание «из-под слоя»

б) свободное всасывание

Рис 4. Схема всасывания горной массы в зумпфе гидродобычного агрегата.

В условиях гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания особую значимость приобретают прогнозные расходно-напорные показатели

струи воды, формируемые гидромонитором для процесса гидровзвешивания и определяющие геометрию всаса и производительность эрлифта.

Текущая средняя скорость по длине затопленных струй в общем виде соответствует следующему выражению

$$V_{cp} = V_0 \cdot \frac{d_0/d_n}{\frac{d_0}{d_n} + \left(1 + \frac{d_0}{d_n}\right) \frac{l}{l_n}} \quad (3)$$

Где V_{cp} , V_0 – соответственно, средняя текущая и начальная скорость истечения струи, м/с;

d_0 , d_n – соответственно, диаметры насадки и переходного диаметра струи, м;

l_n , l – соответственно, длины начального участка и текущей длины струи, м;

Особенностью предлагаемого расчётного выражения струи является то, что сумма коэффициентов в знаменателе формулы должна быть равна 1

$$\frac{d_0}{d_n} + \left(1 - \frac{d_0}{d_n}\right) = 1, \quad (4)$$

И имеет место, следующее продуктивное соотношение между осевой и средней скоростью по длине распространения затопленной струи (согласно опытным данным различных исследователей затопленных струй (таб.1))

$$\frac{V_{oc}}{V_{cp}} = \frac{d_n}{d_0} = 2.41 \quad (5)$$

Таблица 1

Соотношение между осевой и средней скоростью в затопленной струе

№	Автор	Значение $k = \frac{V_{oc}}{V_{cp}}$	Условие опыта
Затопленные струи			
1	Абрамович Н.Г.	2,56	Струя воздуха в воздухе
2	Гиневский А.С.	2,5	Струя воздуха в воздухе
3	Шлихтинг Г.Э.	2,22	Струя воды в воде
4	Идельчик И.Е.	2,42	Струя воды в воде
5	Жученко В.А.	2,42	Струя воды в воде

6	Козодой А.К.	2,35	Струя воды в воде
7	Мирцхулава И.Е.	2,0	Струя воды в воде
8	Сизов Г.Н	2,0÷3,0	Струя воды в воде
Гидромониторные струи			
9	Куклин И.С.	1,68	Струя воды в воздухе
10	Аренс В.Ж.	1,923	Струя воды в воздухе

Исходя условия (4) и (5), выражение (3) примет вид

- для расчёта изменения по длине струи осевой скорости

$$V_{oc} = V_0 \cdot \frac{1}{0,415 + 0,585 \frac{l}{l_H}} \quad (6)$$

т.к. согласно соотношению (5) $\frac{1}{0,41} = 0,415$

- для расчета изменения по длине струи средней скорости

$$V_{cp} = V_0 \cdot \frac{0,415}{0,415 + 0,585 \frac{l}{l_H}} \quad (7)$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \cdot \frac{1}{1 + 1,41 \frac{l}{l_H}} \quad (8)$$

Третье защищаемое научное положение. Расчётное выражение текущей средней скорости отраженной затопленной гидромониторной струи должна быть взаимосвязана с закономерностью её перемещения в воде, в объеме горной массы и отраженной при гидровзвешивании твердого в плоскости всасывания.

Несложно аналитически получить выражение средней скорости падения струйного потока в зависимости начальной скорости, длины струи, диаметра насадки и угла раскрытия образующих струи

$$V_x = V_0 \cdot \frac{1}{1 + 2tg \frac{\varphi}{2} \frac{l}{d_0}} \quad (9)$$

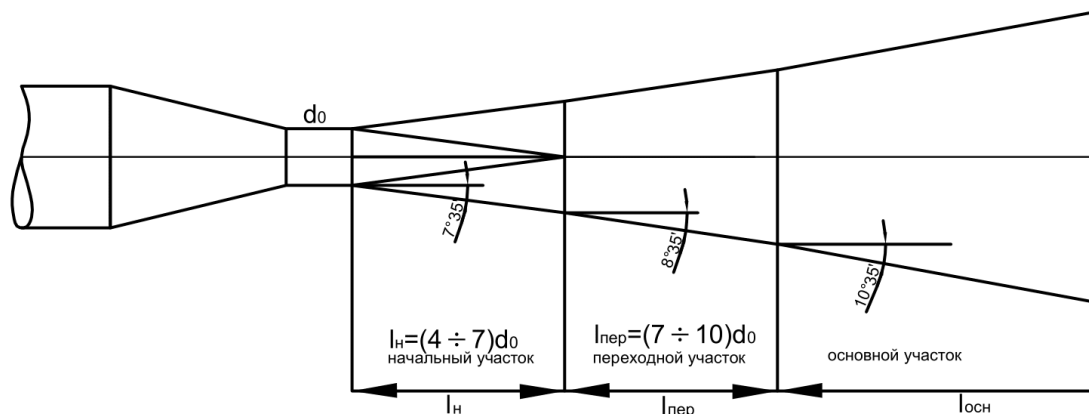


Рис 5. Углы раскрытия затопленной струи на всех участках её распространения.

Где V_0, V_x – соответственно, начальная и текущая (средняя) скорость по длине распространения затопленной струи, м/с;

l – длина струи, м;

d_0 – диаметр насадки, м;

φ – угол раскрытия образующих струи, град;

Подставляя значение угла раскрытия образующих струй равным $\varphi=19.5^\circ$, выражение (9) примет вид опытной зависимости И.М. Коновалова. Используя уточнённые опытные значения угла раскрытия φ (В.А. Жученко) (Рис 5) и выражение (9), можно получить закономерность распространения струи на различных участках её распространения:

- на начальном участке

$$U_{cp} = U_0 \frac{1}{1+0.258 \frac{l}{d_0}} \quad (10)$$

- на переходном

$$U_{cp} = U_0 \frac{1}{1+0.294 \frac{l}{d_0}} \quad (11)$$

- на основном

$$U_{cp} = U_0 \frac{1}{1+0.365 \frac{l}{d_0}} \quad (12)$$

Сравнительный анализ опытных и аналитических исследований полученных закономерностей (10), (11) и (12) (табл. 2) показывает достаточно удовлетворительное совпадение.

Сравнительный анализ опытных и аналитических исследований при распространении затопленных струй.

Движение струи в воде

Таблица 2

№	Формула	Относительное расстояние, $\frac{l}{d_0}$							
		3	4	6	10	12	15	20	40
1	Сизов Г.Н. $u_{cp} = u_0 \cdot \frac{1}{1 + 0,09 \left(\frac{l}{d_0}\right)^{1,32}}$	19,1	17	13,6	9,2	7,8	6,3	4,7	2,1
2	Коновалов И.М. $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,345 \left(\frac{l}{d_0}\right)}$	13	11,2	8,8	5,9	5,18	4,3	3,37	1,79
3	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{7,08}{l/d_0}$	25,6	19,3	12,7	7,7	6,4	5,2	3,8	1,9
4	Абрамович Г.Н. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \frac{0,48}{0,145 + 0,064 \frac{l}{d_0}}$	15,5	13,06	9,9	6,6	5,7	4,7	3,6	1,9
5	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \frac{7,3}{7,3 + \left(\frac{l}{d_0}\right)^{1,25}}$	17,3	19,9	11,7	7,7	6,5	5,2	3,9	1,8
6	Мирицхулава И.Е. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{1}{0,9 + 0,09 \frac{l}{d_0}}$	9,29	8,6	7,5	6	5,5	4,8	4	2,4
7	Осипов В.Б. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot 2,65 \left(\frac{d_0}{l}\right)^{0,84}$	11,4	9	6,4	4,2	3,6	2,97	2,3	1,3
8	Михалёв М.А. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \frac{1}{\sqrt{0,316 + 0,208 \frac{l}{d_0}}}$	11,2	10,2	8,7	7	6,5	5,9	5,2	3,7

9	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,258 \frac{l}{d_0}}$	14,9	13	10,4	7,4	5,6	5,4	4,3	2,3
10	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}}$	14	12,2	9,6	6,7	5,8	4,9	3,8	2
11	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,365 \frac{l}{d_0}}$	12,8	10,8	8,3	5,7	4,9	4,1	3,8	1,7

Используя выражение плотности окружающей среды, в которой распространяется струя

$$\rho_{отр} = \rho_T \cdot S_0 + \rho_0(1 - S_0), \quad (13)$$

с учетом поправочного коэффициента $\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{отр}}}$,

получим расчетное выражение распространения струи в горной массе (таб. 3)

$$U_{cp} = U_0 \frac{1}{1 + 2tg \frac{\varphi}{2} \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{отр}}} \quad (14)$$

где $\rho_{отр}$, ρ_T – соответственно, плотность окружающей среды и твердого, кг/м^3
 S_0 – объемная концентрация твердого (в насыпном состоянии твердого $S_0=0,6$)

Движение струи в массе твёрдого

Таблица 3

№	Формула	Относительное расстояние, $\frac{l}{d_0}$							
		3	4	6	10	12	15	20	40
1	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{7,08}{(1 + S_B) \frac{l}{d_0}}$	16,0	10,7	7,1	4,2	3,5	2,8	2,14	1,07
2	Мирицулава И.Е. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{1}{0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0}}$	8,6	7,9	6,7	5,2	4,6	4	3,3	1,9

3	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}}$	9,9	8,6	6,8	4,8	4,2	3,4	2,7	1,45
4	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,365 \frac{l}{d_0}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}}$	9,0	7,6	5,9	4,0	3,5	2,8	2,3	1,2

Для создания направленного, артикулированного водоструйного гидровзвешиваемого горную массу потока целесообразно использовать насадки, формирующих отраженную струю, распространяющейся в области всасывания эрлифта. Как аналогией этого процесса являются опытные результаты исследования отраженных струй и формирование воронки размыва в нижних бьефах перепадов речных потоков, проведенные гидрологом профессором Мирцхулавой И.Е. со своими учениками. Результатами проведенных крупномасштабных исследований этих ученых по распространению отраженной струи в горной массе (песок) представлено выражением изменение осевой скорости по длине её формирования

$$V_{oc} = V_0 \cdot \frac{1}{\left[0,9 + 0,4 \cdot \left(\frac{\sin \alpha \cdot l / d_0}{1 + 0,43 \cdot l / d_0} \right)^2 \cdot (0,9 + 0,12 \cdot l / d_0) \right]} \quad (15)$$

где V_0 , V_{oc} – соответственно, начальная скорость истечения из насадки и текущая скорость по длине, м/с;

α – угол встречи струи с горной массой (как правило $\alpha=60^\circ$), град;

l , d_0 – соответственно, текущая длина и диаметр струи, м;

Исходя из полученного базового выражения темпа падения средней скорости спутного струйного потока (9), представим закономерности изменения расходно-напорных параметров отраженной струи в такой же аналитической структуре и с учётом полученного соотношения (5) между средней и осевой скоростями

$$V_{cp} = V_0 \cdot \frac{0,41}{\left[1 + 0,12 \cdot l / d_0 + 0,4 \cdot \left(\frac{\sin \alpha \cdot l / d_0}{1 + 0,43 \cdot l / d_0} \right)^2 \right]} \quad (16)$$

где $\frac{V_{cp}}{V_{oc}} = 0,41$ – соотношение между средней и осевой скоростями;

$0,12l/d_0$ - составляющая доля сопротивления при движении

затопленной струи в воде;

$0,4 \cdot \left(\frac{\sin \alpha \cdot l/d_0}{1+0,43 \cdot l/d_0} \right)^2$ - составляющая доля сопротивления при движении

затопленной струи в горной массе.

В таблице 4 представлено выражение для расчета отраженных струй профессора Мирцхулава И.Ц. и автора, которые показывают вполне удовлетворительные результаты сравнения

Выражение текущей скорости по длине отражённой струи Таблица 4

№	Формула	Относительное расстояние $\frac{l}{d_0}$				Примечания
		5	10	15	20	
1	<p>Мирцхулава И.Е. [60]</p> $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l}{d_0}} \right)^2 \left(0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} \right)}$	0,202	0,13	0,098	0,079	$\alpha = 60^\circ$
2	<p>Автор</p> $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l}{d_0}} \right)^2}$	0,182	0,129	0,1047	0,089	$\alpha = 60^\circ$
3	<p>Автор</p> $V_{cp} = V_0 \frac{0,57}{1 + 0,365 \frac{l}{d_0}}$	0,202	0,129	0,088	0,069	
4	<p>Автор</p> $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l}{d_0}} \right)^2}$	0,174	0,125	0,102	0,087	$\alpha = 60^\circ$

Четвертое защищаемое научное положение. Гидровзвешивающая способность струи должна определяться взаимодействием текущих рабочих параметров искомой струи и гидравлической крупностью взвешиваемых частиц в плоскости всасывания с учетом конкретных расходно-напорных эксплуатационных параметров эрлифта.

Как указывалось ранее, затопленные струи, распространяющиеся в объеме горной массы создают различную степень разуплотнения этой горной массы, связанную с размером кусков и плотностью твердого.

Таким образом, если известна скорость струи по длине её распространения, то можно оценить гидровзвешиваемую способность струи. Т.е. оценивается необходимая степень разуплотнения (разжижения) горной массы, а, следовательно, необходимое расстояние до плоскости всасывания эрлифта (в частности) в соответствии с его заданной производительности по твердому.

В связи с этим, гидравлическая крупность в стесненных условиях распространения струи и формы кусков горной массы в плоскости всасывания определяется следующим выражением

$$U_{ст} = (1 - S)^n \cdot K \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{gd}{\varphi}} \quad (17)$$

где S – объемное содержание твердого во всасываемом потоке;

K – коэффициент, учитывающий форму частиц;

n – показатель степенности;

φ – коэффициент лобового сопротивления.

К настоящему времени аналитического представления коэффициента лобового сопротивления не существует и искомые значения φ принимаются по опытным данным в зависимости от режима обтекания частиц, т.е. от значения числа Рейнольдса, которое, в свою очередь зависит от скорости обтекания. Предпримем попытку эту задачу поэтапно.

Используя выражение А.Д. Альтштуя для расчета коэффициента лобового сопротивления, как сумму коэффициентов падения частиц при ламинарном и турбулентном обтекании

$$\varphi = \frac{24}{Re} + 0.67\sqrt{\varphi}, \quad (18)$$

решим его, как квадратное уравнение относительно $\sqrt{\varphi}$, и совместим с основным выражением (17), после несложных алгебраических преобразований, получим следующую структуру выражения для числа Рейнольдса

$$Re = \frac{U_{сп} \cdot d}{\nu} = \frac{A_r [(1-S)^n \cdot K]^2}{18 + 0.581 \sqrt{A_r [(1-S)^n \cdot K]^2}} \quad (19)$$

Полученное выражение расчёта числа Рейнольдса (а, в последующем, расчета скорости падения частиц твердого в стесненных условиях всасываемого потока), подобно известному рабочему выражению Розембаум-Тодес-Горошко

$$R_e = \frac{A_r(1 - S)^{4.75}}{18 + 061 \sqrt{A_r \cdot (1 - S)^{4.75}}} \quad (20)$$

которое не учитывает форму частиц и может использоваться только при расчете скорости падения крупных частиц ($d_i > 2 \div 3$ мм), а коэффициент 0.61 является опытным и не соответствует аналитическому значению $\sqrt{\frac{3}{4}} \varphi_T = 0.581$ (где $\varphi_T = 0.45$ – коэффициент лобового сопротивления при турбулентном обтекании).

Расчет процесса гидровзвешивания горной массы водяной затопленной струей заключается в следующем:

1. Определяется (или изначально задана) производительность эрлифта (с учетом крупности, скорости всасываемого потока, объемной концентрации твердого во всасываемой гидросмеси).

2. Определяется скорость падения частиц твердого заданного диаметра в стесненных условиях несущей среды и объемной общей концентрации твердого.

3. Оценивается объемная концентрация горной массы по длине распространения затопленной струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, содержится новое решение задачи, заключающейся в усовершенствовании технологии скважинной гидродобычи, включающей разработанные опытно-аналитические зависимости, используемые при разработке режима эксплуатации технологических скважин, в обосновании и оптимизации работы затопленных спутных и отраженных струй при гидровзвешивании горной массы в плоскости всасывания, что имеет существенное значение для развития физико-химической геотехнологии в горной и строительной отраслях промышленности.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Обосновано, что процесс гидроразмыва затопленными струями при действующей технологии СГД на участках КМА практически невозможен при радиусе размыва более $0,5 \div 1,0$ м.

2. Определено, что ввод воздуха в промежуточную секцию гидродобычного агрегата крайне неэффективен.

3. Выявлено, что формирование затопленной струи с приемлемой разрушающей способностью, возможно только при эксцентричном расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата, как по минимуму потерь напора в водоводе и увеличения производительности эрлифта, так и значительного снижения усилий необходимых для отклонения ствола гидромонитора.

4. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи аналитически связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью и конечным диаметром её начального участка струи.

5. Гидравлическое рыхление (гидровзвешивание) горной массы вокруг всасывающего отверстия эффективно осуществлять через отдельный напорный водовод, механически не связанный с эрлифтным пульповодом, что возможно только при эксцентричном независимом расположением рабочих трубопроводов.

6. Текущая средняя и осевая скорости по длине затопленной гидромониторной струи соотносятся, как начальный и переходный диаметр струи, причём сумма коэффициентов в знаменателе искомого расчетного выражения должна быть равна единице при любых их сочетаниях.

7. Текущая скорость распространения затопленной струи в горной массе пропорциональна корню квадратному из соотношения плотностей жидкости напорной струи и окружающей среды.

8. Аналитические расчетные выражения текущей скорости затопленной струи, распространяющейся в горной массе структурно подобны, и имеют конкретный корректирующий коэффициент для начального, переходного и основного участков.

9. Процесс гидровзвешивания горной массы затопленной гидромониторной струей непосредственно связан с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песок).

10. Установление закономерности изменения текущей скорости по длине гидромониторной струи позволяет оценить её гидровзвешиваемую способность.

11. Получено аналитическое выражение расчёта гидравлической крупности для всего диапазона чисел Рейнольдса, т.е. для ламинарного и турбулентного режимов движения.

12. Разработана методика расчёта процесса гидровзвешивания частиц горной массы в плоскости всасывания с учётом производительности

подъемного аппарата (эрлифта), объемной концентрации всасываемого потока и гидравлической крупности горной массы.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах автора:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Малухин Н.Г., Кудряшов Р.В. Обоснование эффективности процессов всасывания при скважинной гидродобыче // ВЕСТНИК РАЕН, 2013/6.1 том 13, с.53-55

2. Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Малухин Т.Н., Кудряшов Р.В., Малухин Н.Г. Возникновение стабильного процесса псевдооживления горной массы в объеме загрузочного аппарата при напорном гидротранспортировании // ВЕСТНИК РАЕН, 2013/6.1 том 13, с.57-59

3. Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Кудряшов Р.В., Малухин Н.Г. Исследование особенностей истечения струй центробежных насадок в загрузочных аппаратах напорного гидротранспорта // ВЕСТНИК РАЕН, 2013/6.1 том 13, с.60-62

4. Кудряшов Р.В., Малухин Н.Г. Рациональное размещение рабочих трубопроводов в поперечном сечении гидродобычного агрегата при скважинной гидродобыче // ГИАБ № 5, 2015, с. 366-369.

В прочих изданиях:

5. Малухин Н.Г., Кудряшов Р.В. Обоснование эффективности процессов всасывания при скважинной гидродобыче // Материалы научной конференции «Физико-химическая геотехнология» // Москва, 2013/7, с.73-76

6. Кудряшов Р.В., Малухин Н.Г. Предельно возможные расходно-напорные параметры гидромонитора в процессе гидроразмыва при СГД // Доклады XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (09-12 апреля 2013 г.), с. 114-115