

На правах рукописи



Горшенин Николай Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ КРУПНООБЪЕМНОГО ОПРОБОВАНИЯ И ОТРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СПОСОБОМ
СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ**

Специальность 25.00.14. – Технология и техника геологоразведочных работ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2014

Работа выполнена на кафедре Бурения скважин в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: Рябчиков Сергей Яковлевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Нескормных Вячеслав Васильевич, доктор технических наук, профессор, зав. каф. технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск

Ламбин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет» г. Иркутск

Ведущая организация: ОАО «Тулское научно-исследовательское геологическое предприятие» г. Тула

Защита диссертации состоится 30 июня 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, НИ ТПУ (корпус 20, ауд. 504)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета (ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/914/worklist>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Арбузов С.И.

Введение

Актуальность работы.

Скважинная гидродобыча – способ подземной гидравлической разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых, при котором полезное ископаемое переводится на месте залегания в гидросмесь. Основные технологические процессы при СГД: вскрытие пласта; гидроразрыв; пульпоприготовление; транспортировка от забоя до всасывающего устройства; подъём гидросмеси на поверхность; обогащение; складирование хвостов обогащения; осветление оборотной воды и водоснабжение; управление горным давлением. Непосредственно процесс приготовления пульпы в подземных полостях и выдача ее на поверхность через скважину осуществляются с помощью специального скважинного гидродобычного снаряда (СГС). СГС в совокупности с механизмами и агрегатами, обеспечивающими его работу с поверхности, образует гидродобычный агрегат (ГДА). На сегодняшний день СГД является перспективным способом опробования месторождений с целью отбора крупнообъемных проб.

СГД позволяет коренным образом преобразовать технологию опробования и добычи полезных ископаемых и исключить присутствие людей под землей, а также свести к минимуму вредные экологические последствия ведения горных работ. На территории Томской области данным способом возможна разработка рудных песков Туганского и Георгиевского месторождений и железной руды Бакчарского рудопроявления.

Несмотря на то, что первые работы по СГД были произведены в первой половине XX века, до настоящего времени данная технология не получила достаточного внедрения и должного уровня теоретической проработки. Огромный вклад в теоретическое осмысление технологии СГД внесли ученые – исследователи В.Ж. Аренс, Н.И. Бабичев, Н.Г. Малухин, А.С. Хрулев.

Глубокое теоретическое и практическое изучение технологии выполнено в работах А.Л. Вильмиса, А.В. Пинчука, Ю.Б. Фомина, И.И. Бройда, В.И. Колесникова; С.Н. Журина; И.А. Сергиенко и др. В общую теорию СГД были включены результаты фундаментальных исследований, специальных исследований в горной промышленности.

Актуальность данной работы заключается в том, что предложены решения по повышению качества организации процессов массопереноса в очистном пространстве и созданию методики комплексного проектирования технологии СГД с учетом основных воздействующих факторов.

Цель: Повышение эффективности технологии опробования и последующей отработки месторождений методом СГД за счет формирования методологической базы

проектирования, улучшения условий массопереноса и координации технологических процессов.

Предметом данного исследования являются процессы массопереноса в затопленных очистных пространствах, взаимодействия в гидравлической системе скважинного гидродобычного снаряда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- выполнить анализ современного состояния технологии СГД, расчетных методов для каждого из технологических процессов с определением их надежности и достоверности;
- аналитически исследовать взаимосвязь технологических процессов при СГД на основании ранее разработанных математических моделей;
- исследовать процессы придонного массопереноса и сопутствующие гидродинамические процессы с целью выявления путей повышения эффективности придонного гидротранспорта;
- разработать методику получения представительных по вещественному составу проб полезных ископаемых методом СГД при обеспечении высокой энергоэффективности и производительности;
- разработать методику комплексного проектирования технологии СГД на основании результатов ранее проведенных работ и собственных исследований с использованием математической модели СГД, учитывающей ключевые взаимодействия процессов СГД.

Методика исследований. Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследований, включавший в себя проведение теоретических и экспериментальных исследований, гидравлическое и математическое моделирование процессов скважинной гидродобычи, в том числе с использованием современных программных комплексов Autodesk Inventor; CosmoFloWork; MathCAD.

Научная новизна.

1. Проведенные исследования гидродинамических процессов в добычных камерах позволили:

- установить математическую зависимость для определения скорости придонного течения в области всаса в зависимости от интенсивности всасывания и параметров всаса (зазор между всасывающим наконечником и плоскостью всасывания, диаметр всасывающего наконечника);

- доказать, что всас можно рассматривать как некоторый точечный источник депрессии в пространстве при значительном расстоянии до него в плоскости всасывания;
- получить количественную взаимосвязь между площадью зон эффективного удаления полезных ископаемых из очистных пространств и гидравлической энергией струи, инициирующей этот процесс;
- для расчета эффективного массопереноса в затопленном очистном пространстве посредством отраженных гидромониторных струй с различным углом атаки к забою выявить математическую зависимость в виде

$$W \geq \left[46 - \frac{270Q}{2V} \right] R^{2.05} V^{0.55},$$

где W – удельная энергоёмкость гидротранспорта частиц, кВт/м²; R – радиус очистного пространства, м; Q – интенсивность всасывания, м³/с; V – необходимая минимальная транспортирующая скорость по условиям эффективного придонного гидротранспорта, м/с;

2. На основании комплексного математического моделирования работы гидродобычного агрегата (ГДА) получена количественная оценка:

- влияния соотношения диаметров колонн труб (магистралей) снаряда СГД на энергоэффективность процесса СГД;
- влияния соотношения производительности процессов гидроразмыва и пульпопориготовления (из условия необходимости поддержания заданной плотности пульпы) на энергоэффективность СГД;
- воздействия на технологические процессы СГД фильтрационных взаимодействий с вскрываемыми очистной камерой коллекторами.

3. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований созданы новые инженерные методики расчета технических и технологических параметров СГД:

- методика расчета очистного процесса, осуществляемого посредством всасывания и гидромониторного воздействия в затопленных очистных камерах;
- методика расчета транспортных магистралей для эжекторных гидродобычных агрегатов;
- методика комплексного расчета технических средств (снарядов) для реализации СГД.

4. Сформировано новое научное направление в области комплексной и системной оценки эффективности СГД, учитывающее технические факторы и горно-геологические условия месторождений.

Личный вклад автора: Автором лично выполнены аналитические исследования технологических процессов СГД, основанные на ранее полученных практических материалах; лично выполнены лабораторные и экспериментальные исследования гидродинамических процессов и процессов массопереноса в затопленных очистных камерах скважинной гидродобычи (СГД).

Автором лично разработана методика расчета процесса придонного массопереноса, направленная на повышение представительности (по вещественному составу) извлекаемых методом СГД проб.

Автором лично разработана методика расчета и проектирования технических средств СГД, основанная на комплексном и системном подходе к методу СГД, как к сложной системе взаимодействующих технологических процессов.

Достоверность результатов исследований и защищаемых положений обоснована значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований и подтверждена общепринятыми методами статистической обработки материалов, а также результатами численного моделирования решаемых гидравлических задач.

Апробация работы Идея работы и основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах кафедры Бурение скважин Томского Политехнического Университета; в докладах на XII – XVI международных научных симпозиумах имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», техническом совещании в ООО «Белгородская горнодобывающая компания»; техническом совещании ОАО «ВИОГЕМ» (г. Белгород); на научно-технических совещании в ООО «СПХ» (г. Омск); ООО «НПО ГелиоТом+» (Томск); КазНТУ им. К.И. Сатпаева (Алматы).

Публикации. По теме работы имеется 10 публикаций, в т. ч. 2 в журнале из списка ВАК; 2 патента на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в подготовке и выполнении данной работы научному руководителю проф. Рябчикову С.Я.; нач. тех. отдела ОАО «ВИОГЕМ» Рослякову О.А.; д.т.н. Пономареву В.В.; к.т.н., ген. директору БГДК Балашову С.А., директору и главному инженеру ООО «Сибирский промышленный холдинг» Ницевичу О.А. и Янушенко А.П., профессору РГГУ им. С. Орджоникидзе Н.Г.

Малухину, сотрудникам кафедры бурения скважин Бондарчуку И.Б., Храменкову В.Г., Шестерову В.П., Брылину В.И. а также родителям за мотивацию к завершению данной работы.

Содержание работы (по защищаемым положениям)

Краткие сведения по изучаемому вопросу.

В настоящее время технология СГД для опробования и отработки месторождений твердых полезных ископаемых находится на стадии внедрения в производство.

Основные проблемы, которые возникают при использовании СГД как способа крупнообъемного опробования и отработки месторождений – обеспечение надлежащей представительности проб и разработка режимных параметров, обеспечивающих достаточное качество опробования при минимальных рисках и издержках.

Выявление данных проблем позволило наметить основные направления исследований процесса СГД:

- исследование процессов пульпоприготовления и гидродоставки пульпы с целью разработки мер по предотвращению изменения вещественного состава проб;
- исследование гидравлической системы СГД;
- разработка методов проектирования энергоэффективных технических средств (режимных параметров, обеспечивающих высокую эффективность).

Решение поставленных задач позволит разрабатывать мероприятия по предотвращению разубоживания проб и прогнозировать технико-экономические показатели работ при СГД.

Исследования, проводимые по вышеприведенным направлениям позволили сформулировать следующие защищаемые положения.

Защищаемые научные положения:

Первое защищаемое положение. Достоверное определение технико-экономических показателей СГД может быть обеспечено при комплексном подходе к рассмотрению гидродобычного агрегата и представлении его как единой гидродинамической системы, находящейся в непрерывном внутреннем взаимодействии и изменяющейся во времени.

Рассмотрим принцип работы ГДА, используя схему, приведенную на рис. 1. В снаряд СГД через верхний оголовок 1 под давлением подается техническая вода и сжатый воздух. Эти агенты доставляются к нижнему оголовку снаряда 2 по колоннам (магистральям) водо- и воздухоподающих труб 4, 5 для выполнения технологических операций: вода для интенсификации процессов обрушения горной породы и

приготовления пульпы, для обеспечения подъема пульпы с помощью гидроэлеватора; воздух для подъема пульпы на поверхность с помощью эрлифта (эрлифтный подъем). В работе агрегата можно выделить следующие процессы:

- нагнетание рабочих агентов в снаряд;
- транспорт рабочих агентов по магистралям снаряда;
- обрушение руды и ее размыв до состояния пульпы;
- доставка пульпы к всасу снаряда;
- всасывание пульпы;
- подъем (выдача) пульпы на поверхность;
- фильтрация подземных вод.

Очевидно, что перечисленные процессы взаимосвязаны и необходимо рассматривать их как единую систему, а системный подход позволит правильно оценить производительность СГД, энергозатраты, дебит, время очистки очистной камеры и другие показатели гидродобычи.

Более наглядно связь процессов можно отследить, используя схему на рис. 2. Из анализа схемы понятно, что оценка эффективности работы ГДА через эффективность отдельно взятых узлов, их производительность и КПД не корректна. Применительно к оценке ГДА корректнее применять обобщенные оценки (критерии эффективности), выраженные через себестоимость проведения работ, энергоэффективность, удельные затраты энергии, объем добычи через единичную технологическую ячейку.

Поиск оптимальных значений данных параметров требует новых методологических подходов, основанных на разработке математических моделей агрегатов СГД и последующем их анализе с целью выявления оптимального соотношения параметров ГДА и режимных параметров его работы.

Для решения поставленных задач предложена следующая методика:

- разрабатывается структурная схема ГДА;
- в соответствии со структурной схемой ГДА разрабатывается система уравнений, полностью описывающая весь технологический процесс;
- из параметров системы формируются 3 группы - константы (жесткие характеристики), параметры (варьирующиеся в некотором диапазоне значений), диапазон и шаг их варьирования, переменные;
- выбирается основной критерий для анализа – например, себестоимость работ при жестко заданном объеме извлечения;

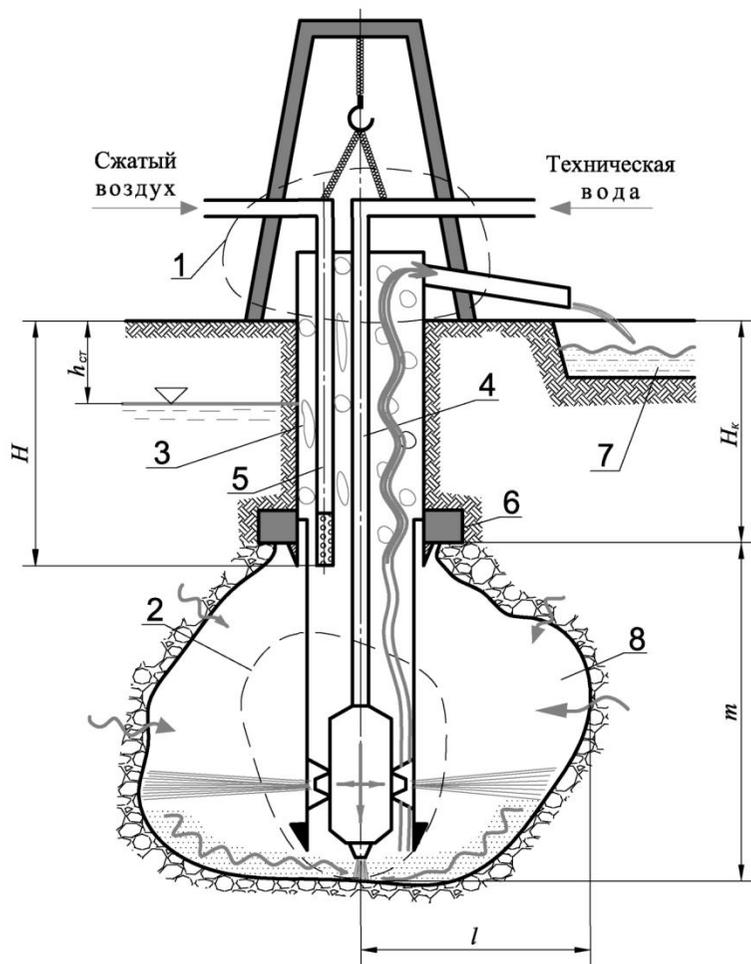


Рис. 1. Схема гидродобывочного агрегата: 1 – верхний оголовок снаряда СГД; 2 – нижний оголовок снаряда СГД; 3 – пульпоподъемная магистраль; 4 – водоподающая магистраль; 5 – воздухоподающая магистраль; 6 – изоляционный мост; 7 – карта намыва; 8 – очистная камера

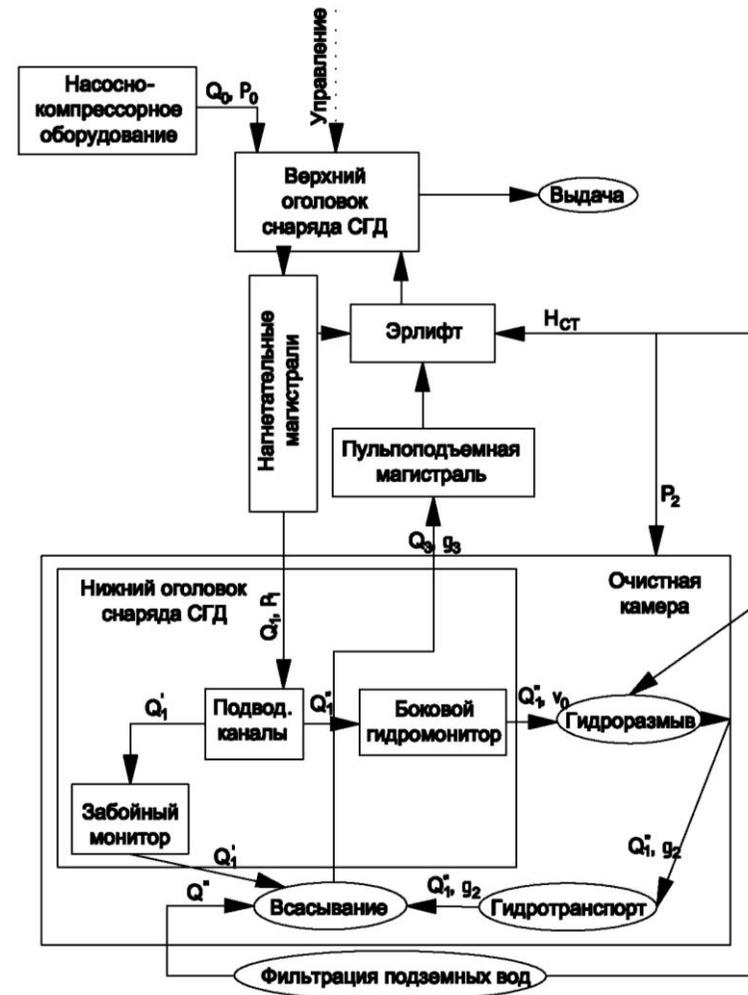


Рис. 2. Структурная схема снаряда СГД: Q , P , g – соответственно расход рабочей жидкости, давление, плотность пульпы в структурных элементах системы, v_0 – начальная скорость гидромониторной струи

- разрешая систему для всего диапазона режимных параметров, определяем сочетание их значений, обеспечивающее оптимальное сочетание критериев эффективности;
- проверяется техническая возможность реализации заданного решения.

Таким образом, системное рассмотрение процесса СГД позволило принципиально изменить подход к проектированию работ по СГД и разработать теоретическую базу компьютерного моделирования процесса СГД.

Второе защищаемое положение. Поле придонных скоростей, возбуждаемое в очистной камере гидромониторами бокового размыва, определяющим образом влияет на эффективность процесса придонного массопереноса.

Опробование и отработка способом СГД месторождений рыхлых и слабосвязных руд может сопровождаться неполным извлечением руд и их разубоживанием. Очевидно, что если в результате работ по СГД будет полностью размыв и извлечен на поверхность планируемый целик руды, то такая проба будет надлежащего качества по вещественному составу.

Выполненный анализ технологической схемы СГД показал, что возможными причинами изменения вещественного состава проб может быть неполный размыв твердых пропластков в прочных рудах, а также неполное и избирательное извлечение горной массы. Рассмотрим возможные способы организации процесса массопереноса.

Существующие и предполагаемые схемы транспорта пульпы в затопленных добычных камерах могут быть реализованы несколькими способами (рис. 3):

- а) смыв горной массы создаваемым при всасывании потоком жидкости;
- б) формирование воронки и транспортировка твердых частиц под действием взвешивающих скоростей и сил гравитации;
- в) самотечный транспорт плывунов за счет создаваемой депрессии и вытеснения горным давлением;
- г) смыв горной массы специально создаваемой гидромониторной струей;
- д) смыв горной массы гидромониторной струей, отраженной от стенок камеры;
- е) использование гибкого всасывающего устройства;
- ж) активное взвешивание и всасывание взвеси.

Наиболее удовлетворяет условиям СГД и практическому опыту работ технологическая схема на рис. 3 д, поэтому основываясь на данной технологической схеме необходимо произвести углубленное изучение процессов массопереноса.

Для выполнения данных исследований предложен и изготовлен стенд (рис. 4, а), изготовленный в геометрическом масштабе в сторону уменьшения относительно реально достигаемых очистных пространств. Стенд состоит из металлического корпуса 1, внутрь которого вставляется картридж, состоящий из крышки 2, дна 3 и перфорированного вну-

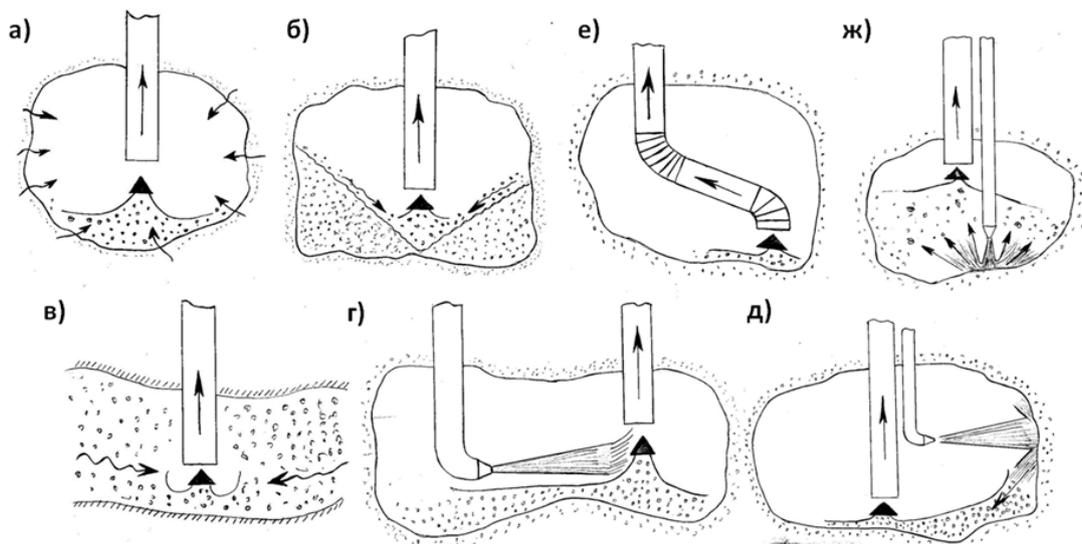


Рис. 3. Технологические схемы массопереноса в затопленном очистном пространстве

тренного корпуса 4. Техническая вода от насоса НБ-3 (подача 18...130 л/мин при максимальном давлении нагнетания 3,0 МПа) нагнетается в корпус 1 через патрубок 5 и гидромонитор 6, а подъем пульпы осуществляется через пульпоподъемный патрубок 7. Необходимое давление на гидромониторе создается при помощи вентиля 8. Контроль за расходом жидкости осуществляется с помощью расходомера РС-ТПУ 9.

Стенд работает следующим образом – на дне картриджа 3 размещается тонкий слой материала-индикатора 10, затем картридж вставляется в наружный корпус – 1 и герметично закрепляется в нем. По патрубку 5 и через гидромонитор 6 внутрь герметичного корпуса подается вода от насоса. За счет вытеснения происходит ее отток через перфорированный внутренний корпус 4 в пульпоподъемный патрубок 7, а далее за пределы герметичного корпуса. Возникающий поток воды формирует поле скоростей, эквивалентное полю скоростей при всасывании жидкости из добычной камеры с равной производительностью. В созданном поле придонных скоростей происходит частичное очищение дна картриджа 3 от размещенного на нем материала-индикатора 10 на некотором расстоянии от всасывающего патрубка, т. е. формируется четкая граница для максимальной транспортирующей (взвешивающей) скорости. После непродолжительного цикла перекачивания жидкости (1...2 мин.) картридж извлекается, дно снимается и фотографируется картина распределения материала-индикатора на нем. Далее на дно картриджа закладывается новая проба материала и эксперимент повторяется. Экспериментальные работы сопровождалось моделированием аналогичных ситуаций в CosmoFloWorks, рис. 4 б.

Качественное изучение воздействия на процесс массопереноса позволяет сделать вывод о том, что массоперенос в затопленном пространстве происходит благодаря процессам:

- всасывания (рис. 4.а, зона II);
- смыва отраженной гидромониторной струей (рис. 4.а, зона I).

Изменяя интенсивность всасывания и параметры гидромониторной струи, при выполнении работ на стенде было достигнуто полное извлечение разнородного по гидравлической крупности материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что извлечение запланированного целика методом СГД при высокой представительности получаемой пробы и требует правильного подбора режимных параметров СГД.

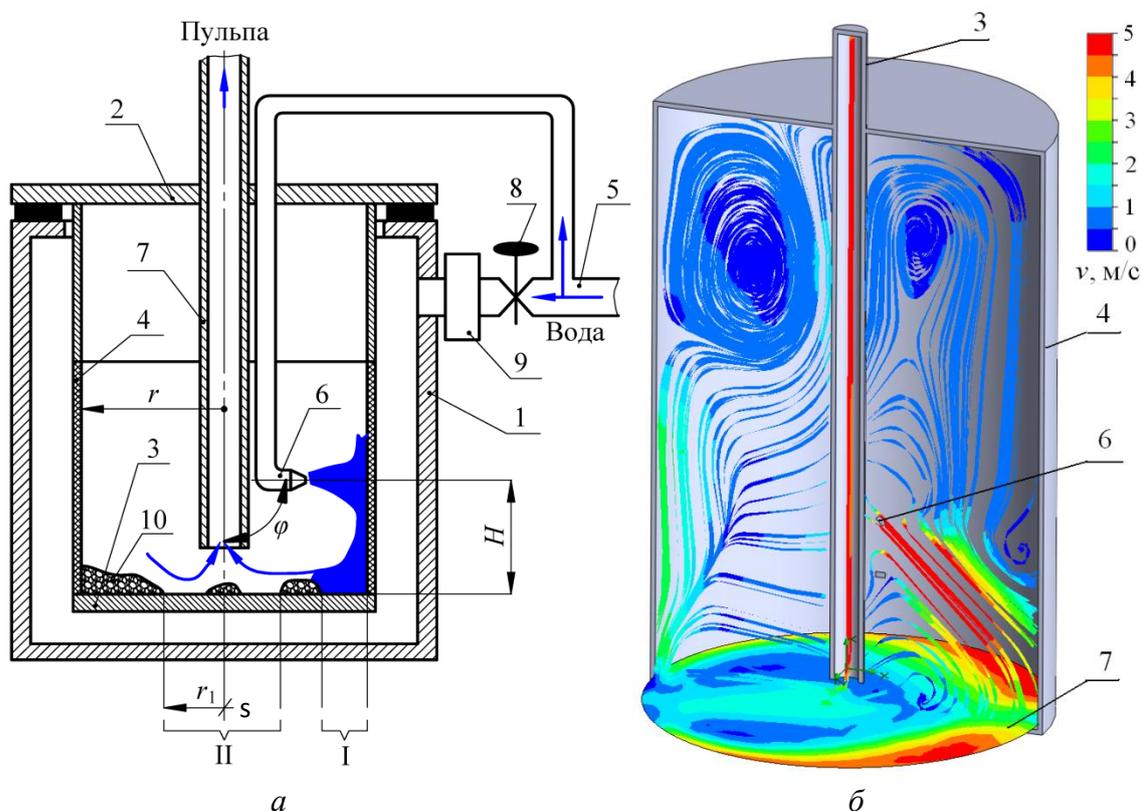


Рис. 4. Стенд для исследования процессов массопереноса в очистном пространстве: а) конструкция стенда; б) модель работы стенда в CosmoFloWorks

Третье защищаемое положение. Для достижения высокого качества опробования по вещественному составу проб и обеспечения полного соответствия пробы фактическому материалу в массиве необходимо формировать боковые гидромониторные струи с гидравлической мощностью, равной:

$$W = 4.9R(2.8R \cdot v)^{1-0.005\varphi} (0.26\varphi + 7),$$

где W – мощность гидромониторной струи, кВт; R – радиус очистного пространства, м; v – транспортирующая скорость для удаляемого грунта, м/с; φ – угол атаки гидромониторной струи, град.

Работа снаряда СГД при условии плоского неразмываемого дна создает определенное поле скоростей. Как показали проведенные эксперименты на стенде (рис. 4), в придонной области формируется 2 зоны эффективного массопереноса (рис. 4, а): I – поле всасывания; II – поле отраженной гидромониторной струи.

Очевидно, что при соединении I и II зон, площади которых соответственно A_1 и A_2 , м² будет достигнуто условие эффективного выноса всех фракций горной массы. Регулировать размеры зоны I возможно, изменяя производительность по всасыванию пульпы. На первом этапе работ было выполнено исследование процесса всасывания, при котором грунт всасывался с некоторой неразмываемой плоскости, а затем фиксировался радиус зоны размыва. Эксперименты были выполнены при различной интенсивности всасывания (40...130 л/мин), высоте позиционирования всаса над неразрываемой плоскостью (10...50 мм), диаметре всаса (20...150 мм). Выполненные исследования подтвердили сделанный ранее вывод о том, что скоростное поле в плоскости всаса резко ослабляется в радиальном направлении по мере удаления от него. Также установлено, что увеличению радиуса зоны всасывания способствует уменьшение высоты позиционирования всаса над забоем и увеличение радиуса всаса (при неизменной интенсивности всасывания). В общем плане скоростного поля изменение диаметра и высоты позиционирования всаса над плоскостью всасывания приводит к локальному его перераспределению в области всаса. По результатам опытов был сделан вывод о том, что придонное поле скоростей с рядом допущений можно описать зависимостью, полученной из условия неразрывности потока, полагая, что в полусфере радиуса r_1 , м, при отсутствии гидравлических сопротивлений действует точечный источник депрессии, интенсивность всасывания для которого равна q , м³/с:

$$v = \frac{q}{2\pi r_1^2}, \quad (1)$$

где v – критическая (взвешивающая) скорость, м/с.

Результаты исследований воздействия бокового гидромонитора на смыв образцов-индикаторов в придонной зоне (второй этап исследований) позволяют связать площадь зоны II с мощностью гидромониторной струи:

$$A_2 = w/w_0, \quad (2)$$

где w_0 – удельная мощность гидромониторного транспорта, кВт/м², которая по результатам исследований остается постоянной при разной мощности струи w , Вт:

$$w = P_j Q_j, \quad (3)$$

где P_j – динамическое давление гидромониторной струи в начальном сечении, Па; Q_j – расход жидкости через сопло гидромонитора, м³/с.

Значение w_0 зависит от высоты сопла гидромонитора над плоскостью всасывания H , м; угла атаки на стенку скважины φ , град; и необходимой придонной скорости v , м/с, которую мы принимаем равной скорости транспортирования наиболее трудноудаляемых фракций грунта. Выполнив серию опытов при различных значениях H , φ , v (рис. 5), по результатам статистической обработки результатов, получаем следующую зависимость для определения удельной энергии гидротранспорта:

$$w_0 = v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7). \quad (4)$$

Данная формула справедлива при соотношении высоты сопла гидромонитора над забоем скважины и радиуса камеры, равном:

$$H / r = -0,024\varphi + 3,11, \quad (5)$$

где H – высота позиционирования гидромонитора, м; r – радиус очистной камеры, м. Из рис. 6 видно, что изменение высоты позиционирования гидромонитора над плоскостью всасывания не рационально, т. к. данное соотношение описывает огибающую максимумов эффективности воздействия струи на дно очистной камеры.

Эффективная очистка забоя будет обеспечена при выполнении соотношения:

$$A = A_1 + A_2 > 40...50 \%, \quad (6)$$

т. е. должен обеспечиваться снос грунта с половины очистного пространства или более. Преобразуем данное выражение, определяя площадь очистного пространства через выше приведенные формулы:

$$\frac{q}{2v} + \frac{w}{v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7)} \geq 0,5\pi r^2. \quad (7)$$

В большей степени на размер очистной площади оказывают гидромониторные струи, поэтому преобразуем выражение к следующему виду:

$$w \geq \left[0,5\pi r^2 - \frac{q}{2v} \right] \left[v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7) \right]. \quad (8)$$

Чтобы привязать результаты исследований к различным размерам очистных пространств, введем масштабные коэффициенты, значения которых получены на основе критериев подобия Рейнольдса и Ньютона:

$$r = 0,34 \text{ м}; \quad k_R = R / r = 2,9R; \quad k_q = Q / q = k_R; \quad k_v = V / v = k_R^{-1}; \quad k_w = W / w = k_R^{3/2}. \quad (9)$$

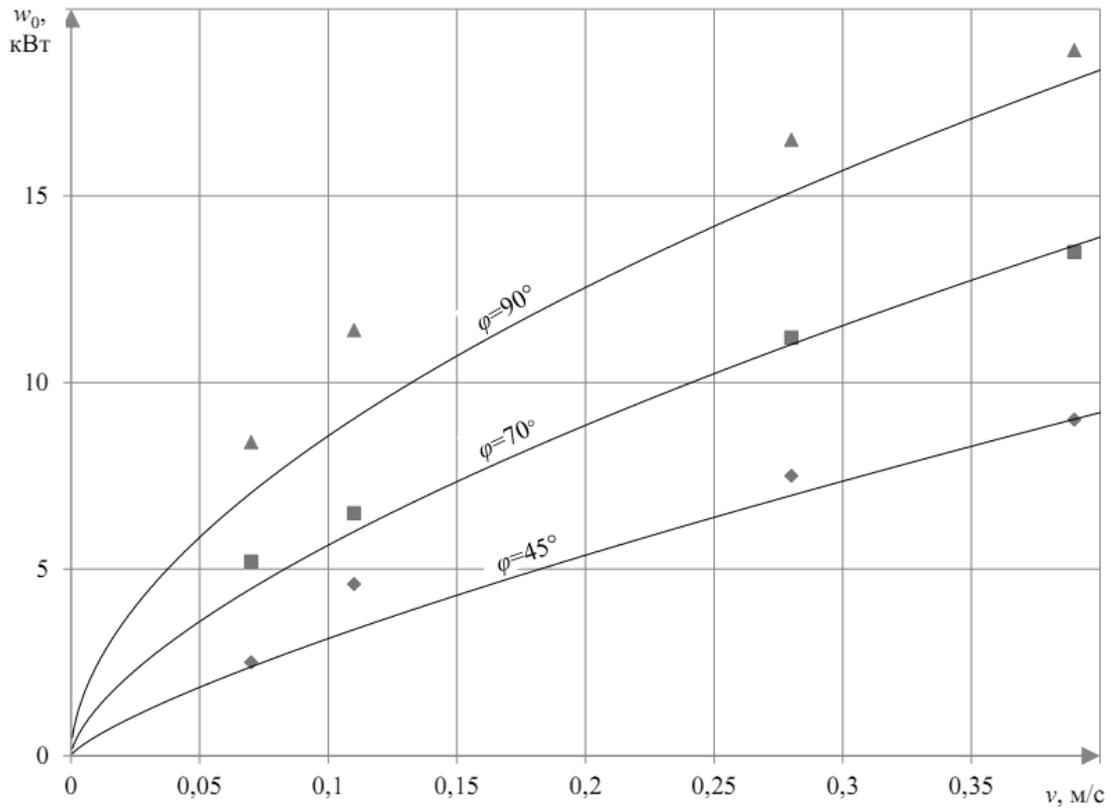


Рис. 5. Зависимость удельной энергии гидротранспорта w_0 грунта от смывающей скорости жидкости v , при различных углах атаки гидромониторной струи φ

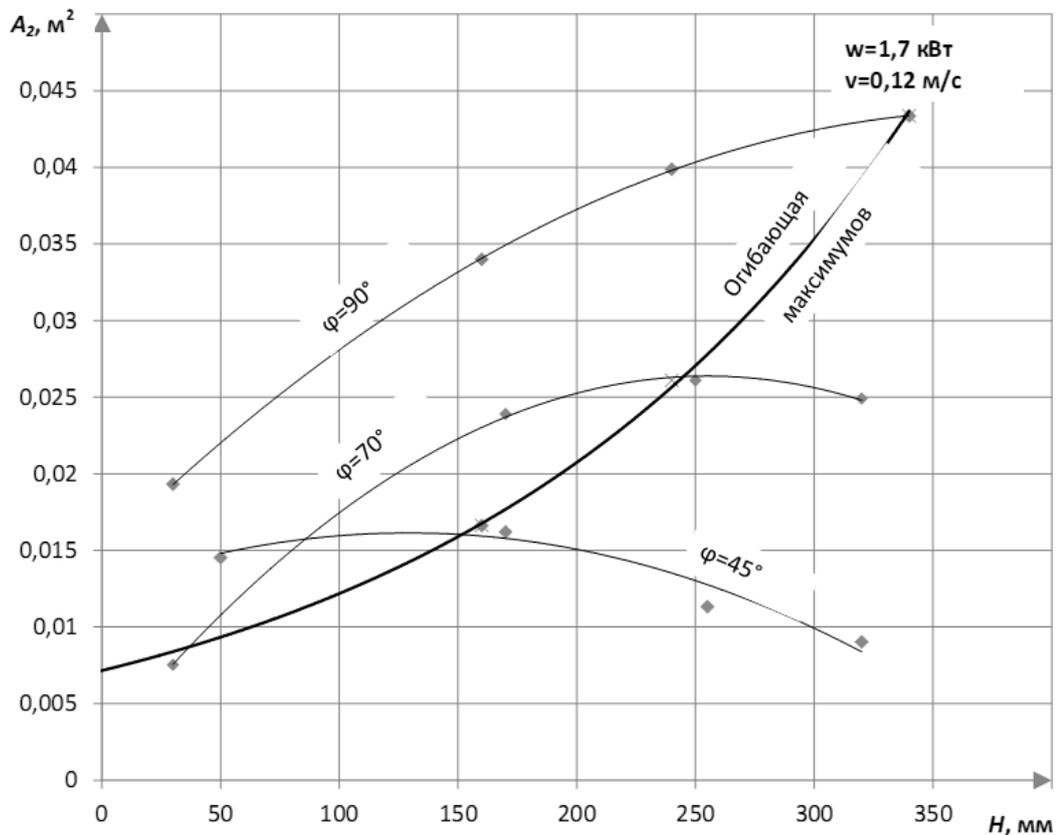


Рис. 6. Зависимость очистной площади A_2 от высоты позиционирования гидромонитора H , при различных углах атаки гидромониторной струи φ

С учетом масштабных коэффициентов и при $\varphi=90^\circ$ вышеприведенное выражение принимает вид:

$$W \geq \left[46 - \frac{270Q}{2V} \right] R^{2.05} V^{0.55}. \quad (10)$$

Полученное выражение можно использовать как основное условие для расчета гидромониторных струй на обеспечение эффективного удаления грунта с предельной транспортирующей скоростью V при радиусе очистного пространства, равном R . Если первостепенное значение имеет обеспечение заданного радиуса размыва, то это условие возможно использовать для проверочного расчета на обеспечение снарядом полной и качественной очистки формируемого очистного пространства.

Четвертое защищаемое положение. Получение достоверных по вещественному составу проб на объектах с прочной подстилающей подошвой продуктивного пласта может быть обеспечено путем увеличения мощности гидромониторных струй и сокращения размеров очистных пространств.

Основным условием получения достоверных проб по вещественному составу является полное извлечение проектного массива на поверхность, включая труднотранспортируемые (из-за высокого удельного веса или размеров зерен) фракции. При этом допустима сортировка грунта и задержка различных фракций по времени в процессе извлечения.

Задача по полному извлечению проектного массива в устойчивом целике (не склонном к обрушению и проявлению плавунных свойств) может быть решена следующим образом: в массиве посредством гидромониторного размыва формируется очистная камера с условно-жестким дном и стенками (по предельному радиусу размыва). Из полученной очистной камеры необходимо добиться полного извлечения грунта, что возможно при осуществлении размыва гидромониторами с определенной мощностью, которая может быть обеспечена из выражения (10).

Таким образом, основные условия обеспечения достоверного опробования:

- обеспечение гидромониторного размыва с радиусом R , м:

$$R = \left[\frac{0.04 \sqrt{\mu H_{\Gamma}}}{\sqrt{P_{\kappa}}} - 0.145 \right] \frac{1}{a} \sqrt{\frac{4Q_{\Gamma}}{\pi \sqrt{2\mu g H_{\Gamma}}}}, \quad (11)$$

где H_{Γ} – избыточный напор на гидромониторной насадке, м; Q_{Γ} – расход рабочей воды через гидромониторную насадку, м³/ч; a , μ – коэффициенты; P_{κ} – прочность горной породы на «размыв»;

- обеспечение мощности гидромониторной струи W , кВт не менее, согласно выражению (10) где V – необходимая придонная средняя транспортирующая скорость, м/ч.

Выражение (10) удобнее преобразовать к следующему виду:

$$R \leq \left[\frac{H_r Q_r}{\left[46 - \frac{270 Q_r}{2V} \right] \cdot V^{0.55}} \right]^{0.49} \quad (12)$$

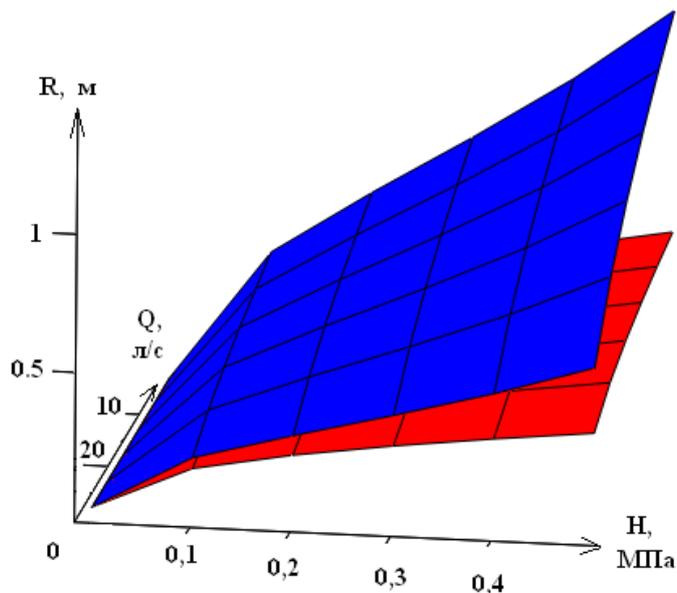


Рис. 7. Сопоставление параметров струи для гидроразмыва (синяя плоскость) и эффективного удаления продуктов размыва (красная плоскость) из формируемой полости

Сопоставим выражения (1) и (3) для массива практически значимых напоров и расходов энергетической воды через боковой гидромонитор (рис. 7) при заданной скорости придонного гидротранспорта $V=0,14$ м/с. Прочность горной породы на размыв 0,18 МПа. Из рис. 7 видно, что в рассматриваемом массиве процесс гидромониторного размыва является более энергоемким, чем процесс гидромониторного гидротранспорта, поэтому должна обеспечиваться высокая эффективность придонного гидротранспорта.

С другой стороны разупрочнение горного массива с помощью воздействия только затопленных гидромониторных струй является крайне энергоемким и исключает существенное увеличение диаметров очистных пространств и промышленное извлечение горной массы. Поэтому, рассмотренная технологическая схема опробования является перспективной при отборе проб небольшой массы и формировании очистных пространств небольшого диаметра.

Пятое защищаемое положение. Проектирование технологических комплексов СГД необходимо производить с учетом взаимодействия технологических процессов с вскрываемыми водоносными пластами. Данное взаимодействие оказывает влияние на процессы подъема пульпы, гидроразмыва и водообмена и является основным осложняющим фактором в гидродинамической системе ГДА.

Согласно предложенной схеме (рис. 2) основным осложняющим фактором в гидродинамической системе ГДА является процесс водообмена с подземным водоносным горизонтом. При вскрытии водоносных пластов скважиной начинается взаимодействие вод пласта и жидкости, находящейся в скважине. Это взаимодействие может носить различный характер и зависит от свойств водоносного пласта и соотношения давлений между водами пласта и жидкостью в скважине. Водоносные пласты могут быть напорные и безнапорные, но чаще всего воды глубинных горизонтов являются напорными.

При работе снаряда СГД будут протекать те же процессы, что и в гидрогеологических скважинах. При работе снаряда СГД возможны следующие режимы взаимодействия пласта и скважины (добычной камеры) в зависимости от соотношения давлений в добычной камере H_2 и напора вод в водоносном горизонте $h_{ст}$:

- сбалансированный режим ($H_2 = h_{ст}$);
- депрессия на пласт ($H_2 < h_{ст}$);
- репрессия на пласт ($H_2 > h_{ст}$).

Давление в добычной камере будет зависеть от производительности всасывания (от скорости осушения добычной камеры), производительности гидромониторного узла (интенсивности доливки воды в камеру Q') и перетока жидкости между пластом и добычной камерой. Таким образом, давление в добычной камере можно выразить через уравнение баланса жидкости в добычной камере.

Результатом водообменных процессов является установление определенного давления в очистном пространстве, а оно в свою очередь воздействует на процессы подъема пульпы на поверхность и процесс нагнетания жидкости через гидромониторы.

Таким образом, образуется сложная взаимосвязь между работой подъемной установки (эрлифт, гидроэлеватор), фильтрационным процессом и процессом нагнетания. В случае использования для нагнетания насосных агрегатов, обладающих гибкой напорно-расходной характеристикой происходит воздействие фильтрационных процессов на подачу насосного агрегата

Очевидно, что подпитка скважины с целью поддержания и повышения пластового давления представляет практический интерес.

Процесс подпитки может быть реализован:

- а) энергетической водой через снаряд (отрицательный дебит);
- б) подпитка неэнергетической водой через скважину подпитки или отработанную скважину.

Таблица 1

Воздействие водообменных процессов на подъем пульпы

Характер воздействия	Значение для водообменного процесса	Воздействие на подъем пульпы
Забор воды из скважины	Выдача «избыточной» жидкости на поверхность, требующей очистки и утилизации	Увеличение энергоемкости процесса (увеличение условной высоты подъема пульпы вплоть до осушения камеры)
Нагнетание воды в скважину	Потеря технической воды (восполнение которой требует материальных и энергетических затрат)	Уменьшение энергоемкости (уменьшение условной высоты всасывания пульпы вплоть до вытеснения пульпы)

Эффективность мероприятий по воздействию на пластовое давление должна определяться по экономическому эффекту: суммарно положительный эффект от улучшения условий подъема пульпы и издержек на мероприятия по нагнетанию.

Очевидно (рис. 8), что подпитка продуктивного пласта энергетической водой является не энергоэффективным мероприятием.

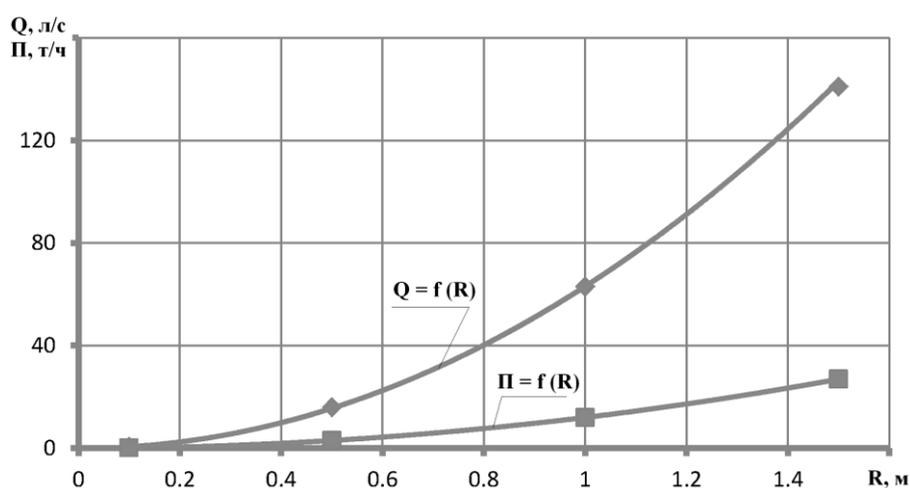


Рис. 8. Зависимость расхода жидкости гидромонитором $Q_{г}$ и соответствующей производительности Π от проектного радиуса скважины R в автосбалансирующем режиме

Таким образом, взаимодействие ГДА с разрабатываемым водоносным пластом определяет:

- водообменный баланс процесса СГД;
- режим отработки пласта (возможность реализации вытеснения и осушения забоя)

Процесс СГД при этом следует ориентировать на отрицательный водообмен (плохие коллектора) или нейтральный водообмен (хорошие коллектора).

Основные выводы:

- оптимизация технологии СГД возможна только посредством комплексного моделирования процесса разработки и анализа полученных математических моделей;
- работа эжекторных ГДА с единой питающей линией для эжектора и гидромониторов не может быть рассчитана посредством линейной последовательности расчетов в силу сложности протекающих процессов, а проектирование возможно только по результатам изучения с помощью математического моделирования;
- для достижения наименьших энергозатрат необходимо выдерживать определенные соотношения между диаметрами колонн – магистралей снаряда СГД, питающих нижний оголовки снаряда;
- согласно результатам математического моделирования, эффективность гидроэлеваторных снарядов повышается при их работе на обводнение обрабатываемого очистного пространства;
- в процессе СГД в добычную камеру целесообразно (с точки зрения повышения энергоэффективности системы) создавать дополнительный приток ненапорной воды с поверхности для разжижения пульпы с целью повышения энергоэффективности;
- наиболее энергоэффективными для опробования близкозалегających к поверхности месторождений, представленных слабосвязными рудами, являются гидроэлеваторные снаряды низкого давления (2÷5 МПа) и низкой мощности (60÷200 кВт);
- использование забойных гидромониторов отрицательно влияет на энергоэффективность снаряда, поэтому мощность этих гидромониторов должна быть строго ограничена выполняемыми задачами;
- основным способом повышения управляемости и предсказуемости работы гидроэлеваторного снаряда является разделение линий нагнетания гидроэлеватора и гидромонитора;
- математическое моделирование работы ГДА позволяет выявить и подобрать рациональные технические параметры, которые необходимы для проектирования снаряда и его детальной проработки под существующие технологические возможности;

- причиной разубоживания и прекращения выдачи пульпы, а также изменения состава проб, получаемых способом СГД, является неэффективная организация процесса массопереноса в очистных пространствах;
- в затопленных очистных пространствах основным фактором, воздействующим на процесс гидротранспорта, является поток, формируемый отраженной от стенок камеры гидромониторных струй;
- эффективное удаление всех фракций горной породы при СГД возможно при правильном подборе режимных параметров размывающих гидромониторных струй;
- повышение эффективности процессов массопереноса в очистных пространствах возможно за счет использования наклонных разрушающих и специальных транспортирующих гидромониторных струй, а также путем уменьшения диаметра очистных пространств и обеспечения непрерывного вращения струй вокруг оси снаряда;
- в качестве технических мероприятий, способствующих прогрессивному развитию технологии СГД следует рекомендовать внедрение гибких всасывающих и размывающих магистралей; разработку средств управления и контроля процесса СГД; большую унификацию технических средств с современным буровым оборудованием, а также разработку мер по роботизации процесса;
- разработанные методические и технико-технологические рекомендации являются основой для создания новых методик и инструкций по совершенствованию технологии опробования МПИ в осложненных геолого-технических условиях методом СГД.

Практическая значимость проведенных исследований:

заключается в том, что на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации разработаны:

- методика расчета качественного удаления разнородных продуктов разрушения из затопленных очистных пространств;
- методика расчета транспортных магистралей для эжекторных гидродобычных агрегатов;
- методика расчета эжекторных снарядов в зависимости от требуемой производительности и размеров очистных пространств;
- методика комплексного проектирования и расчета технических средств (снарядов) СГД.

Основные положения данной работы использованы при разработке методики на опытно-методические работы по скважинной гидродобыче на Бакчарском участке Бакчарского железорудного проявления, утвержденной решением экспертно-технического совета ФБУ ГКЗ 26.02.2013.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Горшенин Н. Е. Особенности расчёта и конструирования эжекторных устройств для снарядов скважинной гидродобычи полезных ископаемых / Н.Е. Горшенин, И. Б. Бондарчук // Проблемы геологии и освоения недр: труды XII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2008. — С. 529-531.
2. Горшенин Н. Е. Гидравлический расчёт эжекторных снарядов для скважинной гидродобычи / Н. Е. Горшенин, И. Б. Бондарчук // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2009. — С. 541-543.
3. Горшенин Н. Е. К вопросу о проектировании скважинной гидродобычи твёрдых полезных ископаемых // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2010. — Т. 2. — С. 190-191.
4. Горшенин Н. Е. Моделирование работы агрегата для скважинной гидродобычи руд на примере Бакчарского рудопроявления // Известия Томского политехнического университета — Томск, 2011. — Т. 319, № 1 : Науки о Земле. — С. 195-198.
5. Горшенин Н. Е. Проблемы технологии скважинной гидродобычи и возможные пути их решения // Проблемы геологии и освоения недр: труды XV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2011. — Т. 2. — С. 262-263.
6. Горшенин Н. Е. Отбор валовых проб методом скважинной гидродобычи // Проблемы геологии и освоения недр: труды XV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2011. — Т. 2. — С. 261-262.
7. Горшенин Н. Е. Перспективы освоения Бакчарского рудопроявления методом скважинной гидродобычи // Проблемы геологии и освоения недр: труды XV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2011. — Т. 2. — С. 263-264.
8. Горшенин Н. Е. Методика исследований процессов массопереноса при крупнообъемном опробовании месторождений методом скважинной гидродобычи // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2012. — Т. 2. — С. 324-325.
9. Горшенин Н. Е. Совершенствование технологии крупнообъемного опробования месторождений методом скважинной гидродобычи на базе совершенствования процессов массопереноса // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова — Томск, 2012. — Т. 2. — С. 326-327.
10. Горшенин Н. Е. Организация массопереноса в затопленном очистном пространстве при скважинной гидродобыче // Известия Томского политехнического университета — Томск., 2012. — Т. 321, № 1 : Науки о Земле. — С. 179-184.
11. Устройство для скважинной гидродобычи полезных ископаемых. Пат. №71377 Рос. Федерация: МПК E21C45/00 / авторы и заявители И. Б. Бондарчук [и др.]; патентообладатель Томский политехнический университет
12. Устройство для скважинной гидродобычи полезных ископаемых. Пат. №79942 Рос. Федерация: МПК E21C45/00 / авторы и заявители И. Б. Бондарчук [и др.]; патентообладатель Томский политехнический университет