

На правах рукописи

Кондратенко Андрей Сергеевич



**СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНОГО БУРЕНИЯ
МЯГКИХ ПОРОД ОБСАДНЫМИ ТРУБАМИ С
ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПНЕВМОТРАНСПОРТОМ ШЛАМА**

*Специальность 2.8.1. Технология и техника
геологоразведочных работ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Кульчицкий Валерий Владимирович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, профессор;

Дмитрак Юрий Витальевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел моделирования и управления горнотехническими системами, ведущий отделом;

Лихущин Александр Михайлович

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», центр технологий строительства и ремонта скважин, лаборатория разработки технологий строительства скважин, главный научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», г. Москва.

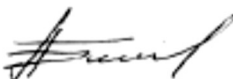
Защита диссертации состоится **25 декабря 2023 г. в 12:30** на заседании диссертационного совета ГУ 2023.3 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 сентября 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Значительный объем бурения скважин приходится на проходку в естественных и техногенных осадочных горных породах в приповерхностном слое I – IV категории по буримости. Вертикальная проходка в мягких и рыхлых породах осуществляется при бурении интервалов для установки кондукторов дегазационных, эксплуатационных и геологоразведочных скважин, при опробовании россыпных месторождений, хвостохранилищ и техногенных полигонов, а также при бурении на воду. Горизонтальное и наклонное бурение выполняется при бестраншейном строительстве и проходке специальных выработок малого сечения в ходе проведения инженерно-геологических и геофизических работ.

Приповерхностный осадочный слой представлен многообразием зачастую перемежающихся пород с широким диапазоном физико-механических свойств. Наибольшую сложность для бурения представляют обводненные грунты, слабые пески, песчано-галечные прослойки, водоносные горизонты и техногенные малосвязанные массивы. Такие горно-геологические условия сопряжены с низкой устойчивостью стенок скважины, существенно затрудняющей процесс бурения и монтаж обсадной трубы.

Существует три основных подхода к решению проблемы устойчивости стенок скважин: физико-химический - создание эффективных буровых растворов; термический - образование спечённой корки на стенке скважины; механический - с установкой обсадной трубы. Проходка с одновременной установкой обсадной трубы реализуется при ударном бурении, ударно-канатном и ударно-вращательном бурении с двойной буровой колонной, оснащённой раздвижным или теряемым буровым инструментом. Ударно-канатный способ наиболее прост среди существующих, но вместе с тем имеет предельно низкую производительность. Технология с двойной буровой колонной требует специализированных буровых станков и оснастки, а при прохождении обводненных глинистых пластов связана с возрастающим риском закупоривания продувочных каналов и образования сальников в межтрубном пространстве.

Между тем, бурение с внедрением полых трубчатых элементов в массив энергией ударных импульсов не только реализует опережающую установку обсадной трубы, гарантирующую устойчивость стенок скважины, но при этом обеспечивает и наибольшую производительность проходки в сравнении с другими способами.

Область применения бурения с ударным погружением обсадной трубы распространяется от самых слабых пород до крепких и мерзлых грунтов с включениями из валунов при армировании забойного торца твердосплавными вставками. В мировой практике есть примеры погружения труб горизонтально на длину до 122 м, а вертикально на глубину до 96 м.

Наиболее значительный вклад в развитие теории и практики ударного, ударно-вибрационного и вибрационного бурения внесли ученые: Д. Д. Баркан, И. И. Блехман, А. И. Прудентов, В. В. Верстов, А. А. Лука, В. И. Минаев, Б. В. Суднишников, М. Najafi, Т. Matsumoto, S. R. Gudavalli, М. Y. Fattah, X. M. Ding, M. F. Randolph, G. Kiun и другие. Их исследования показали наибольшую эффективность с точки зрения глубины и крепости разрушаемой породы именно ударного погружения.

Основным сдерживающим фактором более широкого применения технологий ударного погружения обсадной трубы является отсутствие высокомеханизированного, высокопроизводительного и мало затратного способа экскавации из внутренней полости шлама. Существующие технологии промежуточного удаления шлама с помощью шнеков, желонки и гидроразмыва не в полной мере соответствуют достигнутой производительности непосредственно процесса погружения. Они требуют дополнительных средств механизации, монтаж которых для очередного удаления поступившей в трубу породы на продолжительное время прерывает процесс погружения, что существенно снижает производительность проходки в целом.

В этой связи разработка новых научно обоснованных технических и технологических решений в области ударного бурения мягких осадочных горных пород актуальна, а решение задачи удаления шлама из погружаемой в массив обсадной трубы представляет значительный научный и практический интерес для проходки как вертикальных, так и горизонтальных скважин.

Объект исследования – технология проходки скважин в мягких осадочных горных породах на обсадной колонне с периодическим удалением шлама.

Предмет исследования:

- закономерности деформирования массива осадочных горных пород в процессах погружения обсадной трубы, отрыва поступившей в трубу порции породы сжатым воздухом и пневмотранспортирования ее на разгрузку.

- технико-экономическая эффективность ведения работ при бурении с поверхности дегазационных скважин в купол обрушения с поверхности.

Цели и задачи

Цель работы - создание эффективной технологии проходки вертикальных и горизонтальных скважин с опережающей установкой обсадной трубы в осадочных горных породах и периодическим удалением шлама от забоя без остановки процесса бурения.

Идея работы в использовании эффекта нарастающего к забою уплотнения разрушенной породы внутри погружаемой в массив обсадной трубы для реализации периодического удаления шлама сжатым воздухом.

Основные задачи исследования:

1. Экспериментально оценить влияние физико-механических свойств осадочных горных пород и энергетических параметров внешнего воздействия на процессы формирования породного цилиндра внутри погружаемой трубы, отделения от него удаляемой части и её последующего транспортирования наружу.

2. Выявить на основе математического моделирования закономерности взаимодействия обсадной трубы с массивом и разрушенной породой с учетом энергетических и геометрических параметров технологии ударного погружения.

3. Исходя из проведенных исследований разработать и испытать в производственных условиях технологию ударного бурения мягких пород обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом шлама.

4. Оценить экономическую эффективность разработанной технологии при проходке вертикальных интервалов в мягких осадочных породах для установки кондукторов дегазационных скважин.

Научная новизна

1. Установлены закономерности изменения давления, необходимого для отрыва породного поршня от забоя, и силы сопротивления его перемещения по трубе в зависимости от содержания глинистых частиц в массиве при одновременном статическом воздействии сжатого воздуха на поршень и ударном воздействии на обсадную трубу. Эти закономерности отличаются от известных формой испытываемых образцов и особенностью сочетания силовых воздействий на систему.

2. Создана математическая модель взаимосвязи процессов ударного погружения трубы и формирования породного поршня внутри неё. Отличительной особенностью предложенной математической модели является учет упруго-пластичного контакта трубы с массивом и влияние ударного возмущения на функцию давления в конечных элементах. Модель дает возможность определить рациональную периодичность операций по пневмотранспорту шлама из трубы.

3. Получена квадратичная зависимость затухания амплитуды ударного импульса при погружении обсадной трубы в упруго-пластичный массив от расстояния, пройденного упругой волной по трубе, и толщины ее стенки, позволяющая определять перемещение трубы под действием ударного импульса на заданной глубине.

4. Установлено, что скорость движения породного поршня не зависит от глубины погружения, а определяется соотношением поперечного сечения обсадной трубы к пропускной способности канала для подачи сжатого воздуха. Данное соотношение играет определяющую роль в реализации технологии.

Объект исследования – технология проходки скважин в осадочных горных породах на обсадной колонне с периодическим удалением шлама.

Теоретическая и практическая значимость работы

Применительно к разработанной технологии проходки скважин в мягких породах на основе математического описания протекающих процессов созданы расчетные программы, позволяющие для заданных условий определить рациональную периодичность удаления шлама и энергию удара, необходимую для погружения трубы в массив на требуемую глубину, а также расход сжатого воздуха для

эффективной реализации процесса выноса породного поршня и давление для его отрыва.

Предложенная технология ударного бурения мягких пород обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом шлама обеспечивает снижение энергозатрат и времени технологических операций. Буровой комплекс на основе предложенной технологии имеет ряд преимуществ в сравнении с комплектом оборудования для реализации других способов бурения геологоразведочных, дегазационных и нефтегазовых скважин при проходке интервалов в слабых породах, а также горизонтальных скважин при бестраншейном строительстве.

Методология и методы исследований

Выявление закономерностей процессов формирования, отрыва и удаления породного поршня проводилось при лабораторных и полевых исследованиях на уменьшенных моделях труб диаметром 32, 56 и 76 мм и трех типах породы: глине, суглинке, супеси с процентным содержанием глинистых частиц 62, 39, 21 % соответственно. В качестве источника ударных импульсов использовались пневмомолоты, энергия ударов которых изменялась в диапазоне от 1,8 до 12,3 Дж.

Численное моделирование процесса взаимодействия погружаемой ударами обсадной трубы с вмещающим массивом и разрушенной породой внутри нее выполнялись на основе классической теории тонких оболочек Кирхгофа – Лява, метода конечных элементов на решателе ANSYS Mechanical APDL и анализа волновой картины, возникающей в волноводе, роль которого выполняет погружаемая труба, при генерации, передаче и трансформации ударного импульса, а также уравнений термодинамики и расходной функция Сен-Венана в расчетном модуле IPI Simulation X.

Производственное бурение горизонтальных скважин диаметром от 210 до 630 мм и длиной от 12 до 30 м с использованием новой технологии осуществлялось при проведении специальных выработок малого сечения под магистралями в Новосибирской области. Вертикальное ударное бурение обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом шлама в естественный массив осадочных горных пород проводилось в условиях горных отводов шахт им. А.Д. Рубана и

им. С.М. Кирова при бурении интервалов под стартовые кондукторы дегазационных скважин диаметром 325 и 426 мм.

Положения, выносимые на защиту

1. Ударное воздействие на трубу, дополняющее статическое выдавливающее воздействие на породу сжатым воздухом, приводит к снижению до 85 % сил сопротивления при срабатывании породного поршня и до 70% давления, необходимого для его отделения. Эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в массиве.

2. При прочих равных условиях допустимая длина части породы, подлежащая отделению от призабойного участка и удалению, увеличивается с ростом диаметра погружаемой трубы и энергии ударов, воздействующих на нее.

3. При вертикальном ударном погружении обсадной трубы затухание амплитуды ударного импульса пропорционально квадрату расстояния, пройденного упругой волной по забиваемой трубе.

4. Расход сжатого воздуха для реализации выноса породного поршня при заданной скорости его движения не зависит от глубины погружения и определяется соотношением поперечного сечения обсадной трубы к пропускной способности канала для подачи сжатого воздуха.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций доказаны результатами экспериментальных и опытно-производственных исследований, сходимостью и воспроизводимостью полученных результатов.

Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2019); Международной научно-практической конференции «Строительство и ремонт скважин» (Новороссийск, 2019); International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management (Болгария, 2019); Международной научно-практической конференции «Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого-технологическими условиями их разработки» (Тюмень, 2022); Международной конференции «Рассохинские чтения. Геология, поиски и разведка месторождений углеводородов» (Ухта, 2022); XXI Международной

научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2023); XXIII Международной научно-технической конференции «ГЕОНАУКИ-2023» (Иркутск, 2023); Международной научно-практической конференции «Золотухинские чтения. Нефть, газ и энергетика в Арктическом регионе» (Архангельск, 2023).

Личный вклад автора в создании теории взаимодействия погружаемой трубы с массивом и расчетных программ на ее основе, защищенных патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ; в постановке и выполнении теоретических и экспериментальных исследований по разработке технологии ударного погружения трубы в массив осадочных горных пород с периодическим удалением шлама, а также во внедрении результатов работы в производственных условиях.

Разработанные в диссертационном исследовании технологические решения и рекомендации, направленные на обеспечение устойчивости стенок скважины и повышение производительности проходки используются ООО «СУЭК-Кузбасс» при установке стартовых кондукторов дегазационных скважин, а также производственными организациями, занимающимися бестраншейной прокладкой коммуникаций.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 23 печатных работах, в том числе в 6 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 13 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus, Web of Science). Получено 3 патента и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 201 наименование и 6 приложений. Диссертация изложена на 302 страницах машинописного текста, содержит 137 рисунков и 38 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность сотрудникам ИГД СО РАН А.М. Петрееву, А.Л. Исакову, В.Н. Карпову, А.И. Конурину, Н.И. Александровой, Б.Б. Данилову, А.Т. Сырямину за помощь и ценные замечания при выполнении исследований, а также работникам «СУЭК-Кузбасс» за советы и техническую поддержку при внедрении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы; обосновывается ее актуальность; определяются цель, идея и задачи исследования; излагаются научная новизна, практическая и теоретическая значимость.

В первой главе представлены анализ и обобщение работ, посвященных исследованию методов образования скважин в массиве осадочных горных пород для геологоразведочного бурения, дегазации угольных пластов и прокладки подземных коммуникаций. Выполнен анализ основных способов очистки трубы от разрушенной породы, рассмотрены их достоинства и недостатки. Предложена технологическая схема реализации технологии ударного бурения мягких пород обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом шлама.

Во второй главе изложены результаты полевых, лабораторных и промышленных экспериментов, основная задача которых — выявление закономерностей процессов формирования, отрыва и удаления разрушенной породы.

Третья глава посвящена определению закономерностей формирования породного поршня при горизонтальном погружении в привязке к геометрическим параметрам трубы и свойствам массива на математических моделях.

В четвертой главе представлены результаты апробации технологии вертикального ударного погружения обсадных труб в ненарушенный массив мягких осадочных горных пород для создания стартовых кондукторов дегазационных скважин, которые бурятся с поверхности в угольный пласт в условиях горного отвода шахты им. С. М. Кирова АО «СУЭК – Кузбасс». Дана оценка экономической эффективности предложенной технологии в сравнении с действующей. Представлены варианты безопасного выпуска разрушенной породы.

В пятой главе выполнено математическое моделирование процессов ударного вертикального погружения металлических труб в массив осадочных горных пород и движения породного поршня по трубе. Даны рекомендации по требуемому давлению и расходу сжатого воздуха для реализации предложенной технологии.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Ударное воздействие на трубу, дополняющее статическое выдавливающее воздействие на породу сжатым воздухом, приводит к снижению до 85 % сил сопротивления при страгивании породного поршня и до 70% давления, необходимого для его отделения. Эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в массиве.

В случае ударного погружения обсадной трубы дополнительными факторами, влияющими на отрыв и транспортирование шлама, являются колебание трубы с присоединенной частью грунтового массива и упругая деформация ее стенок при прохождении ударных импульсов. Для определения влияния ударной нагрузки на эффективность транспортирования и отрыва породной порции воздушным потоком разработан лабораторный стенд (рисунок 1).

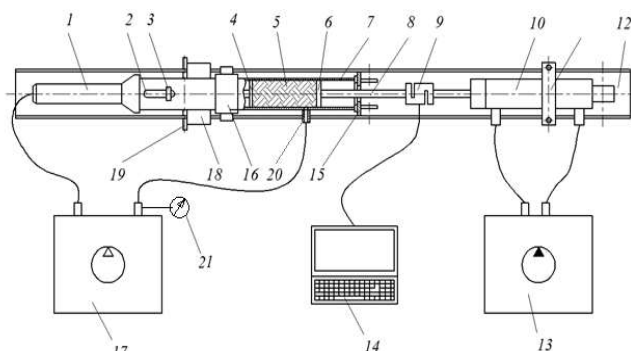


Рисунок 1 — Схема экспериментального стенда:

1 – пневмомолот; 2 – паз; 3 – ползун; 4 – измерительный поршень; 5 – образец породы; 6 – поршень; 7 – труба; 8 – штанга; 9 – датчик силы; 10 – гидроцилиндр; 11 – прижим гидроцилиндра; 12 – основание; 13 – насосная станция; 14 – ПК; 15 – кронштейн; 16 – прижим трубы; 17 – компрессорная установка; 18 – боковые пластины; 19 – ограничительный штифт; 20 – штуцер; 21 – манометр

Труба 7 фиксируется в ложементе с помощью прижима 16, внутренняя поверхность которого выполнена из резины для создания силы трения, изменяющейся в зависимости от усилия прижатия. Во внутреннюю полость трубы 7 заведен поршень 6 на штанге 8, соединенной со штоком гидроцилиндра 10 через датчик силы 9, который фиксирует усилие страгивания образца породы 5. На противоположном конце трубы установлен пневмомолот 1. Для визуального контроля момента начала движения образца породы 5 в трубе 7 выполнен продольный паз 2, в который выведен ползун 3, жестко связанный с измерительным поршнем 4.

Для каждого эксперимента образец породы формировался уплотнением насыпной породы осевым усилием 4 кН. Серия экспериментов по страгиванию проводилась на трех типах породы. Чтобы эксперименты соответствовали реальному процессу, были проведены замеры плотности и влажности в естественном массиве, порода из которого впоследствии использовались для формирования искусственных образцов (таблица 1). Сформированные образцы с одинаковой длиной, плотностью, влажностью и расположением относительно торцов трубы выдавливались осевым усилием гидроцилиндра. При этом фиксировалось сопротивление страгиванию. Затем серия экспериментов повторялась уже с одновременным приложением к трубе ударной нагрузки, создаваемой пневмомолотом 1.

Таблица 1 — Результаты экспериментов

Параметр	Глина	Суглинок	Супесь
Содержание глинистых частиц, %	62	39	21
Длина порции, мм	150	150	150
Плотность, кг/м ³	1960	1840	1860
Влажность, %	13	13	13

Аналогичные эксперименты проводились при выдавливании образцов сжатым воздухом, который подавался во внутреннюю полость трубы через штуцер 20, а давление сжатого воздуха контролировалось манометром 21. Результаты экспериментов представлены на диаграммах (рисунок 2).

Установлено, что ударное воздействие на трубу приводит к снижению на 30–85 % сил сопротивления при страгивании породного

поршня и на 40–70 % давления, необходимого для его отрыва, причем эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в образце.

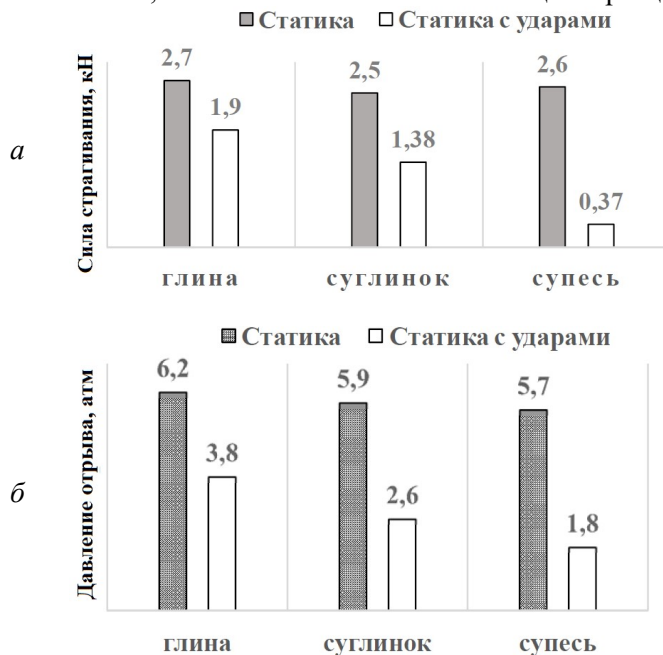


Рисунок 2 — Диаграммы сил страгивания породного поршня (а) и давления воздуха для его отрыва (б)

2. При прочих равных условиях допустимая длина части породы, подлежащая отделению от призабойного участка и удалению, увеличивается с ростом диаметра погружаемой трубы и энергии ударов, воздействующих на нее.

В ходе промышленной апробации технологии при горизонтальной проходки установлены случаи, когда порции породы не выходили из трубы, рассыпаясь в процессе движения. Также зафиксированы факты переуплотнения, при которых магистрального давления компрессора для отделения породного поршня было недостаточно. Решение этих проблем возможно только с помощью теоретического описания процессов, протекающих при формировании порции.

Для определения рационального шага удаления разрушенной породы было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния массива осадочных горных пород в трехмерной постановке. В программном комплексе *ANSYS* была построена динамическая расчетная модель взаимодействия упруго-пластичного массива и жесткой погружаемой трубы на основе метода конечных элементов (рисунок 3).

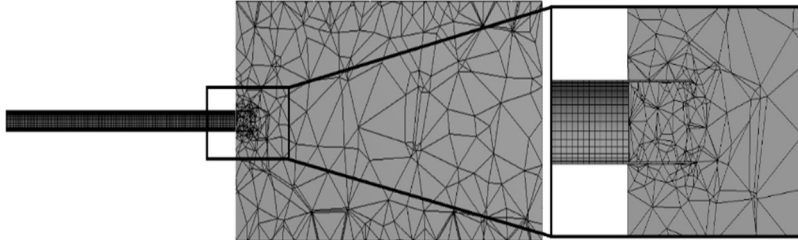


Рисунок 3 — Расчетная схема с разбиением модели на конечные элементы для горизонтального погружения трубы в массив

В качестве модели массива применялась модель Менгери – Вилама, основанная на использовании теории пластического течения. Для построения первоначальной поверхности текучести в модели используются три основных параметра (1): предел текучести при одноосном растяжении, предел прочности на одноосное сжатие и предел прочности при двuosном сжатии:

$$\begin{aligned} \bar{R}_t &= R_t \Omega_t, \\ \bar{R}_c &= R_c \Omega_c, \\ \bar{R}_b &= R_b \Omega_c, \\ \Omega_{tc} &= \begin{cases} \Omega_t & \text{при } k_c \leq k_{cm} \\ \Omega_t \Omega_c & \text{при } k_c > k_{cm}, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где k_{cm} — параметр материала.

Поведение поверхности текучести описывается функциями упрочнения и разупрочнения Ω_t и Ω_c , которые, в свою очередь, зависят от переменных при растяжении и сжатии k_t и k_c соответственно, определяемыми через производные (2):

$$\begin{aligned} \dot{k}_c &= \frac{\alpha_c}{\bar{R}_c} \sigma \cdot \dot{\epsilon}_{pl} \quad , \\ \dot{k}_t &= \frac{\alpha_t}{\bar{R}_t} \sigma \cdot \dot{\epsilon}_{pl} \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

где α_c и α_t — весовые функции при сжатии и растяжении соответственно; $\dot{\epsilon}_{pl}$ — производная пластической деформации; σ — главные напряжения.

Система дифференциальных уравнений для определения вектора перемещений узловых точек (3) имеет вид:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = F(t), \quad (3)$$

где $[M]$ — матрица масс; $[C]$ — матрица демпфирования; $[K]$ — матрица жесткости; (\ddot{u}) — вектор ускорений узлов; (\dot{u}) — вектор скоростей узлов; (u) — вектор перемещений узлов; $F(t)$ — вектор приложенного силового воздействия.

Матрица демпфирования (4) определяется с использованием матрицы масс и матрицы жесткости:

$$[C] = \varepsilon \cdot [M] + \chi \cdot [K]. \quad (4)$$

Коэффициенты вязкого демпфирования ε , χ являются действительными константами.

Давление в границах каждого конечного элемента (5) определяется по зависимости:

$$p = -p_t + (p_0 + p_t) e^{\left(\frac{1+e_0}{k}(1-e^{\varepsilon_{vol}})\right)} \quad (5)$$

где p_0 — начальное давление; p_t — давление, возникающее от динамического воздействия; e_0 — исходная пустотность грунта; k — коэффициент набухания; ε_{vol} — упругая объемная деформация.

Для описания поведения массива применялись усредненные показатели для супеси и суглинка, как наиболее распространенных пород в приповерхностном слое: плотность — 1980 кг/м³, модуль упругости Юнга — 40 МПа, коэффициент Пуассона — 0,3; параметры модели Мендери — Вилама, основанной на теории пластического течения: прочность на одноосное сжатие — 9850 Па, на одноосное растяжение — 2250 Па, на двухосное сжатие — 10 кПа, угол дилатансии — 0,25 радиан. Для описания трубы используются следующие показатели: плотность — 7850 кг/м³, модуль упругости Юнга — 200 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,3, предел текучести при растяжении и сжатии — 250 МПа, предел прочности при растяжении — 460 МПа.

Расчет выполнен для труб диаметром 325–730 мм, энергии удара 2–6 кДж и усредненных физико-механических свойств массива. Во всех расчетах толщина стенки принята 8 мм, а частота ударов — 100 уд/мин.

В качестве граничных условий принято: жесткое закрепление основания и боковых стенок модели, контактные условия на границе раздела сред кольцевой цилиндрический элемент – массив, сила гравитации, постоянное статическое давление и серия ударных воздействий на внешний конец кольцевого цилиндрического элемента. В расчете принимается, что в начальный момент времени кольцевой элемент погружен в массив на глубину двух диаметров трубы, при этом поверхность массива внутри совпадает с внешней поверхностью.

При разбиении расчетной области применялись конечные элементы переменного размера. В зоне ожидаемого наибольшего градиента деформаций разбиение было наиболее мелким и увеличивалось на участках с плавным изменением деформаций (на границах расчетной области). При этом используется адаптивное перестроение сетки для обеспечения баланса между временем расчета и точностью решения в процессе продвижения кольцевого цилиндрического элемента и формирования разрушенной породы.

В таблице 2 представлены результаты расчета в формате отношения длины шага погружения к диаметру трубы, при которых напряжения в породе в месте подачи сжатого воздуха на расстоянии от торца в 1 диаметр трубы равны 0,6 МПа. Указанное значение напряжений в породе выбрано исходя из энергетических возможностей большинства компрессорных установок, номинальное давление которых равно 0,6 МПа.

Таблица 2 — Отношение длины погружения к диаметру трубы

Диаметр трубы, мм	Энергия ударов		
	2000 Дж	4000 Дж	6000 Дж
	L/D		
325	6,870	7,914	10,010
426	7,317	9,206	11,363
530	8,196	9,975	12,545
630	11,775	13,555	14,647
730	14,585	16,770	17,299

Используя результаты, приведенные в таблице 2, следует учитывать, что они получены для усредненных свойств массива. Проводить множество вычислений нецелесообразно, поскольку многообразие типов грунтов огромно и свойства могут сильно изменяться даже по длине одного бестраншейного перехода. При подготовке стартового и приемного котлованов можно экспресс-методом определить, к какому типу относится разрабатываемый грунт, и при необходимости внести корректировку: если преобладают песчаные частицы, то шаг погружения увеличить на 1–2 диаметра трубы; если больше глинистых частиц, то шаг нужно уменьшить. Кроме того, эти расчеты отражают максимально допустимые значения шага очистки. При реализации технологии циклично-поточного удаления следует стремиться к формированию как можно более протяженной порции.

3. При вертикальном ударном погружении обсадной трубы затухание амплитуды ударного импульса пропорционально квадрату расстояния, пройденного упругой волной по забиваемой трубе.

Процесс погружения металлических труб в массив осадочных горных пород с применением машин ударного действия, который можно охарактеризовать тремя основными параметрами: длина погружаемой трубы, скорость забивания и точность проходки скважины. При планировании работ по забиванию труб в массив приоритетным вопросом является выбор генератора ударных импульсов, обеспечивающего нужную глубину погружения трубы заданного диаметра в массив с известными физико-механическими характеристиками. Ввиду того что длина труб измеряется десятками метров, подход к решению поставленного вопроса реализован с позиции анализа волновой картины, возникающей в волноводе, роль которого выполняет забиваемая труба, при генерации, передаче и трансформации ударного импульса.

Постановка задачи. Металлическая труба диаметром D_1 с толщиной стенки h и длиной H , моделируемая упругим стержнем с сечением $S_1 = \frac{\pi}{4} [D_1^2 - (D_1 - 2h)^2]$, находится в массиве, описываемом идеальной упруго-пластической моделью. На верхнем торце трубы в направлении ее забивания генерируется ударный импульс. Требуется

описать поведение трубы в массиве, если на ее забойном торце действует лобовое сопротивление, вызванное формированием породы.

Система координат выбрана таким образом, что ее начало совпадает с верхним торцом забиваемой трубы, а ось Ox направлена вдоль оси трубы вглубь массива (рисунок 4). Тогда граничные условия задачи (6) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma(0, t) &= \Phi(t) \\ \sigma(H, t) &= -P_n,\end{aligned}\quad (6)$$

где $\Phi(t)$ — функция напряжений, получаемая из решения задачи о взаимодействии генератора ударных импульсов с трубой на ее верхнем торце; P_n — напряжение на нижнем торце трубы, вызванное лобовым сопротивлением.

На участке $H_0 \leq x \leq H$ труба нагружена нормальным давлением $P_{бок}$, линейно увеличивающимся с ростом глубины погружения (7):

$$P_{бок} = k_{бок} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot x, \quad (7)$$

где $k_{бок}$ — коэффициент бокового давления вмещающего массива; x — текущая глубина.

Система дифференциальных уравнений (8), описывающих движение одномерного упругого стержня в массиве, имеет вид

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + f(x, v) \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = E_1 \frac{\partial v}{\partial x}, \end{cases} \quad (8)$$

где $v(x, t)$ и $\sigma(x, t)$ — массовая скорость и напряжение в точке x в момент времени t ; $f(x, t)$ — удельная сила бокового сопротивления трубы (9), отнесенная к площади ее поперечного сечения S :

$$f(x, v) = \begin{cases} -\frac{\pi D_1}{S_1} \tau(u) & \text{при } |u| < \frac{\tilde{F}_{mp}}{G} \\ -\text{sign}(v) \tilde{F}_{mp} & \text{при } |u| \geq \frac{\tilde{F}_{mp}}{G}, \end{cases} \quad (9)$$

где $u(x, t)$ — перемещения стержня; $\tilde{F}_{mp} = P_{бок} \cdot \mu \frac{\pi D_1}{S_1}$ - усредненная по сечению удельная сила трения трубы о вмещающий массив при необратимых деформациях; $G = \frac{\pi D}{S} \tilde{G}$, \tilde{G} — приведенный модуль сдвига грунта; μ — коэффициент трения трубы о массив.

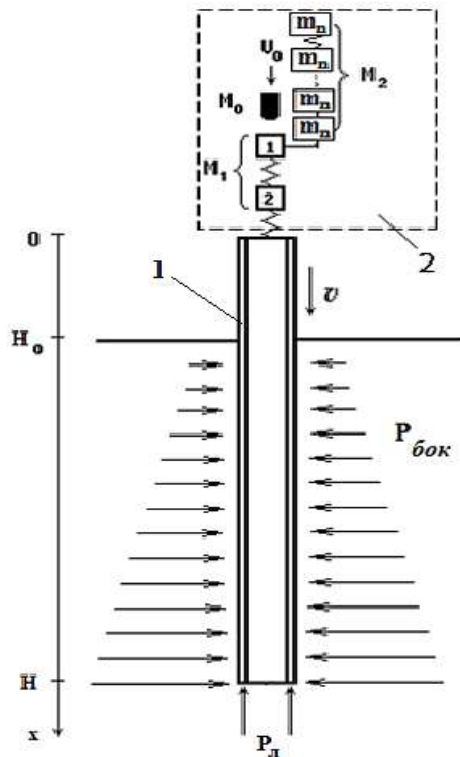


Рисунок 4 - Постановка задачи о забивании металлической трубы (1) в осадочный массив с использованием генератора ударных импульсов (2)

При определении граничного условия задачи на верхнем торце упругого стержня используется дискретная модель генератора ударных импульсов, имитирующая процесс зарождения, трансформации и

передачи волны напряжений забиваемой трубе с применением машин ударно-вибрационного действия.

Первостепенной задачей, лежащей в основе любых оценок предельно достижимой глубины погружения, является вопрос о затухании волны напряжений, распространяющейся вдоль трубы. Зная закономерности этого процесса и располагая информацией об ударном импульсе, формируемом в трубе, можно делать обоснованные оценки достаточности входных параметров для достижения проектной глубины скважины, сооружаемой в массиве осадочных породах путем забивания металлических труб открытым концом. Основными факторами, способными оказывать влияние на характер затухания упругой волны, которая распространяется вдоль трубы, находящейся в массиве, являются конфигурация ударно-вибрационного импульса и упругость массива.

Конфигурация ударного импульса. На рисунке 5 приведены эпюры перемещений поперечных сечений металлической трубы диаметром 426 мм и длиной 50 м, к левому торцу которой приложен синусоидальный импульс. Функция $\Phi(t)$, конкретизирующая граничное условие (6), в этом случае имеет вид (10)

$$\Phi(t) = \begin{cases} -\sigma_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{t_m}\right), & \text{при } 0 \leq t \leq t_m \\ 0, & \text{при } t > t_m, \end{cases} \quad (10)$$

где σ_0 — амплитуда ударного импульса; t_m — его длительность.

В расчетах использовались следующие параметры: $\mu = 0,4$; $\tilde{G} = 10000$ МПа/м. Приведенный модуль сдвига грунта соответствует минимального сцепления массива с трубой, близкому к случаю сухого трения. Параметры синусоидальных импульсов подобраны таким образом, что при отличии амплитуд в полтора-два раза их энергия оставалась неизменной ($A = 10000$ Дж). Как видно из рисунка 13, наилучший результат по дальности распространения конечных перемещений поперечных сечений трубы дает наиболее резкий из сравниваемых удар, имеющий наибольшую амплитуду при наименьшей длительности.

Более затянутый импульс приводит к росту градиента распределения остаточных деформаций по длине трубы, обусловленному

наличием сил внешнего трения. Кроме того, максимальная длина, на которой еще зафиксированы остаточные перемещения поперечных сечений трубы, связана линейной зависимостью с амплитудой исходного импульса, приложенного к торцу погруженной в массив трубы.

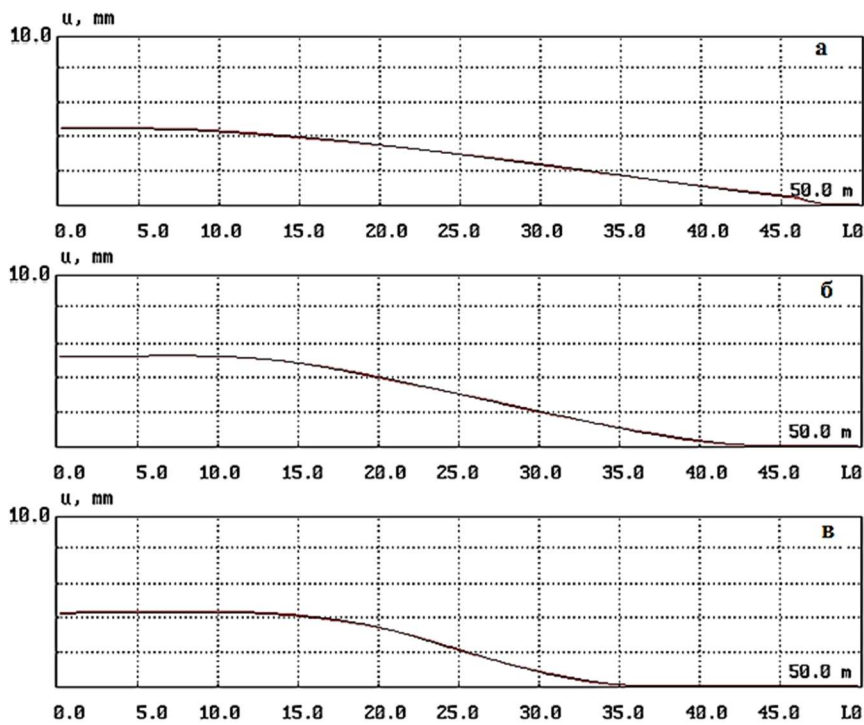


Рисунок 5 — Эпюры остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в массив трубы, вызванных синусоидальным импульсом напряжений с параметрами: *а* — $\sigma_o = 232$ МПа, $t_m = 1,25$ мс; *б* — $\sigma_o = 164$ МПа, $t_m = 2,5$ мс; *в* — $\sigma_o = 116$ МПа, $t_m = 5,0$ мс

Упругость массива — это свойство внешней среды, способное существенно влиять на процесс забивания трубы в массив осадочных горных пород, оно слабо изучено при рассмотрении динамических процессов, происходящих в упругих стержнях. В качестве иллюстрации важности учета такого характеризующего упругость внешней среды параметра, как модуль сдвига, на рисунке 6 приведена расчетная эпюра пе-

ремещений поперечных сечений металлической трубы с синусоидальным импульсом, приложенным к ее торцу при $\tilde{G} = 100$ МПа/м. Такие значения модуля сдвига соответствуют вязким водонасыщенным грунтам, где возвратно-колебательные движения трубы при ударе могут быть весьма ощутимы. Расчетная эпюра на рисунке 5а соответствует супеси с величиной $\tilde{G} = 10000$ МПа/м. При прочих равных условиях наличие низкочастотных колебаний трубы, вызванных упругой реакцией массива, приводит к снижению предельно возможной длины забиваемой трубы с 50 до 35 м (рисунок 5а и б).

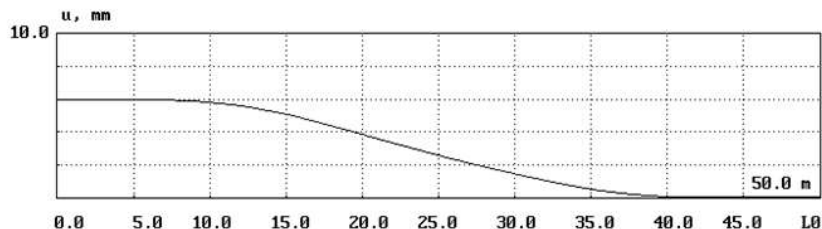


Рисунок 6 — Эпюра остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в вязкий грунт трубы, вызванных синусоидальным импульсом напряжений с параметрами $\sigma_0 = 232$ МПа, $t_m = 1,25$ мс при $\tilde{G} = 100$ МПа/м

Для определения характера затухания импульса при описании внешнего сопротивления среды законом сухого трения рассмотрены две последовательные фазы ударного импульса, представленные профилями массовых скоростей в поперечном сечении трубы с амплитудами v_0 и v_l с выделенным элементарным прямоугольным импульсом длиной Δx , который за время t_l «пробегает» расстояние $l = C_p \cdot t_l$, где C_p — скорость распространения импульса (упругой волны) вдоль трубы (рисунок 7).

В процессе движения выделенного элементарного импульса вдоль трубы в зоне его действия изменение массовой скорости трубы описывается уравнением (11)

$$dv = a dt, \quad (11)$$

где a — ускорение, вызываемое трением боковой поверхности трубы о массив. Ускорение может быть найдено из второго закона Ньютона (12), выписанного для элементарного кольца трубы с массой Δm :

$$F_{mp} = \Delta m \cdot a, \quad (12)$$

где $\Delta m = S_1 \cdot \Delta x \cdot \rho$; $F_{mp} = \pi D_1 \cdot \Delta x \cdot P_{бок} \cdot \mu$ — сила бокового трения;
 $P_{бок} = \rho_2 \cdot g \cdot x \cdot k_{бок}$ — боковое давление массива на глубине x ; $k_{бок}$ — коэффициент бокового давления массива.

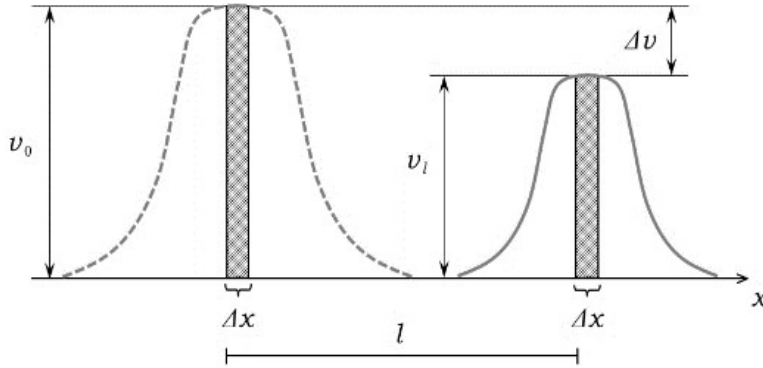


Рисунок 7 — Распространении упругой волны по трубе, взаимодействующей с массивом по закону сухого трения

Тогда, интегрируя уравнение (11) по времени от $t=0$ до $t = t_l = l/C_p$, с учетом (10) получаем (13)

$$v_0 - v_l = \int_0^{t_l} a dt = k_v \cdot l^2, \quad (13)$$

где k_v — коэффициент затухания, определяется по формуле (124)

$$k_v = \frac{1}{2} \frac{\pi D}{S} k_{mp} \cdot k_{бок} \cdot \frac{\rho_{zp} \cdot g}{\rho \cdot C_p}. \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) позволяют записать закон затухания амплитуды массовых скоростей импульса (15) произвольной конфигурации, распространяющегося вдоль упругого стержня (трубы) с условием внешнего трения, вплоть до прекращения проскальзывания отдельных участков стержня относительно массива:

$$\Delta v = k_v \cdot l^2, \quad (15)$$

где l — длина пробега импульса (упругой волны) вдоль вертикально забиваемой в массив металлической трубы.

Установлен закон затухания ударного импульса, распространяющегося по вертикально забиваемой в массив металлической трубе, при условии сухого трения по ее боковой поверхности. Затухание амплитуды ударного импульса происходит пропорционально квадрату расстояния, пройденного упругой волной. При этом коэффициент затухания прямо пропорционален коэффициенту трения трубы о массив и обратно пропорционален площади сечения трубы.

Представленная математическая модель реализована в формате программы *Pipe-vert*, которая позволяет определить минимальную необходимую энергию удара для погружения металлической обсадной трубы на заданную глубину в массив осадочных горных пород. Данная программа учитывает параметры погружаемой трубы, промежуточного элемента, корпуса пневмомолота и его ударника, предударную скорость, а также свойства грунта, такие как приведенный модуль сдвига, коэффициенты бокового распора и трения. Кроме того, в этой программе можно задавать осевое статическое усилие на забой и силу лобового сопротивления. Возможности программы *Pipe-vert* проиллюстрированы зависимостями уходки за один удар на глубинах 15, 40 и 65 м для труб различного диаметра при заданных энергиях удара (рисунок 8).

Представленные диаграммы позволяют оценить, какая энергия удара будет достаточной, чтобы погрузить обсадной кондуктор на заданную глубину в массив осадочных горных пород. При этом на более ранних стадиях погружения перемещения будут значительно выше.

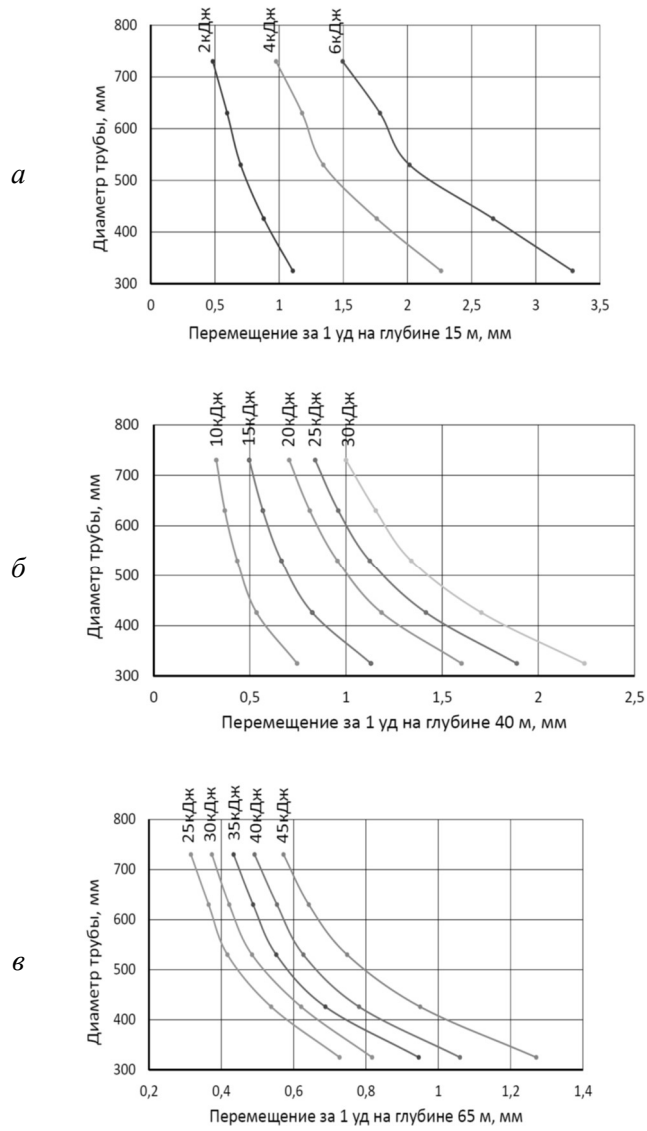


Рисунок 8 — Результаты расчетов в программе *Pipe-vert* для глубин 15 м (а), 40 м (б) и 65 м (в)

4. Расход сжатого воздуха для реализации выноса породного поршня при заданной скорости его движения не зависит от глубины погружения и определяется соотношением поперечного сечения обсадной трубы к пропускной способности канала для подачи сжатого воздуха.

Важное значение в реализации предложенной технологии имеет выбор источника сжатого воздуха с соответствующим давлением и расходом. При отсутствии ограничений на эти параметры жизнеспособность пневмоэкскавации разрушенной породы из погружаемой трубы сомнений не вызывает. Однако реальная ограниченность технических возможностей средств пневмоснабжения требует определения пределов применения этой технологии и уровня ее эффективности в этих пределах.

Наиболее экономичным видом пневмотранспортирования породы в трубе является перемещение ее в виде поршня. Выдувание породы в виде группы разобренных кусков, комков и осколков существенно более энергозатратно, требует большего расхода сжатого воздуха.

Основные потери при поршневом транспортировании обусловлены протечкой сжатого воздуха через воздушные каналы, образованные порами в породе, а также через пристеночный зазор между поршнем и трубой. Учет этих потерь составляет главную трудность при построении расчетной модели процесса транспортирования породного поршня. Для обеспечения приемлемой практической значимости результатов каких-либо расчетов этого процесса необходимо иметь достоверное значение пропускной способности породной порции по меньшей мере хотя бы для одного реального образца породы. С этой целью была создана экспериментальная установка, представленная на рисунке 9а и 9б.

Установка представляет собой закрепленную на основании прозрачную трубу из оргстекла, с одного торца которой подается сжатый воздух. На другом торце установлена легко проницаемая для воздуха заглушка, ограничивающая перемещение испытуемого грунтового цилиндра. По длине трубы размещены 4 датчика, позволяющие измерять давление в 4-х сечениях грунтового цилиндра, разнесенных по ходу потока. Грунтовый цилиндр сформирован из уплотненной до плотности

1957 кг/м³ супеси с пористостью 45%. Сжатый воздух подавался из ресивера ступенями через редуктор давления, которое снималось с 4-х датчиков *HBM P8AP 10 bar* и регистрировалось через АЦП с помощью программы *ZetLab*.

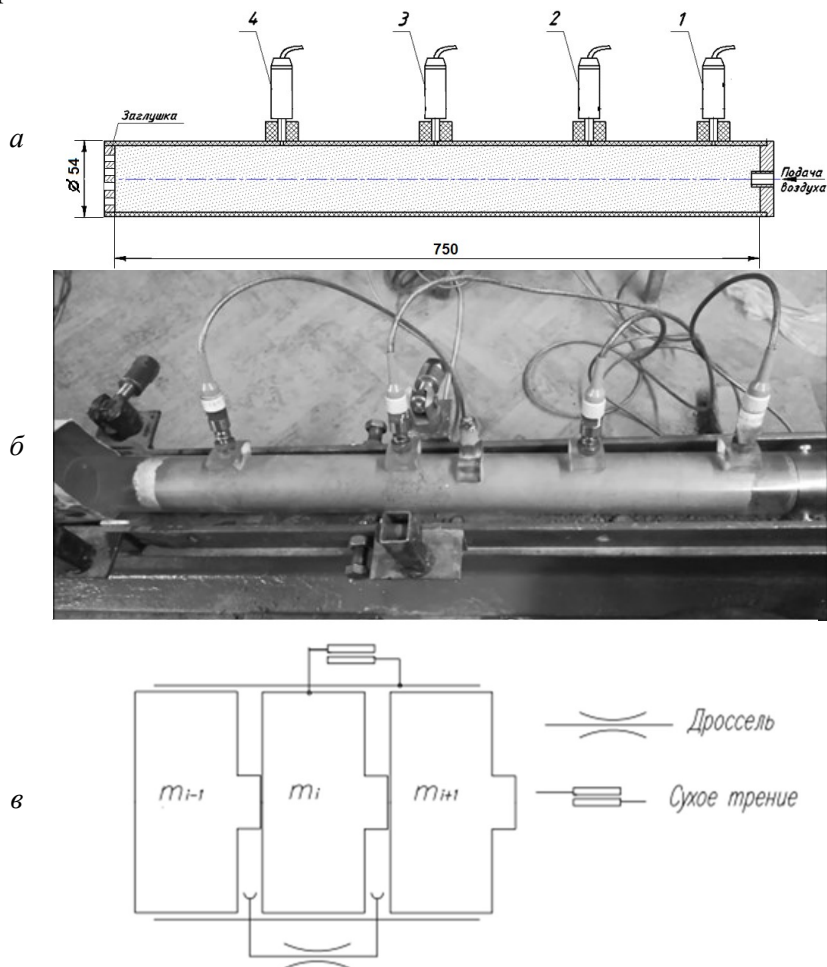


Рисунок 9 – Экспериментальная установка: а – схема; б – фото; в – диаграмма; г – расчетная схема; 1...4 – датчики давления

Результаты, полученные на экспериментальной, использованы для количественной оценки пропускной способности находящегося в

трубе породного цилиндра. Применительно к этой программе грунт в трубе рассматривается как прямолинейная последовательность коротких сомкнутых поршней, взаимодействующих между собой и с трубой (рисунок 9 в).

Фильтрация газа через каждый поршень имитируется течением через дроссельное отверстие в поршне. В сомкнутом состоянии, т.е. при наличии механического контакта между соседними поршнями, объем порового газа в каждом поршне представляется в виде проточного объема между соседними поршнями. Сила трения между поршнем и трубой соответствует типу «сухое трение». Такая схематизация позволяет продуваемую пористую среду каждого участка грунтового цилиндра заменить эквивалентным дросселем с пропускной способностью, соответствующей пропускной способности пористого участка. Это, в свою очередь, открывает возможность использовать для дальнейших расчетов уравнения термодинамики переменного количества газа и расчетные схемы исследования производственных пневматических устройств, а также применять специализированные программные продукты, такие как ITI Simulation X (*Sim. X*), для численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику пневматических устройств.

Пневматическая система, имитирующая продуваемую пористую среду, легко представляется набором проточных камер, связанных между собой каналами. Камеры могут иметь постоянный объем. Основными параметрами термодинамических процессов являются давление P и температура T газа. Схема на рисунке 10 представляет базовый элемент пневматической системы. Здесь P , T и V – соответственно, давление, температура и объем проточной камеры; f_1 и f_2 – эффективная площадь впускного и выпускного отверстий; $P_1 T_1$ и $P_2 T_2$ – параметры сжатого воздуха, соответственно, на входе и на выходе.



Рисунок 10 – Базовый элемент пневматической системы

Процессы изменения состояния воздуха в полости постоянного объема ($V=const$) определяются балансом прихода и расхода энергии. Уравнения первого закона термодинамики для переменного количества

рабочего тела (16) при условии стационарности течения и малостью теплообмена с окружающей средой:

$$kRT_1 G_1 dt = V dp, \quad (16)$$

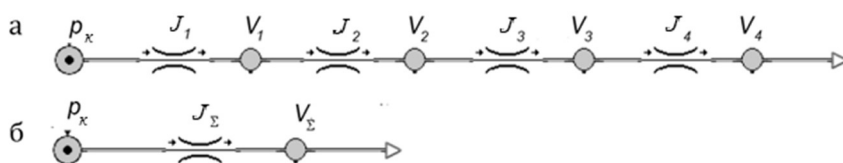
где k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная; G_1 – массовый расход воздуха, поступающего в полость.

Весовой расход на входе в полость (17) определяется по функции Сен-Венана:

$$G_1 = f_1 \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{p^{2/k}}{p_1} - \frac{p^{k+1}}{p_1} \right)}, \quad (17)$$

где γ – удельный вес воздуха.

Расчетная схема стандовой продувки грунта представлена на рисунке 11.



p – давление от компрессора; $J_1 \dots J_4$ – пропускная способность участков порции; $V_1 \dots V_4$ – объем пор участков порции; $J_Σ$ – эквивалентная пропускная способность; $V_Σ$ – суммарный объем пор

Рисунок 11 – Расчетная схема стандовой продувки грунтового цилиндра: а – реальная; б – с эквивалентным дросселем

Каждому отрезку грунтового цилиндра между датчиками давления (рисунок 11) на расчетной схеме соответствует свой объем V_i и дроссель с пропускной способностью J_i . Пропускная способность (18) – функция, связывающая расход и давление:

$$J_i = \frac{G_i}{\gamma dp}, \quad (18)$$

В расчетной программе *Sim. X*, базирующей на уравнениях термодинамики, варьируя значением пропускной способности достигнуто соответствие расчетных давлений давлениям на реальной осциллограмме, а также получен расход сжатого воздуха, проходящий через весь

грунтовой цилиндр (рисунок 11б). В свою очередь, это позволило определить проходное сечение дросселя f , эквивалентного по пропускной способности системе пор грунтового цилиндра.

Для представленного в качестве примера образца из супеси пропускная способность грунтового цилиндра длиной 750 мм и диаметром 54 мм составила 1,32 л/(бар·с), что соответствует диаметру 4,1 мм. Указанное значение можно привести по соотношению площадей и получить пропускную способность породного поршня для других размеров погружаемых труб, учитывая длину транспортируемой порции. Зная пропускную способность грунтового цилиндра, можно приступить к моделированию поршневого транспортирования.

На рисунке 12 представлена схема удаления порции из забиваемой трубы и соответствующая ей расчетная схема.

Здесь сжатый воздух от компрессора с заданным давлением p_k проходит через выходной вентиль, имеющий пропускную способность J_k . Далее воздух поступает в рукав высокого давления заданной диаметром d_1 и длиной l_1 . Питающий трубопровод, закрепленный на внешней поверхности погружаемой трубы представлен в расчетной схеме трубкой с диаметром d_3 и длиной l_3 , а также двумя отводами на 90° . Из трубопровода сжатый воздух разделяется на 2 потока. Первый идет в поршневую камеру пневмоцилиндра и совершает полезную работу по перемещению породного поршня. Второй – это перетечки через кольцевой зазор между поверхностями поршня и цилиндра, а также фильтрационные каналы в породе. Эти перетечки характеризуются в расчетной модели значением пропускной способности J_p . Штоковой полости соответствует объем погружаемой трубы V_t , которая сообщена с атмосферой через разгрузочные окна, площади которых соответствует пропускная способность J_0 . Поршень, имеющий массу m , взаимодействует с цилиндром через силу трения F_{fr} . На поршень также действует сила тяжести $F=mg$.

В основе расчетных алгоритмов программы *Sim. X* лежат уравнения энергетического баланса. После некоторых преобразований на основе уравнения Менделеева - Клайперона и допущения, что процесс изотермический уравнения энергетического баланса (19) примет вид:

$$kR[T_m \cdot G_m dt - T \cdot G_a dt] = kpdV + Vdp, \quad (19)$$

где G_m, G_a – весовой расход в полости наполнения и опораживания;
 T – температура в поршневой полости; V – объем поршневой полости;
 t – время; p – давление в полости наполнения.

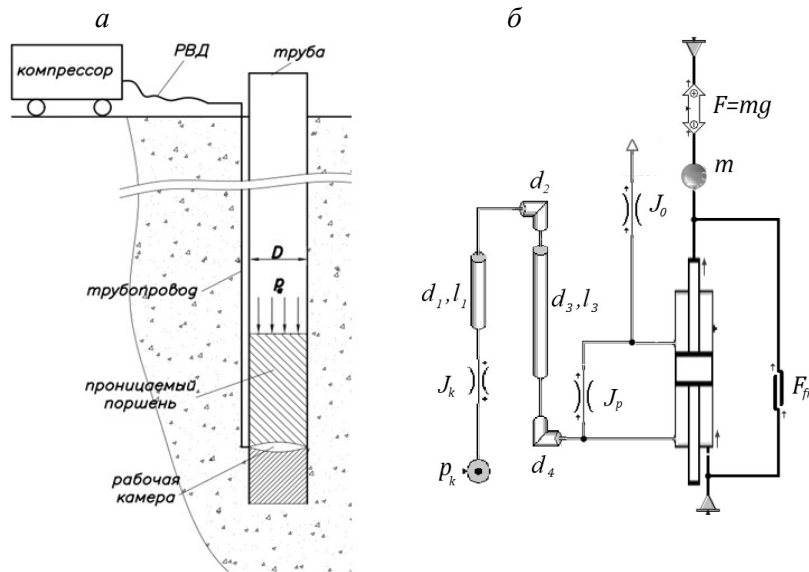


Рисунок 12 – К исследованию поршневого транспортирования:

а - схема удаления грунтовой порции; б - расчетная схема; p – источник сжатого воздуха; Q_k – пропускная способность крана компрессора; V_r – объем рукава высокого давления; d_1, l_1 – диаметр и длина рукава высокого давления; d_2 и d_4 – диаметры отводов на 90° ; d_3, l_3 – диаметр и длина питающего трубопровода; Q_p – пропускная способность через поршень; V_t – объем погружаемой трубы; Q_0 – пропускная способность разгрузочных окон; m – масса поршня; F_{fr} – сила трения порции о трубу

Уравнение (19) характеризует процесс изменения давления воздуха в данной системе. В этом уравнении имеются три неизвестные переменные величины (кроме времени): давление, температура и переменный объем полости. Чтобы найти эти величины как функцию времени, используем уравнение движения поршня (21) и уравнение состояния воздуха (20) в дифференциальной форме:

$$RT(G_m - G_a)dt + \frac{pV}{T}dT = pdV + Vdp, \quad (20)$$

Уравнение движения поршня имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = (p - p_a) \frac{\pi D^2}{4} - mg - F_{fr}, \quad (21)$$

где m – масса поршня; x – перемещение поршня; p_a – давление в полости опораживания, равное атмосферному; D – внутренний диаметр погружаемой трубы; F_{fr} – сила трения поршня о внутреннюю поверхность трубы.

Весовой расход на входе в поршневую полость (22):

$$G_m = f_m \cdot p_m \sqrt{\frac{2gk}{RT_m(k-1)}} \varphi(y), \quad (22)$$

где f_m – эффективная площадь проходного сечения питающей магистрали; p_m – давление в питающей магистрали; $\varphi(y)$ – функция расхода.

Потери напора в трубопроводах (23) определяются на основе уравнения Бернулли по формуле Дарси:

$$dh = \lambda \cdot \frac{dx}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (23)$$

где dh – потери напора на трения на длине трубопровода dx ; λ – коэффициент трения воздуха в трубе; d – диаметр трубопровода; v – средняя скорость газа в живом сечении.

Система уравнений (19) – (23), описывающих движение поршня и термодинамические процессы в полостях и трубопроводах, в конечном виде не имеют аналитического решения. В расчетной программе *Sim. X* вычисления производятся методом Рунге – Кутты. Используя вышеуказанные зависимости расчетная модель позволяет определить расход сжатого воздуха, скорость и время транспортирования порции, а также давление в поршневой камере в установившемся режиме. Для анализа полученных результатов необходимо определиться со значением скорости движения порции, поскольку именно она определяет требуемую подачу сжатого воздуха в поршневую камеру. От скорости порции в момент контакта с рассекателем зависит эффективность ее разделения и выхода через окна. С точки зрения энергоэффективности резания грунта оптимальное значение скорости составляет около 2 м/с. Большие

значения скорости транспортирования приведут к увеличению производительности данной технологической операции, но повысят энергоемкость резания порции породы. Также следует понимать, что скорости транспортирование напрямую зависит от количества сжатого воздуха, подаваемого от компрессора. Величина номинальной производительности компрессора определяет его стоимость, поэтому целесообразно ориентироваться на необходимые и достаточные значения.

В начальной стадии транспортирования поршня (рисунок 13) после отрыва он будет двигаться с интенсивным набором скорости под действием остаточного высокого давления сжатого воздуха, накопившегося в питающей магистрали.

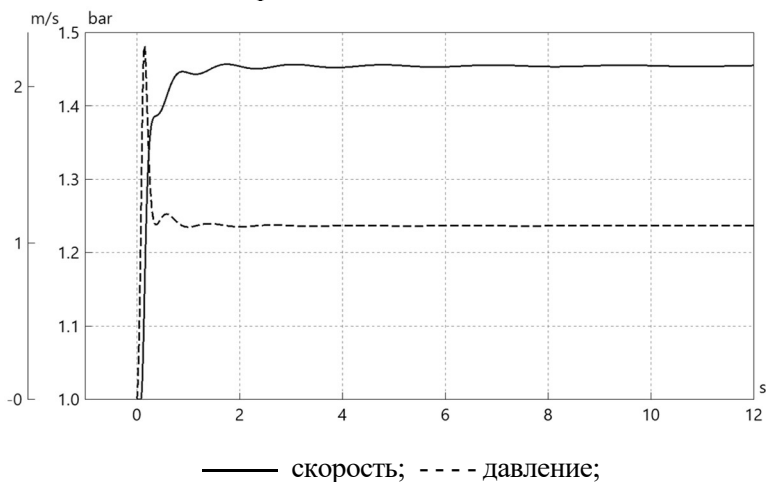


Рисунок 13 – Результаты расчета скорости транспортирования и давления сжатого воздуха

При высокой скорости и ограниченной пропускной способности питающей магистрали давление под поршнем быстро упадет. Однако, постоянная подача сжатого воздуха компенсирует этот провал скорости и давление в поршневой камере поднимется до уровня, близкого к равновесному состоянию, соответствующего установившемуся движению с постоянной скоростью. Ввиду наличия отрицательной обратной связи между давлением в поршневой камере и ее объемом, а также демпфирующего воздействия трения поршня о внутренние стенки трубы, переходный колебательный процесс затухает очень быстро и при отсутствии

внешних возмущений до конца транспортирования поршень перемещается с постоянной скоростью. Это позволяет сделать вывод, что при заданной скорости транспортирования расход сжатого воздуха не зависит от глубины погружения и определяется соотношением внутреннего сечения обсадной трубы и пропускной способностью питающей магистрали.

Для более широкого представления о потреблении сжатого воздуха при реализации технологии ударного бурения обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом разрушенной породы на рисунке 14 представлены расчетные данные для широкого диапазона диаметров обсадных труб, погружаемых на глубину 25 м. Диаметр воздухоподводящего канала - 10% от диаметра погружаемой трубы, длина отделяемой порции - $2D$, номинальное давление компрессора 0,8 МПа.

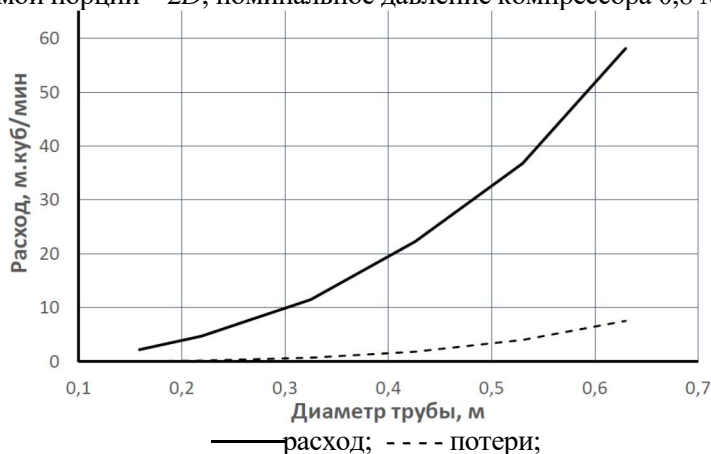


Рисунок 14 – Требуемый расход сжатого воздуха и потери через транспортируемую порцию

Результаты получены для легкой супеси, имеющей значительно большие значения фильтрационной способности в сравнении с другими типами осадочных пород. Следовательно, соблюдение приведенных соотношений по расходу воздуха при ударном бурении глин и суглинков также гарантирует стабильную реализацию выноса породного поршня из погружаемой трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основании выполненных автором исследований получены научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке технологии ударного бурения обсадными трубами с периодическим пневмотранспортом разрушенной породы на основе полученных зависимостей изменения напряженно-деформируемого состояния породы и закона затухания ударного импульса, направленные на повышение качества и снижение стоимости строительства всех видов скважин, что вносит значительный вклад в развитие страны. Наиболее важные научные и практические результаты выполненных исследований сформулированы ниже.

1. Разработана технология ударного бурения мягких пород обсадными трубами вертикальных и горизонтальных скважин с периодическим пневмотранспортом шлама. За счет совмещения операций бурения и обсаживания она гарантирует абсолютную устойчивость скважины, защиту от обрушений и вывалов.

2. Проведены лабораторные и полевые исследования особенностей взаимодействия породного массива и погружаемой в него ударами трубы, которые показали, что при прочих равных условиях:

— при погружении трубы в породный массив формирующаяся в ней порода превращается в пробку раньше в глинистом массиве, чем в супеси;

— ударное воздействие на трубу приводит к снижению до 85 % сил сопротивления сдвиганию породного поршня и до 70 % давления, необходимого для его отрыва, причем эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в массиве.

3. Расчетным путем установлено, что при вертикальном бурении затухание амплитуды ударного импульса, распространяющегося по забиваемой трубе, пропорционально квадрату расстояния, пройденного упругой волной, а коэффициент затухания прямо пропорционален коэффициенту трения трубы о грунт и обратно пропорционален площади поперечного сечения стенок трубы.

4. Разработаны и отлажены программные продукты, основанные на использовании конечно-разностного метода решения волновых уравнений, метода конечных элементов в системе ANSYS и решения основ-

ных уравнений термодинамики. При соответствующем задании параметров породного массива созданный математический инструмент позволяет расчетным путем определить:

— перемещение трубы в массиве под действием ударного импульса;

— скорость бурения с учетом периодического удаления породы из внутренней полости;

— требуемые параметры ударной машины, исходя из известных размеров трубопровода и грунтовых условий;

— периодичность очистки, при которой давление сжатого воздуха, необходимое для отрыва породной поршней, не превышает номинального давления компрессора;

— требуемые параметры компрессора для погружения обсадной трубы определенного диаметра на заданную глубину.

5. Установлена возможность периодического пневмотранспорта шлама при ударной проходке скважин в осадочных породах с прослоями алевролита.

6. На шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» внедрена технология сооружения стартовых кондукторов вертикальных дегазационных скважин. По сравнению с действующей технологией вращательного бурения шарошечным долотом, удельная себестоимость прямых затрат и стоимость необходимого оборудования снижаются более чем в 2 раза, а производительность увеличивается вдвое. Только для шахт Кемеровской области ежегодная потребность составляет около 5000 дегазационных скважин, пробуренных с поверхности.

Развитие полученных результатов заключается в поиске технических и технологических решений для адаптации предложенной технологии проходки скважин к бурению с отбором цельных грунтовых кернов и в углубленном изучении влияния волновых процессов на взаимодействие погружаемой трубы с породой внутри нее и вмещающим массивом.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Червов, В.В. Пневмомолот «Тайфун-70» и новый метод очистки трубы от грунтового керна / В. В. Червов, **А. С. Кондратенко** // Механизация строительства. — 2006. — № 8. — С. 8–12.

2. **Кондратенко, А.С.** Особенности отчистки обсадной трубы от грунтового керна / А. С. Кондратенко // ГИАБ. — 2008. — № 7. — С. 327–331.

3. **Кондратенко, А.С.** Комбинированный способ удаления керна из трубы при ее виброударном погружении / А. С. Кондратенко // Строительные и дорожные машины. — 2012. — № 7. — С. 43–45.

4. **Кондратенко, А.С.** Удаление грунтового керна из трубы с помощью комбинированного воздействия на систему «труба с керном в грунте» / А. С. Кондратенко // Механизация строительства. — 2013. — № 4 (826). — С. 3–5.

5. **Кондратенко, А.С.** Технология безопасного сооружения бестраншейных горизонтально-наклонных скважин / А. С. Кондратенко, В. В. Тимонин, А. А. Абиров, М. К. Госманов, Б. У. Есенов, Е. Б. Жаркенов // Вестник КузГТУ. — 2014. — № 1. — С. 40–45.

6. **Кондратенко, А.С.** Повышение производительности бурения дегазационных скважин с дневной поверхности / А. С. Кондратенко, И. О. Шахторин // ГИАБ. — 2018. — № S48. — С. 364–372.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования:

7. **Кондратенко, А.С.** Особенности процесса удаления грунтового керна при виброударном воздействии на трубу и статическом воздействии на керн / А. С. Кондратенко, А. М. Петреев // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 36–46. (Web of Science)

8. Данилов, Б.Б. Совершенствование технологии проходки скважин в грунте методом продавливания / Б. Б. Данилов, **А. С. Кондратенко**, Б. Н. Смоляницкий, А. С. Смоленцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — №3. — С. 57 – 64. (Scopus)

9. Александрова, Н.И. Расчет движения трубы с грунтовой пробкой при продольном импульсном воздействии / Н.И. Александрова, **А. С. Кондратенко** // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 29–42. (Scopus)
10. Исаков, А.Л. Моделирование процесса забивания металлической трубы в грунт с порционным удалением грунтового керна / А. Л. Исаков, **А. С. Кондратенко**, А. М. Петреев // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 36–45. (Scopus)
11. Мешков, А.А. Перспективы ударного погружения стальной трубы-кондуктора при бурении дегазационных скважин с поверхности / А. А. Мешков, А. П. Садов, И. Л. Харитонов, **А. С. Кондратенко**, В. Н. Карпов // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 50–55. (Scopus)
12. **Кондратенко, А.С.** Технологические аспекты проходки обсаженных скважин с циклично-поточным транспортированием керна // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 601-609. (Scopus)
13. Исаков, А.Л. О распространении ударного импульса вдоль вертикально погружаемой трубы в грунт / А. Л. Исаков, **А.С. Кондратенко** // ФТПРПИ. — 2021. — № 2. — С. 3 – 10. (Scopus)
14. **Kondratenko, A.S.** The Perspective of Batch-Wise Removal of Soil Plug from Pipes During Trenchless Installation / A. S. Kondratenko, A. S. Smolentsev, V. V. Timonin and A. Yu. Primychkin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 134. (Scopus)
15. **Kondratenko, A.S.** Influence of Energy Characteristics of Vibropercussion Source on Efficiency of Soil Plug Removal from Casing Pipes / A. S. Kondratenko, A. M. Petreev, A. Yu. Primychkin and A. S. Smolentsev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 262. (Scopus)
16. **Kondratenko, A.S.** Engineering solutions for casing drilling in pre-mine drainage / A. S. Kondratenko, I.O. Shakhtorin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 262. (Scopus)
17. **Kondratenko, A.S.** Numerical simulation of forming a soil plug during the pipe immersion to the massif / A. S. Kondratenko, A. I. Konurin,

A. P. Khmelinin, S. Y. Gavrilov and D. P. Khmelinin // International Multi-disciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. — 2019. — Vol. 19 (1.3). — P. 447 – 453. (Scopus)

18. Aleksandrova, N.I. Movement of an Open-Ended Pipe with a Soil Plug Under a Longitudinal Impact / N. I. Aleksandrova, **A. S. Kondratenko** // Geotechnical and Geological Engineering. – 2020. – Vol. 38 (4) – P. 3493 – 3504. (Scopus)

19. Perepechko, Y.V. Parallel technologies in unsteady problems of soil dynamics / Y.V. Perepechko, S. E. Kireev, K. E. Sorokin, **A. S. Kondratenko** and S. K. Imomnazarov // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1263. – P. 237 – 250. (Scopus)

Публикации в прочих изданиях:

20. **Кондратенко, А.С.** Исследование на физической модели процесса удаления грунтового керна из трубы комбинированным способом / А. С. Кондратенко // Горняцкая смена. Сб. трудов молодых ученых. — Новосибирск : ИГД СО РАН, 2008. — Т. 1. — С. 140–144.

21. **Кондратенко, А.С.** Влияние влажности грунта на силу трения при его движении по трубопроводу / А. С. Кондратенко // Материалы 65-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ». — Омск: СибАДИ, 2011. — С. 371 – 374.

22. Смоляницкий, Б.Н. Современные технологии сооружения протяженных скважин в грунтовых массивах и технические средства контроля их траектории / Б. Н. Смоляницкий, В. Н. Опарин, Е. В. Денисова, **А. С. Кондратенко**, И. В. Тищенко, А. С. Смоленцев, А. П. Хмелинин, А. И. Конури // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2016. — 342 с.

23. **Кондратенко, А.С.** Технология установки стартовых кондукторов / А. С. Кондратенко, В. Н. Карпов, А. И. Конури, А. П. Хмелинин // Нефть. Газ. Новации. — 2019. — № 11. — С. 33–39.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

24. Патент № 2399725 Российская Федерация, МПК E02F 5/18 (2006.01). Способ очистки трубы от грунтового керна и устройство для его осуществления: № 2009126320/03: заявлено 08.07.2009: опубликовано 20.09.2010 / Петреев А. М., **Кондратенко А. С.**; заявитель Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Сибирского отделения РАН (ИГД СО РАН). — 8 с. : ил.

25. Патент № 2516630 Российская Федерация, МПК F16L 1/028 (2006.01), E02F 5/18 (2006.01). Способ бестраншейной прокладки труб в грунте: № 2012140885/06: заявлено 24.09.2012: опубликовано 20.05.2014 / Смоляницкий Б. Н., Данилов Б. Б., **Кондратенко А.С.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – 6 с. : ил.

26. Патент № 2501913 Российская Федерация, МПК E02F 5/18 (2006.01). Способ бестраншейной прокладки труб в грунте: № 2012118529/03: заявлено 04.05.2012: опубликовано 20.12.2013 / Петреев А.М., **Кондратенко А.С.**; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – 8 с. : ил.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664376. Определение параметров ударного импульса, передаваемого металлической трубе при ее забивании в грунт с помощью пневмоударной машины (Shock Pulse): № 2018661871: заявлено 29.10.2018: опубликовано 15.11.2018 / Исаков А.Л., **Кондратенко А.С.**; заявитель ИГД СО РАН. – 88 Кб.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664377. Описание движения металлической трубы с керном при ее забивании в грунт с помощью пневмоударной машины (Pipe Ramming): № 2018661881: заявлено 29.10.2018: опубликовано 15.11.2018 / Исаков А.Л., **Кондратенко А.С.**; заявитель ИГД СО РАН. – 88 Кб.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664392. Описание волновых процессов при вертикальном забивании трубы в грунт: № 2019663021: заявлено 21.10.2019: опубликовано 06.11.2019/ Исаков А.Л., **Кондратенко А.С.**; заявитель ИГД СО РАН. – 134 Кб.